

UNIVERSIDAD DE JAÉN  
*Centro de Estudios de Postgrado*

Trabajo Fin de Máster

**Cuantificación de  
incertidumbres en la  
reconstrucción  
paleohidrológica de  
inundaciones en valles  
encajonados: aplicación  
al río Guadalquivir**

**Alumno: del Moral Erencia, José David**

Tutores: Prof. D. Patricio Bohórquez Rodríguez de  
Medina / Prof. D. Fernando García García

Dptos: Ingeniería Mecánica y Minera / Geología



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
*Centro de Estudios de Postgrado*

## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

# **Cuantificación de incertidumbres en la reconstrucción paleohidrológica de inundaciones en valles encajonados: aplicación al río Guadalquivir**

**José David del Moral Erencia**

**Tutores**

**Dr. Patricio Bohórquez Rodríguez de Medina**

**Dr. Fernando García García**



# ÍNDICE

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Summary</b>	<b>2</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>I.1. Motivación</b>	<b>4</b>
<b>I.2. Objetivos</b>	<b>4</b>
<b>I.3. Zona de estudio</b>	<b>5</b>
<i>I.3.1. Situación geográfica</i>	<b>5</b>
<i>I.3.2. Hidrografía</i>	<b>6</b>
<i>I.3.3. Clima</i>	<b>8</b>
<i>I.3.4. Geología</i>	<b>9</b>
<i>I.3.5. Usos del suelo</i>	<b>11</b>
<i>I.3.6. Procesos erosivos</i>	<b>12</b>
<i>I.3.7. Problemática de la zona de estudio</i>	<b>13</b>
<b>II. MATERIAL EMPLEADO</b>	<b>15</b>
<b>II.1. Hardware</b>	<b>16</b>
<b>II.2. Software</b>	<b>17</b>
<b>II.3. Datos empleados</b>	<b>22</b>
<b>III. METODOLOGÍA</b>	<b>27</b>
<b>III.1. Estudio previo</b>	<b>28</b>
<i>III.1.1. Búsqueda de eventos de inundación</i>	<b>28</b>

<i>III.1.2. Búsqueda de información de los eventos de inundación</i>	<b>31</b>
<i>III.1.3. Análisis de los cambios morfológicos del río Eliche</i>	<b>31</b>
<b>III.2. Reconstrucción paleohidrológica</b>	<b>33</b>
<i>III.2.1. Análisis morfológico de la zona de estudio</i>	<b>33</b>
<i>III.2.2. Búsqueda de evidencias de inundación</i>	<b>33</b>
<i>III.2.3. Medición y proceso de las evidencias de inundación</i>	<b>34</b>
<i>III.2.4. Modelización 1D</i>	<b>38</b>
<i>III.2.5. Modelización 2D</i>	<b>42</b>
<b>IV. RESULTADOS</b>	<b>49</b>
<b>IV.1. Eventos de inundación en la zona de estudio</b>	<b>50</b>
<b>IV.2. Análisis de los cambios morfológicos del río Eliche</b>	<b>61</b>
<i>IV.2.1. Sector 1</i>	<b>61</b>
<i>IV.2.2. Sector 2</i>	<b>69</b>
<b>IV.3. Reconstrucción paleohidrológica</b>	<b>72</b>
<i>IV.3.1. Análisis morfológico del río Eliche</i>	<b>72</b>
<i>IV.3.2. Evidencias de inundación del río Eliche</i>	<b>76</b>
<i>IV.3.3. Modelización 1D</i>	<b>84</b>
<i>IV.3.4. Modelización 2D</i>	<b>85</b>
<b>V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b>	<b>97</b>
<b>V.I. Discusión</b>	<b>97</b>
<b>V.II. Conclusiones</b>	<b>100</b>

<b>VI. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>102</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>104</b>
<b>Anexo 1. Anexo de referencias web</b>	<b>105</b>

## Resumen

La cuenca del río Eliche, situada en el sur de la provincia de Jaén, presenta un riesgo de inundación elevado debido a la presencia de urbanizaciones ilegales en su llanura de inundación desde finales del siglo XX. Los diferentes eventos de alto caudal han causado numerosos daños materiales. Estos eventos, además de correlacionarse correctamente con los producidos en el río Guadalquivir, también presentan un origen local causante de inundaciones *fast-flood* o repentinas que no suceden en el mismo, por lo que esta cuenca presenta una hidrodinámica más completa.

Mediante este trabajo se evalúan los diferentes episodios de inundación en la cuenca, los cambios que se han producido en la morfología del río Eliche y las evidencias paleohidrológicas existentes de dichos episodios en la actualidad. Con estos datos se ha realizado una reconstrucción paleohidrológica mediante el cálculo calibrado en 1D y 2D de diferentes variables fluidas del evento de mayor magnitud dentro del período instrumental. Finalmente se ha deducido que la metodología correcta para realizar un estudio hidráulico de la cuenca del río Eliche es a través de cálculos bidimensionales debido a la alta incertidumbre que incluían los modelos unidimensionales.

## Summary

The Eliche river basin, located in the south of the province of Jaen, presents a high risk of flooding due to the presence of illegal buildings in the floodplain since the late twentieth century. Different high flow events have caused significant damage in this site. These events, correlate properly with those produced in the river Guadalquivir, also have a local origin causing flash floods that do not happen in it, so this basin presents a more complete hydrodynamics.

Through this paper, the different episodes of flooding in the basin and the changes that have occurred in the morphology of the Eliche River have been analysed. The existing paleohydrological evidences of such episodes have been evaluated also. With these data a paleohydrological reconstruction was performed by calibrating both 1D and 2D models for different fluid variables in the largest event of flood. Finally, it has been inferred that the correct methodology for a hydraulic study of the Eliche river is through two-dimensional calculations due to the high uncertainty that included one-dimensional models.

# I. INTRODUCCIÓN

## Índice

### II.1. Motivación

### II.2. Objetivos del estudio

### II.3. Zona de estudio

## Resumen

En este capítulo se indica la justificación de por qué se ha elegido la cuenca del río Eliche como zona de estudio y los objetivos que se plantean conseguir con el desarrollo de este trabajo fin de máster. A continuación se indica donde se ubica geográficamente esta zona de estudio, la hidrografía, clima, geología y los usos del suelo que presenta la cuenca del río Eliche. El presente capítulo finaliza comentado la problemática que presenta dicha cuenca en relación a los procesos erosivos tan intensos que tienen lugar y el riesgo de inundaciones por la presencia de edificaciones irregulares sobre la llanura de inundación.

# I. INTRODUCCIÓN

## I.1. Motivación

La elección de la temática y del área de estudio en el presente trabajo fin de máster ha estado influenciada por el interés que suscita la problemática que presenta la cuenca de drenaje del río Eliche debido a las inundaciones reiteradas, que causan daños importantes sobre las infraestructuras urbanas y civiles. La existencia de este riesgo geológico en un curso fluvial de importancia menor situado cerca de la ciudad donde resido llevó a plantearme una serie de incógnitas del pasado relacionadas con el mecanismo de formación, el desarrollo y la casuística que lleva a producir daños en una zona extensa.

La realización de este trabajo fin de máster sobre esta localización permite estudiar dicha problemática y resolver las inquietudes existentes en esta temática aplicando los conocimientos adquiridos durante la realización del máster de Análisis, Gestión y Restauración del Medio Físico.

## I.2. Objetivos del estudio

Los objetivos de este trabajo fin de máster son variados. Se exponen a continuación.

- Recopilación de los eventos de inundación en la cuenca de drenaje del río Eliche desde el inicio del período instrumental hasta la actualidad.
- Análisis y cuantificación de los cambios morfológicos existentes en una zona del río Eliche, causados por los diferentes eventos de alto caudal.
- Reconstrucción paleohidrológica de un evento de crecida importante mediante el uso de técnicas de modelización 1D y 2D, en base a la existencia *in-situ* de marcas dendrológicas, estructurales, geológicas o



Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir y se considera de entidad menor dentro de su red de drenaje. El río Eliche se ubica dentro de la Sierra Sur de Jaén perteneciente a la Cordillera Bética.

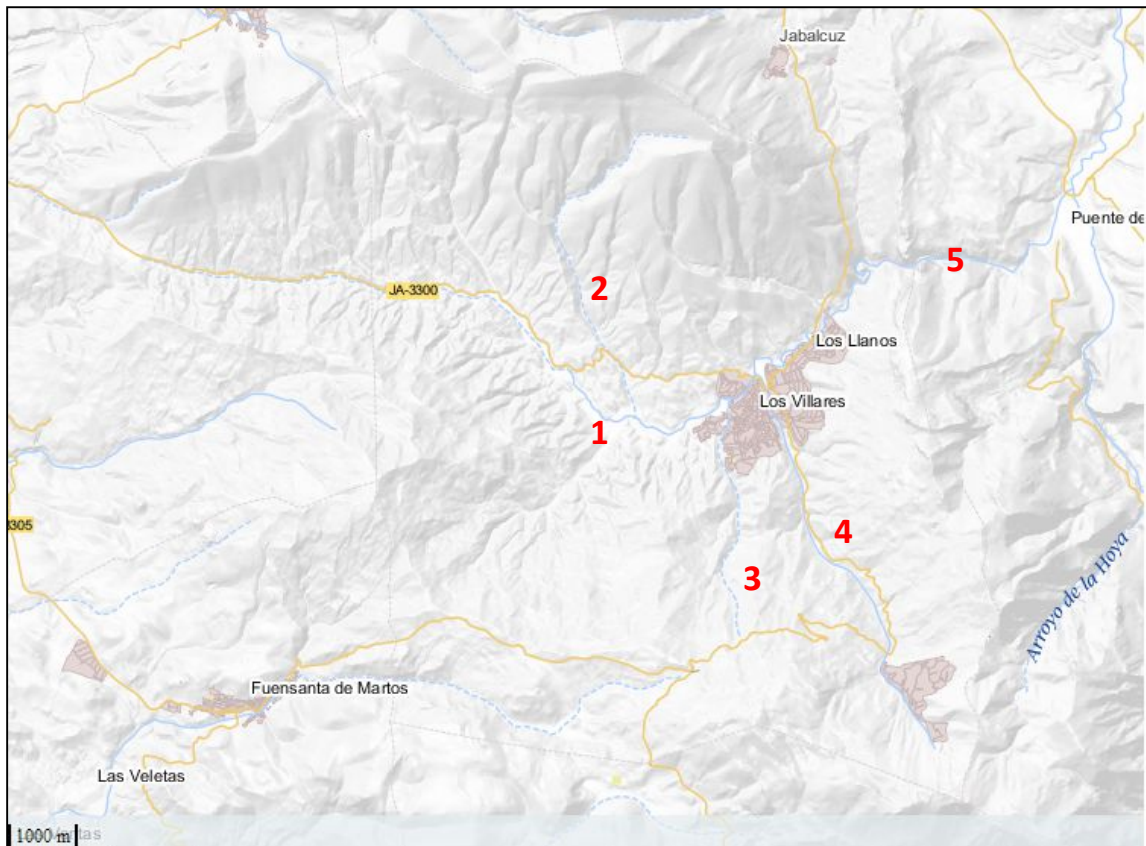
### **I.3.2. Hidrografía**

El río Eliche (**punto 1 en la figura 2**) nace en el paraje Ahoga Lobos, situado dentro del término municipal de Martos, al oeste de la localidad de Los Villares (Jaén). Durante su curso alto recibe aportaciones de agua y sedimento desde diferentes arroyos y barrancos que se sitúan en sus márgenes izquierda y derecha. Los que alimentan por su izquierda provienen de la Sierra de Jabalcuz y de la Grana, y los de la derecha de la Sierra de la Pandera. Algunos de estos arroyos son: Arroyo de Bonilla y Arroyo de Pedregoso (**puntos 2 y 3 en la figura 2**, respectivamente).

Estos cursos fluviales presentan un carácter irregular típico de los cursos de montaña con régimen de caudal estacional y no continuo. En situaciones de lluvias repentinas (denominadas en inglés *fast flood*) o continuadas (bien correlacionadas con inundaciones regionales de mayor escala espacial) ejercen su importancia en el caudal del río Eliche al recoger la escorrentía de estas dos sierras.

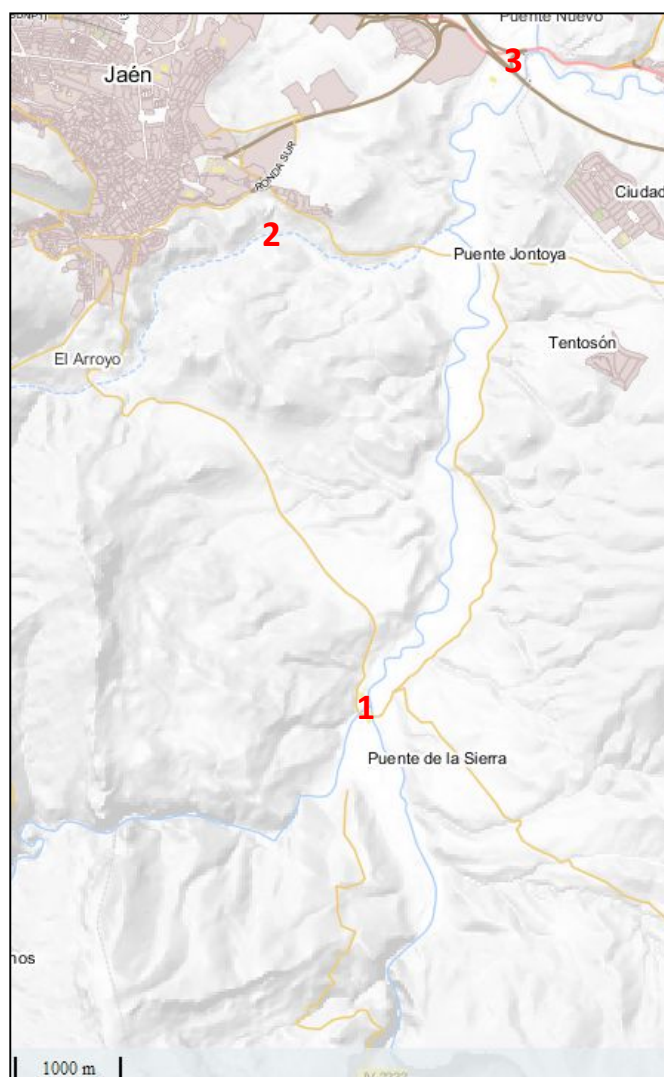
A la altura de la localidad de Los Villares (Jaén) el río Eliche recibe el primer aporte importante a través del Río Frío (**punto 4 en la figura 2**). Dicho curso fluvial nace en la Sierra de la Pandera a través del manantial Ojo del Moral. La aportación de este curso fluvial es fundamental en el mantenimiento del caudal del río Eliche durante el estío, encontrándose seco muchos años hasta este punto de aportación. En régimen de crecida, este tributario aporta un gran caudal al río Eliche, por lo que es determinante de su respuesta fluvial. El río Eliche sigue su camino aguas abajo donde se encuentra con una zona de estrechamiento conocida como Los Cañones, entre los términos municipales de Los Villares y Jaén (**punto 5 en la figura 2**). En este sector el río Eliche disminuye su anchura debido a la presencia de materiales calizos de gran potencia. A lo largo de este tramo la presencia de barrancos y de la surgencia

del Mingo favorecen aportes esporádicos durante los eventos de inundaciones extremas.



**Figura 2.** Tramo alto de la cuenca de drenaje del río Eliche. Se enumera: 1. Río Eliche, 2. Arroyo de Bonilla, 3. Arroyo de Pedregoso, 4. Río Frío, 5. Cañones del río Eliche.

Una vez que llega al Puente de la Sierra, zona residencial de Jaén capital, el río Eliche se encuentra con el río Quiebrajano. A partir de esta unión, el curso fluvial resultante de la aportación conjunta del río Eliche y del río Quiebrajano se conoce como río Jaén (**punto 1 en la figura 3**). La aportación del río Quiebrajano durante eventos de alta precipitación se encuentra suavizada debido a la regulación que ejerce el Embalse del Quiebrajano. El caudal del Quiebrajano presenta valores más continuos a lo largo del tiempo por lo que ejerce un papel secundario durante las crecidas del río Jaén.



**Figura 3.** Tramo bajo de la cuenca de drenaje del río Eliche. Se enumera: 1. Unión del río Eliche y río Queibrajano, 2. Arroyo de Reguchillo, 3. Desembocadura del río Eliche.

El río Jaén continúa su camino hasta la zona residencial del Puente Nuevo (Jaén) donde desemboca en el río Guadalbullón (**punto 3 en la figura 3**). Este tramo es el de menor pendiente del río y recibe aportación de arroyos menores como el arroyo de Reguchillo (**punto 2 en la figura 3**).

Considerando el río Eliche y el río Jaén como una única entidad, su longitud es de 28,95 Kms con un desnivel de 540 m. Su cuenca de drenaje se extiende a lo largo de 182 km<sup>2</sup> con un perímetro de 72 Kms (Sánchez Arroyo et al., 2012).

### I.3.3. Clima

La zona de estudio posee un clima mediterráneo continental, con veranos cálidos e inviernos fríos, agudizados por su condición de zona de montaña. En la cuenca de drenaje del río Eliche existe una gran complejidad termométrica debido al gran desnivel que presenta, con altitudes entre 1800 y 400 metros sobre el nivel del mar (msnm). Las heladas son frecuentes en el período invernal y las nevadas son comunes en las zonas altas que se encuentran dentro de la cuenca de drenaje.

La pluviometría de la zona de estudio es alta respecto al clima mediterráneo, con una media anual de 715,2 mm en la localidad de Los Villares (**tabla 1**) que está situada a 630 msnm. Es conocida la dependencia de la precipitación con la altitud, por lo que este valor de precipitación media en las zonas altas de la cuenca debe ser superior al de la localidad de Los Villares. Los valores máximos de precipitación mensuales se sitúan en la estación invernal y otoñal, siendo diciembre el mes con más precipitación media (aproximadamente 96,6 mm). Estas precipitaciones se corresponden con la entrada de vientos ábregos asociados con borrascas atlánticas. En contrapartida, el período estival es el momento del año donde menor precipitación media se registra, siendo el mes de julio el menos lluvioso del año con 5,6 mm.

La presencia de un estío pronunciado no es incompatible con la presencia de lluvias fuertes asociadas a períodos tormentosos entre junio y agosto. Por ejemplo, el mes de agosto de 1996 registró 113 mm de lluvia, recogidos íntegramente en un único día.

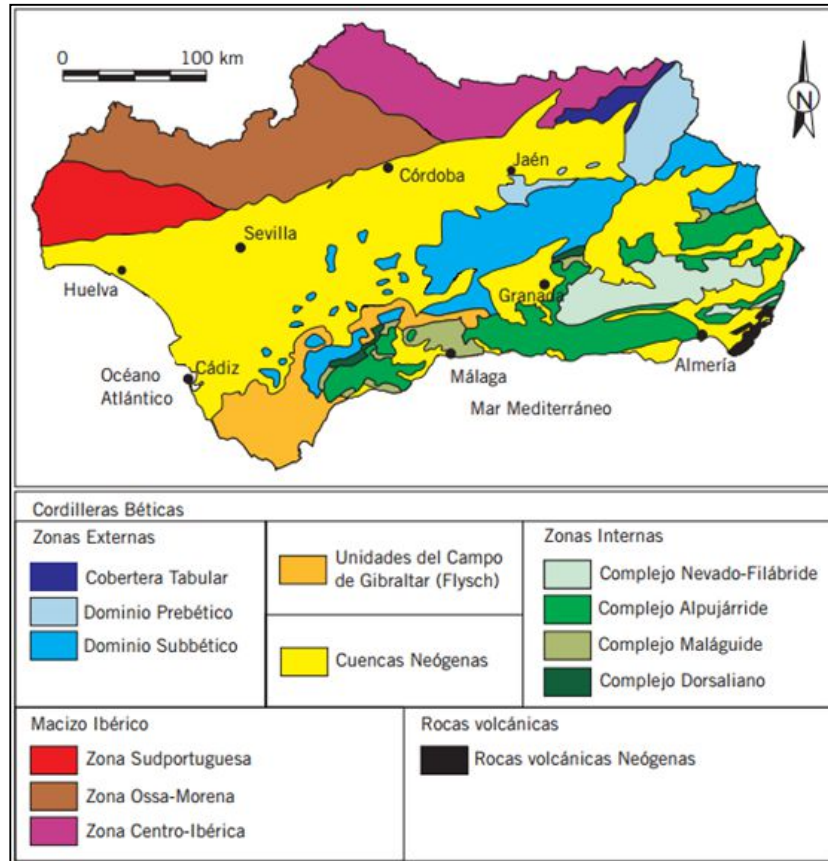
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
87,5	95,9	79,1	73,5	58,7	21,5	5,6	8,6	35,1	65,9	87,3	96,6	715,2

**Tabla 1.** Valores de precipitación media de la estación pluviométrica de Los Villares (período 1951-2015) medida en mm.

#### **I.3.4. Geología**

La zona de estudio se encuentra enmarcada en la unidad geológica de las Cordilleras Béticas (**figura 4**), formando parte del Dominio Prebético, de edad

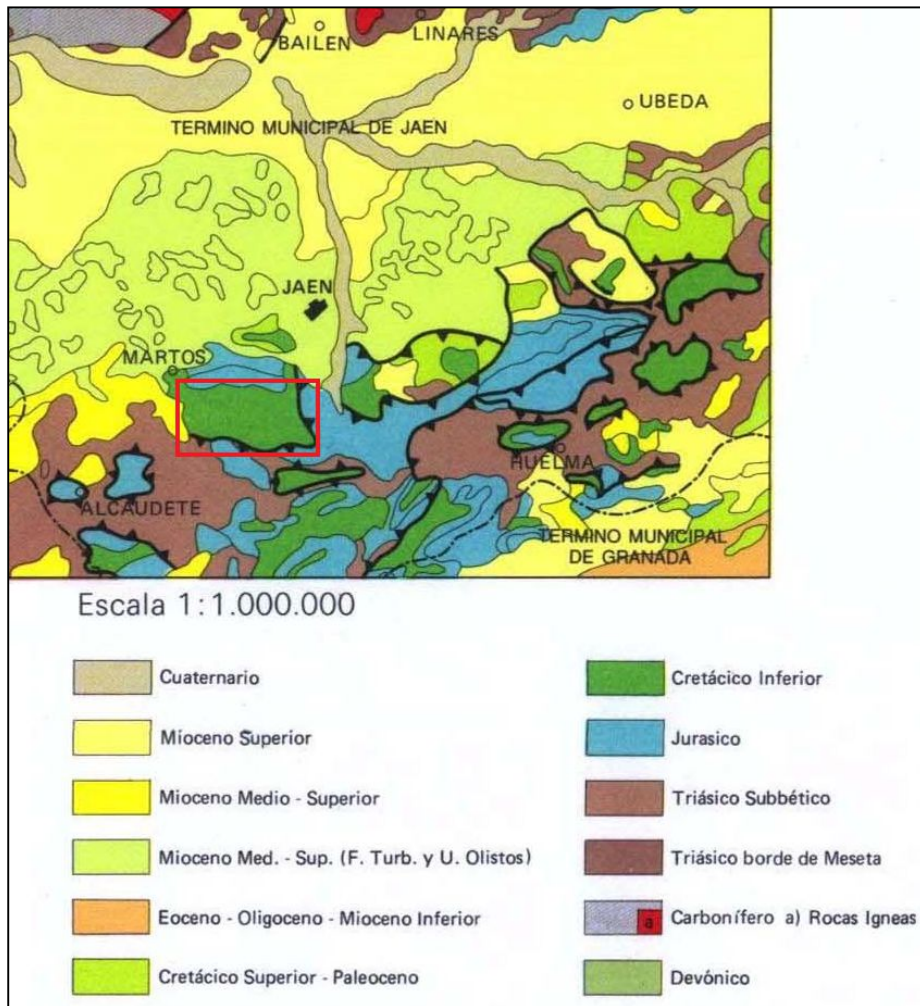
Jurásica, que incluye parte de la sierra de la Pandera, sierra de la Grana y sierra de Jabalcuz. Las rocas características de este dominio son rocas carbonatadas como la caliza o la dolomía.



**Figura 4.** Mapa de dominios geológicos de Andalucía. Fuente [2](#).

El río Eliche se asienta sobre una pequeña cuenca sedimentaria entre las sierras del dominio prebético que lo rodean. Data de edad Cretácica y está formada por rocas sedimentarias como margas, margocalizas (**figura 5**).

En la zona próxima al río Eliche existe un dominio de material aluvial de edad Neógena formada por los sedimentos que ha depositado el río Eliche hasta la actualidad y forman la terraza fluvial de dicho río.



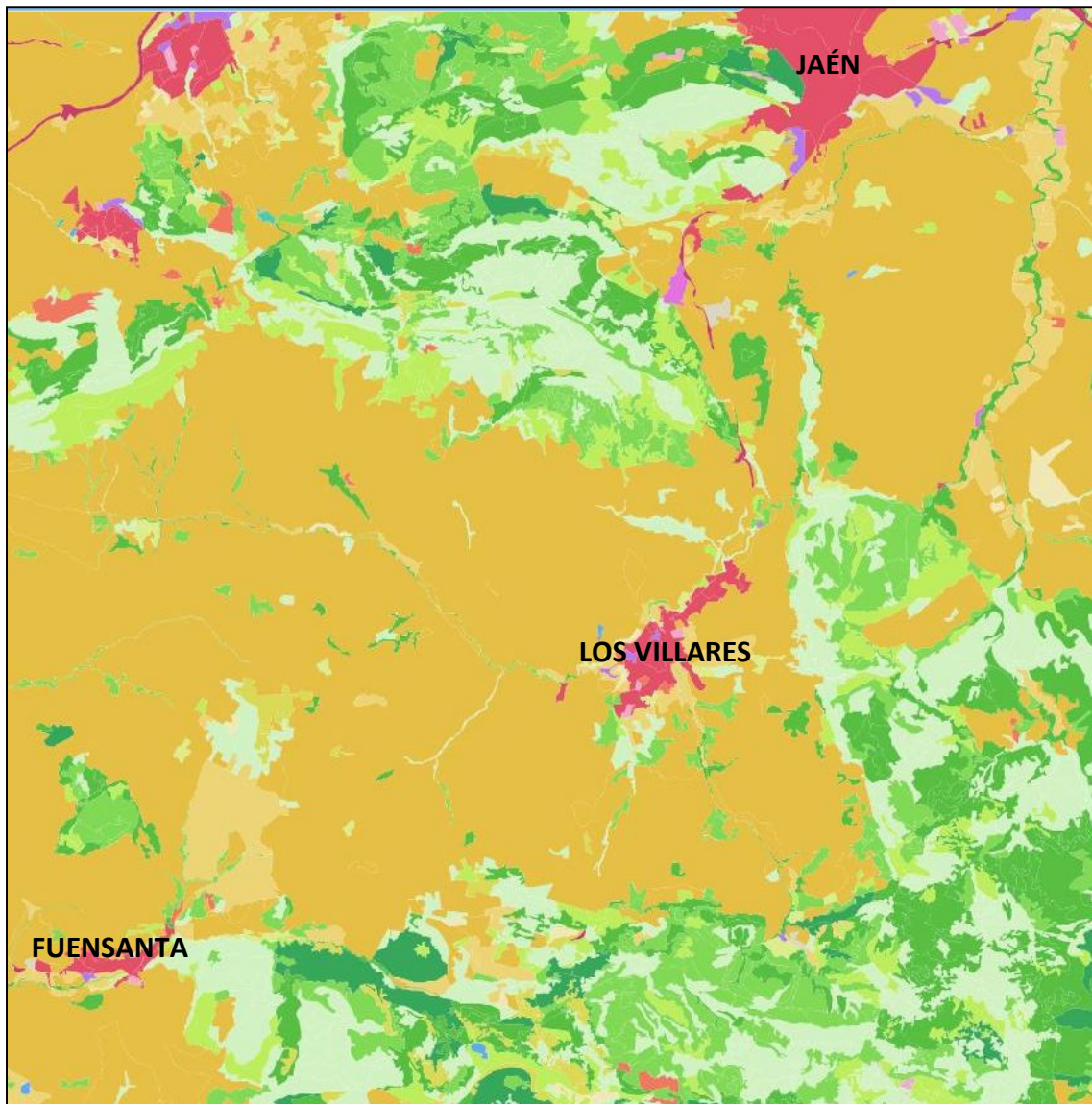
**Figura 5.** Esquema geológico de la zona circundante a la de estudio. Se señala la zona de estudio. Fuente [3](#).

### I.3.5. Usos del suelo

En las zonas medias y bajas del área de estudio predomina un uso del suelo agrícola. Este uso está dedicado en la mayor parte al cultivo de olivar (*Olea Europeae*), ya sea de secano o regadío. En la terraza fluvial del río Eliche existe también cultivo de cereal, limitándose únicamente a esta zona.

El uso forestal está presente en las zonas altas, medias y con pendiente pronunciada. La vegetación presente de este uso es la característica del bosque mediterráneo esclerófilo. Consta en su mayor parte de coníferas, concretamente pino Carrasco (*Pinus Halepensis*) y especies del género

Quercus tales como la Encina (*Quercus ilex*) o el Quejigo (*Quercus faginea*). Existen manchas de uso forestal entre el uso agrícola.



**Figura 6.** Usos del suelo en la zona de estudio. En magenta: uso urbano, en naranja: uso agrícola (olivar), en tonalidad verde: uso forestal, en beige: uso agrícola (cereal). Se añade la toponimia para facilidad la referencia. Fuente [4](#).

El uso urbano presente en la cuenca se limita a la localidad de Los Villares y a la presencia de urbanizaciones.

### **I.3.6. Procesos erosivos**

La erosión del suelo es un factor muy importante que afecta a la cuenca del río Eliche. El término municipal de Los Villares, que representa más de la mitad de la superficie de la cuenca, está definido como el que más pérdida de suelo tiene anualmente de la provincia de Jaén por procesos de erosión laminar y en surcos con 92,09 ta ha/año según el Inventario Nacional de Erosión de los Suelos, publicado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Este hecho está causado por su alta superficie agrícola de cultivo de olivar tradicional que no respeta las cubiertas vegetales y aumenta la escorrentía, así como el proceso de erosión hídrica.

El efecto de la erosión hídrica debido a la inexistencia de cubiertas vegetales en el cultivo del olivar se ve potenciado por la alta pendiente media que existe en la cuenca, siendo de 40,61% (Sánchez Arroyo et al, 2012). La conjugación de estos dos factores provoca numerosos procesos erosivos a lo largo de la cuenca, palpables mediante la presencia de surcos y cárcavas en las laderas, incluso deslizamientos.

### **I.3.7. Problemática de la zona de estudio**

Varias zonas de la cuenca de drenaje del río Eliche han sufrido los efectos de la urbanización ilegal en su llanura de inundación durante el final del siglo XX y principios del siglo XXI (**figura 7**). Ejemplos de estos núcleos poblacionales son La Vega Redonda (T.M. de Los Villares) o Puente de la Sierra (T.M. de Jaén). La presencia de estas edificaciones ha aumentado el riesgo de inundación de dicha cuenca notablemente.

Tal y como se observa en el último estudio de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG), los ríos Eliche y Jaén presentan tramos calificados como Áreas de Riesgo Potencial Significativo por Inundación (ARPSIs). En el río Eliche se incluye una zona de 2,63 Kms abarcando el paraje Vega Redonda. Para el río Jaén el tramo considerado es de 22,64 Kms y se extiende desde el Puente de la Sierra hasta la desembocadura del río Jaén. Ambas zonas están calificadas como riesgo de inundación a un período de retorno de 10 años.



**Figura 7.** Evolución de la urbanización en la llanura de inundación del Río Eliche, en el paraje Vega Redonda.

# **II. MATERIAL EMPLEADO**

## **Índice**

### **II.1. Hardware**

### **II.2. Software**

### **II.3. Datos empleados**

## **Resumen**

En el apartado material empleado se indica los equipamientos (hardware), programas (software) y material empleado (datos empleados) necesarios para poder realizar este estudio. Para el hardware se incluyen las especificaciones técnicas de cada uno. En el caso del software se comentan las características que posee y las funcionalidades que pueden llevar a cabo. Finalmente, para los datos empleados, se realiza una definición de los mismos y se explica cómo se recolecta y procesa la información que contienen.

## II. MATERIAL EMPLEADO

El material empleado para el desarrollo del presente estudio se define a continuación, y posteriormente se desarrolla el uso que ha tenido para el mismo en su apartado correspondiente:

### II.1. Hardware

- Cámara fotográfica:

Se ha utilizado la cámara fotográfica de 12 megapíxeles del dispositivo móvil Samsung Galaxy Alpha para capturar imágenes de las evidencias de inundación y de la morfología del río Eliche.

- Distanciómetro LEICA S910

El distanciómetro LEICA S910 se ha empleado para medir la altura de las evidencias de inundación, las secciones del río Eliche y para calcular su pendiente (apartado III.2.3.). Este modelo de distanciómetro de la marca LEICA es un distanciómetro portátil de tipo láser con un alcance de hasta 300 metros con gran variedad de modos de medición, como por ejemplo puntos y superficies (**figura 8**). Permite su uso como estación total libre.




**Figura 8.** Distanciómetro Leica S910. Fuente: [5](#)

El modo de medición de puntos que se ha empleado en el presente trabajo ha sido DXF. Así pues, todas las coordenadas X, Y, Z de los puntos medidos se almacenan en un único fichero en formato DXF. A posteriori, se realiza el tratamiento de los datos a través de un software apropiado (por ejemplo, un CAD, Matlab o similar).

El distanciómetro LEICA S910 incluye un trípode que actúa de sujeción a la hora de realizar la medición. Sus especificaciones técnicas se detallan en la siguiente figura (**figura 9**):

Precisión de medición tip.	± 1,0 mm	Memoria para archivos CAD	20 archivos, cada uno 30 puntos
Alcance	0,05 hasta 300m	Software gratuito para Windows	●
X-Range Power Technology	●	Aplicación gratuita	iOS/Android
Base Smart alcance de medición		Interfaz de datos*	Bluetooth* SMART, WLAN
Horizontal	360°	Mediciones por juego de pilas	hasta 4000**
Vertical	- 40° a 80°	Pilas	Recargable de ion de Litio
Distancia en m	2, 5, 10m	Tiempo de carga	4h
Tolerancia tip. de la función P2P	2, 5, 10 mm	Clase de protección	IP 54
Área de nivelación	± 5°	Dimensiones	164×61×32 mm
Puntero con zoom de 4 aumentos	●	Peso con pilas	290 g
Cámara de visión general	●		
Formatos de archivo	jpg, dxf		



Clase de láser 2  
según la norma IEC 60825-1

**Figura 9.** Especificaciones técnicas del distanciómetro LEICA S910. Fuente: [5](#)

## II.2. Software

- Matlab:

El software Matlab (versión utilizada: R2012a en el presente trabajo) ha permitido visualizar, interpretar, generar gráficas y obtener datos adicionales a partir de los datos tomados con el distanciómetro LEICA S910 (apartado III.2.3.). MATLAB (Matrix Laboratory) es un software propietario matemático desarrollado y comercializado por la empresa Mathworks que permite un entorno de desarrollo integrado mediante un lenguaje de programación creado para el uso de dicho software. Es un programa muy usado en investigación, y su uso se está incrementando durante los últimos años. El software permite realizar multitud de

funciones y operaciones matemáticas tales como la manipulación de matrices, la representación de datos (función utilizada en el presente trabajo), la creación e implementación de algoritmos matemáticos y la compatibilidad con otros programas que trabajen con un lenguaje diferente.

- ArcMap

La aplicación informática ArcMap (versión 10.3 en este caso) se ha usado en este trabajo para realizar la fotointerpretación de las imágenes de satélite utilizadas y para cuantificar los cambios morfológicos del río Eliche. ArcMap es una aplicación que forma parte de las aplicaciones consideradas como Sistemas de Información Geográfica (SIG). Dicha aplicación forma parte del paquete de software propietario ArcGIS Desktop, desarrollado y comercializado por la empresa ESRI. Es probablemente el software SIG más utilizado en el mundo. Entre sus funcionalidades genéricas se encuentran el análisis, la modificación y la creación de información geográfica mediante herramientas y módulos tales como *Spatial Analyst* o *Image Analysis* que se instalan dentro de la propia aplicación y permiten ejecutar una gran cantidad de operaciones sobre los datos geográficos.

- GlobalMapper

El software GlobalMapper se ha empleado en el presente trabajo para realizar cambios de formato de las ortofotografías y de los modelos digitales del terreno para poder ser utilizados en el software IBER. GlobalMapper es un software propietario que entra dentro de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Ha sido desarrollado y comercializado por la empresa Blue Marble Geographics. Entre sus funciones se encuentran las propias de cualquier SIG, tales como el análisis, modificación y creación de información geográfica. Aunque no posee la potencialidad de realizar tantas operaciones como el paquete ArcGIS Desktop, GlobalMapper destaca en la accesibilidad de la

información ya que permite realizar eficientemente una gran multitud de cambios de formato para poder usar cualquier información geográfica en software diferentes.

- IBER

El software IBER se ha empleado en este estudio para realizar la modelización hidráulica de eventos de inundación del río Eliche (apartado III.2.5). IBER (versión 2.3.2 en el presente estudio) es un software gratuito de modelización matemática en dos dimensiones para simular el comportamiento del flujo en lámina libre y los procesos de transporte de sedimentos en sistemas como ríos y estuarios. El desarrollo de IBER ha sido realizado por instituciones públicas tales como la Universidad de A Coruña (UDC) y la Univesidad Politècnica de Catalunya (UPC) mediante un convenio con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y la Dirección General del Agua, ambos dependientes del Gobierno de España (Bladé et al., 2012).

Los acuerdos y convenios creados para el desarrollo de este software han estado motivados para homogeneizar el procedimiento a ejecutar de los estudios hidrodinámicos y de inundaciones realizados por el Gobierno de España (detallado con la publicación "Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables") y, a la par, dar cabida al cumplimiento de diferentes normativas y directivas vigentes como son la Directiva 2000/60/CE "Directiva Marco del Agua", la orden ARM/2656/2008 "de la Instrucción de Planificación Hidrológica", con su posterior modificación ARM/1195/2011, y la Directiva 2007/60 "de evaluación y gestión de los riesgos de inundación".

En su versión actual (2.3.2) IBER permite una gran variedad de cálculos y operaciones, que se enuncian a continuación:

- Simulación del flujo de agua en lámina libre en cauce natural.

- Evaluación y estudio de zonas inundables.
- Cálculo hidráulico en zona encauzada.
- Cálculo hidráulico de redes de canal.
- Cálculo de corrientes mareales en estuario.
- Cálculo de la estabilidad de sedimentos presentes.
- Cálculo de los procesos de erosión y sedimentación en el proceso de transporte fluvial.

IBER realiza estas funciones a través de cinco módulos diferentes para la modelización matemática dependiendo el proceso que se considere. Estos módulos son: Hidrodinámica, turbulencia, transporte de sedimentos, calidad de aguas y procesos hidrológicos.

El módulo de hidrodinámica ha sido el utilizado en el presente trabajo para realizar la modelización hidráulica. Este módulo calcula y resuelve las ecuaciones de Saint Venant 2D, también conocidas como ecuaciones de aguas someras (**Ver ecuaciones 1**). Son ecuaciones promediadas en profundidad, por lo que dan una descripción en planta o dos dimensiones del campo de velocidad y calado. Estas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución medianamente uniforme de la velocidad a lo largo del eje vertical.

$$\left(\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}\right) = 0 \quad \mathbf{1)}$$

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

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

La condición de presión hidrostática se cumple, a grades rasgos, en el flujo en cursos fluviales y en estuarios (Keller, 2003; Dressler, 1978). A la par la distribución uniforme de la velocidad en profundidad también se cumple en dichos sistemas, aunque pueden existir zonas en las que esta

condición no se cumpla debido a la presencia de flujos locales tridimensionales o a cuñas salinas.

IBER presenta módulos adicionales que permiten realizar otro tipo de cálculos que están fuera del alcance de este trabajo fin de máster. Para el lector interesado se enumera la utilidad de los mismos a continuación. El módulo de turbulencia se basa en la incorporación de modelos Boussinesq para el cálculo de las tensiones tangenciales turbulentas, Estos modelos intervienen tanto en el cálculo de la hidrodinámica como en el del transporte en suspensión. El módulo de transporte de sedimentos resuelve las ecuaciones de transporte por carga de fondo y por carga en suspensión. El módulo de calidad de aguas (IberWQ) es capaz de calcular la evolución espacial y temporal de diferentes variables físicas (temperatura, salinidad...), químicas (concentración de nitratos, nitritos...) y biológicas (concentración de oxígeno disuelto, Escherichia coli...). Finalmente, el módulo de procesos hidrológicos permite realizar cálculos como la transformación lluvia-escorrentía.

- Google Earth

La aplicación informática Google Earth se ha utilizado para obtener diferentes imágenes de referencia y para ilustrar algunas de las figuras incluidas en este documento. Es un software propietario gratuito propiedad de Google, aunque en sus orígenes lo desarrollaba la empresa Keyhole Inc. Este software consta de un globo virtual con el que se puede consultar información geográfica que se representa sobre un fondo de imágenes satelitales que se van actualizando periódicamente. Es un software muy popular entre el público general. Dicha aplicación no entra en el marco de aplicaciones SIG ya que no cumple entre sus funciones las características, explicadas anteriormente, de un Sistema de Información Geográfica ya que Google Earth no permite tratar la información, sino que se enfoca únicamente a la visualización.

### II.3. Datos empleados

- Modelo digital de elevaciones (MDE)

El modelo digital de elevaciones (MDE), correspondiente a la zona de Jaén y Los Villares (hoja 947), se ha utilizado como base orográfica al realizar las simulaciones con IBER. Éste representa las tres dimensiones espaciales de la topografía de la zona de interés en la simulación numérica. Considera únicamente la cota topográfica del terreno eliminando los elementos que se elevan sobre la superficie del suelo. Este MDE se ha generado mediante ortofotogrametría a partir de los datos del vuelo fotogramétrico del año 2013 y posee una resolución espacial de 5 metros. La generación de modelos digitales del terreno mediante el uso de la ortofotogrametría es la técnica más usada en la actualidad. Se realiza mediante técnicas de correlación de imágenes digitales automáticamente. Este proceso tiene varios pasos como son la creación del TIN, el posicionamiento del primer punto del grid, cálculo del tamaño del paso de la malla en coordenadas X e Y y el cálculo de la coordenada Z para cada uno de los puntos del modelo. Estos pasos son realizados mediante un software apropiado.

Existen otras técnicas para la obtención de MDE como es el uso de la técnica LiDAR. Actualmente existe un vuelo LiDAR obtenido entre los años 2008 y 2014 que cubre el territorio español, pero en el momento de realización de este trabajo los datos de este vuelo se encuentran en proceso (Maderal et al., 2016) por lo que se ha usado únicamente para el análisis de secciones y pendientes del río Eliche. El uso del LiDAR (Light Detection and Ranging) es una técnica aerotransportada para la generación de modelos digitales del terreno se encuentra en auge en la actualidad ya que este método proporciona mayor resolución de la malla respecto a los modelos digitales obtenidos mediante fotogrametría. Esta técnica consiste en medir el desfase entre el haz láser pulsado que emite la estación LIDAR y la señal reflejada del mismo haz al impactar con un blanco de medida. Este proceso determina la distancia de ese

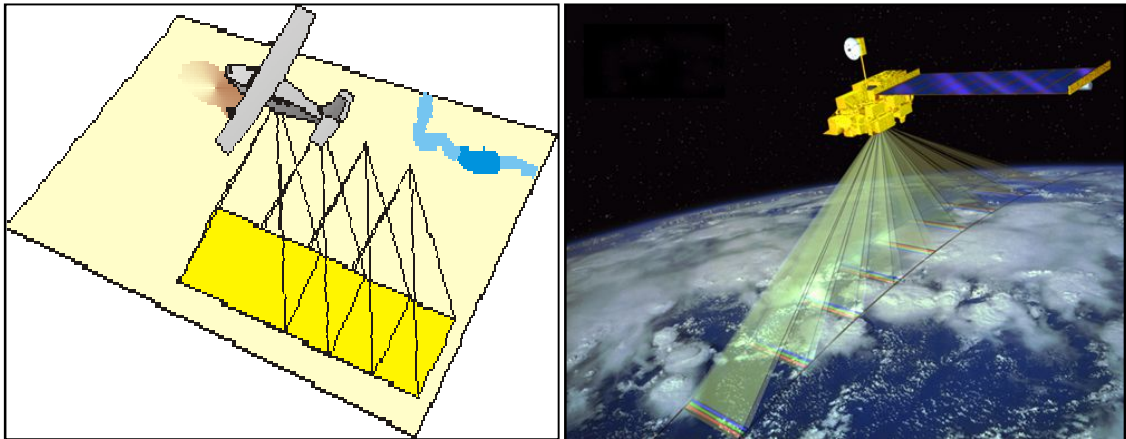
punto con la ayuda de un sistema GPS y un sensor inercial instalados en la plataforma aérea. Conocidos estos datos y la distancia, se determinan con gran precisión las coordenadas de los puntos de medida, que se representan mediante una nube de puntos. Finalmente, mediante técnicas de interpolación (por ejemplo, triangulación) se obtiene una malla y con ello el modelo digital del terreno final.

- Ortofotografías aéreas

Las ortofotografías aéreas, correspondiente a la zona de Jaén y Los Villares (hoja 947), se han empleado en este estudio para evaluar los cambios morfológicos del río Eliche y como referencia para visualizar la modelización hidráulica realizada mediante el software IBER.

Una ortofotografía aérea es una fotografía aérea una vez que ha pasado un proceso de georreferenciación y de corrección de deformaciones que se realiza normalmente mediante el uso de software y hardware específico. La ortofotografía aérea conserva toda la información original de la fotografía aérea. Dicha fotografía se puede realizar mediante dos técnicas, la fotogrametría y la teledetección. La fotogrametría obtiene la fotografía aérea mediante el uso de medios aéreos como puede ser los aviones y la teledetección captura la fotografía mediante el uso de satélites situados en la órbita terrestre (Chuvieco, 2016) (**figura 10**).

El Gobierno de España dispone del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) mediante el cual se realizan anualmente diferentes vuelos fotogramétricos de resolución 50/25 centímetros cubriendo parte de la geografía española con el fin de obtener ortofotografías del conjunto del territorio español (mas detalles en <http://pnoa.ign.es/>).



**Figura 10.** Captura de fotografías aéreas mediante fotogrametría (A) y mediante teledetección (B). Fuente [6](#).

- Datos pluviométricos

Los datos pluviométricos se han usado para caracterizar la zona de estudio y para verificar datos anómalos presentes en el registro de caudales (apartado III.1.1).

La precipitación se mide mediante pluviómetros colocados correctamente en el marco de redes de observación pluviométrica. Existen diferentes redes de observación pluviométrica, propiedad de diferentes organismos estatales como son la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) o las Confederaciones Hidrográficas. Por ejemplo, la AEMET dispone de redes automáticas y manuales de registro de datos pluviométricos en diferentes localizaciones dentro de España.

El pluviómetro utilizado por la AEMET para sus redes de observación es un pluviómetro tipo Hellmann (**figura 11**) cuyas medidas están homologadas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Actualmente muchas de estas redes de medición pluviométrica se encuentran automatizadas y sus datos se disponen en tiempo real a través de sus correspondientes portales web, como por ejemplo el

Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Cuenca del Guadalquivir (<http://www.chguadalquivir.es/saih/LluviaTiempoReal.aspx>).



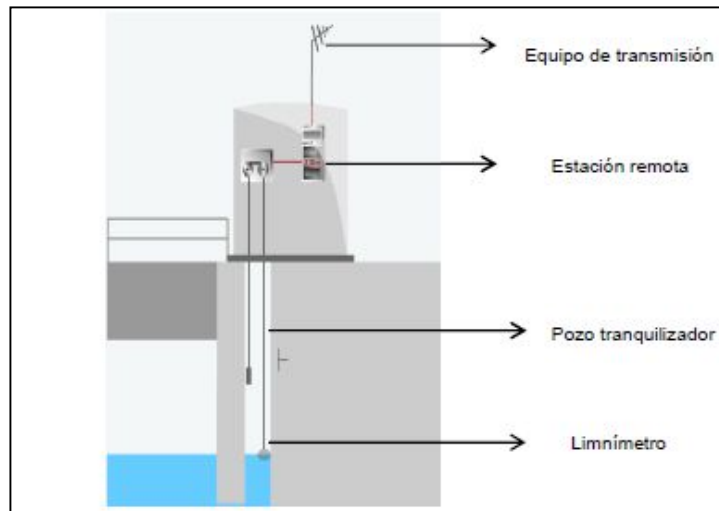
**Figura 11.** Pluviómetro Hellmann usado por AEMET para sus redes de observación.

Fuente [7](#).

- Datos de caudal y nivel de río

Los datos de caudal y nivel del río se han empleado en el presente estudio para conocer los caudales y altura de lámina de agua que se han registrado en un período de tiempo en el río Eliche o Jaén (apartado III.1.1).

Los datos de caudal en un punto de un río son tomados mediante una estación de aforo. Para ello se conoce a la perfección el área transversal que moja el curso fluvial y la velocidad media de ese curso en la sección donde se sitúa la estación. La altura de la lámina de agua, necesaria para calcular el caudal, se obtiene mediante el uso de un limnómetro (**figura 12**) previamente calibrado que detecta las variaciones del nivel de agua del río. A continuación, se incluye un esquema de una estación de aforo.



**Figura 12.** Esquema genérico de una estación de aforo (Plaza et al., 2015)

El Gobierno de España posee la red Oficial de Estaciones de Aforo, mantenida por cada confederación hidrográfica, que se encarga de medir el caudal de diferentes cursos fluviales a lo largo del territorio español. Muchas de estas estaciones se encuentran hoy en día automatizadas y se muestran sus datos en tiempo real a través de sus portales webs.

# III. METODOLOGÍA

## Índice

### III.1. Estudio previo

- III.1.1. Búsqueda de eventos de inundación
- III.1.2. Búsqueda de información de los eventos de inundación
- III.1.3. Análisis de los cambios morfológicos del Río Eliche

### III.2. Reconstrucción Paleohidrológica

- III.2.1. Análisis morfológico de la zona de estudio
- III.2.2. Búsqueda de evidencias de inundación
- III.2.3. Medición y proceso de las evidencias de inundación
- III.2.4. Modelización 1D
- III.2.5. Modelización 2D

## Resumen

El apartado metodológico indica el proceso detallado llevado a cabo con el material explicado en el capítulo anterior para obtener información relevante del mismo. En primer lugar, se explica el estudio previo realizado mediante el uso de los datos de caudales, datos meteorológicos y ortofotografías seriadas para obtener los eventos de inundación en la cuenca y los cambios morfológicos que se producen en el río Eliche. En segundo lugar, se comenta minuciosamente el proceso previo al cálculo numérico de la inundación que incluye la búsqueda de evidencias paleohidrológicas en la zona y su medición posterior con el distanciómetro. En último lugar, se detalla el proceso llevado a cabo para realizar la modelización unidimensional y bidimensional.

## **III. METODOLOGÍA**

### **III.1. Estudio previo**

En primer lugar, se realizó un estudio previo de la zona que se dividió en varias fases:

- Búsqueda de eventos de inundación.
- Búsqueda de información de eventos de inundación.
- Análisis de los cambios morfológicos del Río Eliche.

#### **III.1.1. Búsqueda de eventos de inundación**

La búsqueda de eventos de inundación que han tenido lugar en la zona de estudio durante los últimos años se exploraron a través de dos vías diferentes.

##### **a) Anuario de aforos**

La primera vía fue utilizando los datos de caudal y niveles históricos disponibles a través de la página web del Anuario de Aforos (fuente [8](#)) dependiente del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) del Gobierno de España. Dicha web aglutina en un único portal los datos históricos de caudal y niveles de agua de la red Oficial de Estaciones de Aforo que son tomados por las diferentes Confederaciones Hidrográficas, entre ellas la cuenca del Guadalquivir, a través de estaciones de aforo situadas de un gran número de ríos y arroyos. El portal permite la visualización y descarga de datos en diferentes formatos temporales: formatos anuales, mensuales y diarios. Adicionalmente se ofrecen los datos históricos de capacidad de Embalses, cuya utilidad en dicho estudio no es relevante.

Para el presente estudio se han utilizado los datos diarios y mensuales de la estación de aforo con código 5084 para la red R.O.E.A. (Red Oficial de Estaciones de Aforo) y código A28 para el S.A.I.H. Guadalquivir (Sistema

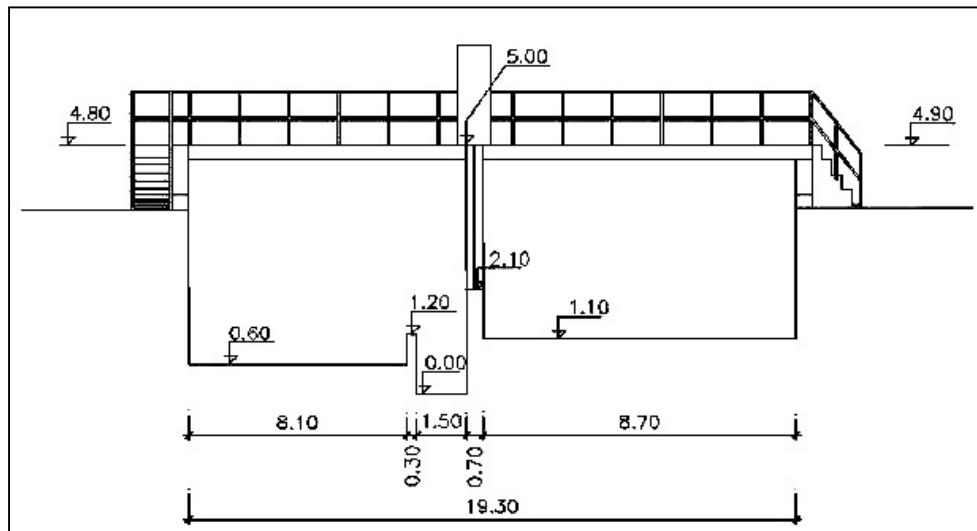
Automático de Información Hidrológica) situada en el Puente Jontoya (Jaén) sobre las aguas del río Jaén. Sus características, imagen y esquema de dicha estación de aforo se incluyen en la **tabla 2**, **figura 13** y **figura 14**.

Estación:	Puente Jontoya
Fecha de inicio de los datos:	1974
Fecha de finalización de los datos:	2012
Ubicación (Datum: ETRS89)	30 433.821 4.179.468
Provincia	Jaén
	Boya-Contrapeso y
Sensores:	Limnígrafo
Longitud (m):	21
Ancho (m):	19,3

**Tabla 2.** Características de la estación de aforos 5084 situada en el Puente Jontoya. Fuente [8](#).



**Figura 13.** Estación de aforos 5084 (Puente Jontoya) sobre el río Jaén. Fuente [8](#).



**Figura 14.** Esquema y medidas (metros) de la sección del río Jaén donde se ubica la estación de aforos 5084. Fuente [8](#).

Los datos de caudal y nivel del río Eliche posteriores a 2012 se obtuvieron en el S.A.I.H. Guadalquivir (Fuente [8](#)) ya que la estación de aforos 5084 se encuentra automatizada desde 2009 mediante el indicativo A28. La selección de esta estación ha estado motivada por la falta de datos en la zona de estudio, ya que es la única estación de aforo que se encuentra más próxima a ella y recibe las aguas provenientes del río Eliche (río de estudio) y del río Quiebrajano.

Los días cuyo caudal fue máximo se contrastaron mediante los datos pluviométricos de la estación pluviométrica 5269A, de la red secundaria de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), situada en la localidad de Los Villares (Jaén), con el fin de eliminar posibles errores presentes en la serie de la estación de aforo. El período de datos disponibles era desde 1950 hasta el año 2016. Adicionalmente se comprobó con un mapa sinóptico meteorológico que la configuración atmosférica fuera propensa a lluvias.

Debido a que el registro de la estación de aforo 5084 (Puente Jontoya) posee lagunas de datos en su serie hubo que recurrir a información complementaria que solucionara este problema, como artículos de prensa.

b) Artículos periodísticos

Se consultaron artículos periodísticos digitales de diferentes editoriales a través de un buscador de Internet mediante el uso de palabras clave para encontrar eventos de inundación que se hubieran producido en lagunas de la serie de datos de la estación 5084. Debido a la problemática existente en la cuenca de nuestro río de estudio, comentada en el apartado I.3.7, estos eventos de inundación tienen gran acogida en la prensa local, regional y nacional por su propensión de causar daños a los seres humanos o a sus bienes.

### **III.1.2. Búsqueda de información de los eventos de inundación.**

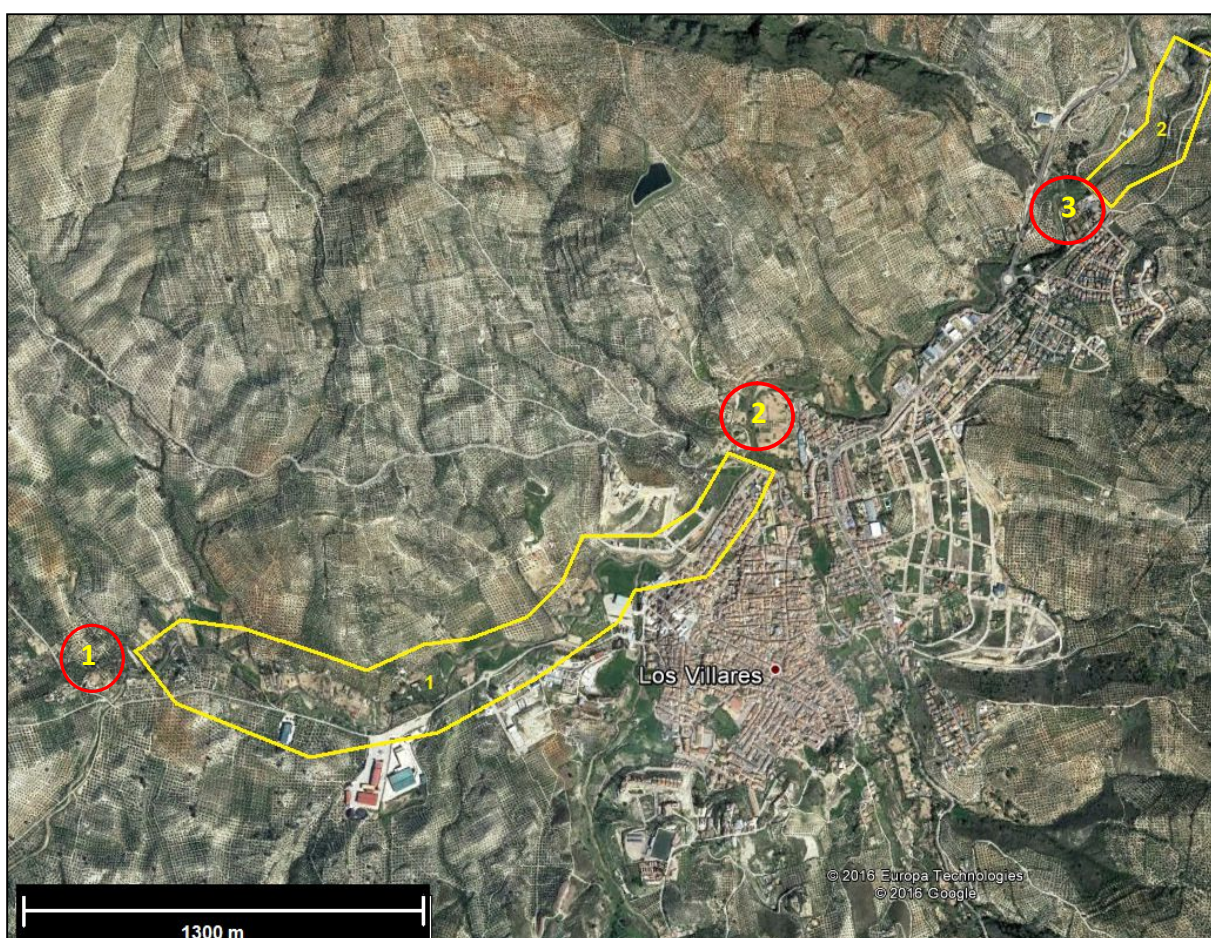
Una vez recopilados los episodios recientes de inundación (apartado 3.1.1) se procedió a buscar información de esos eventos (hora y duración aproximada, daños, consecuencias) a través de diferentes medios como la bibliografía existente, noticias periodísticas y planes de Gestión de las Administraciones competentes. A la par se realizó una recopilación del material fotográfico existente de los mismos mediante los medios comentados anteriormente con inclusión del material fotográfico presente en el archivo histórico de la localidad de Los Villares (Jaén) que fue relevante a esta temática.

### **III.1.3. Análisis de los cambios morfológicos del Río Eliche.**

Los cambios morfológicos fueron analizados en dos tramos del río Eliche mediante la comparación de ortofotografías seriadas de fechas diferentes de la zona de estudio. Las ortofotografías digitales utilizadas en dicho análisis correspondieron al Vuelo Americano Serie B (julio 1956), Vuelo Interministerial (1977-83), Vuelo Nacional (marzo 1985-87) y algunas de las ortofotografías realizadas los últimos años en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía aérea (PNOA) que abarcan los años 2001, 2006-07, 2008-09 y mayo 2013. La resolución de estos vuelos es de 0,5 m/pixel salvo el Vuelo Americano serie B que tiene una resolución de 1 m/pixel. Las ortofotografías se obtuvieron desde la web del Instituto Geográfico Nacional a través del apartado "Centro de Descargas" (Fuente [9](#)) para las ortofotografías pertenecientes al PNOA. Las ortofotografías restantes se descargaron a través del portal web de la Red de

Información Ambiental de la Junta de Andalucía (REDIAM) con enlace <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/rediam/>.

El proceso de análisis se realizó utilizando un software SIG (Sistema de Información Geográfica) como es ArcGIS (apartado II.2.). En dicho software se visualizaron las ortofotografías descargadas y a través de su herramienta de medida se calcularon los cambios del trazado del río y sus desplazamientos (en metros) en el caso que hubiera.



**Figura 15.** Dominio del análisis morfológico del río Eliche. 1. Vega Redonda. 2. Puente de la Priscalea. 3. Puente Bajo.

El primer tramo considerado tiene una longitud de 2,97 kms y se extiende desde el paraje Vega Redonda (**punto 1 en la figura 15**) hasta el puente de la Priscalea (**punto 2 en la figura 15**). El segundo tramo mide una longitud de 0,45 kms y parte desde el Puente Bajo (**punto 3 en la figura 15**) hasta el tramo donde finaliza la malla computacional considerada en la simulación 2D.

## **III.2. Reconstrucción paleohidrológica**

### **III.2.1. Análisis morfológico de la zona de estudio**

En primer lugar, se realizó *in-situ* un análisis morfológico del cauce y de las estructuras que poseía con el fin de obtener información que pudiera ser relevante para la reconstrucción paleohidráulica. Se observaron morfologías relacionadas con el comportamiento del flujo de agua en el cauce con tal de identificar el comportamiento que podrían tener en situaciones de alto caudal. En segundo lugar, se obtuvieron muestras fotográficas de la morfología del cauce y sus estructuras en diversas zonas.

### **III.2.2. Búsqueda de evidencias de inundación.**

Sobre la zona de estudio se realizó un barrido anexo al río Eliche para identificar evidencias asociadas a eventos de inundación que se produjeron años atrás, así como los efectos de los mismos que aún perduran sobre la zona. Las marcas que se buscaban eran de diferente tipo en función de donde se presentan, diferenciando entre:

- **Marcas geológicas:** Estas evidencias tienen un carácter geológico ya que es la Geología de la zona la que permite su presencia o formación. Corresponden, por ejemplo, a depósitos de sedimento durante un evento de inundación o acumulación del mismo en zonas situadas en un remanso del curso fluvial durante la inundación.
- **Marcas dendrológicas:** Estas marcas están determinadas por la presencia de la vegetación, ya sea directamente sobre ella o por su presencia. Se pueden citar como ejemplos la acumulación de la broza que transporta un río durante la inundación debido al efecto obstáculo que realiza la presencia de las ramas de un árbol o heridas en la vegetación debido a la presencia de un objeto flotante sobre la lámina de agua que impacta contra el tronco o las ramas de un árbol o arbusto.

- Marcas estructurales: Estas marcas se presentan sobre en las infraestructuras civiles (por ejemplo, puentes, postes de alta tensión...). Se presentan debido al efecto que hace la corriente fluvial sobre ellas, ya sea un daño, una sedimentación u otro tipo de efecto causado por la presencia de esta infraestructura.

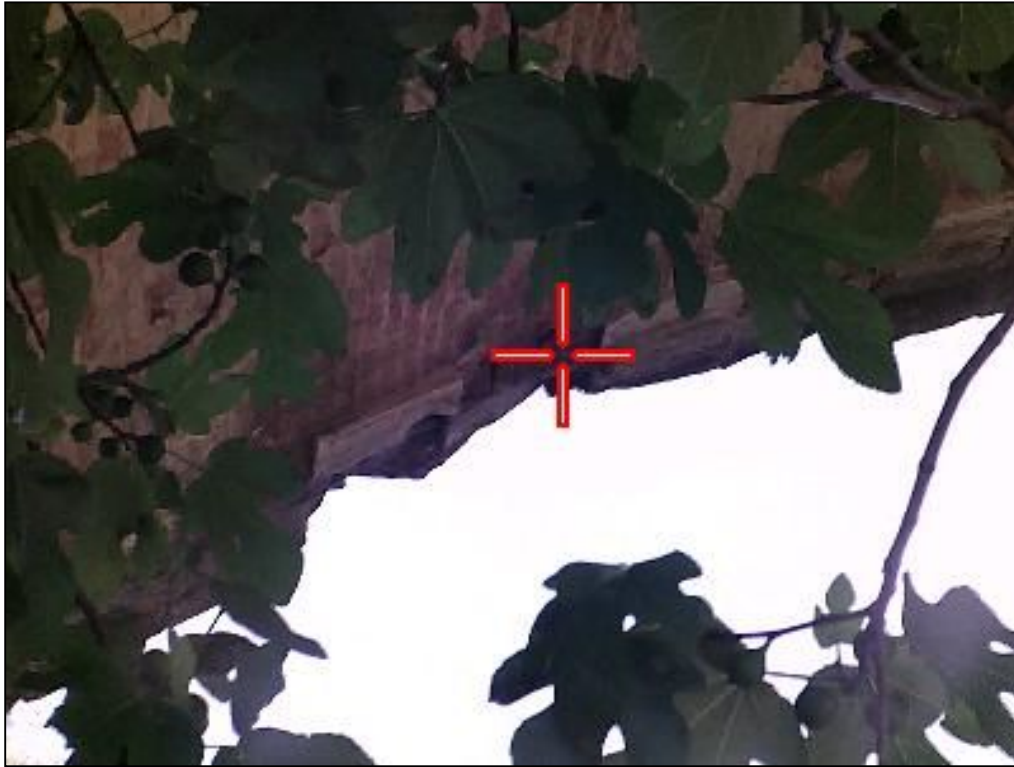
Estas evidencias proporcionan una información diferente sobre un evento de inundación según sea tu tipología. Las marcas dendrológicas proporcionan la altura mínima a la que ha llegado la lámina de agua. Las marcas estructurales proporcionan el nivel máximo al que se ha presentado la lámina de agua. Las marcas geológicas pueden proporcionar tanto el nivel máximo al que se ha presentado la lámina de agua como un nivel mínimo de ella.

También se consideraron los testimonios de testigos de diferentes inundaciones en la zona de estudio sobre el nivel máximo que había alcanzado el agua.

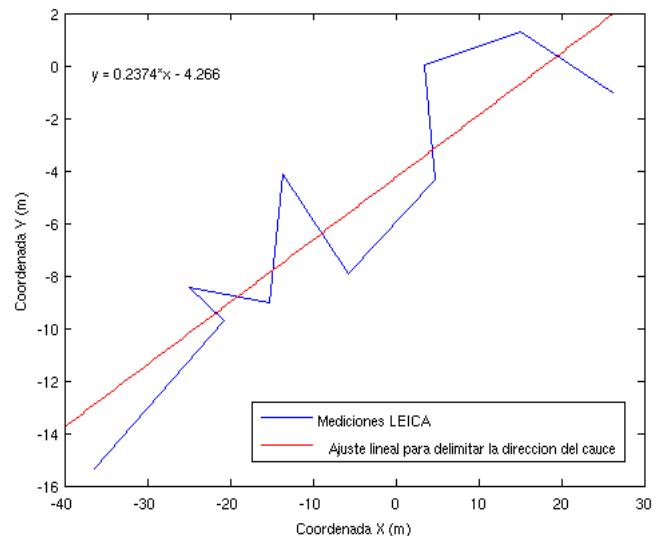
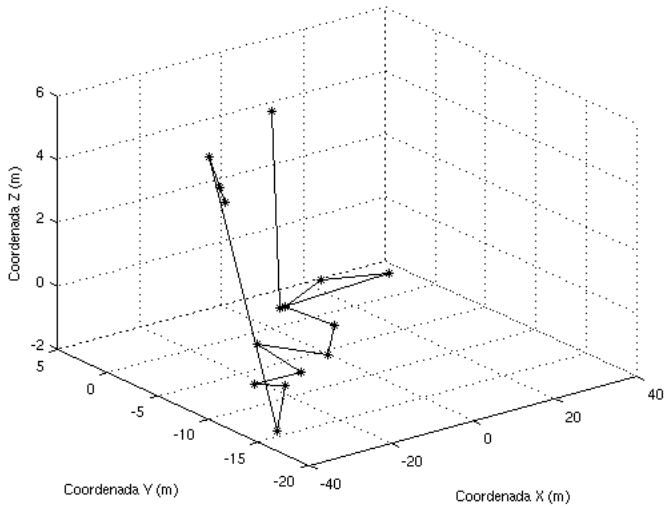
Las evidencias encontradas en la zona de estudio fueron muestreadas fotográficamente con el fin de poner analizarlas posteriormente mediante trabajo de gabinete con el fin de obtener información adicional de las mismas, y sí es posible, correlacionarlas con un evento concreto de inundación.

### **III.2.3. Medición y proceso de las evidencias de inundación**

Las evidencias de campo, comentadas en el apartado anterior, se midieron con el distanciómetro LEICA S910 con el objeto de cuantificar algunos parámetros asociados a ellas (figura 16). Estas mediciones se realizaron con la ayuda de un trípode que facilitaba la sujeción del equipo y aseguraba su estabilidad con el fin de minimizar el error en la medida y poder realizarlas en terreno cuya estabilidad era menor.



**Figura 16.** Medición de la evidencia 1 con el distanciómetro LEICA S910.



**Figura 16b.** Gráfica 3D de las coordenadas medidas con el distanciómetro (izquierda) y ajuste lineal de las coordenadas XY para la determinación de la distancia longitudinal.

Los datos obtenidos con el distanciómetro se procesaron a través del software MATLAB. Para ello se utilizó un script que permite leer y procesar el fichero DXF en tres dimensiones que genera el distanciómetro. El código presente en el script es el siguiente:

```
% Borra todo lo que haya en memoria
clear all
% Cierra todas las ventanas gráficas
close all

% Leemos el fichero con las coordenadas
datos=f_LectDxf('3D_20160519_094308.dxf');

% Hay 15 puntos, por eso vamos del 1 al 15
for i=1:15
x(i) = datos{i}(1);
y(i) = datos{i}(2);
z(i) = datos{i}(3);
end

% Grafica 3D de los puntos coordenados
figure(1)
plot3(x,y,z,'k*-' )
% Añade etiquetas a los ejes
xlabel('Coordenada X (m)');
ylabel('Coordenada Y (m)');
zlabel('Coordenada Z (m)');
grid on

% El primer punto es la evidencia más alta del puente
% El segundo es el lecho del río debajo del puente
% Los tres últimos son la barra lateral aguas abajo del puente
% Del 3 al 12 son el cauce para sacar la pendiente

alturadelimpactoalcauce = z(1) - z(2)
alturadeltalud = z(13:15) - z(2)

% Dibujamos el cauce
figure(2)
plot( x(3:12), y(3:12) );
xlabel('Coordenada X (m)');
ylabel('Coordenada Y (m)');

anguloagitar = atan(0.2374)*180/pi
ydesplazada = y + 4.266;
xnew = x*cos(anguloagitar*pi/180) + ydesplazada*sin(anguloagitar*pi/180);
ynew = x*sin(anguloagitar*pi/180) - ydesplazada*cos(anguloagitar*pi/180);
```

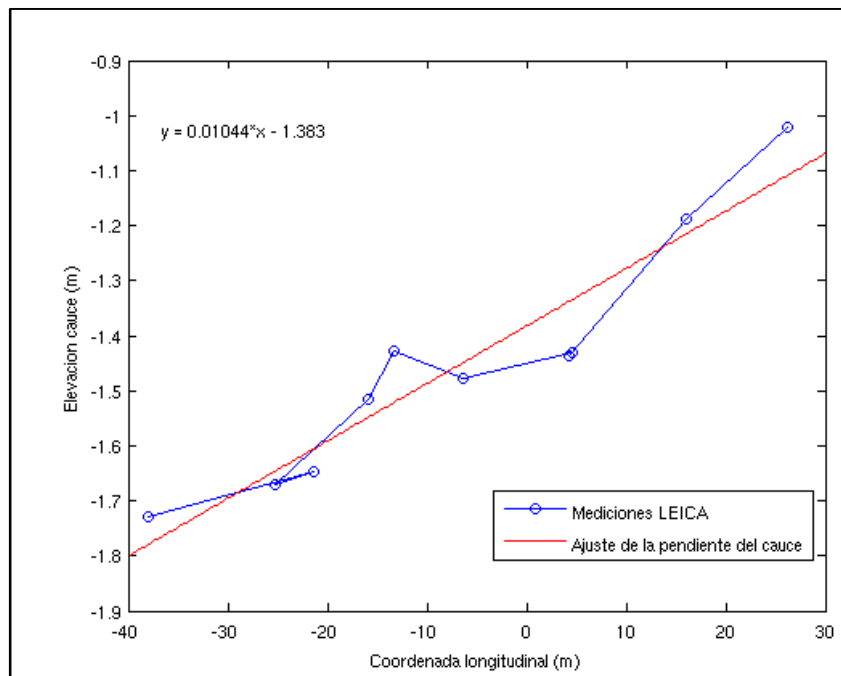
```

% Dibujamos el cauce girado
figure(3)
plot( xnew(3:12), ynew(3:12) );
xlabel('Coordenada X (m)');
ylabel('Coordenada Y (m)');

% Dibujamos la elevación del cauce frente a la distancia
figure(4)
plot( xnew(3:12), z(3:12) );
xlabel('Coordenada longitudinal (m)');
ylabel('Elevacion cauce (m)');

```

Las líneas de texto que se representan con el código anterior con el comando “%” corresponden a comentarios que explican el proceso realizado en el software MATLAB para analizar los datos tomados por el distanciómetro. Tal y como se describe en el script, la pendiente se obtuvo mediante un ajuste lineal de las coordenadas de los puntos del cauce. Algunas de las imágenes generadas se muestran **en la figura 16b**.



**Figura 16c.** Regresión lineal empleada para obtener la pendiente del cauce del río Eliche.

La coordenada Z corresponde a la altura de las evidencias registradas con el distanciómetro. Para la coordenada longitudinal, el proceso es algo más complejo. Primero se realiza una regresión lineal en el plano XY de las coordenadas de los puntos del cauce. Posteriormente, se determina la distancia longitudinal como la proyección de las coordenadas XY sobre la recta de regresión.

### **III.2.4. Modelización 1D**

#### **III.2.4.1. Introducción**

La modelización matemática 1D del flujo de agua en un río radica en conocer los valores de diferentes variables hidráulicas (tales como caudal, velocidad o nivel del agua entre otras) en secciones transversales mediante la resolución numérica de las **ecuaciones 2 y 3** utilizando valores experimentales o teóricos. Este tipo de modelización ha sido la opción más utilizada en el pasado debido a la mayor sencillez de cálculo y a la falta de datos existentes que dificulte otro tipo de simulaciones. Anteriormente los ordenadores no tenían suficiente potencia de cálculo y procesamiento de la información como para poder realizar otros tipos de simulaciones. Actualmente con la mejora continua de la informática su uso está disminuyendo y se está sustituyendo por la modelización 2D y 3D que ofrecen mayor información y posibilidades.

La modelización 1D asume que el curso fluvial tiene un flujo unidimensional con un régimen permanente gradualmente variado, es decir, el vector velocidad del flujo solo depende de una variable espacial despreciándose los cambios de velocidad que se producen en los márgenes del río. También se asume que el coeficiente de Manning ( $n$ ) que define la rugosidad del curso fluvial es constante en la sección y que su profundidad del canal varía de manera progresiva.

Existen diferentes ecuaciones desarrolladas para realizar una modelización 1D. En el presente estudio se ha utilizado la Fórmula de Manning. Esta fórmula fue

descrita por el ingeniero irlandés Robert Manning en el año 1889 y consiste en una mejora de la fórmula de Chézy. Su uso ha sido muy importante desde su formulación hasta la actualidad para el cálculo de la velocidad y el caudal para secciones de canales abiertos (**ecuación 2**). En ella se define la velocidad del flujo de agua que recorre un canal como (Chow, 1959):

$$V = \frac{1}{n} \cdot R(h)^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad \mathbf{2)}$$

Siendo:

- V = Velocidad del agua (m/s).
- n = Coeficiente de Manning, en función de la rugosidad del curso fluvial. Es adimensional.
- R(h) = Radio hidráulico (m), en función de la altura de la lámina de agua.
- S = Pendiente del curso fluvial, en tanto por 1.

Mediante sustitución en la fórmula de Chézy, Robert Manning describió el cálculo del caudal con la siguiente expresión (**ecuación 3**):

$$Q(h) = \frac{1}{n} \cdot A R(h)^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{S} \quad \mathbf{3)}$$

Siendo:

- Q(h) = Caudal del agua (m<sup>3</sup>/s)
- n = Coeficiente de Manning, en función de la rugosidad del curso fluvial. Es adimensional.
- A = Área de la sección del flujo del agua (m<sup>2</sup>).
- R(h) = Radio hidráulico (m), en función de la altura de la lámina de agua.
- S = Pendiente del curso fluvial, en tanto por 1.

#### **III.2.4.2. Cálculo de los parámetros necesarios**

El coeficiente de Manning se ha calculado en base a la presencia de vegetación en el cauce del río Eliche mediante la ayuda de plantillas para su

determinación. El radio hidráulico y el área de la sección del flujo de agua se determinaron mediante las **ecuaciones 4 y 5** en base a las evidencias paleohidrológicas encontradas en la zona de estudio y las medidas de las secciones rectangulares tomadas mediante el distanciómetro LEICA S910.

$$R(h) = \frac{bh}{b+2h} \quad \mathbf{4)}$$

Siendo:

- R(h) = Radio hidráulico, en metros.
- b = Ancho de la sección considerada, en metros
- h = Altura de la lámina de agua, en metros.

$$A = bh \quad \mathbf{5)}$$

Siendo:

- A = Área de la sección, en m<sup>2</sup>.
- b = Ancho de la sección considerada, en metros.
- h = Altura de la lámina de agua, en metros

#### **III.2.4.3. Cálculo de la pendiente del cauce.**

La pendiente "S" de una sección del cauce fluvial es un parámetro muy importante en la modelización 1D a través de la fórmula de Manning. Se calculó para el río Eliche en varias secciones, siendo las que muestran la **figura 17**.

- **Sección 1:** Aguas arriba al Puente Bajo. Longitud de la sección: 69,8 metros.
- **Sección 2:** Aguas abajo respecto al Puente Bajo. Longitud de la sección: 52,3 metros.



**Figura 17.** Secciones empleadas para el cálculo de la pendiente en el río Eliche. 1. Puente Bajo.

El cálculo se realizó mediante el proceso comentado en el apartado III.2.3. Los datos obtenidos se verificaron obteniendo la pendiente de la sección 1 y 2 a partir de los ficheros LiDAR del año 2014 aplicando **la ecuación 6**.

$$S = \frac{C_{ini} - C_{fin}}{D} \quad \mathbf{6)}$$

Siendo:

- Cini: Cota (en metros sobre el nivel del mar) de inicio de la sección.
- Cfin: Cota (en metros sobre el nivel del mar) de finalización de la sección
- D: Distancia (en metros) entre el punto de inicio y fin de la sección

La elección de estas secciones no fue de forma aleatoria sino que se realizó siguiendo criterios geológicos. La zona indicada para estudios de esta índole es una zona estacionaria, en lo que se refiere a su morfología, donde los diferentes eventos de inundaciones no causan una variación de su pendiente que anule la posibilidad de realizar una reconstrucción paleohidrológica en ese

tramo de un evento de crecida anterior. Las secciones 1 y 2 cumplen esta condición ya que el cauce se encuentra encajado en la roca, cuyas propiedades no erosivas impiden modificaciones morfológicas y cambios de sección asegurando que no ha habido cambio discernible en la pendiente durante los últimos años.

### **III.2.5. Modelización 2D**

#### **III.2.5.1. Introducción**

El desarrollo de modelos numéricos basados en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales es el método más empleado en los estudios de dinámica fluvial, dinámica litoral, cálculo de transporte de contaminantes y de sedimentos. El desarrollo informático junto con la creación de software de modelización hidráulica en dos dimensiones, con interfaz gráfica e intuitiva, ha desplazado a la modelización 1D durante los últimos años.

La modelización 2D se realiza resolviendo las ecuaciones de conservación de la masa y momento en las dos componentes horizontales (**ecuación 1**)

#### **III.2.5.2. Selección del dominio computacional**

La modelización hidráulica del río Eliche se realizó mediante el software IBER usando su módulo hidrodinámico (versión 2.3.2.) como se ha comentado en el apartado III.2. Se realizó en un tramo del río Eliche aguas abajo del Puente Bajo dentro del término municipal de Los Villares (Jaén) como muestra la **figura 18**. Esta sección posee una longitud de 450 metros y su elección ha estado motivada por ser una zona estacionaria, es decir, la morfología y disposición del cauce fluvial no ha cambiado en un período de tiempo más o menos extenso por lo que asegura que la modelización de un evento anterior no es errónea debido a procesos como migración del canal o encajamiento



**Figura 18.** Dominio computacional donde se ha efectuado la modelización 2D. 1. Puente Bajo

### III.2.5.3. Proceso de realización de la simulación en IBER

La modelización hidráulica se ha realizado mediante el siguiente proceso en el software IBER:

1. Adición de la ortofotografía de la zona de estudio, previamente georreferenciada.
2. Determinación sobre la ortofotografía la zona donde se pretende realizar el cálculo numérico y creación de la superficie NURBS.
3. Adición de los datos del problema que se quiere resolver mediante el software IBER. Estos datos son el instante inicial de simulación (s), el tiempo

máximo de simulación (s) y el intervalo de resultados (s) en el que se mostrarán los resultados.

4. Definición de las condiciones de contorno de la simulación en su entrada y en la salida y posterior asignación a la superficie NURBS creada anteriormente. Estas condiciones de contorno a la entrada se definen mediante la entrada del caudal total, caudal específico o cota de agua y el tipo de régimen de flujo y los datos temporales. En la salida dichas condiciones depende del tipo de flujo considerado para la misma (ejemplo descarga libre para régimen de flujo supercrítico o curva de gasto para régimen subcrítico).

5. Asignación del valor del coeficiente de rugosidad (n) de Manning a la superficie NURBS.

6. Creación de la malla computacional sobre la que se realizará la modelización y de su resolución espacial.

7. Asignación de la orografía a la malla mediante el uso de un modelo digital del terreno (MDT), previamente georreferenciado. Este paso es indispensable para darle la realidad al modelo hidráulico que se pretende generar ya que define los límites topográficos del flujo del agua.

Mediante el proceso explicado anteriormente se realizaron en el presente estudio dos tipos de simulaciones 2D diferentes: estacionarias (apartado III.2.5.4.) y transitorias (apartado III.2.5.5.)

Las simulaciones estacionarias son cálculos numéricos cuya solución es estacionaria, es decir, en los pasos de la simulación se alcanza un caudal fijo máximo definido anteriormente. Difieren de las simulaciones transitorias ya que estas están definidas por un hidrograma cuyo pico de caudal máximo se alcanza en un momento determinado.

Como referencia en ambas simulaciones se usó una ortofotografía del año 2013, con resolución 0,5 m y como base topográfica el modelo digital del

terreno (MDT) obtenido a partir de dicha ortofotografía, con resolución 5 m. Ambos productos cartográficos se descargaron a través del centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional (hoja 947).

#### **III.2.5.4. Simulaciones estacionarias**

Las simulaciones estacionarias se calcularon para conocer la altura de la lámina de agua que se alcanza en el dominio computacional para un caudal marcado como una inundación importante. Este caudal se infirió a partir de las evidencias paleohidrológicas presentes en la zona (apartado III.2.2) y de los testimonios de testigos debido a la ausencia de estaciones de aforo en esta zona. Complementando estas dos fuentes se obtuvieron el calado de agua que se alcanzó en diferentes puntos del dominio computacional en el evento determinado. Esta metodología ha sido aplicada en otros estudios como Baker, 1987; Bodoque et al., 2014; Ortega, 2007; entre otros.

Se realizaron 6 simulaciones estacionarias mediante IBER con diferentes caudales: 100 m<sup>3</sup>/s, 200 m<sup>3</sup>/s, 300 m<sup>3</sup>/s, 400 m<sup>3</sup>/s, 500 m<sup>3</sup>/s y 600 m<sup>3</sup>/s. Los parámetros introducidos en el software a través del método comentado en el apartado III.2.5. se muestran en la **tabla 3**. Mediante análisis del calado obtenido en estas simulaciones y la posterior comparación con la altura a la que se encontraban las evidencias relevantes sobre la superficie, se pudo obtener el caudal aproximado que tuvo un evento de inundación importante, y a la par, su simulación.

Se asumió un régimen de flujo supercrítico (número de Froude > 1) en la entrada y en la salida debido a los resultados que arrojó el análisis morfológico de la zona de estudio donde se encontraron morfologías presentes en el río Eliche como las steep-pool que se forman en zonas donde domina este tipo de flujo (apartado IV.3.1.). Este valor se comprobó posteriormente con el resultado de la simulación.

Tipo de simulación	Estacionaria
Instante inicial de simulación (s)	0
Tiempo máximo de simulación (s)	3600
Intervalo de resultados (s)	600
Condición de entrada	Caudal total
Régimen de flujo	Supercrítico
Valor de caudal total máximo	100-600
Condición de salida	Descarga libre
Régimen de flujo	Supercrítico
Coefficiente de Manning	0,025
Tipo de malla	No estructurada
Tamaño de malla (m)	3,5
Uso de hidrograma	No

**Tabla 3.** Parámetros introducidos en IBER en las 6 simulaciones estacionarias.

### III.2.5.5. Simulaciones transitorias

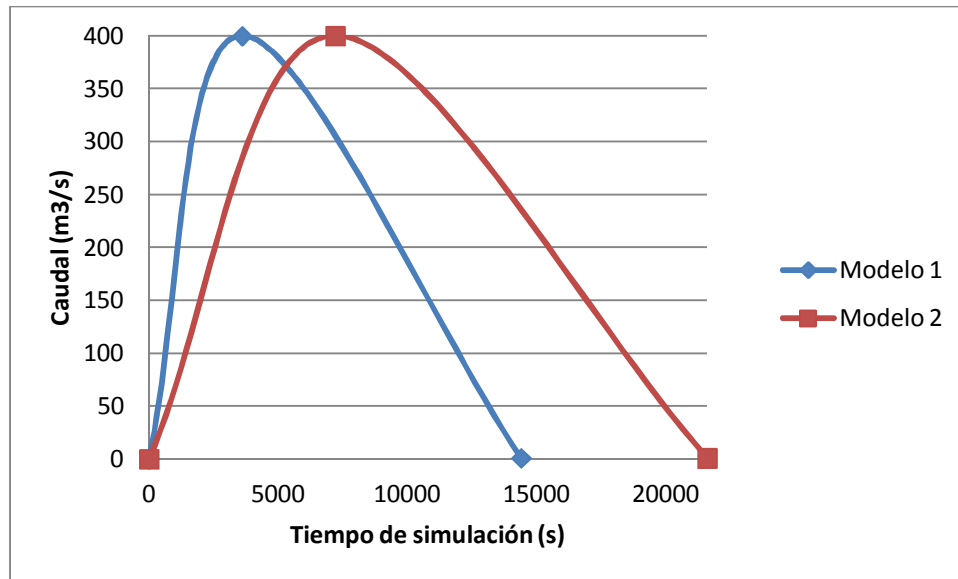
Las simulaciones transitorias se calcularon para el caudal pico definido en el apartado anterior para una inundación importante en la cuenca considerando como condición de contorno dos modelos de hidrogramas. En el modelo 1 (**tabla 4**) se asumió una intensidad de precipitación mayor estableciendo un período de crecida de 1hr (3600 s) estipulado desde el inicio de la misma hasta que se alcanza el pico máximo de caudal. El modelo 2 (**tabla 5**) establece un tiempo de crecida de 2hr (7200 s) hasta que se alcanza el máximo caudal, en base a una precipitación menos intensa que en el modelo 1 pero más prolongada en el tiempo (**gráfico 1**).

Tiempo (s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
0	0
3600	400
14400	1

**Tabla 4.** Modelo 1 de hidrograma.

Tiempo (s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
0	0
7200	400
21600	1

**Tabla 5.** Modelo 2 de hidrograma.



**Gráfico 1.** Representación de dos modelos de hidrograma empleados.

Tipo de simulación	Transitoria
Instante inicial de simulación (s)	0
Tiempo máximo de simulación (s)	14400/7200
Intervalo de resultados (s)	600
Condición de entrada	Caudal total
Régimen de flujo	Supercrítico
Valor de caudal total máximo	400
Condición de salida	Descarga libre
Régimen de flujo	Supercrítico
Coefficiente de Manning	0,025
Tipo de malla	No estructurada
Tamaño de malla (m)	3,5
Uso de hidrograma	Sí

**Tabla 6.** Parámetros introducidos en IBER en las simulaciones transitorias

Se introdujeron los dos modelos de hidrograma en IBER y se calculó la simulación 2D obteniéndose magnitudes fluidas como el calado, la velocidad y líneas del flujo de agua o el número de Froude. En la tabla siguiente (**tabla 6**) se muestran las características y parámetros introducidos en IBER.

Los resultados de las simulaciones transitorias se compararon con los obtenidos a través del método estacionario.

# IV. RESULTADOS

## Índice

### IV.1. Eventos de inundación en la zona de estudio

### IV.2. Análisis de los cambios morfológicos del río Eliche

IV.2.1. Sector 1

IV.2.2. Sector 2

### IV.3. Reconstrucción paleohidrológica

IV.3.1. Análisis morfológico del río Eliche

IV.3.2. Evidencias de inundación del río Eliche

IV.3.3. Modelización 1D

IV.3.4. Modelización 2D

## Resumen

En este apartado se presentan los resultados del análisis de los eventos de inundación en la cuenca de drenaje acompañado de datos de caudal, registros pluviométricos, mapas de configuración atmosférica e información presente en los artículos de prensa. Posteriormente se representan mediante pares de ortofotografías aéreas los cambios morfológicos del río Eliche entre los años 1956-2013 y la medición del desplazamiento del río. En el apartado de reconstrucción paleohidrológica se presentan y analizan las evidencias de inundación encontradas en la zona de estudio que permiten ajustar los subapartados siguientes. Finalmente se comentan los resultados obtenidos en la modelización 1D y 2D acompañado de material gráfico en el que se incluyen diferentes variables fluidas.

## IV. RESULTADOS

### IV.1. Eventos de inundación en la zona de estudio

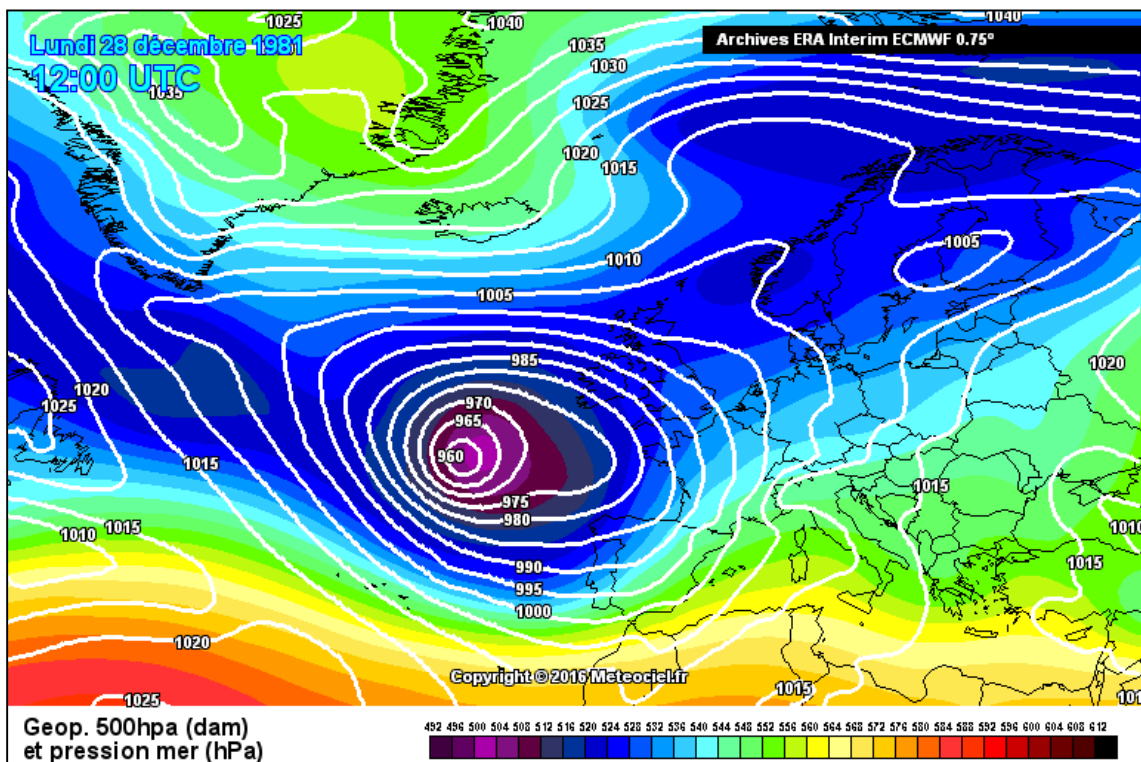
En la cuenca de drenaje del río Eliche se han producido diferentes eventos de alto caudal que han afectado o han podido afectar a las infraestructuras presentes en la misma. Debido a la limitación de los datos de caudal existentes tan solo es posible describir los eventos de inundación posteriores al año 1974, que corresponde al período instrumental.

Los episodios de inundación encontrados han sido los siguientes:

- *Evento del 29 de diciembre de 1981*: La estación de aforo 5246 situada en el Puente Jontoya registra un caudal medio diario de 132 m<sup>3</sup>/s y un calado medio diario de 1,5 metros.

No existen registros de precipitación en la estación pluviométrica 5269A situada en la localidad de Los Villares debido a una laguna presente en la serie en ese año. En su lugar, la estación 5270, situada en Jaén capital registró aquel día una precipitación de 36,2 mm. Lamentablemente no existen datos horarios que reflejen la distribución de la precipitación durante el día. La configuración sinóptica meteorológica del presente día muestra la presencia de una borrasca profunda situada al noroeste de la península que impulsa vientos húmedos del W-SW sobre la zona de estudio (**figura 19**). El gran contraste de masas presente no descarta la formación de tormentas asociadas a la borrasca que hayan causado el valor de caudal registrado por la estación.

No existen artículos de prensa que comenten los efectos de este evento sobre las edificaciones presentes en la vega del río Eliche y río Jaén. En el año 1981 la construcción en la cuenca de drenaje era aun muy baja y por lo tanto este evento no fue relevante en la prensa local.



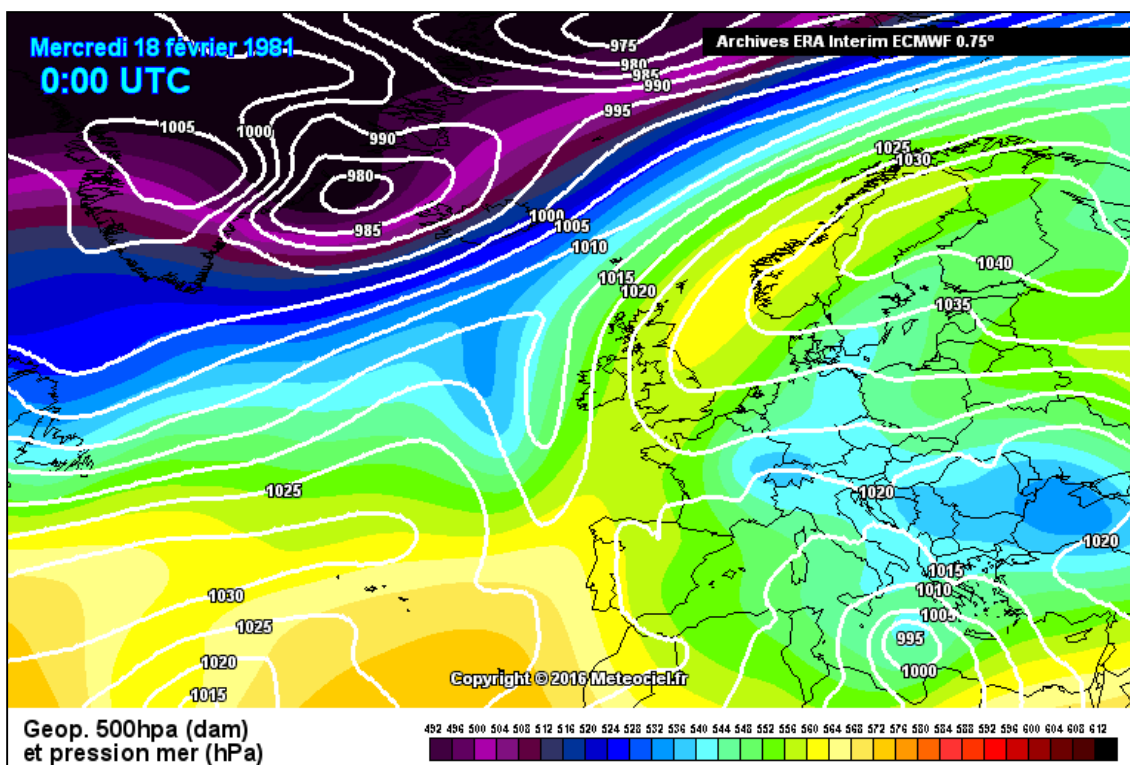
**Figura 19.** Configuración sinóptica meteorológica del día 28/12/1981 a la 1 de la tarde. Se muestra una borrasca profunda con un centro de 960 hPa de presión al noroeste de la península Ibérica. Fuente [10](#).

- *Evento del 18 de febrero de 1987:* La estación de aforo 5246 situada en el Puente Jontoya registra un caudal medio diario de 143,3 m<sup>3</sup>/s y un calado medio diario de 1,5 metros.

La estación pluviométrica situada en la localidad de Los Villares registró el día 18 de febrero una precipitación de 10,2 mm. La configuración sinóptica meteorológica del día 18 de febrero de 1987 no muestra la presencia de ninguna borrasca atlántica sobre la zona de estudio, existiendo una pequeña baja presión al sureste de Sicilia (**figura 20**).

No existen artículos periodísticos que comenten el efecto de esta crecida registrada por la estación de aforo de Puente Jontoya ni del episodio de lluvia que lo causa.

A tenor de los bajos datos de precipitación, el análisis de la configuración meteorológica y la ausencia de noticias en la prensa local; es posible que, aunque los datos presentes en el Anuario de Aforos han pasado por una revisión, el dato registrado por la estación de aforo se deba a un fallo mecánico de la misma, por lo que tal evento no se produjo.

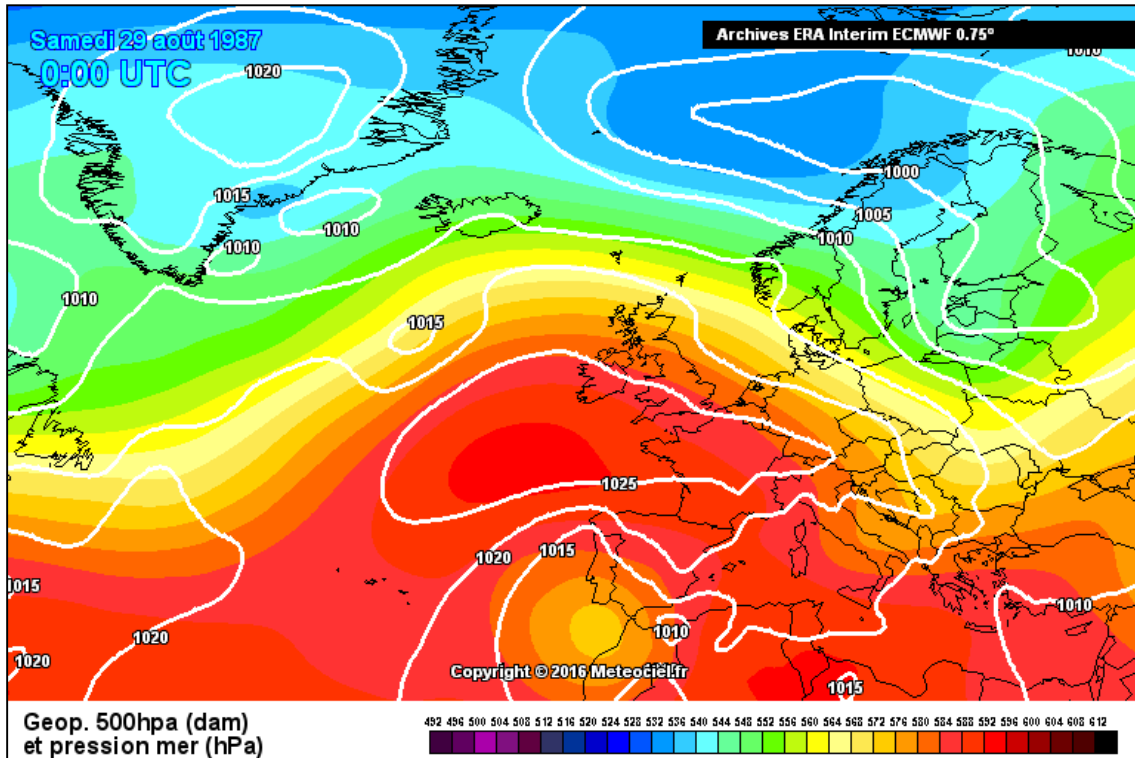


**Figura 20.** Configuración sinóptica meteorológica del día 18/02/1987 a la 1 de la madrugada. No se aprecia la influencia de ninguna borrasca potente sobre la zona de estudio. Fuente: [10](#).

- *Evento del 29 de agosto de 1987:* La estación de aforo 5246 situada en el Puente Jontoya registra un caudal medio diario de 93,65 m<sup>3</sup>/s y un calado medio diario de 1,4 metros.

La estación pluviométrica localizada en Los Villares acumula entre los días 28 y 29 de agosto una precipitación de 23mm. Esta precipitación pudo ser mucho mayor en otro punto de la cuenca de drenaje del río Eliche debido al carácter irregular de las tormentas de verano. La configuración meteorológica del día 29 de agosto de 1987 (**figura 21**)

muestra la presencia de una depresión aislada en niveles altos (DANA) situada sobre el Golfo de Cádiz que favorece el desarrollo de tormentas sobre la zona de estudio.



**Figura 21.** Configuración sinóptica meteorológica del día 29/08/1987 a las dos de la madrugada. Se aprecia una depresión aislada en niveles altos en el Golfo de Cádiz. Fuente: [10](#).

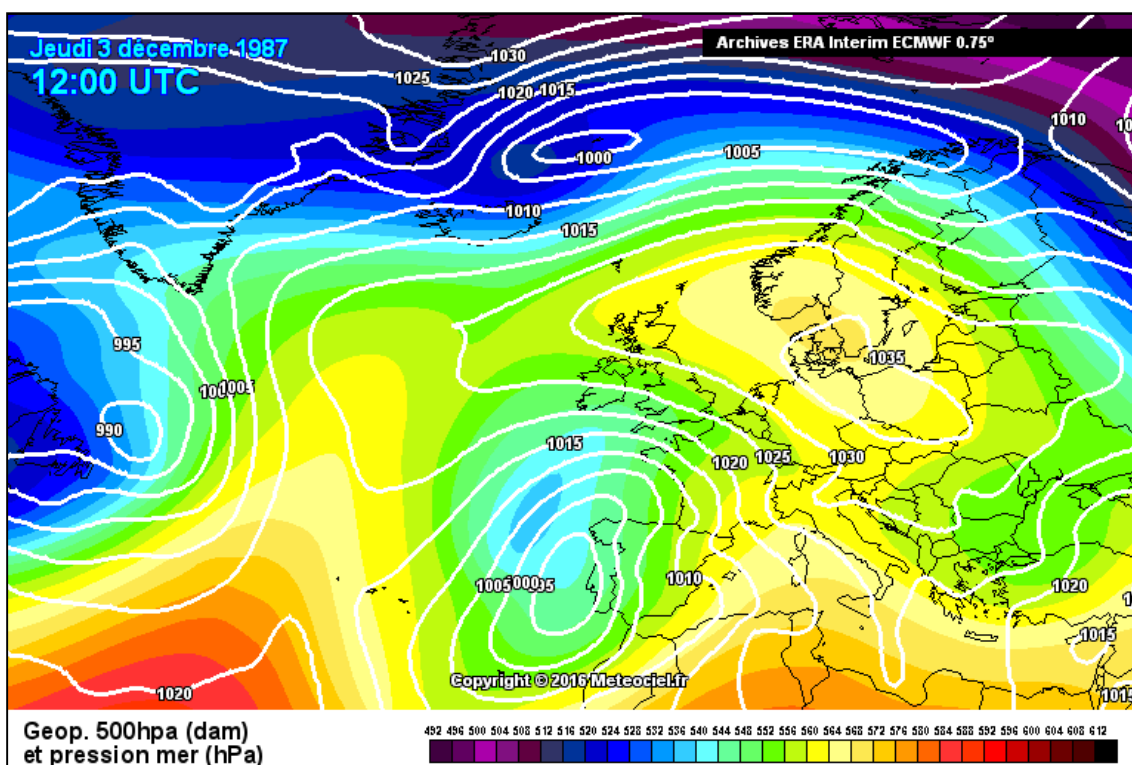
No existen artículos de prensa que comenten de daño producidos por este episodio de tormentas en la zona de estudio, no así en la provincia de Málaga donde el noticiario "El País" redacta una noticia sobre la consecuencia de las inundaciones en la provincia de Málaga.

El informe de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía de 1988 indica daños económicos por inundación producidos en el año 1987 en poblaciones cercanas a la zona de estudio como Alcaudete o Castillo de Locubín, probablemente relacionados con este evento.

- *Evento del 4-5 de diciembre de 1987*: La estación de aforo 5246 situada en el Puente Jontoya registró un caudal medio diario de 93,7 m<sup>3</sup>/s y un calado medio diario de 1,4 metros ambos días.

La estación pluviométrica localizada en Los Villares acumula entre los días 02, 03 y 04 de diciembre una precipitación de 47,8 mm, distribuida de la siguiente forma: Día 2: 9mm, día 3: 29,3 mm y día 4: 9,5 mm. La configuración meteorológica del día 3 de diciembre de 1987 (**figura 22**) muestra la presencia de una importante baja presión situada al oeste de la Península Ibérica. Existe un importante contraste de masas que favorece la formación de tormentas asociadas a la borrasca.

No existen artículos periodísticos que se hagan eco de daños producidos en la zona de estudio por este evento.

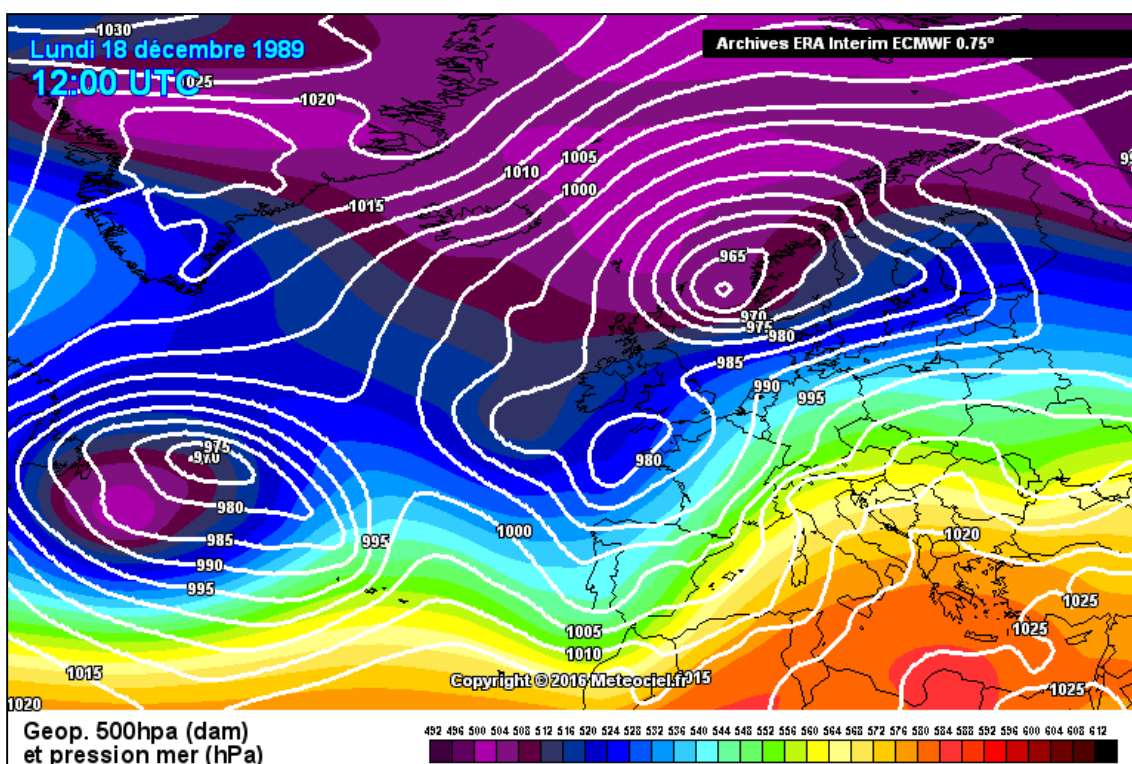


**Figura 22.** Configuración sinóptica meteorológica del día 03/12/1987 a las 1 de la tarde. Se observa una baja situada al oeste de la Península Ibérica. Fuente: [10](#).

- *Evento del 20 de diciembre de 1989*: La estación de aforo 5246 situada en el Puente Jontoya registró un caudal medio diario de 143,3 m<sup>3</sup>/s y un calado medio diario de 1,5 metros.

La estación pluviométrica localizada en Los Villares registró entre los días 17, 18 y 19 de diciembre una precipitación de 75,7 mm, distribuida de la siguiente forma: Día 17: 23mm, día 18: 25,7 mm y día 19: 27 mm. Es notable la persistencia de las precipitaciones en este episodio respecto a otros explicados anteriormente. La configuración meteorológica del día 18 de diciembre de 1989 (**figura 23**) muestra la presencia de fuertes vientos ábregos, húmedos en la zona de estudio, por la acción de un sistema de bajas presiones situado al suroeste de Reino Unido. El contraste de masas es patente con lo que pudo favorecer la formación de tormentas asociadas al sistema frontal.

No existen artículos periodísticos que se hagan eco de daños producidos en la zona de estudio por este evento.



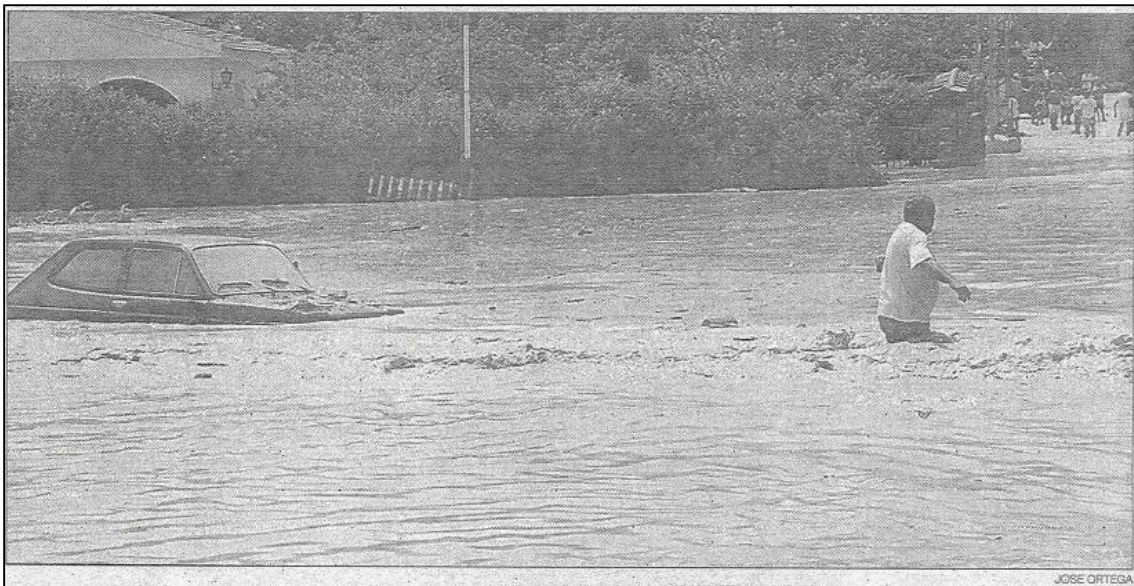
**Figura 23.** Configuración sinóptica meteorológica del día 18/12/1989 a la 1 de la tarde. Se observa una baja situada al suroeste del Reino Unido. Fuente: [10](#).

- *Evento del 15 de agosto de 1996*: En este evento la estación de aforo de Puente Jontoya no muestra dato de caudal medio diario. El calado medio diario registrado fue de 4,1 metros. Los datos de caudal faltan a partir de este día por lo que es probable que la estación fuera destruida por el evento de inundación.

La estación pluviométrica localizada en Los Villares registró en el día 15 de agosto de 1996 una precipitación de 113mm, siendo el récord de precipitación máxima en un 1 día en su serie (1951-2015). Es muy probable que esta precipitación fuera de mayor entidad en algún punto de la cuenca de drenaje, dada la irregularidad de estos episodios veraniegos. En el mapa sinóptico meteorológico del día 15 de agosto de 1996 se muestra un embolsamiento frío en altura (500 hPa equivale aproximadamente a 5500 metros de altitud) asociado a una depresión aislada en niveles altos (DANA) situada sobre el oeste de Andalucía. La conjunción de un embolsamiento frío y el calor característico de mitad de agosto generó tormentas muy fuertes que descargaron sobre la zona de estudio (**figura 24b**).

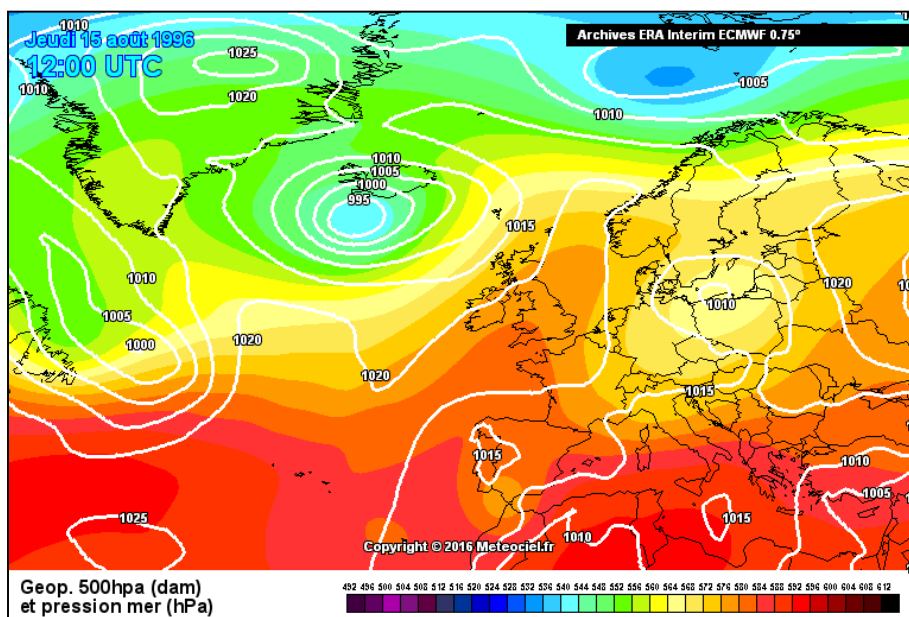
Debido a la gran magnitud de estas inundaciones existen multitud de artículos de prensa que detallan el desarrollo de este evento y los daños ocasionados sobre los núcleos poblacionales situados en la vega. Según el periódico regional "IDEAL" se registraron en el Puente de la Sierra 100mm de lluvia en 20 minutos, por lo que tuvo que decretarse un plan de evacuación de esta zona que afectó a más de 100 personas. El río Eliche, junto con el Quiebrajano, se desbordó a primera hora de la mañana anegando gran parte de este núcleo poblacional y del Puente Jontoya (**figura 24a**). Dicho artículo también cita daños de inundación en la localidad de Los Villares, situada en la zona de estudio y en localidades circundantes como Fuensanta de Martos o Valdepeñas de Jaén. El diario local "Diario Jaén" indica la existencia de otra inundación el mismo día 15 de agosto de "magnitud similar", ocurrida al anochecer,

cuyas consecuencias fueron menores que la acaecida durante la mañana debido a la desalojo de la zona.



**Figura 24a.** Fotografía escaneada del diario IDEAL donde se muestra la inundación del 15/08/1996 en el Puente de la Sierra.

Este evento afectó seriamente a 400 viviendas, granjas e infraestructuras urbanas cifrándose sus daños en 10.500.000 pesetas.



**Figura 24b.** Configuración sinóptica meteorológica del día 15/08/1996 a las 2 de la tarde. Se observa un embolsamiento frío en capas altas situado sobre el oeste de Andalucía. Fuente: [10](#).

- *Evento del 9 de mayo de 2008*: En este evento los datos de la estación de aforo de Puente Jontoya no muestran el caudal medio diario. El calado medio diario registrado fue de 1,6 metros.

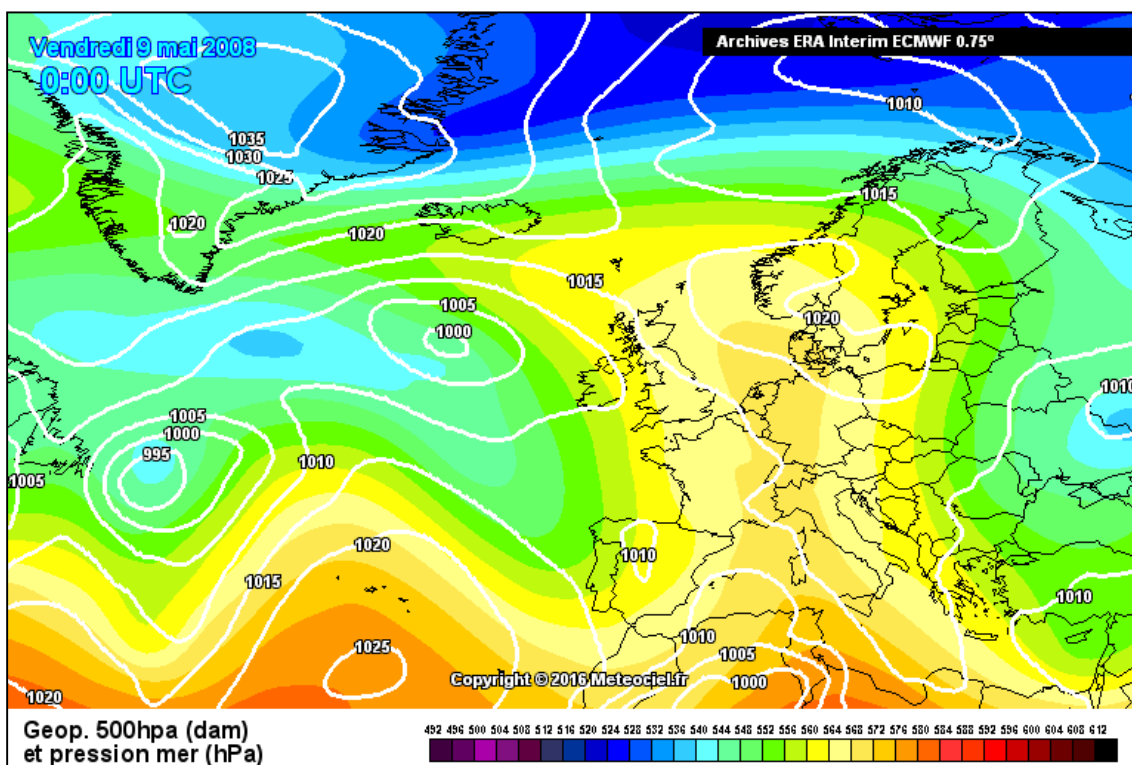
La estación pluviométrica localizada en Los Villares registró entre los días 08 y 09 de mayo una precipitación de 87mm repartidos del siguiente modo: 08: 72mm, 09: 15mm. Siendo precipitaciones de carácter tormentoso, es posible que estos acumulados fueran mayores en otros puntos de la cuenca de drenaje del río Eliche. En el mapa sinóptico meteorológico del día 09 de mayo de 2008 (**figura 25b**) se aprecia la presencia de una vaguada sobre la zona de estudio que genera un fuerte contraste de masas, favoreciendo la formación de tormentas de entidad.



**Figura 25a.** Fotograma de un reportaje de Canal Sur TV en el que se muestra la inundación en el Puente de la Sierra.

Existen diferentes de artículos de prensa que detallan las consecuencias producidas sobre los núcleos poblacionales situados en el río Eliche. El periódico digital "20 minutos" relata el desalojo de 16 familias en el

Puente de la Sierra y Puente Jontoya. Indica una acumulación de 61,8 mm en el Puente de la Sierra en una hora, que produjo el desborde del río Eliche y Jaén en la madrugada (**figura 25a**), produciendo daños en inmuebles e infraestructuras situadas en estos núcleos poblacionales. También enuncia daños menores en la localidad de Los Villares.



**Figura 25b.** Configuración sinóptica meteorológica del día 09/05/2008 a las 1 de la madrugada. Se aprecia una vaguada situada sobre la zona de estudio que favorece el desarrollo de tormentas. Fuente: [10](#).

- *Evento del 23-24 de febrero de 2010:* La estación de aforo de Puente Jontoya registró un caudal medio diario de 41,89 m<sup>3</sup>/s. Gracias a la automatización de esta estación en el año 2009 se puede conocer, a diferencia de los anteriores eventos, el pico horario de caudal registrado. Este pico fue de 184,12 m<sup>3</sup>/s y un calado de 3,17 metros a las 10 horas del día 23. Horas después se registró otro pico de 110,49 m<sup>3</sup>/s y un calado de 2,82 metros a las 01 de la madrugada del día 24.

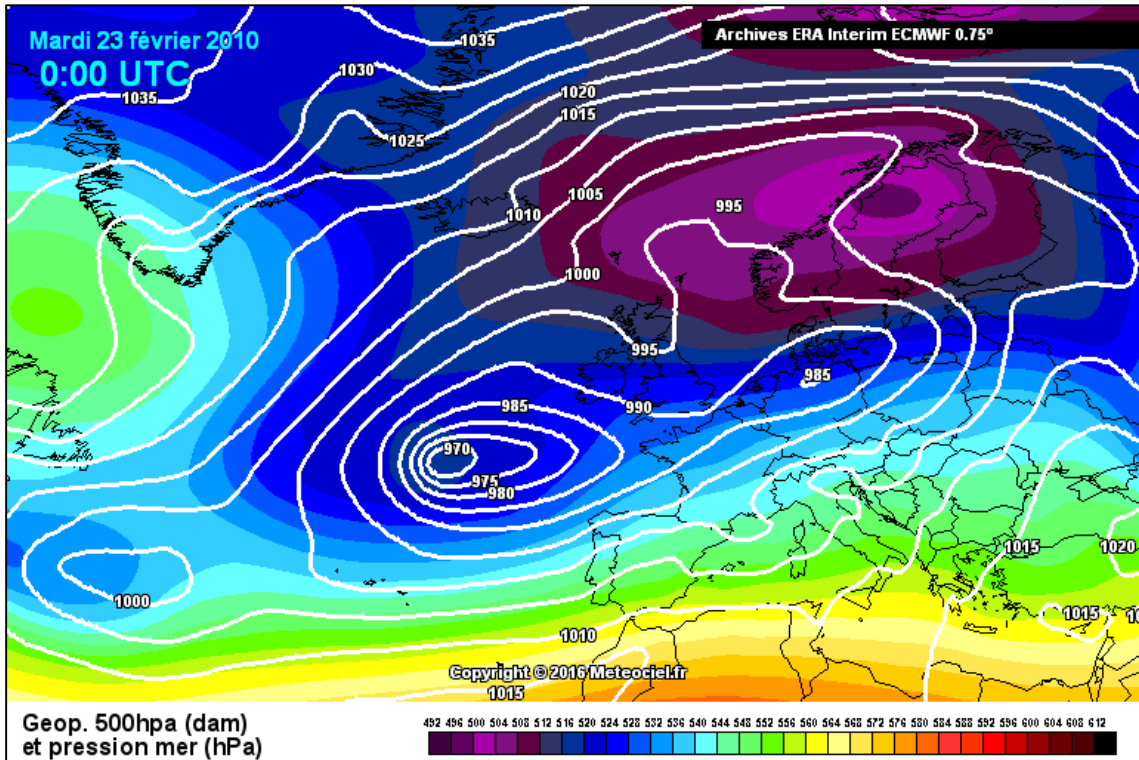
La estación pluviométrica localizada en Los Villares registró entre los días 22 y 23 de febrero una precipitación de 76,4mm repartidos del siguiente modo: 22: 30,4mm, 23: 46mm. Estas precipitaciones se sucedieron después de dos meses de lluvias persistentes en la cuenca de drenaje (230,9 mm registrados en diciembre y 128mm en enero en Los Villares) que pudo causar un incremento de la escorrentía de estas precipitaciones al encontrarse los suelos saturados. En el mapa sinóptico meteorológico del día 23 de febrero de 2010 (**figura 26b**) aparece una profunda borrasca situada al noroeste de la Península Ibérica que inyecta vientos húmedos del suroeste en la zona de estudio. Existe contraste entre masas de aire que favorece el desarrollo de tormentas asociadas a la borrasca.



**Figura 26a.** Fotografía obtenida por "Diario Jaén" donde se muestra el efecto de las inundaciones en el Puente de la Sierra.

Existen diferentes de artículos de prensa que detallan las consecuencias producidas sobre los núcleos poblacionales situados en el río Eliche. El diario "La Información" de Córdoba relata que los habitantes del Puente de la Sierra fueron desalojados a primera hora de la mañana por la

crecida de caudal del río Eliche, evitando que los daños fueran mayores. Se produjeron daños en algunos inmuebles e infraestructuras de esta zona residencial (figura 26a).



**Figura 26b.** Configuración sinóptica meteorológica del día 23/02/2010 a las 1 de la madrugada. Se aprecia una borrasca profunda al noroeste de la Península. Fuente: [10](#).

## IV.2. Cambios morfológicos del Río Eliche

Los cambios morfológicos se muestran a continuación comparando pares de ortofotografías entre diferentes fechas comprendidas entre 1956 y 2013. Estos cambios se analizan siguiendo la corriente fluvial.

### IV.2.1. Sector 1

#### IV.2.1.1. Cambios morfológicos entre 1956 y 1982

Este período de tiempo es el mayor considerado en el estudio, debido a la falta de vuelos fotogramétricos en este período. Se producen hasta cuatro cambios morfológicos que corresponden íntegramente a cortas de meandros del río.

Los desplazamientos del cauce en este período son de 40,1 metros hacia el sursureste para la zona 1; 64 metros hacia el sur para la zona 2; 61,6 metros hacia el sureste para la zona 3 (**1, 2 y 3 en la figura 27**, respectivamente). En la zona 4 el cambio de la morfología fluvial implica un cambio del trazado del río en un sector de 510 metros, pasando de ser meandriforme a ser rectilíneo. Esta variación del trazado conlleva el estrangulamiento de 3 meandros cuyos desplazamientos son de 11,7 metros hacia el norte en el primer meandro, 45,3 metros hacia el sureste en el segundo y 32,3 metros hacia el sur sureste en el tercero.

#### **IV.2.1.2. Cambios morfológicos entre 1982 y 1985**

No existen cambios morfológicos en el trazado del río Eliche considerado entre los años 1982 y 1985. Durante este período no existen crecidas relevantes en la cuenca de drenaje del río Eliche.

#### **IV.2.1.3. Cambios morfológicos entre 1985 y 2002**

Durante los años 1985 y 2002 los cambios morfológicos se asocian a los efectos de erosión lateral en los meandros, produciendo desplazamientos pequeños y un aumento de curvatura de algunos meandros. En este período se producen los eventos del año 1987, 1989 y 1996.

Se han contabilizado dos meandros desplazados debido a este proceso: El primer meandro (**1 en la figura 28**) se ha desplazado 17,1 metros hacia el noroeste. El segundo meandro (**2 en la figura 28**) ha migrado 17,4 metros hacia el sureste respecto a la ortoimagen del año 1985.

En este período se realiza el encauzamiento de un tramo de 710 metros del río Eliche (zona seleccionada **en amarillo sobre la figura 28**) debido a la gran

urbanización levantada cerca del río entre el 1985 y el 2002 con el fin de evitar que las inundaciones causen daño en las nuevas edificaciones.

#### **IV.2.1.4. Cambios morfológicos entre 2002 y 2007**

Durante los años 2002 y 2007 se observan desplazamientos menores en el río Eliche asociados a la erosión lateral de los meandros, que incrementan su curvatura. No existen durante este período crecidas relevantes en la cuenca de drenaje del río Eliche.

En la ortofoto de 2007 se observa un gran aumento de la vegetación próxima al río respecto al año 2002, causado por la ausencia de crecidas de importancia durante este período.

Se han identificado desplazamientos de dos meandros durante estos años, uno de ellos (**zona 1 en figura 29**) ya había sufrido desplazamiento durante el período anterior. Sobre la ortoimagen del año 2002, la zona 1 se ha desplazado 11,6 metros hacia el noroeste y la zona 2 (**ambas referencias sobre la figura 29**) se ha movido 9,2 metros hacia el noroeste.

#### **IV.2.1.5. Cambios morfológicos entre 2007 y 2009**

En este período de dos años se produce un gran dinamismo en el sector considerado del río Eliche como se puede ver **en la figura 30**. Se aprecian efectos de erosión lateral y especialmente estrangulamiento de meandros.

La vegetación de ribera decrece considerablemente respecto a la ortoimagen del año 2007 probablemente debido a un evento de inundación en estos años que limpió el cauce. El evento puede ser el acaecido en mayo del 2008 pero esto se discutirá en el apartado V.

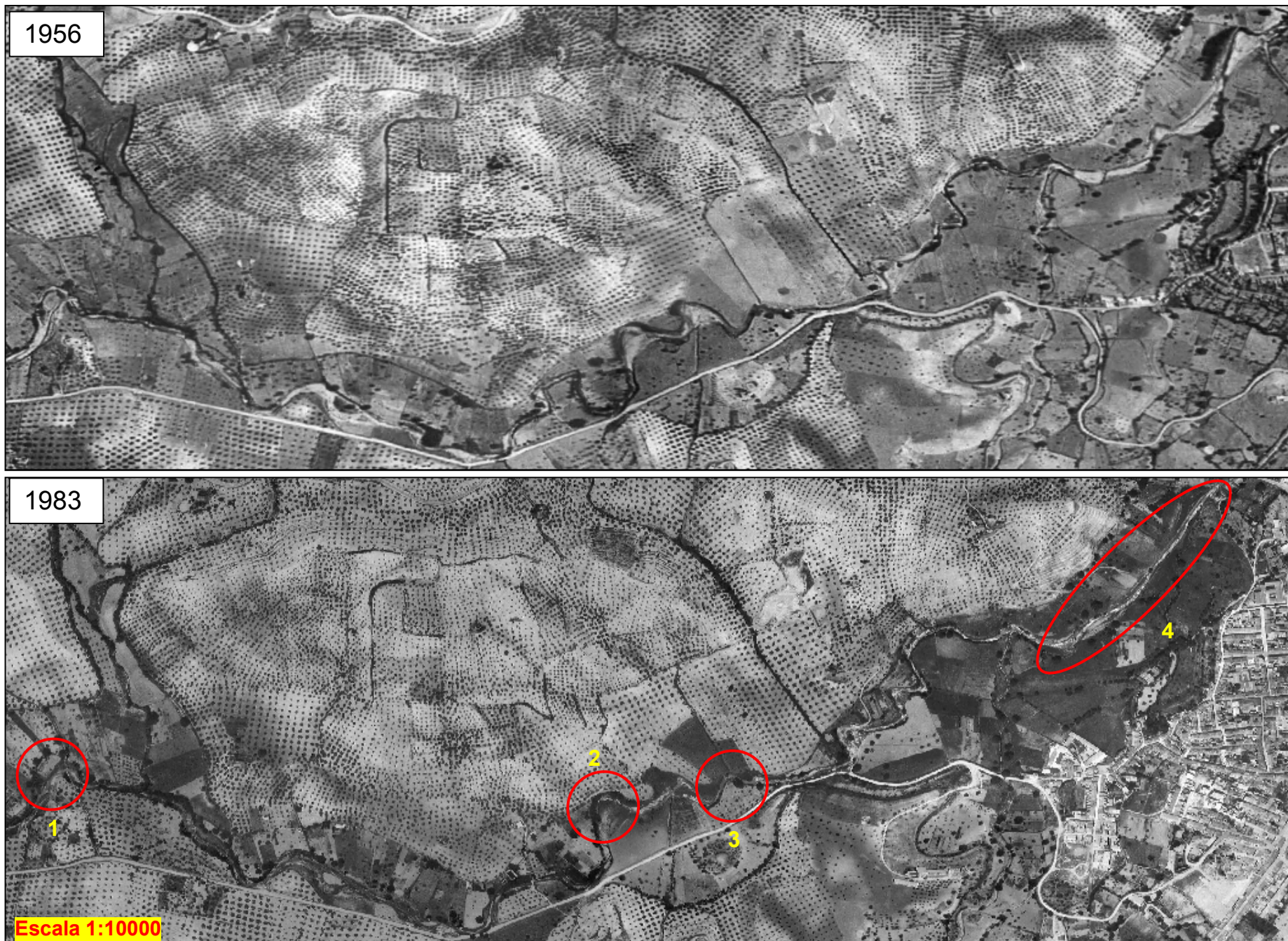


Figura 27. Comparativa entre las ortofotos del año 1956 (arriba) y 1983 (abajo).

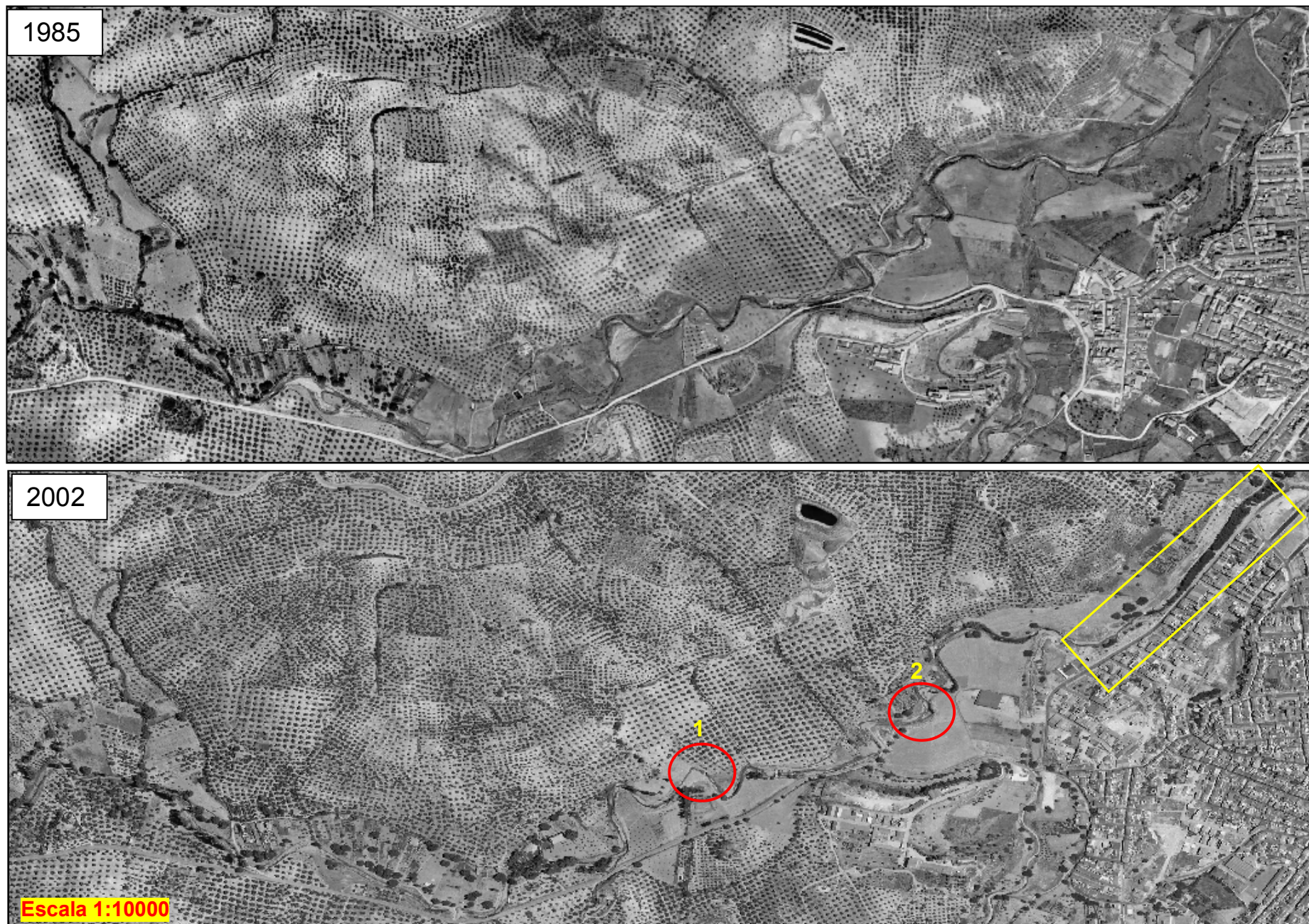


Figura 28. Comparativa entre las ortofotos del año 1985 (arriba) y 2002 (abajo).

Se han seleccionado las zonas de cambios respecto a la ortoimagen del año 2007 en la segunda imagen de la **figura 30** mediante un recuadro, y siendo enumeradas.

- La zona seleccionada 1 presenta un desplazamiento máximo de 3,5 metros hacia el sur del margen derecho del río Eliche debido a procesos de erosión lateral del margen.
  
- En la zona 2 se produce un estrangulamiento de un meandro que causa un desplazamiento de 63,5 metros hacia el sursureste. Se observa en la ortoimagen del 2008 que el río discurre por ambos canales por lo que la migración del río no se ha completado aun en la fecha de captura de la misma.
  
- En la zona 3 podremos observar otro proceso de corta de meandro en una fase menos desarrollada que en la zona 2 ya que se observa que en el momento de toma de la ortoimagen el río transcurre por el mismo cauce que en el año 2007. La corta pudo ocurrir en un evento de crecida entre ambas fotografías que causó un desplazamiento del cauce de 45,2 metros hacia el norte. La erosión del cauce no fue suficiente como para que el río abandonara su curso en condiciones normales.
  
- En la zona 4 existe otro proceso de estrangulamiento del meandro presente en la ortoimagen del 2007. Se encuentra en el mismo estadio que el meandro de la zona 3, ya que el río en condiciones normales todavía discurre por el trazado meandriforme. Esta corta está relacionada con un evento de alto caudal del río Eliche que causó un desplazamiento del cauce de 45 metros hacia el sureste en el transcurso del mismo, recuperando su curso meandriforme cuando disminuyera el caudal.

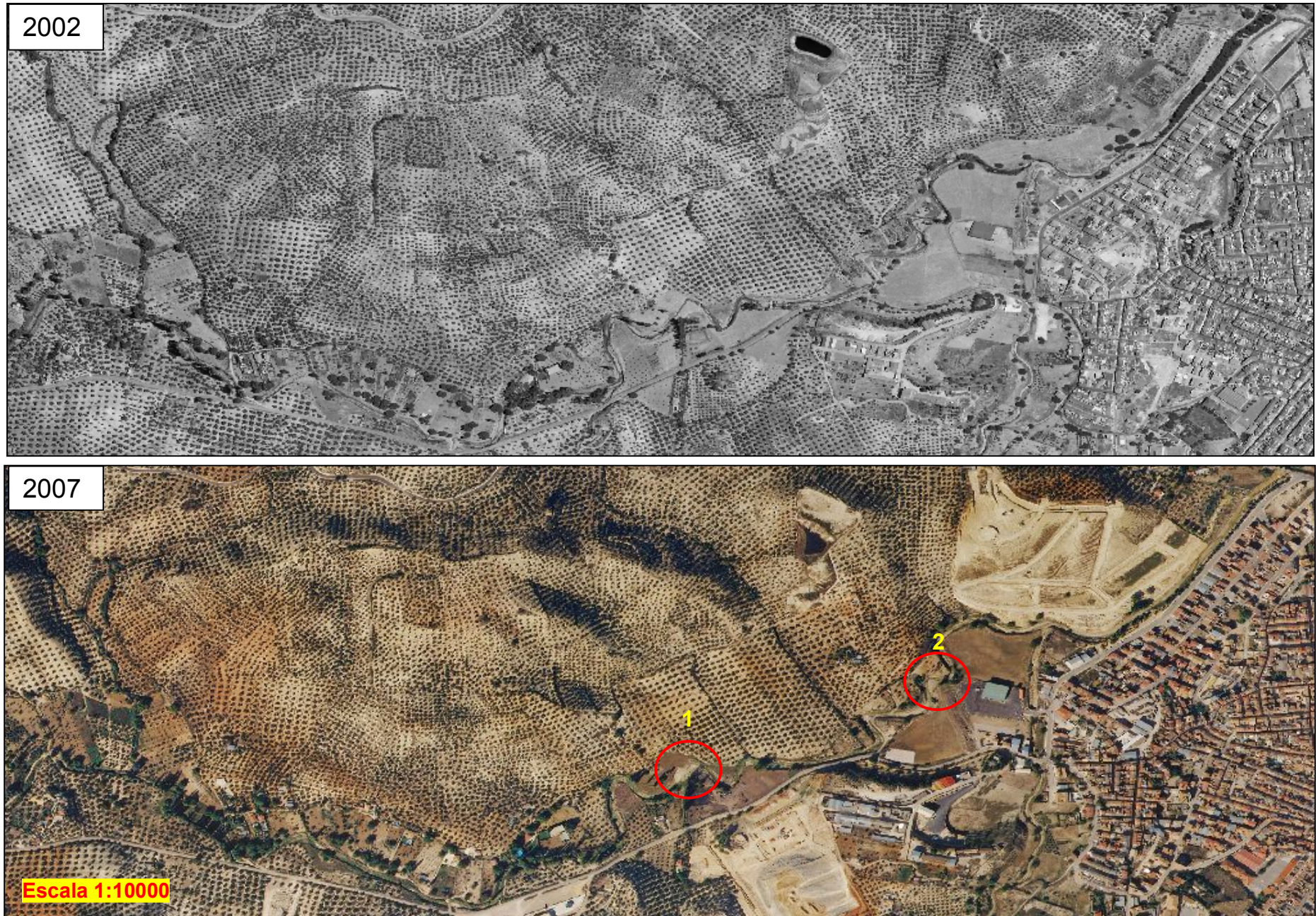


Figura 29. Comparativa entre las ortofotos del año 2002 (arriba) y 2007 (abajo) del cauce del río Eliche.



Figura 30. Comparativa entre las ortofotos del año 2007 (arriba) y 2009 (abajo) del cauce del río Eliche.

#### **IV.2.1.6. Cambios morfológicos entre 2009 y 2013**

Durante este período continúa el gran dinamismo del río Eliche debido a procesos de erosión lateral de márgenes y a la finalización del proceso de estrangulamiento de los meandros comentados en la etapa anterior. Durante estos años se produjo el evento de inundación del 23 de febrero de 2010.

Respecto a la ortoimagen del año 2009, la vegetación de ribera no se desarrolla durante estos años debido a la recurrencia de eventos de alto caudal como 2010 y medio caudal como los años 2012 y 2013.

En la **imagen 2 de figura 31** se seleccionan las zonas de cambio, enumerándolas para su fácil identificación.

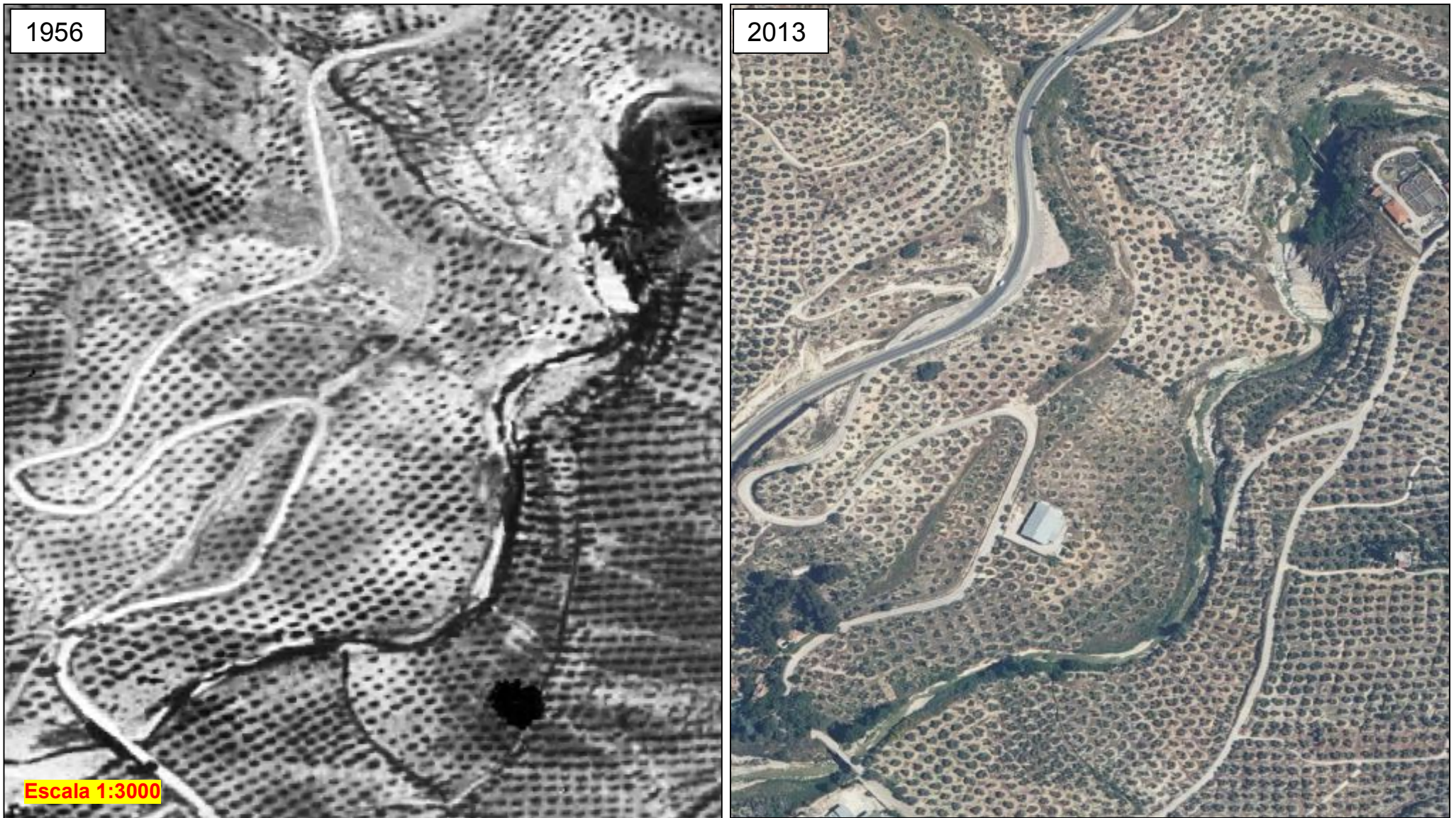
- En la zona 1 se aprecian los efectos de un fuerte erosión lateral del margen que produce un desplazamiento máximo del cauce hacia el sur de 32,8 metros.
- En la zona 2 y 3 se completa el proceso de migración del cauce iniciado en la fase anterior, abandonando el trazado meandriforme que presentaba en el año 2007.
- La zona 4 presenta un aumento de la curvatura del meandro respecto al año 2009. El río mediante un proceso de erosión lateral en el margen externo del meandro se desplaza 9,3 metros hacia el noroeste.

#### **IV.2.2. Sector 2**

El sector 2 considerado no presenta cambios morfológicos de ningún tipo entre 1956 y 2013, por lo que se ha mantenido estable durante, mínimo, durante los últimos 57 años considerados en este análisis (**figura 32**).



**Figura 31.** Comparativa entre las ortofotos del año 2009 (arriba) y 2013 (abajo) del cauce del río Eliche.



**Figura 32.** Sector 2. Comparativa entre las ortofotos del año 1956 (izquierda) y 2013 (derecha) del cauce del río Eliche.

### IV.3. Reconstrucción paleohidrológica

#### IV.3.1. Análisis morfológico del río Eliche

Se encontraron diferentes estructuras presentes en el tramo considerado en este análisis.

- Cauce con morfología en Step-pool

La sección situada aguas arriba del Puente Bajo (**figura 33**) presenta una morfología en Step-Pool.



**Figura 33.** Morfología en Steep-Pool del Río Eliche. Imagen tomada en el Puente Bajo hacia aguas arriba.

Este tipo de morfología consiste en el desarrollo de peldaños longitudinales similares a una escalera en el cauce de un curso fluvial. Estos peldaños se

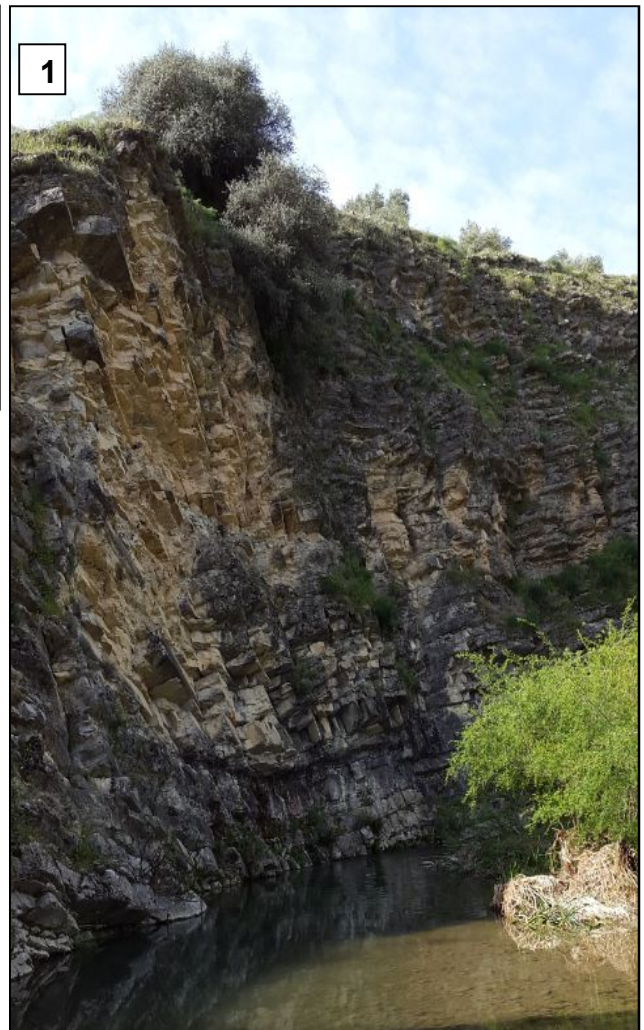
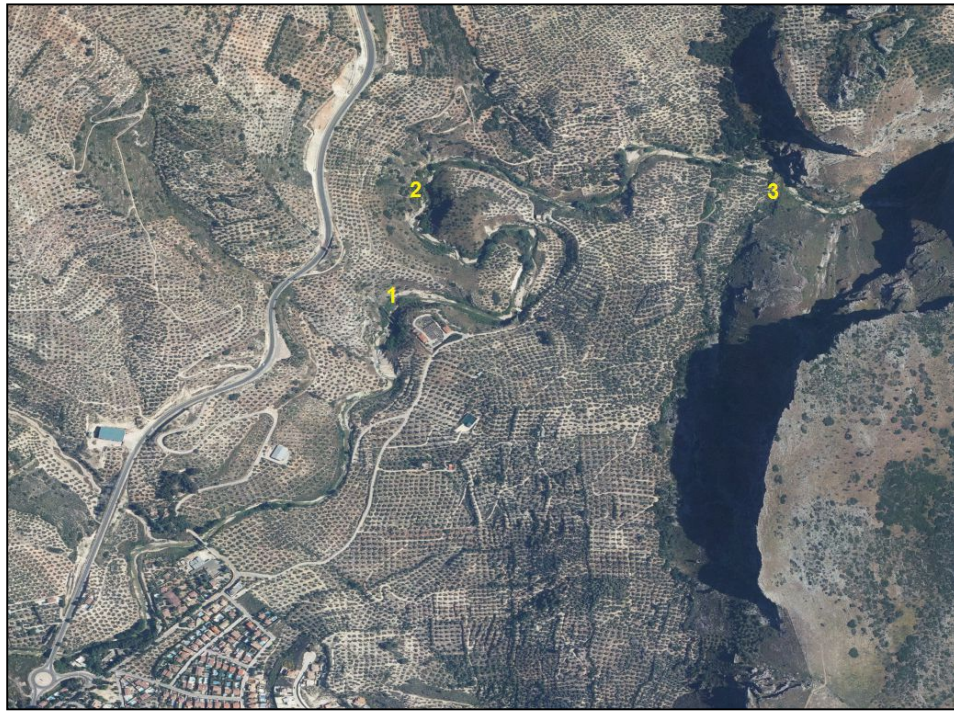


de las antidunas, las partículas más gruesas que se transportan mediante carga de fondo se frenan debajo de la cresta de la antiduna. El material fino transportado por el curso fluvial se encuentra con el material más grueso frenado en la antiduna, quedando imbricado en el material más grueso y fijado en el cauce. Esta conjunción de materiales de diferente granulometría forma un armazón de gran resistencia que solo puede deshacerse en el caso de producirse un evento de inundación de mayor magnitud al que ha formado esta morfología. Debido a esto, la presencia de una morfología en Steep-Pool es un indicativo de un cauce estable, donde las variaciones morfológicas y orográficas del cauce son escasas o nulas.

- Zonas de estrechamiento: Contracciones y expansiones

El río Eliche salva en su transcurso tres zonas de estrechamiento situadas entre la localidad de Los Villares y el núcleo poblacional del Puente de la Sierra, donde se dan procesos de compresión del flujo de agua. En estas zonas la anchura del cauce disminuye notablemente y la pendiente se incrementa. A la salida de estas zonas el río Eliche aumenta el ancho del canal y se produce una expansión del flujo.

En la siguiente imagen se identifican los estrechamientos identificados (e imágenes de los mismos (**figura 35**))



**Figura 35.** Zonas de estrechamiento del río Eliche (imagen superior). Zona 1 (esquina inferior-derecha), zona 2 (esquina inferior izquierda) y zona 3 (centro-izquierda).

### IV.3.2. Evidencias de inundación del río Eliche

En la búsqueda de evidencias o marcas que se preservaron sobre el cauce, las infraestructuras o sobre la vegetación de momentos de crecida o inundación se han encontrado diferentes registros de diferente tipología que se exponen a continuación.

#### IV.3.2.1. Marcas estructurales

- Evidencia 1: En el puente Bajo aparece un daño en la estructura del mismo situado en el lado que se encuentra en el sentido opuesto del flujo. Esta marca puede identificarse como una marca de inundación causada por el impacto de un objeto flotante que transportaba el flujo de agua en el momento de la crecida. Esta marca se considera una evidencia del nivel máximo de agua que ha alcanzado el agua en un episodio determinado (**figura 36**).

La altura de la evidencia se midió con el distanciómetro LEICA S910 registrándose a una altura de 6,29 metros sobre la superficie del cauce.

- Evidencia 2: En una caseta de bombeo de aguas (construida en 2007), situada a la salida del citado estrechamiento 1 **en la figura 35**, se muestra la marca del sedimento fino en el lateral de la misma. El sedimento fino en suspensión que transportaba la inundación quedó engarzado gracias a la rugosidad que presenta la pared de la caseta. Esta marca se considera una evidencia del nivel máximo de agua que ha alcanzado el agua en un episodio determinado (**figura 37**).

La medición con el distanciómetro LEICA S910 obtuvo una altura de 3,26 metros.

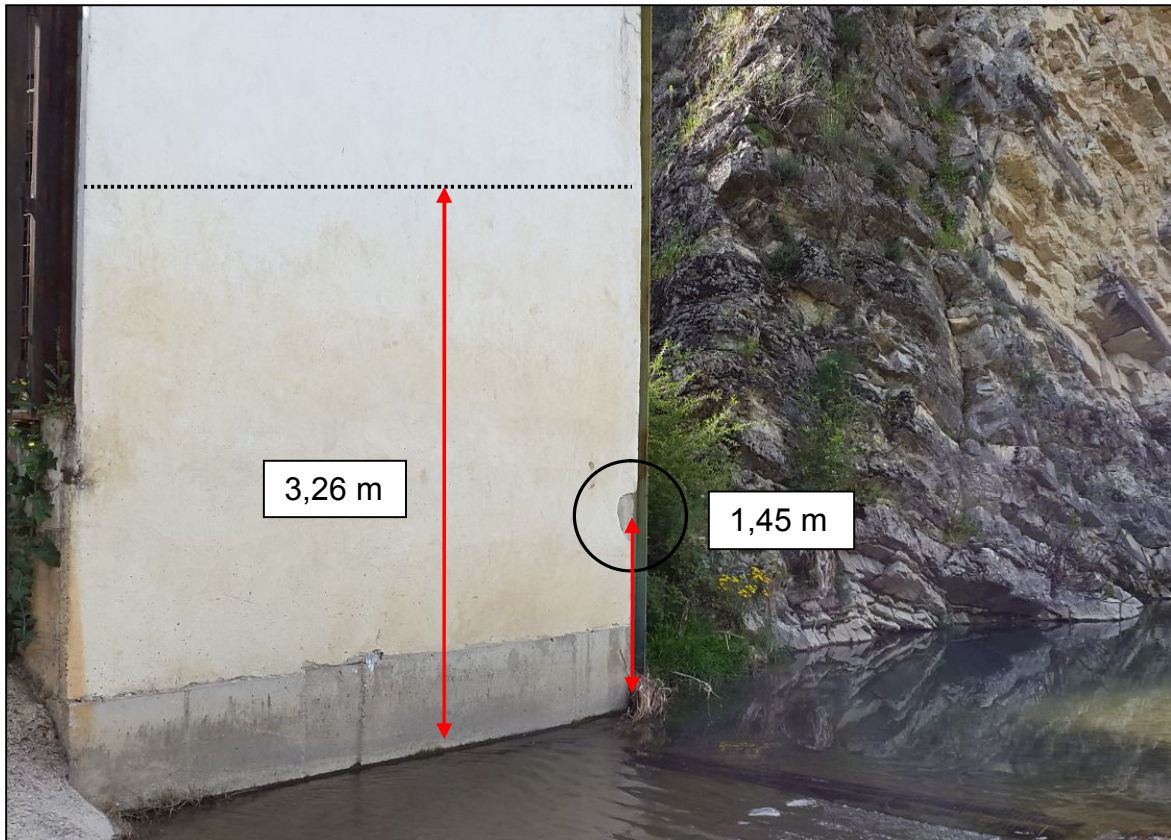


**Figura 36.** Evidencia 1: Daño en la estructura del puente Bajo situado a 6,29 metros sobre la superficie del cauce. Se incluye la referencia de la altura de 2 metros medida con un metro respecto al lateral del cauce.

- Evidencia 3: En la misma caseta de bombeo de la evidencia anterior, aparece en una altura inferior un daño en la estructura de la misma en el lado que causa oposición al flujo de agua. Esta marca está probablemente causada por el impacto de un objeto flotante que transportaba el río en el momento de la crecida (**figura 37**).

La medición de la altura de esta evidencia con el distanciómetro LEICA S910 arrojó una altura de 1,45 metros sobre la superficie del cauce.

Esta marca se corresponde con un evento diferente al de la evidencia anterior, aunque este tema se desarrollará en el apartado V.



**Figura 37.** Evidencias 2 y 3: Marca a 3,26 m del sedimento fino sobre la pared de la caseta de bombeo. Daño en la pared de la caseta producido por un impacto a 1,45 metros de la superficie del cauce.

#### **IV.3.2.2. Registros Geológicos**

- Evidencia 4: Unos metros aguas abajo del Puente Bajo se encontraron depósitos de sedimento fino en un lateral del río Eliche. Dicho sedimento se depositó durante una pequeña crecida del curso de agua (**figura 38**).

Debido a la pequeña altura de esta evidencia, no se midió la altura de la misma ya que no se corresponde con una crecida extraordinaria.



**Figura 38.** Evidencia: 4: Depósito de sedimento acumulado en el margen derecho por una crecida ordinaria.

- Evidencia 5: En el margen izquierdo del río Eliche, cerca del Puente Bajo, se observa la acumulación anexa a un olivar de sedimento fino que transportaba el río Eliche durante una crecida, depositándose cuando la velocidad del flujo fue disminuyó para ello. Esta marca indica el nivel mínimo al que llegó el nivel de agua (**figura 39**).

La altura de la evidencia, medida con los datos LiDAR, es de 4,2 m sobre la superficie del cauce.

- Evidencia 6: Sobre un campo de olivares próximo al río Eliche, se observa la acumulación de sedimento fino que transporta el curso fluvial durante un momento de crecida. Este sedimento se depositó cuando la velocidad del flujo disminuyó para ello e indica el nivel mínimo al que llegó el nivel de agua.

En este caso no se pudo medir la altura sobre el cauce debido a la distancia a la que se presentaba del mismo, que excedía el rango del distanciómetro. En su lugar se midió usando los ficheros LiDAR del año 2014 del Instituto Geográfico Nacional. Se obtuvo que la presencia del

sedimento fino se encuentra a una altura de 2,4 m sobre la superficie del cauce (**figura 40**).



**Figura 39.** Evidencia 5: Sedimento fino situado en el margen izquierdo del Río Eliche situado a 4,2 metros respecto al cauce.



**Figura 40.** Evidencia 6: Sedimento fino situado en un olivar a una altura de 2,4 m respecto al cauce, depositado por una crecida del río Eliche.

### IV.3.2.3. Marcas dendrológicas

- Evidencia 7: Unos metros aguas abajo del puente Bajo se observa basculamiento de la vegetación presente en el cauce del río en sentido del flujo. Esta basculación se produce en momentos de crecida donde la velocidad y el esfuerzo de la corriente fluvial es mayor, venciendo a la vegetación que se encuentra a su paso a su favor. Por lo tanto nos informa de la altura mínima a la que ha llegado el flujo de agua. En este caso el basculamiento está causado por una crecida menor y reciente, ya que su altura es baja y está presente sobre especies arbustivas de corta edad (**figura 41**).

Debido a importancia menor de esta evidencia no se midió la altura de la misma con el distanciómetro LEICA S910.



**Figura 41.** Evidencia 7: Basculamiento de la vegetación a favor del sentido del flujo.

- Evidencia 8: En la misma zona donde se presentó la evidencia anterior se evidencia la presencia de broza enganchada sobre la vegetación. Esta broza se presenta a una altura similar al basculamiento anterior, por lo que ambas evidencias podrían ser del mismo evento (**figura 42**). La vegetación ejerce una barrera al flujo de agua, pudiendo quedar atrapados por su presencia elementos que transporta el curso fluvial, tales como plásticos, broza... etc. Por lo tanto este tipo de evidencias nos informa del calado mínimo que ha presentado un evento de crecida del caudal.



**Figura 42.** Evidencia 8: Broza adherida a la vegetación de ribera

Debido a importancia menor de esta evidencia no se midió la altura de la misma con el distanciómetro LEICA S910.

- Evidencia 9: En la zona próxima a la estación de bombeo de aguas, donde se ha localizado la evidencia 2 y 3, se encuentra broza acumulada sobre la vegetación anexa al río Eliche debido al obstáculo que generan a la corriente fluvial (**figura 43**). Esta evidencia nos indica un nivel mínimo de crecida. Es posible que pertenezca a la misma crecida menor que el que causó las evidencias 4, 7 y 9 ya que se presenta a altura similar y la broza acumulada es muy abundante.

Debido a ser una evidencia de menor importancia, no se midió la altura con el distanciómetro.



**Figura 43.** Evidencia 9: Broza abundante acumulada sobre la vegetación de ribera.

- Evidencia 10: Como evidencia 10 se ha considerado los testimonios de testigos de los eventos de inundación de mayor magnitud en los últimos 25 años. La cota de agua que relataron se midió con el distanciómetro, obteniéndose una altura de la lámina de agua de 4,5 metros sobre la superficie del cauce.

### IV.3.3. Modelización 1D

El coeficiente de Manning ( $n$ ) se halla en simulaciones 1D no solo observando la vegetación, sino que se añaden una serie de correcciones en base a las características del cauce (**ecuación 7**). Algunas de estas modificaciones son debidas a la presencia de obstrucciones, sinuosidad del cauce, irregularidades superficiales... etc.,

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m \quad \mathbf{7)}$$

siendo:

$n$ : coeficiente de Manning (adimensional)

$n_b$ : valor base del coeficiente de Manning (cauce recto, uniforme y liso)

$n_1$ : factor de corrección debido a irregularidades superficiales en el cauce

$n_2$ : factor de corrección en base a las variaciones de forma y tamaño del cauce

$n_3$ : valor que implementa el efecto de las obstrucciones

$n_4$ : valor que incorpora el efecto de vegetación

$m$ : factor de corrección en función de la sinuosidad del cauce

Se toma como valor base del coeficiente de Manning ( $n_b$ ) el empleado en el cálculo de la simulación 2D, siendo de 0,025. Para calcular la contribución que realizan las diferentes correcciones, se realiza un ajuste del coeficiente base incrementado su valor hasta que los datos de velocidad y caudal coinciden, en cierta parte, con los obtenidos mediante la simulación 2D (**tabla 7**).

<b>n</b>	<b>V</b>
0,025	12,3
0,03	10,23
0,035	8,8
0,04	7,7

**Tabla 7.** Velocidades obtenidas para diferentes ajustes del coeficiente de fricción.

Asumiendo que los resultados para la velocidad en el modelo 2D son correctos, ya que tiene en cuenta la geometría real del cauce, se ha procedido a comparar los resultados del modelo 1D con los del 2D. Para el mismo coeficiente de fricción (0,025) el modelo 1D predice una velocidad de 12,3 m/s que es irrealista. De hecho el número de Froude asociado a esta velocidad es de 1,85 que es propio de arroyos de alta montaña más que del cauce de un río. Por tanto, se ha procedido a incrementar el coeficiente de Manning de manera progresiva.

A medida que el coeficiente de fricción aumenta de 0,025 a 0,04 los valores de la velocidad disminuyen progresivamente desde 12,3 m/s hasta 7,7 m/s. Tal y como se mostrará en la siguiente sección, la velocidad media en el modelo 2D varía en el intervalo de 7-8 m/s. Así pues, el coeficiente de Manning corregido debe tomar el valor de 0,04. Nótese que es casi el doble que el coeficiente base de la vegetación.

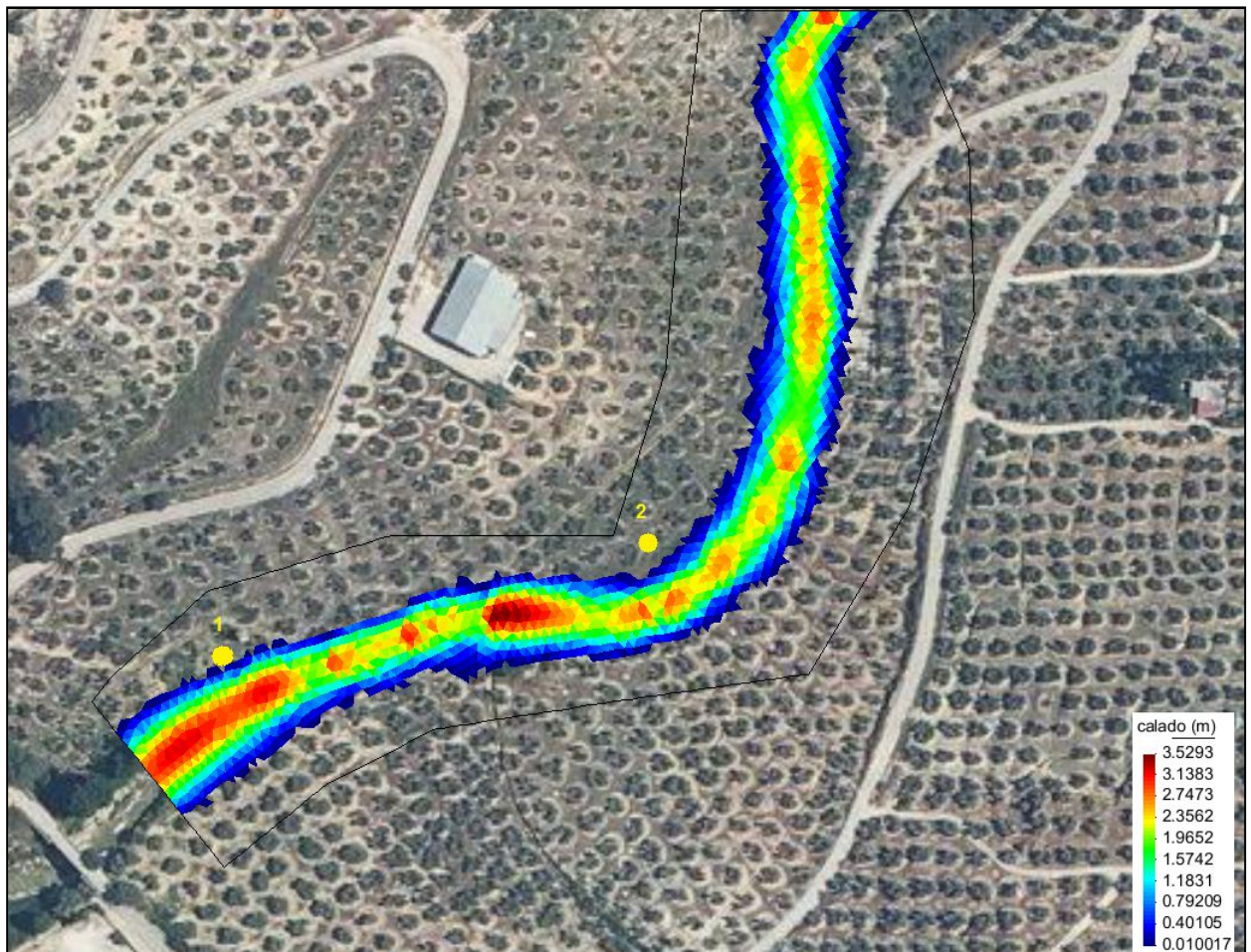
Se concluye que la geometría del cauce ejerce un control hidráulico sobre el flujo. Los modelos 1D no son óptimos para este escenario físico pues inducen incertidumbres del 59% en la estimación de la velocidad. Por ello se ha procedido a realizar las simulaciones 2D descritas a continuación.

#### **IV.3.4. Simulación 2D**

##### **IV.3.4.1. Simulaciones estacionarias**

Los resultados obtenidos por las seis simulaciones estacionarias (de 100 a 600 m<sup>3</sup>/s) se obtuvieron mediante IBER a través de mapas donde se representaban diferentes variables fluidas como, por ejemplo, el calado.

#### IV.3.4.1.1. Caudal: 200 m<sup>3</sup>/s



**Figura 44.** Calado (en metros) resultante para un caudal de 200 m<sup>3</sup>/s. Se indica la localización de: 1. Evidencia 5. 2. Evidencia 10.

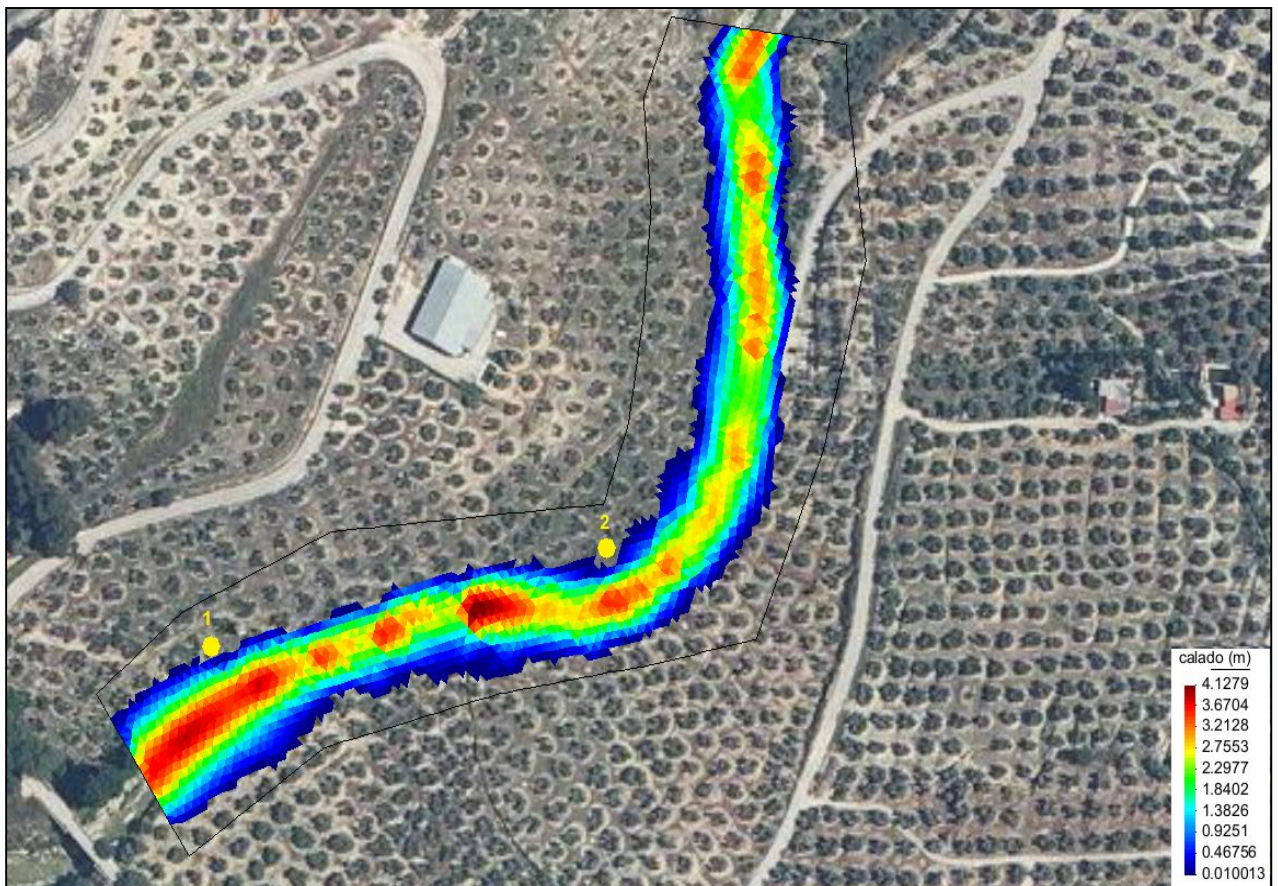
Inyectando un caudal máximo de 200 m<sup>3</sup>/s en la simulación observamos como el calado que presenta la crecida (**figura 44**) se encuentra por debajo de la altura a la que se presentan las evidencia 5 y la evidencia 10.

La evidencia 5 (localización **en punto 1 de la figura 44**) se encuentra emergida ya que se presenta a un calado mínimo de 4,2 metros, siendo el simulado de 3,04 metros. La evidencia 10 (**punto 2 de la figura 44**) está fuera de la

superficie de inundación debido a que se encuentra a una altura de lámina de agua de 4,5 metros sobre la superficie del cauce, siendo el calado obtenido de 2,83 metros. Por lo tanto el evento que causó estas dos evidencias presentó un caudal máximo de 200 m<sup>3</sup>/s.

#### IV.3.4.1.2. Caudal: 300 m<sup>3</sup>/s

Al incrementar el caudal hasta 300 m<sup>3</sup>/s se observa como la cota de agua que presenta la crecida (**figura 45**) sigue encontrándose por debajo de las evidencias 5 y 10.



**Figura 45.** Calado (en metros) para un caudal de 300 m<sup>3</sup>/s. Se indica la localización de: 1. Evidencia 5. 2. Evidencia 10.

Al igual que en el caso anterior, la evidencia 5 (localización **en punto 1 de la figura 45**) se encuentra por encima de la cota de agua resultante en la modelización ya que se presenta a un calado mínimo de 4,2 metros siendo el

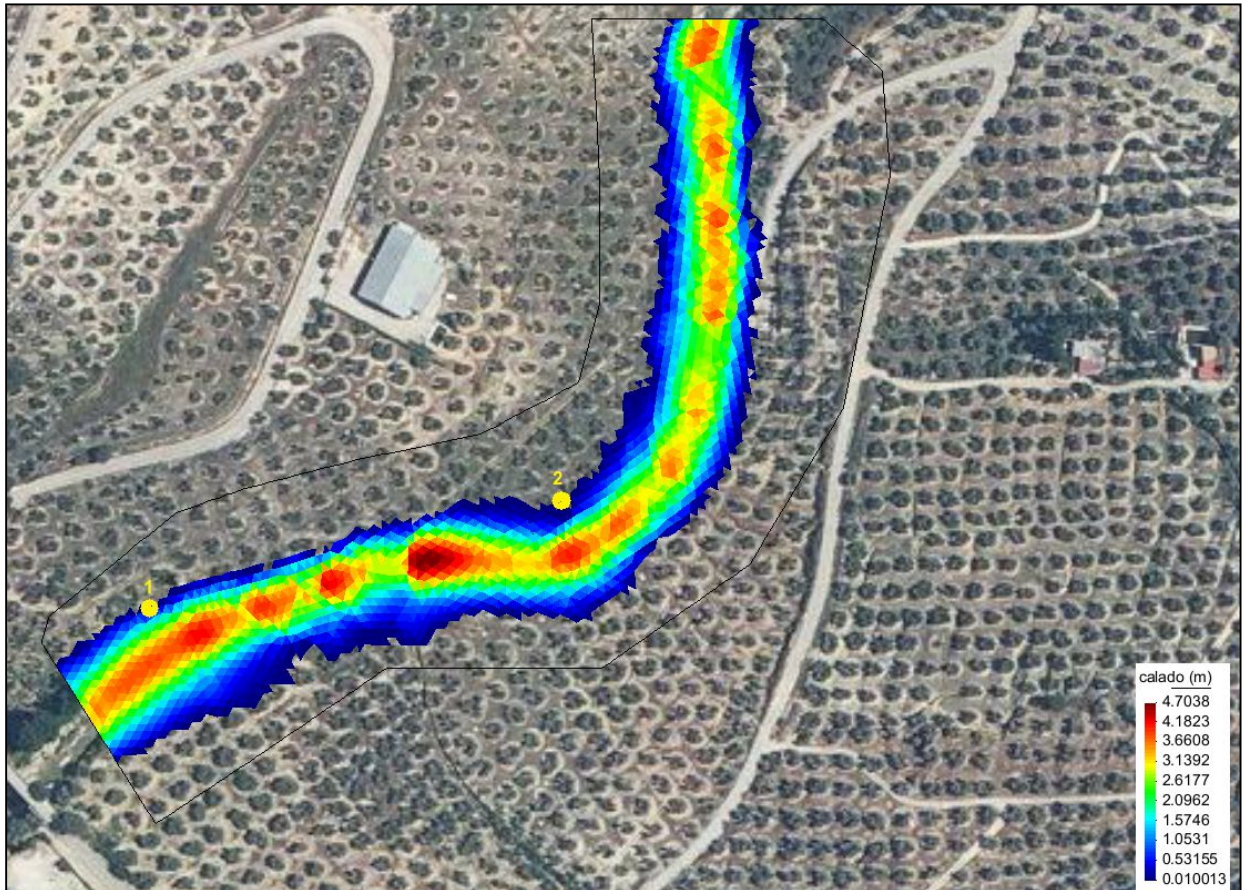
simulado de 4,05 metros. Por otro lado, el registro 10 (**punto 2 de la figura 45**) se localiza en una posición superior a la superficie de inundación. Dicha evidencia se encuentra a una altura de lámina de agua de 4,5 metros sobre la superficie del cauce, siendo el calado obtenido mediante la simulación de 3,55 metros.

#### IV.3.4.1.3. Caudal: 400 m<sup>3</sup>/s

Analizado el mapa de calado para una inundación de 400 m<sup>3</sup>/s se observa que la cota de la evidencia 5 simulada (**punto 1 de la figura 46**) se encuentra por encima de la misma. El calado para un caudal de 400 m<sup>3</sup>/s es de 4,4 metros encontrándose dicho registro a 4,2 metros sobre la superficie del cauce. Para la evidencia 10, la superficie de inundación se encuentra próxima a esta marca, presentándose en la modelización un calado de 4,35 metros cuando la evidencia se encuentra a 4,5 metros.

Los valores tan próximos de calado entre las evidencias y la simulación hacen pensar que el evento de estudio tuvo un caudal de, aproximadamente, 400 m<sup>3</sup>/s.

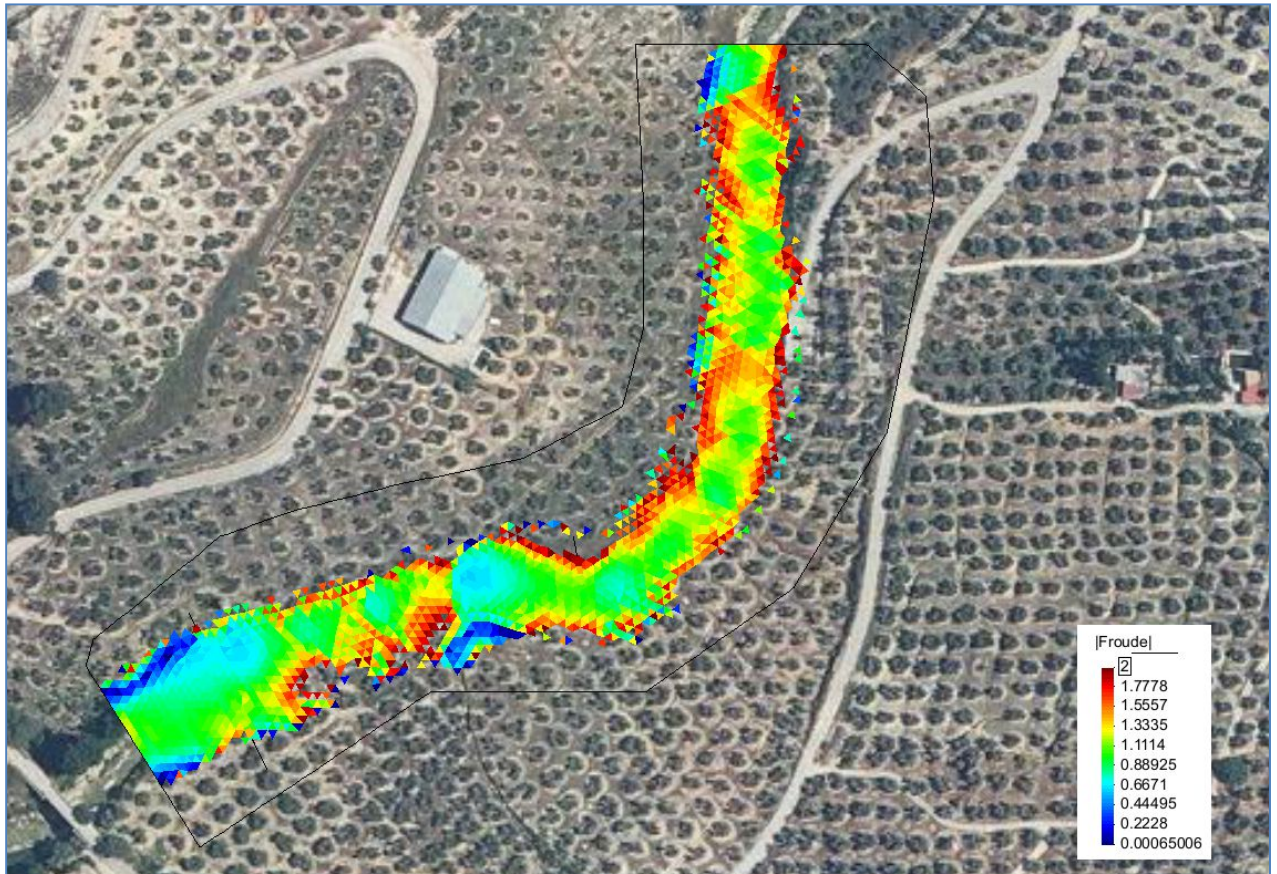
El número de Froude para un caudal de 400 m<sup>3</sup>/s muestra un resultado acorde a un flujo supercrítico en la mayor parte de la sección (**figura 47**) al encontrarse sus valores en la misma por encima de 1. Por lo tanto, se cumple la premisa de partida que permitió imponer condiciones de flujo supercrítico en las condiciones de contorno (apartado III.2.5.). Las simulaciones estacionarias realizadas con correctas. Únicamente se observa flujo subcrítico en zonas minoritarias.



**Figura 46** Calado (en metros) obtenido para un caudal de 400 m<sup>3</sup>/s. Se indica la localización de: 1. Evidencia 5. 2. Evidencia 10.

#### IV.3.4.1.4. Caudales: 500 m<sup>3</sup>/s y 600 m<sup>3</sup>/s

La cota de agua hallada para un caudal de 500 y 600 m<sup>3</sup>/s se encuentra notablemente por encima de la cota a la que se sitúan las evidencias 5 y 10. Se considera que estos caudales están muy por encima de los ocurridos en el evento que dio lugar a las mismas.



**Figura 47.** Número de Froude obtenido para un caudal de  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ , similar al evento de estudio.

#### IV.3.4.2. Simulaciones transitorias

Se mostrarán los resultados únicamente del modelo 1 de hidrograma con objeto de no redundar contenido debido a que los valores de las variables fluidas en el segundo modelo son similares, variando únicamente el instante de tiempo de la simulación.

##### IV.3.4.2.1. Modelo 1 de hidrograma.

Se muestran los resultados de la simulación transitoria en diferentes pasos de tiempo durante la simulación. En este caso se ha considerado 4 instantes de tiempo a un tiempo (s) de 1200, 3600, 6000 y 8400.

- En el instante de tiempo 1200 s (o 20 min) desde el inicio de la crecida, la lámina de agua alcanza un valor máximo de 3,1 metros. La superficie del agua

se mantiene dentro el cauce, sin producirse desbordamiento en la llanura de inundación. Aproximadamente, la distancia a las márgenes laterales es de 1 m (figura 48).

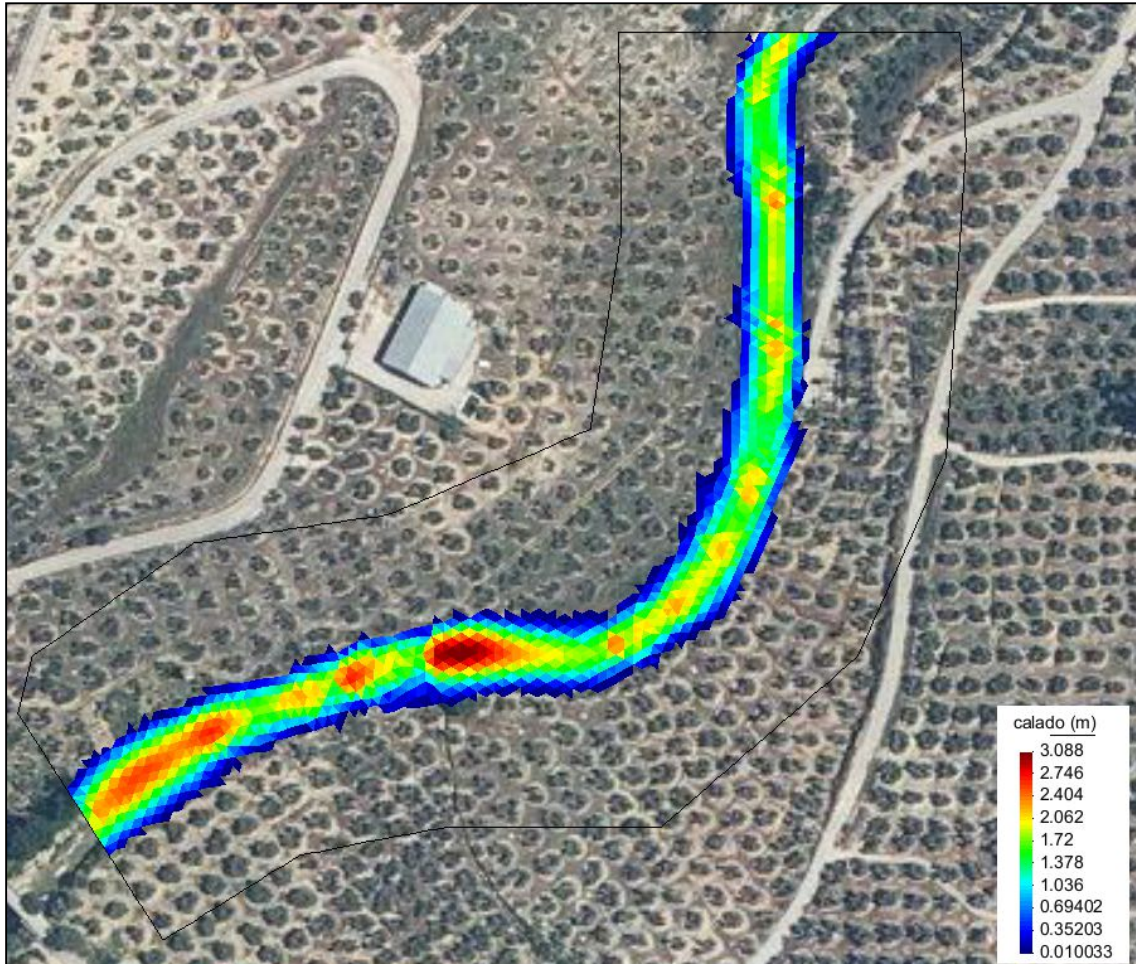


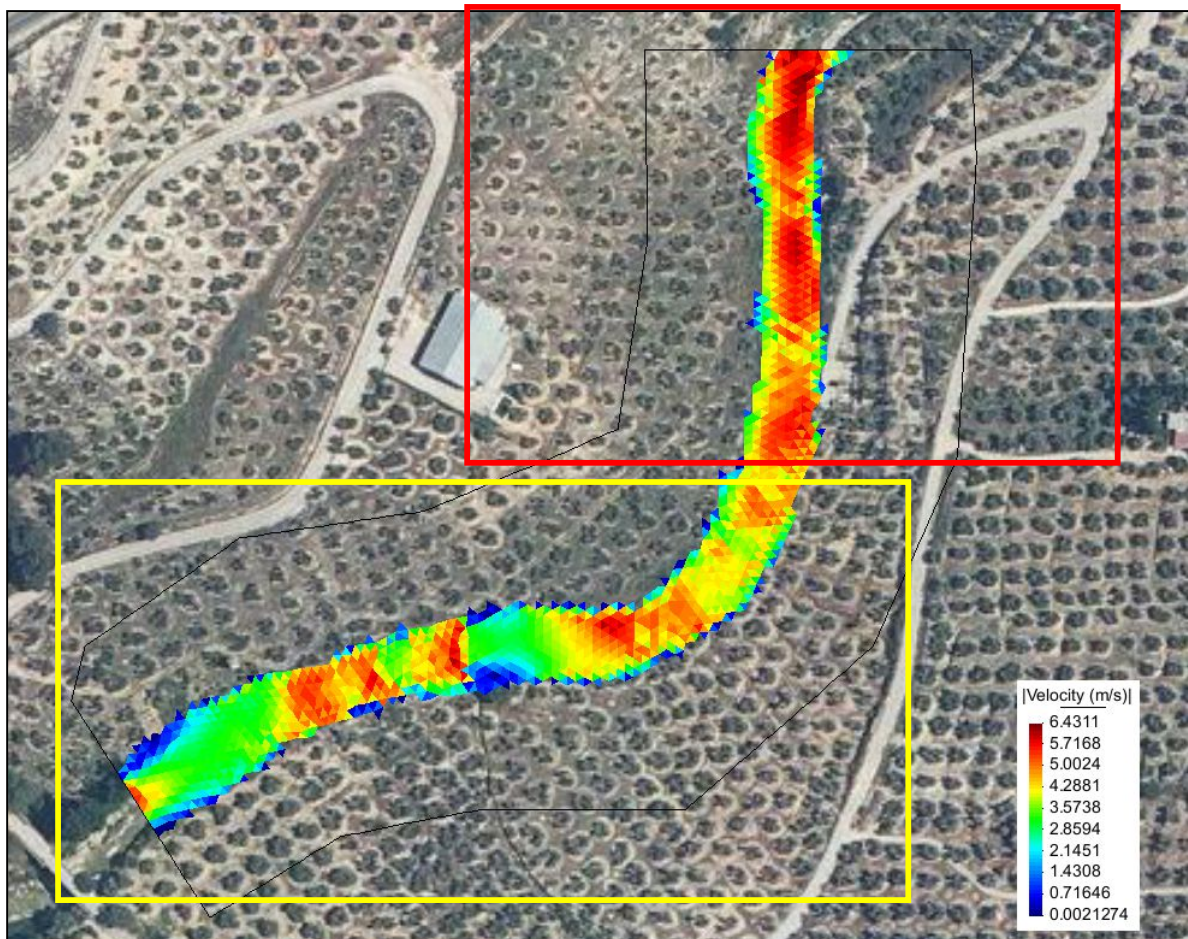
Figura 48. Calado (m) en el instante de tiempo 1200 s.

La velocidad del agua es mayor en el tramo final de la sección debido a la mayor pendiente existente. Se observan zonas localizadas (ejemplo 1 y 2) donde la velocidad del flujo es mayor, causado por falta de resolución del modelo digital de elevaciones empleado. Se aprecian dos zonas situadas a la sombra del flujo, donde la velocidad es menor.

En el primer tramo considerado (zona **en amarillo en figura 49**) la velocidad presente, descontando las zonas de mayor velocidad relacionadas con la falta de resolución del MDE, presenta unos valores entre 3 y 4 m/s. Utilizando el diagrama de Hjulström para estas velocidades, se concluye que dominan los

procesos de erosión de partículas de hasta tamaño de grano de 10 cms. Esto justifica la ausencia de partículas finas de sedimento en las fotografías mostradas en el apartado IV.3.2. y demuestra el realismo de las simulaciones numéricas.

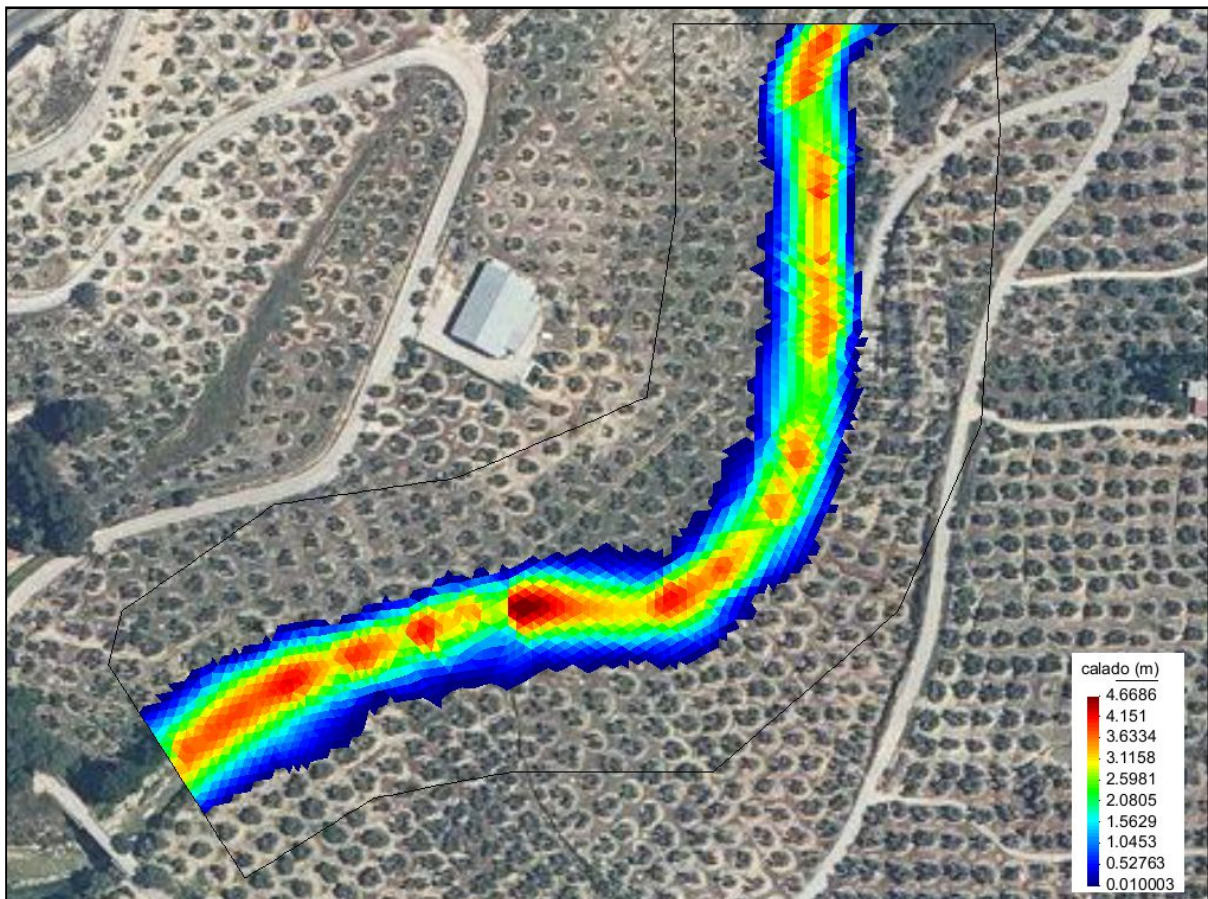
El segundo tramo (zona **en rojo en figura 49**) presenta una mayor pendiente que implica una aceleración del flujo de agua, obteniéndose velocidades medias entre 5 y 6 m/s. En este tramo la erosión de las partículas se extiende hasta tamaños de grano de hasta 30-40 cms. Al igual que en el tramo anterior este resultado está de acuerdo con la ausencia de evidencias sedimentológicas en el lecho del cauce.



**Figura 49.** Velocidad del flujo (m/s) en el instante de tiempo 1200 s.

- Transcurridos 3600 s (1hr) desde el inicio de la crecida se alcanza el pico máximo de descarga con  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ . El curso fluvial desborda por sus márgenes

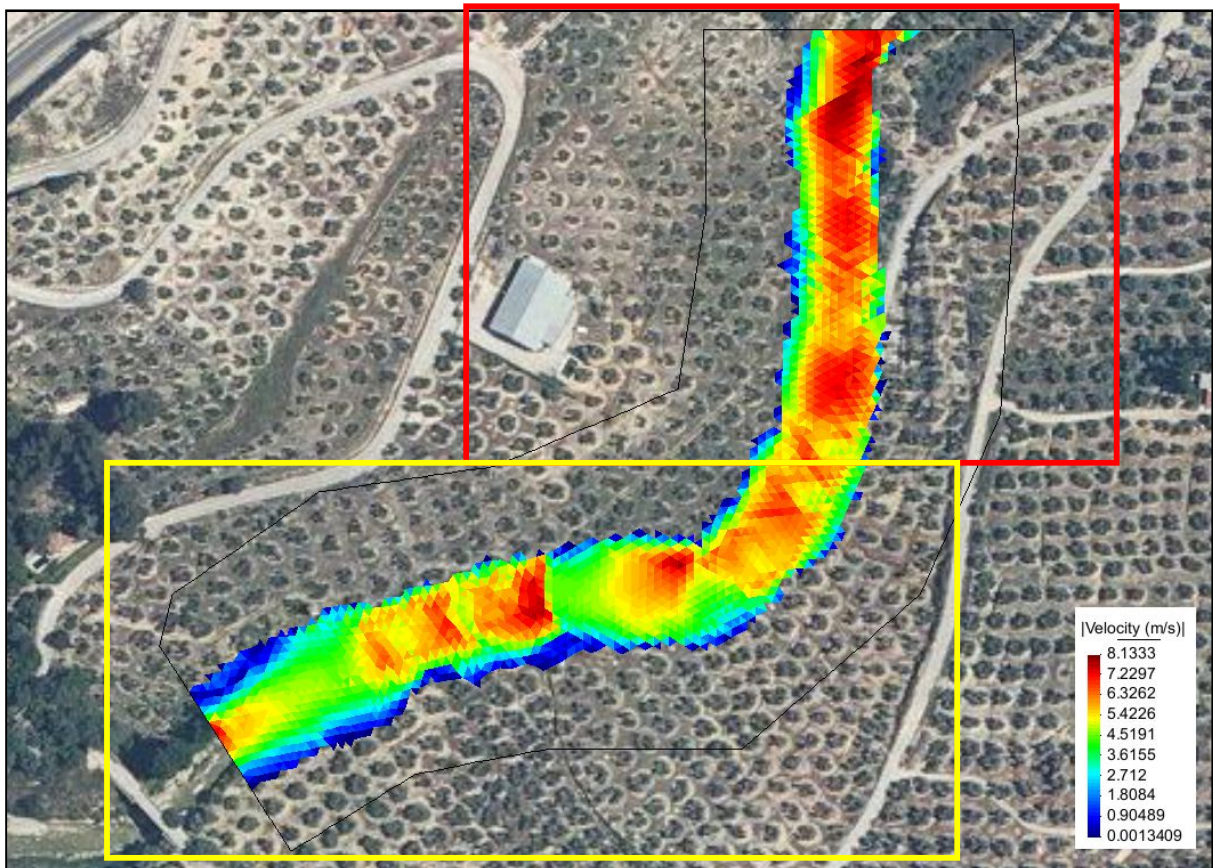
e inunda parte de los campos de cultivo de olivar que se encuentran anexos a él. Se alcanza una altura de lámina de agua superior a 4 metros (**figura 50**). El agua alcanza la cota donde se forman posteriormente las evidencias (5 y 10) utilizadas como referencia para realizar la calibración de las simulaciones estacionarias.



**Figura 50.** Calado (m) en el instante de tiempo 3600 s, correspondiente al pico de descarga.

La velocidad del agua alcanza su máximo durante el pico de descarga, siendo mayor en la parte final de la sección debido a su pendiente. En el primer tramo considerado (zona **en amarillo en figura 51**) la velocidad presente en el tramo presenta unos valores entre 5 y 6 m/s. El segundo tramo (zona **en rojo en figura 51**) presenta una mayor pendiente que implica una aceleración del flujo de agua, obteniéndose velocidades medias entre 6 y 7 m/s.

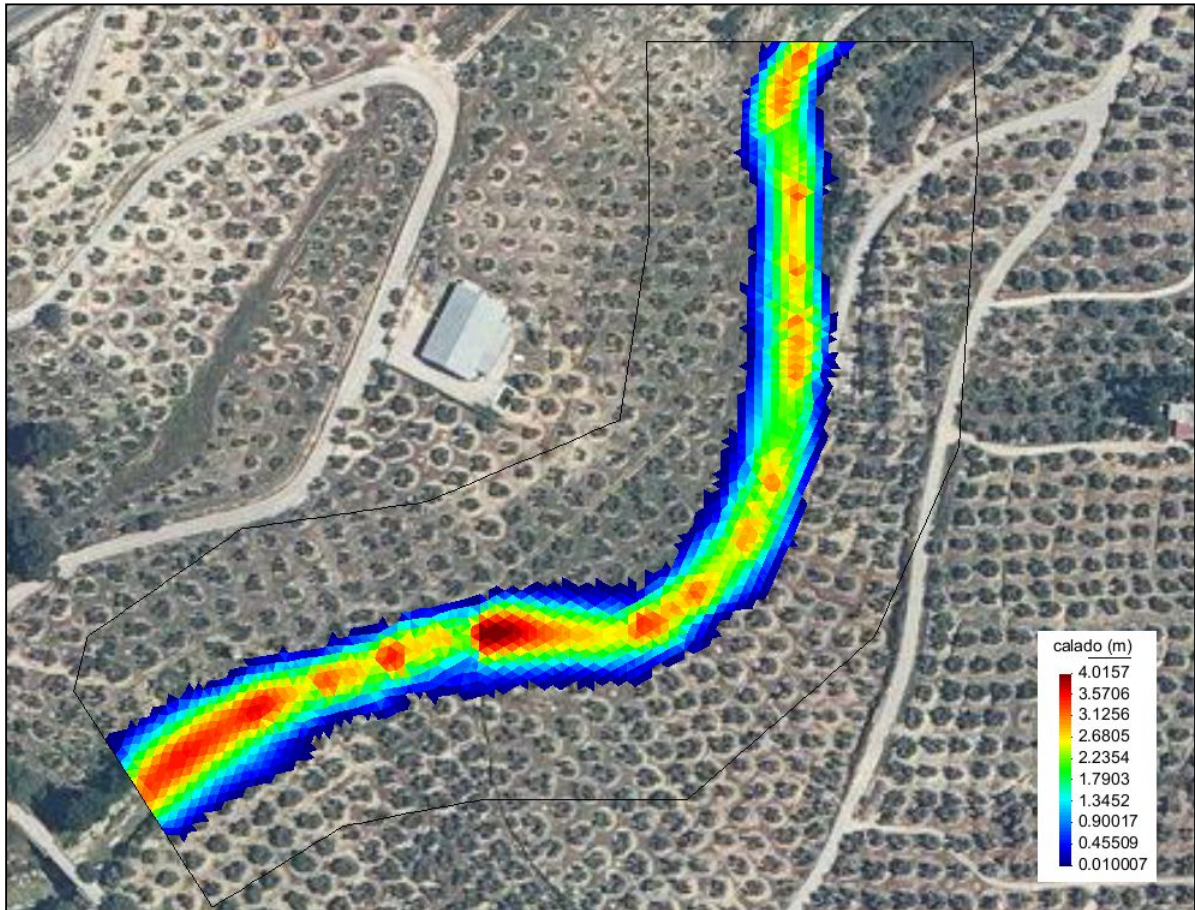
Es el momento de mayor erosión y transporte de carga sedimentaria por el curso fluvial, pudiendo acoger tamaños de grano de hasta 50 cms. Los procesos de migración de canal y de erosión lateral de los márgenes en zonas donde los materiales no son consolidados son muy efectivos, no siendo el caso de esta zona concreta.



**Figura 51.** Velocidad (m/s) del flujo de agua en el instante de tiempo 3600 s. correspondiente al pico de descarga.

Una vez rebasado este tiempo, el caudal empieza a descender al disminuir la aportación al curso fluvial.

- Pasados 6000 s desde el inicio de la crecida, el caudal ya ha descendido notablemente y con ello la altura de la lámina de agua, representada en la **figura 52**, pasando de superar los 4 metros en el pico de crecida a encontrarse aproximadamente 1 metro por debajo 40 minutos después. El agua regresa al cauce, desbordando solo en tramos localizados.



**Figura 52.** Calado (m) en el instante de tiempo 6000 s.

La velocidad del agua disminuye notablemente respecto al pico de descarga, siendo en torno a 5-6 m/s de media en la sección (**figura 53**). La erosión y el transporte de sedimento continúa siendo proceso dominante, dándose hasta tamaños de grano de 40 cms. En los márgenes laterales empieza a retirarse el agua que llegó durante el pico de crecida, disminuyendo su velocidad. Esta disminución permite que se deposite sedimento de diferente granulometría, progresivamente de menor tamaño, sobre ellos. Debido a este proceso se depositó el sedimento que forma la evidencia 5 que utilizamos como referencia para elaborar las simulaciones 2D.

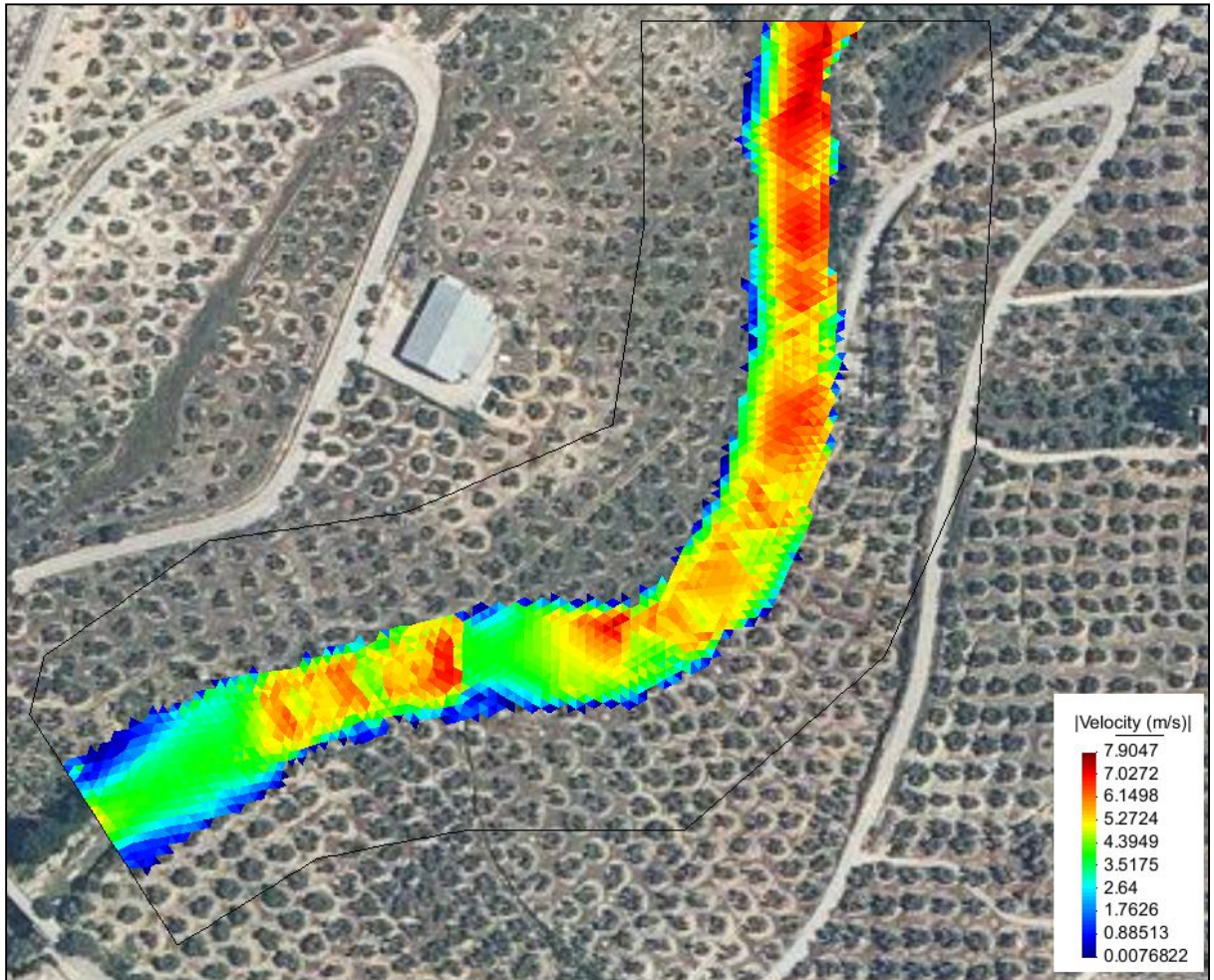


Figura 53. Velocidad del flujo (m/s) en el instante de tiempo 6000 s.

## V. Discusión y conclusiones.

### V.I. Discusión

Los eventos de crecida con una magnitud importante en la cuenca del río Eliche se han producido desde el inicio de la época instrumental (1974) en los años 1981, 1987 (dos crecidas en este año: agosto y diciembre), 1989, 1996, 2008 y 2010. El período de recurrencia se encuentra, aproximadamente, en 5 años aunque como se observa es algo teórico ya que pueden presentarse dos eventos en el mismo año. El episodio de inundación de mayor magnitud ha sido el producido en agosto de 1996, siendo un evento excepcional desde 1950 ya que posee el récord de precipitación máxima en 24 horas desde esa fecha.

El mecanismo de formación de estos eventos en la cuenca del río Eliche está relacionado con la presencia de lluvias persistentes asociadas al paso de sistemas de bajas presiones con un carácter geográfico de mayor ámbito (inundaciones regionales) como con la formación de tormentas locales (que dan lugar a *fast-flood* o inundaciones repentinas). No existe un carácter estacional debido a que ambos procesos abarcan la totalidad del año, pudiendo producirse una inundación en la cuenca en cualquier época del año. En invierno solo se producen eventos relacionados con el paso de borrascas y en verano con la formación de tormentas, confluyendo la probabilidad de que se produzcan los dos eventos conjuntos en la época de primavera y otoño.

Las inundaciones repentinas o *fast-flood* son las que tienen mayor potencial de causar daños en la cuenca debido a su carácter espontáneo y su escaso potencial de predicción (situado en torno a un margen de horas o minutos), no así los episodios que afectan a un área mayor cuya predicción se puede establecer durante días previos aumentando la eficacia de la alerta a la población.

El riesgo por inundación se incrementa notablemente debido a la presencia de núcleos residenciales ilegales presentes en la llanura de inundación del río

Eliche, como Vega Redonda o Puente de la Sierra, construidos a final del siglo XX y sobre todo entre los años 2001 y 2008, habiéndose producido numerosos daños materiales durante este período.

El dinamismo morfológico del río Eliche al paso por la localidad de Los Villares tiene una fuerte componente zonal, en función de las características del cauce. En el tramo situado aguas arriba a esta localidad existen multitud de cambios morfológicos en los últimos 50 años como cortas de meandros o desplazamientos del cauce por procesos de erosión lateral, produciéndose los más importantes entre los años 2007 y 2009. Estos cambios están relacionados por los eventos de inundación, siendo sus mecanismos de control el caudal de dicho evento y la carga sedimentaria que transporta (Aubert et al., 2016). Una mayor presencia de sedimentos en el flujo de agua durante la inundación de mayo 2008 respecto a otra de mayor magnitud como la de agosto 1996 produjo una mayor variación morfológica del río Eliche. Estos cambios morfológicos confieren un riesgo sobre las edificaciones ilegales levantadas durante finales del siglo XX, y principios del siglo XXI (especialmente, el paraje Vega Redonda).

Por otra parte, una vez que el río Eliche atraviesa la localidad de Los Villares, existe el desarrollo de estructuras en el cauce como, por ejemplo, la morfología en Step-Pool que confieren estabilidad al mismo, provocando que se encuentre en carácter estacionario desde, al menos, desde el año 1956.

Las evidencias de inundación registradas en el río Eliche provienen de diferentes eventos, observándose marcas que se pueden asociar con eventos de magnitud superior de como el de agosto de 1996 (Ejemplo evidencia 1 o evidencia 5), mayo de 2008 (evidencia 2 y 6). Claramente, los registros más abundantes son los causados por las crecidas más recientes, aunque sean de entidad menor (ejemplo evidencia 4, 7, 8 y 9) desapareciendo los más antiguos con el paso del tiempo. La escasez de evidencias de inundación en la zona está relacionada con el carácter agrícola de la cuenca, que impide que se conserven en las zonas vulnerables más alejadas del cauce debido a tareas como el laboreo, paso de maquinaria agrícola... etc.

La calibración de los cálculos de modelización 1D y 2D mediante los datos obtenidos a través de las evidencias paleohidrológicas de inundación resulta fundamental para obtener resultados verídicos y fiables en secciones no aforadas como la que se estudia en este trabajo fin de máster. Los estudios oficiales de inundación no tienen en cuenta esta metodología de trabajo, por lo que infieren un error notable en los cálculos posteriores en secciones de estas características, por lo que se debería implementar este sistema de trabajo con el fin de obtener resultados en la modelización más realistas que ayuden en la toma de decisiones en temáticas de Planificación Hidrológica.

La crecida simulada bidimensionalmente mediante el software IBER (calibrada en base a las evidencias existentes de ese evento) corresponde al evento del día 15 de agosto de 1996 obteniéndose un caudal pico de, aproximadamente, 400 m<sup>3</sup>/s. Este caudal se encuentra por encima del estimado en los estudios de inundabilidad de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir en este tramo para eventos situados en 250 m<sup>3</sup>/s para un período de retorno de 100 años (fuente [11](#)) por lo que reafirma de la necesidad de reconsideración de estos estudios incluyendo datos de evidencias paleohidrológicas para la estimación del caudal en zonas no aforadas.

La modelización 2D indica que se alcanzaron calados mayores a 4 metros en la sección de estudio y velocidades de hasta 7 m/s. El flujo dominante de este evento fue mayoritariamente supercrítico. La escasa anchura del cauce, inferior a 10 metros en la sección considerada, provoca que las láminas de agua durante los eventos de inundación sean más altas de lo que cabe pensar en un momento anterior. Las velocidades notables de flujo provocan procesos de erosión importantes en las secciones no consolidadas, que unido a las partículas de sedimento que transportan los arroyos y ríos tributarios, aportan una gran carga sedimentaria al río Eliche, depositando gran parte de ella en la zona de expansión de flujo situada aguas abajo de los Cañones, entre las urbanizaciones Puente de la Sierra y Puente Nuevo, generando problemas añadidos sobre estas zonas.

El uso de la modelización 1D no es apropiado para los estudios realizados en este tramo de estudio debido al control hidráulico que genera la geometría del cauce, produciendo incertidumbres del 59% en el cálculo de la velocidad, siendo la modelización 2D el método más realista para reproducir con menor error el comportamiento de estas crecidas.

## **V.II. Conclusiones**

1. El período de recurrencia de un evento de crecida importante en el río Eliche es de, aproximadamente, 5 años, pudiéndose producir en cualquier época del año.
2. El dinamismo morfológico del río Eliche presenta una componente zonal en función de las características del cauce. Estos cambios morfológicos se producen en momentos de crecida en función del caudal y de la carga sedimentaria que transporta el flujo.
3. La calibración de las modelizaciones 2D mediante el uso de los datos que aportan las evidencias paleohidrológicas es un método fiable para reducir el error de los cálculos y atribuir mas realismo a las variables fluidas obtenidas.
4. El caudal pico registrado en el evento del agosto de 1996 fue de aproximadamente  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  en la sección de estudio, con calados superiores a 4 metros y velocidades en torno a 7 m/s.
5. El uso de la modelización 1D no es adecuado en este tramo del río Eliche ya que genera mucha incertidumbre en el cálculo de las velocidades de flujo, siendo la modelización 2D el método más adecuado para emplearse en los estudios hidráulicos en esta zona.
6. Los organismos oficiales deben considerar el uso de las marcas paleohidrológicas en sus estudios de inundabilidad con el fin de

minimizar su error y que puedan ser usados como instrumentos de planificación hidrológica en base a la realidad.

## VI. Bibliografía

Aubert, G., Langlois, V., and Allemand, P. (2016). Bedrock incision by bedload: insights from direct numerical simulations. *Earth Surface Dynamics*, 4, 327–342, 2016.

Baker, V.R. (1987). Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. *Journal of Hydrology*, 96 (1987), pp. 79-99.

Bladé, E., Ceab, L., Coresteina, G., Escolanoc, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en Ingeniería*. 2014; 30(1):1–10.

Bodoque, J.M., Díez Herrero, A., Eguibar, M.A., Benito, G., Ruiz-Villanueva, V., Ballesteros-Cánovas, J.A. (2015). Challenges in paleoflood hydrology applied to risk analysis in mountainous watersheds – A review. *Journal of Hydrology*, 529 (2015); pp. 449–467.

Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York, pages 168-175.

Chuvieco, E. (2016). Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. *Ariel Ciencia*.

Dressler, R. F. (1978). New nonlinear shallow-flow equations with curvature. *Journal of Hydraulic Research*, 16(3), 205-222.

Grant, G.E., Swanson, F.J., and Wolman, M.G. (1990). Pattern and Origin of Stepped Bed Morphology in High-Gradient Streams, Western Cascades, Oregon. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol. 102, pp. 340-352.

Keller, J. B. (2003). Shallow-water theory for arbitrary slopes of the bottom. *Journal of Fluid Mechanics*, 489, 345-348.

Maderal, E.N., Valcarcel, N., Delgado, J., Sevilla, C., Ojeda, J.C. (2016). Automatic river network extraction from lidar data. *Commission WG VIII/4 - Water Resources*.

Maxwell, A.R., Papanicolaou, A.N. (2001). Step-pool morphology in high-gradient streams. *International Journal of Sediment Research*, Vol. 16, No. 3, 2001, pp. 380-390.

Milzow, C. (2004). The step-pool morphology of a steep mountain stream. Tesis doctoral.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2007). Inventario Nacional de Erosión de Suelos.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2007). Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.

Ortega Becerril, J.A. (2007). Paleocrecidas, avenidas recientes e hidroclimatología en la cuenca media y baja del río Guadiana. Tesis Doctoral. *Repositorio digital de la Universidad Complutense de Madrid (UCM)*.

Plaza, J.A. (2015). Dinámica fluvial del río Guadalbullón a su paso por las Infantas. *Repositorio de trabajos académicos de la Universidad de Jaén*.

Sánchez Arroyo, R., Sánchez Martínez, J.D. (2012). La transformación de las cuencas de los ríos Eliche y Jaén en un territorio-riesgo: dinámica y perspectivas. *Repositorio institucional de la Universidad de Almería*.

## **Agradecimientos**

A Patricio Bohórquez Rodríguez de Medina y a Fernando García García por la labor de tutorización durante la realización de este trabajo fin de máster.

## Anexo 1. Listado de referencias web

**Fuente 1:** Contexto físico de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir.  
(<http://www.chguadalquivir.es/la-demarcacion-hidrografica-del-guadalquivir>)

**Fuente 2:** Guía de georrecursos de Andalucía.  
([https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/ContenidosOrdenacion/ed\\_informacion\\_ambiental/PDF/Geodiversidad/Geodiversidad\\_y\\_Patrimonio\\_Geologico\\_Andalucia\\_2006/capitulo14.pdf](https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/ContenidosOrdenacion/ed_informacion_ambiental/PDF/Geodiversidad/Geodiversidad_y_Patrimonio_Geologico_Andalucia_2006/capitulo14.pdf))

**Fuente 3:** Mapa geológico MAGNA 50 (2º Serie), hoja 969.  
(<http://info.igme.es/cartografia/magna50.asp?hoja=969&bis=>)

**Fuente 4:** Sistema de Ocupación del Suelo en España (<http://www.siose.es/>)

**Fuente 5:** Especificaciones técnicas del distanciómetro LEICA S910.  
([http://www.leica-geosystems.es/downloads123/cp/disto/DISTO\\_S910/brochures/Leica%20DISTO%20S910%20Folder%20828429%200115\\_es.pdf](http://www.leica-geosystems.es/downloads123/cp/disto/DISTO_S910/brochures/Leica%20DISTO%20S910%20Folder%20828429%200115_es.pdf))

**Fuente 6:** Nasa Space Place. (<http://spaceplace.nasa.gov/>)

**Fuente 7:** Organización Meteorológica Mundial (OMM). (<http://www.omm.es/>)

**Fuente 8:** Sistema de Información del Anuario de aforos.  
(<http://sig.magrama.es/aforos/>).

**Fuente 9:** Centro de descargas del IGN  
(<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>)

**Fuente 10:** Portal web Meteociel (<http://www.meteociel.fr>)

**Fuente 11:** Memoria del Sistema Nacional de Cartografía de Suelos Inundables para los ríos Eliche, Quiebrajano y Jaén.

[http://www.chguadalquivir.es/documents/10182/61956/INFORME\\_CONSULTA\\_PUBLICA\\_AG048\\_AG049\\_AG051\\_AG52\\_06112014\\_MEMORIA.pdf/77501e34-018e-46c3-9fe5-430b329b2568](http://www.chguadalquivir.es/documents/10182/61956/INFORME_CONSULTA_PUBLICA_AG048_AG049_AG051_AG52_06112014_MEMORIA.pdf/77501e34-018e-46c3-9fe5-430b329b2568))

