

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ÁVILA

MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOTECNOLOGÍAS
CARTOGRÁFICAS EN INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

CURSO ACADÉMICO 2020-2021



VNiVERSiDAD
D SALAMANCA

**Uso extensivo de la tecnología
LiDAR pública en análisis de
inundabilidad. El caso del Guadalete.**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Presentado por: David Ríos Santana

Tutores: Susana Del Pozo y José Luis Molina

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. ELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	5
1.2. PRINCIPIOS DE LA TECNOLOGÍA LIDAR E INFORMACIÓN DISPONIBLE	6
1.3. OBJETIVOS DEL PRESENTE TRABAJO.....	9
2. ESTADO DEL ARTE.....	11
3. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO.....	12
3.1. MARCO GEOGRÁFICO	12
3.2. MEDIO BIÓTICO Y ABIÓTICO	14
3.2.1. CLIMATOLOGÍA	14
3.2.2. MEDIO BIÓTICO	16
3.2.3. MEDIO ABIÓTICO	18
4. ESTUDIO GEOMORFOLÓGICO	22
4.1. LOCAL DOMINANCE.....	22
4.2. SKY VIEW FACTOR	23
4.3. LOCAL RELIEF MODEL	24
4.4. RED RELIEF IMAGE MAP (RRIM) Y MORPHOMETRIC PROTECTION INDEX-RED RELIEF IMAGE MAP (MPI-RRIM):	25
4.5. RESULTADOS	26
5. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ESTUDIO HIDROLÓGICO	30
5.1. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO RACIONAL SEGÚN LA INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS 5.2-IC "DRENAJE SUPERFICIAL" MODIFICADO POR TÉMEZ.....	30
5.2. CÁLCULO DE LA SUPERFICIE DE LA CUENCA DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO	31
5.3. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN PARA LA CUENCA.....	33

5.4. CÁLCULO DEL UMBRAL DE ESCORRENTÍA.....	35
5.5. CÁLCULO DE CAUDALES DE CRECIDA EXTRAORDINARIA	41
6. ESTUDIO HIDRÁULICO	49
6.1. MODELO HIDRÁULICO IBER.....	49
6.2. TRATAMIENTO NECESARIO DEL MDS.....	50
6.3. RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN HIDRÁULICA.....	61
6.4. DESGLOSE DE RESULTADOS	72
6.5. CORRESPONDENCIA CON EL ESTUDIO GEOMORFOLÓGICO.....	84
6.6. CORRESPONDENCIA CON INUNDACIONES HISTÓRICAS.....	88
6.6.1. GRANDES INUNDACIONES DE 1917	88
6.6.2. ÚLTIMAS INUNDACIONES DE 2009/2010.....	97
7. CONCLUSIONES	107
8. PROPUESTAS DE MEJORA EN EL ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD A PARTIR DEL USO DE GEOTECNOLOGÍAS	112
9. BIBLIOGRAFÍA.....	113

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento se redacta dentro del marco académico suscrito al Máster en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura, siendo el mismo el Trabajo Fin de Máster necesario para la consecución de los objetivos del programa educativo.

La temática del documento girará en torno al uso extensivo de las Geotecnologías, y más concretamente, la tecnología *Ligth Detection And Ranging* (en adelante LiDAR) dentro de los análisis de inundabilidad, siendo la modelización topográfica del territorio uno de los hitos clave para la correcta obtención de resultados fieles y útiles, analizando el potencial y las limitaciones de los datos LiDAR en dichos resultados.

El entorno objeto de análisis elegido son los meandros del río Guadalete a su paso por Arcos de la Frontera, en Cádiz, siendo la residencia actual del postulante para la cual el mismo posee una serie de conocimientos del territorio que le pueden ayudar a contrastar los resultados.

Por otro lado, el elevado coste de captura de datos LiDAR hacen que los datos públicos hayan conseguido un papel protagonista dentro del desarrollo de análisis de inundabilidad tanto en el marco académico-investigador como en el marco privado-empresarial, por lo que a lo largo del documento se someterá a juicio la idoneidad de dichos datos y de las ediciones que sean necesarias.

1.1.ELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La elección del área de estudio se produjo durante el año 2020, cuando en una revisión de las zonas inundables del municipio se advirtió de la falta de información de un tramo concreto. Este tramo concreto se corresponde con un meandro del río Guadalete a su paso por el municipio de Arcos de la Frontera:

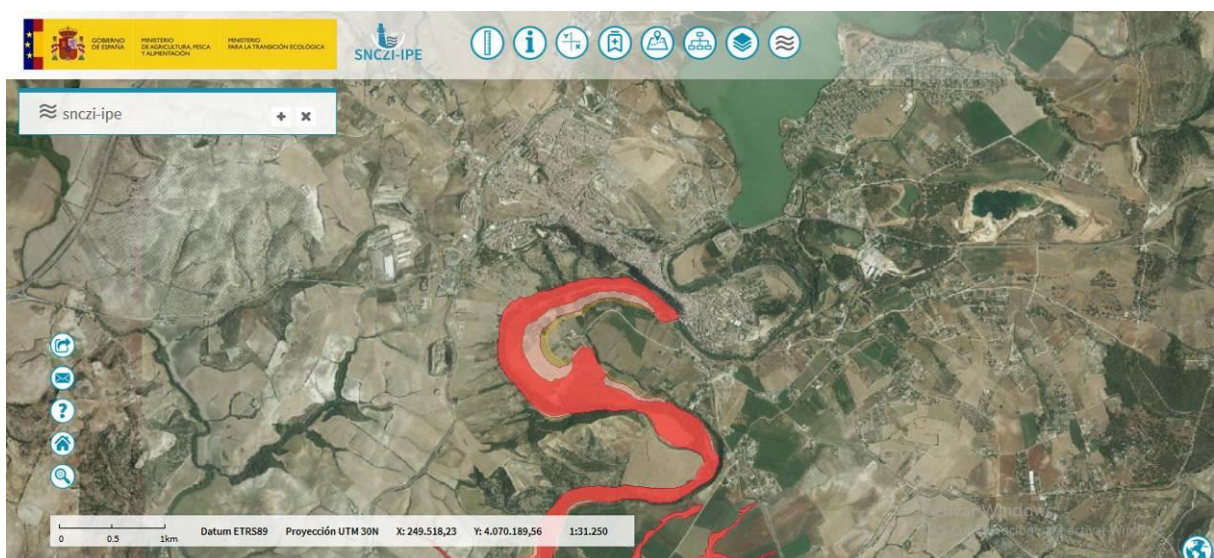


Figura 1. Área de estudio en 2020 en el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.

La Figura 1 muestra las zonas inundables con distintos periodos de retorno, T10, T50, T100 y T500. Como se puede observar, el modelo comienza al finalizar uno de los meandros que discurren por el entorno urbano del municipio de Arcos de la Frontera, pero, sin embargo, no existen datos publicados aguas arriba del mismo hasta llegar al Embalse del municipio. También, para la fecha de realización del presente documento, las zonificaciones anteriormente expuestas han sido retiradas del acceso público en la página del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (en adelante SNCZI).

El discurrir del río Guadalete se encuentra sometido a distintos accidentes antrópicos (varios puentes, azudes, alteraciones hidromorfológicas, etc.) que hacen del entorno fluvial un área especialmente idónea para la aplicación de geotecnologías, en este caso principalmente LiDAR, a estudios geomorfológicas e hidráulicas.

1.2. PRINCIPIOS DE LA TECNOLOGÍA LIDAR E INFORMACIÓN DISPONIBLE

La tecnología LiDAR

Para la realización de los estudios geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos del presente documento, a la escala a la que pretenden ser realizados, es necesario disponer principalmente de información topográfica de referencia de gran precisión que represente fielmente la realidad del terreno en un Modelo Digital de Terreno (en adelante MDT) o Modelo Digital de Superficie (en adelante MDS). La gran cantidad de posibilidades de manejo de los MDT o mallados derivados de los mismos es uno de los fuertes de esta tecnología.

Los MDT son, a grandes rasgos, representaciones simplificadas de la topografía de un territorio en concreto. Los accidentes geográficos conforman una superficie de características tridimensionales susceptibles de ser caracterizados geoméricamente mediante su ubicación espacial (coordenadas X e Y) y su altura (coordenada Z). La resolución del vuelo LIDAR se caracteriza por el número de puntos medio por metro cuadrado del que se dispone de información. La densidad puede variar de 50 puntos por metro cuadrado en vuelos en helicóptero, hasta 0,33 puntos por metro cuadrado en vuelos en avión a alta distancia. Una precisión excesiva repercute en el precio del vuelo haciéndolo demasiado caro mientras que la poca precisión puede arruinar el trabajo (baja calidad).

Para poder referenciar correctamente un punto que se ha medido en el terreno, se utiliza la combinación de dos tecnologías diferentes:

- **INS (Sistema de Navegación Inercial):** permite medir la orientación exacta del sensor. Este sistema mide los diferentes ángulos en los que se toman los datos con una precisión de 0,001 grados. Ésto, además, permite compensar los movimientos bruscos que sufre el sensor a bordo del avión, pudiendo calcular en cada momento las coordenadas exactas del punto que se está midiendo en el terreno.
- **GPS (Global Positioning System) diferencial:** permite medir la posición exacta del sensor (su ubicación en el espacio, es decir sus coordenadas en el momento de efectuar cada medición). De esta forma, se obtienen las alturas del terreno con un error de +/- 15 cm en altura. Si el sensor trabaja con una frecuencia de hasta 150 kHz, el proceso de medida descrito anteriormente se repite 150.000 veces por segundo, lo que permite

obtener modelos de alta precisión, con una resolución espacial de 1 metro por metro cuadrado.

El proceso pormenorizado de producción de datos LiDAR se puede dividir en 3 partes bien diferenciadas:

- 1- Captura: La captura de datos de un sensor LiDAR aerotransportado se realiza de manera perpendicular, escaneando la superficie en distintas batidas o pasadas consiguiéndose densas nubes de puntos donde cada punto se corresponde con el retorno de un pulso de luz.
- 2- Procesamiento: La fase de procesamiento se lleva a cabo una vez la nube de puntos es capturada. En esta fase, cobran especial importancia los algoritmos automáticos de clasificación y el filtrado automático de errores. También se hacen necesarias intervenciones manuales, como ediciones por parte de técnicos especializados, que deben ser de aplicación para segmentar, editar, clasificar y modelar los puntos medidos, tal como se exponen algunos ejemplos en la Figura 2.

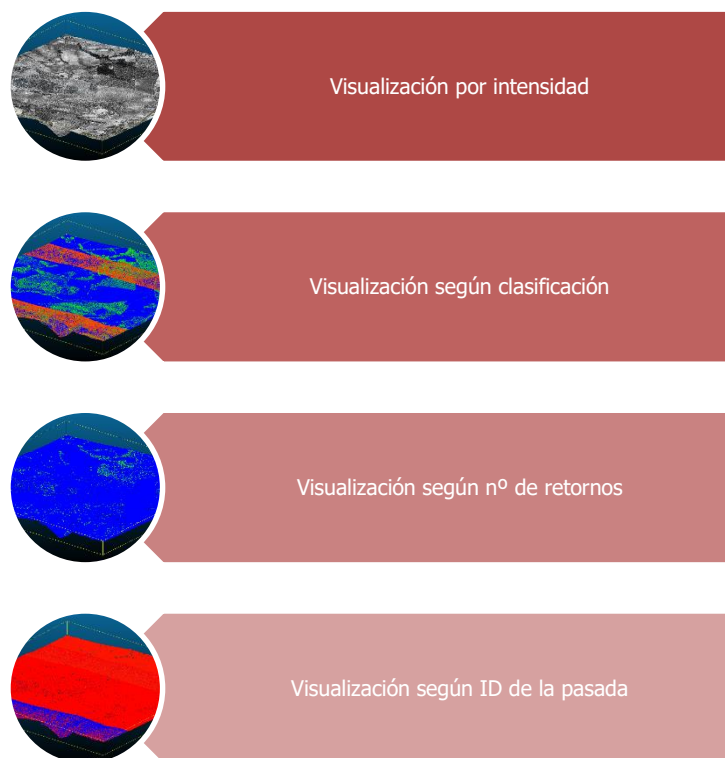


Figura 2. Distintas visualizaciones de nube de puntos correspondiente al área de estudio

- 3- Productos finales: El resultado de los datos procesados se traduce, por lo general, en la generación de nubes de puntos en formato LAS (Log ASCII Standard por sus siglas en inglés) siendo este formato uno de los más habituales para el intercambio de nubes de puntos tridimensionales LiDAR. Este formato creado por la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) consigue almacenar para cada punto de la nube unos determinados valores X, Y, Z, además de otras tantas variables como

la intensidad, el número de retorno, la calificación según la ASPRS (Sociedad Americana de Fotogrametría y Percepción Remota/Teledetección), etc.

Otro producto final del LiDAR, quizás el de mayor interés para el presente documento, son los Modelos Digitales de Elevaciones (en adelante MDE). Dichos modelos se obtienen mediante la interpolación de la nube de puntos anteriormente descrita, y pueden ser de varios tipos según los puntos que entren en juego en la interpolación. El MDS se obtiene de la interpolación de sólo los primeros pulsos recibidos, como pueden ser aquellos reflejados por construcciones, vegetación de distinto porte, puentes, etc.

En otro orden, los MDT se corresponden con las interpolaciones de los puntos recibidos durante el último pulso, eliminando los puntos que no pertenecen al terreno, pudiéndose conseguir así un modelo con la topografía del lugar "al desnudo", son los demás objetos que se encontraban sobre la superficie del terreno al momento de la captura de datos.



Figura 3. Productos finales más habituales.

En los últimos años se está dando un uso extensivo de MDTs y otros productos derivados del LiDAR en todos aquellos ámbitos que hacen uso de mallas correctamente dimensionadas de alta precisión. Tal es el caso de los análisis hidráulicos, donde el quid de la cuestión gira en torno a la precisión en Z como revulsivo dentro del análisis para conseguir unos productos lo más cercanos a la realidad posible.

Información pública disponible

El principal enfoque del presente Trabajo Fin de Máster es hacer un uso extensivo de la tecnología LiDAR pública que se brinda a los técnicos e investigadores desde instituciones públicas como el Instituto Geográfico Nacional. El alto coste de captura y procesamiento de

datos LiDAR lo hace prácticamente inasumible para empresas y grupos de investigación que necesitan de datos de alta precisión para la correcta consecución de sus objetivos.

Los datos públicos utilizados para las modelizaciones del documento son los vuelos LIDAR llevados a cabo por el Instituto Geográfico Nacional (en adelante, IGN) durante 2014. Tal como se viene comentando, son de distribución libre, se pueden descargar de la web del IGN. La densidad de puntos es de 0,5 p/m² en la primera cobertura y de 2 p/m² en la segunda cobertura, que se presupone que verá la luz en el segundo semestre de 2021. La precisión altimétrica asegurada es menor a 20 cm, por lo que la precisión en Z es más que suficiente para obtener mallas de alta precisión.

Los archivos implicados en el estudio, correspondientes a distintas subdivisiones de las hojas de Mapa Topográfico Nacional, son:

- Coloreado (RGB) 2015 - PNOA-2015-AND-SW-246-4070-ORT-CLA-COL.LAZ
- Coloreado (RGB) 2015 - PNOA-2015-AND-SW-246-4072-ORT-CLA-COL.LAZ
- Coloreado (RGB) 2015 - PNOA-2015-AND-SW-248-4070-ORT-CLA-COL.LAZ
- Coloreado (RGB) 2015 - PNOA-2015-AND-SW-248-4072-ORT-CLA-COL.LAZ
- Coloreado (RGB) 2015 - PNOA-2015-AND-SW-250-4068-ORT-CLA-COL.LAZ
- Coloreado (RGB) 2015 - PNOA-2015-AND-SW-250-4070-ORT-CLA-COL.LAZ
- Coloreado (RGB) 2015 - PNOA-2015-AND-SW-250-4072-ORT-CLA-COL.LAZ
- Coloreado (RGB) 2015 - PNOA-2015-AND-SW-252-4068-ORT-CLA-COL.LAZ
- Coloreado (RGB) 2015 - PNOA-2015-AND-SW-252-4070-ORT-CLA-COL.LAZ
- Coloreado (RGB) 2015 - PNOA-2015-AND-SW-252-4072-ORT-CLA-COL.LAZ
- Coloreado (RGB) 2015 - PNOA-2015-AND-SW-246-4068-ORT-CLA-COL.LAZ
- Coloreado (RGB) 2015 - PNOA-2015-AND-SW-248-4068-ORT-CLA-COL.LAZ

1.3.OBJETIVOS DEL PRESENTE TRABAJO

Los episodios de inundaciones cobran especial protagonismo una vez se producen debido a la gran potencialidad que muestran para acometer grandes pérdidas económicas e incluso, de vidas humanas. La composición del territorio que sufre de estos eventos es determinante también a la hora de paliar los riesgos o presentar mayores vulnerabilidades, siendo habitual la ocupación de zonas inundables o habiendo modificado el hombre los cauces de los ríos.

El objetivo general del presente trabajo es **analizar la idoneidad de la tecnología LiDAR para los análisis de inundabilidad en casos complejos como el Guadalete**. A un nivel inferior, de manera más específica, los objetivos específicos serán definir la idoneidad de los distintos datos LiDAR brindados por las instituciones públicas, de gran calidad, resaltando la necesidad de tratamiento de los mismos según la morfología del terreno a analizar. Para la precisión que asegura el PNOA, no se pueden utilizar de manera arbitraria para los análisis de inundabilidad tal como viene siendo habitual en una gran cantidad de documentos relacionados con el medio ambiente y el urbanismo.

2. ESTADO DEL ARTE

Las tendencias a nivel global auguran un aumento en la cantidad de desastres derivados de los riesgos naturales, que, sobre todo a raíz del Cambio Climático, vienen a ser la causa más frecuente de daños producidos por fenómenos naturales. A nivel mundial, alrededor de un tercio de todos los eventos notificados son atribuibles a las inundaciones (<https://www.desinventar.net/> - Naciones Unidas).

La precisión a la hora de acometer una correcta delimitación de las zonas inundables ha sido tratada específicamente por varios autores y grupos de investigación, además de publicaciones oficiales. En este sentido, cabe destacar la aportación del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables y más concretamente, la "*Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables*", realizada por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (actual Ministerio de Transición Ecológica) en 2011, con la asistencia técnica del IGME (Instituto Geológico y Minero de España) y CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) principalmente.

En otro término, son varios los investigadores y grupos que han puesto el foco de atención en el uso del LiDAR a la hora de acometer análisis de inundabilidad bajo distintas hipótesis, como la tesis doctoral Espejo Almodóvar, F. (2017, donde se lleva a cabo un profundo análisis hidráulico en el que los datos LiDAR sirven de base primordial para la consecución del mismo.

Asimismo, las publicaciones Zazo et al 2019., todas pertenecientes al Grupo de Investigación IGA, de la Universidad de Salamanca, que se enfoca al modelado del terreno en base a adquisiciones LiDAR para realizar estudios de inundabilidad.

No existen publicaciones concretas para el ámbito de estudio presentado en éste trabajo en términos de inundabilidad y datos LiDAR. Sin embargo, existen algunas publicaciones que han sentado la base dentro de la cuenca del Guadalete – Barbate, como *Modeling River Runoff Temporal Behavior through a Hybrid Causal – Hydrological (HCH) Method*, del anteriormente citado grupo IGA y la Universidad de Cádiz. En el mismo se lleva a cabo una modelización híbrida entre los modelos hidrológicos clásicos, como el de Temez, y los modelos más vanguardistas de Hidrología casual, consiguiendo en una serie de resultados mejor definidos que los cálculos clásicos para la cuenca del Barbate. En otro orden de cosas, la caracterización de caudales vertidos según tipos de tormentas o capacidades máximas es objeto de estudio en la publicación Fernandez-Montblanc, T.; Benavente, J.; Plomaritis, T.A., de la Universidad de Cádiz donde se hace un profundo análisis del régimen no permanente del Guadalete, y el impacto de la serie de embalses dentro de su discurrir aguas abajo desde el área de estudio (embalse de Arcos de la Frontera) hasta su desembocadura en la costa occidental de Cádiz.

3. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

3.1. MARCO GEOGRÁFICO

El área de trabajo elegida se corresponde con el término municipal de Arcos de la Frontera, incluido en el ámbito conocido como Sierra de Cádiz. En el Mapa Topográfico Nacional ocupa la hoja 1049, recibiendo ésta su nombre. Al ser la extensión del término municipal de un tamaño considerable, ocupa también su parte más al oeste una parte de la hoja 1048, perteneciente a Jerez de la Frontera (Figura 4).

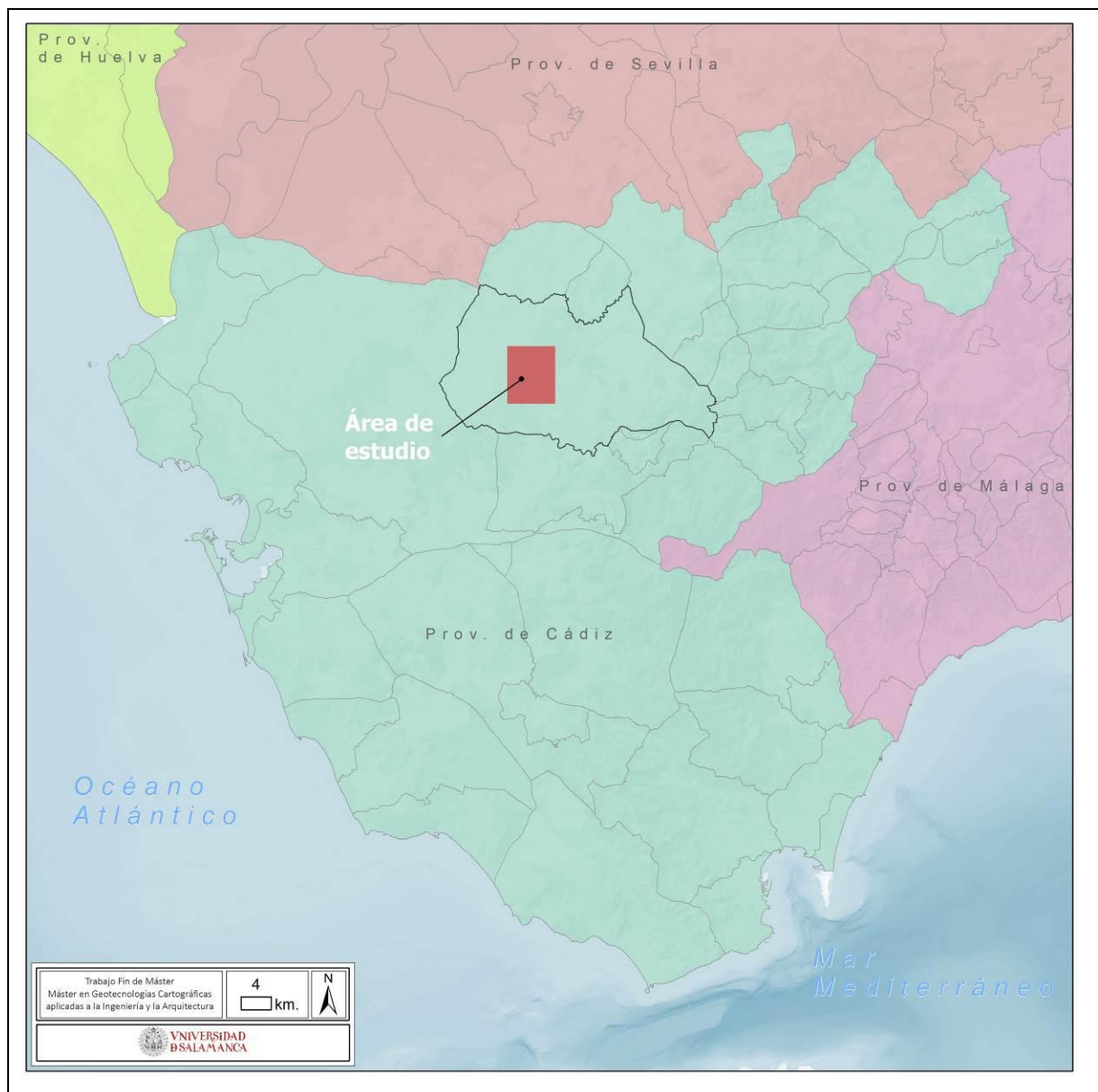


Figura 4. Ubicación del área de estudio a nivel provincial.

El área de estudio elegida se encuentra en torno al discurrir del río Guadalete por el núcleo principal de Arcos de la Frontera, donde el trazado del río es sinuoso y meandriforme, quedando limitado en ocasiones por escarpes del terreno.

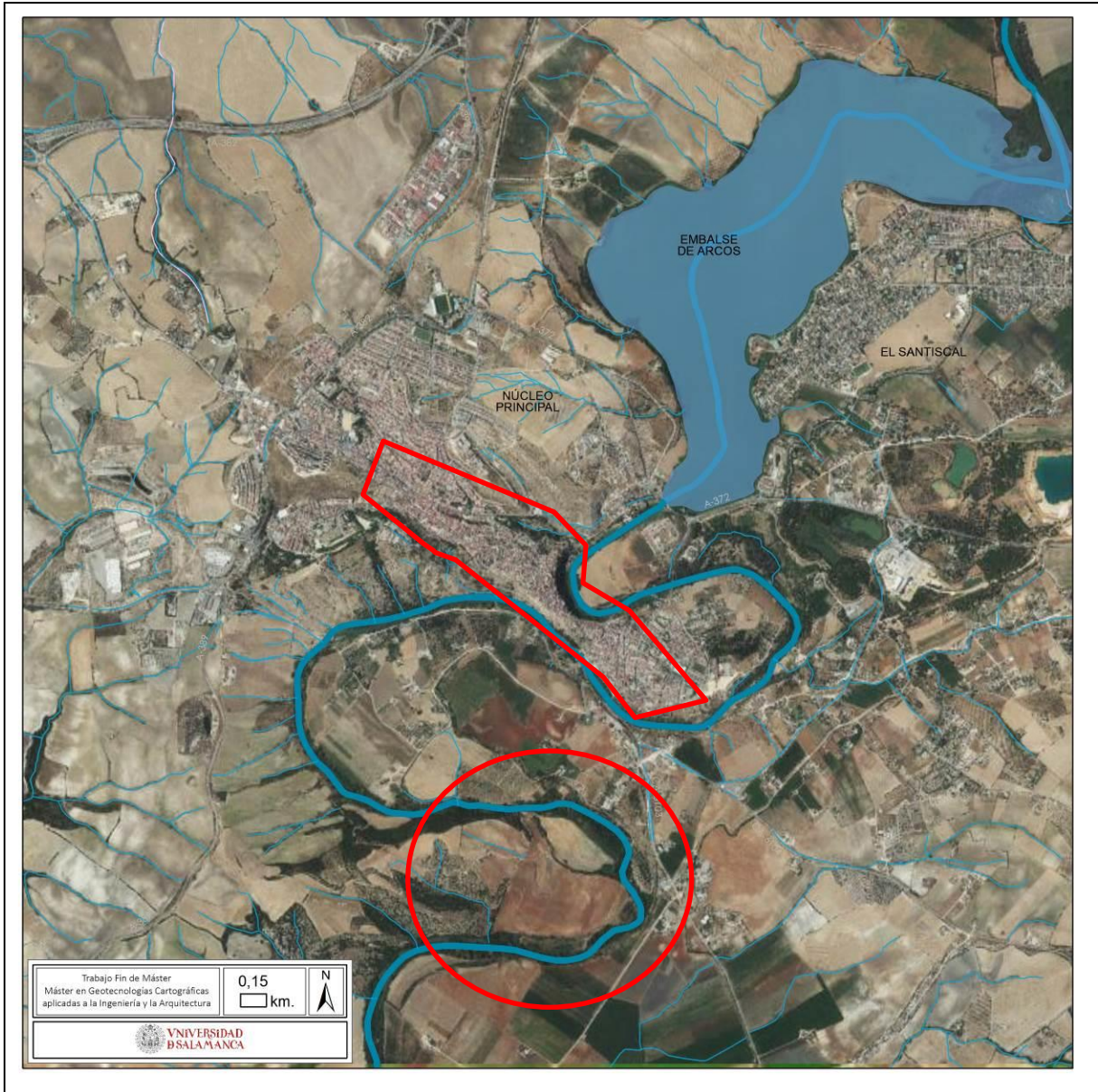


Figura 5. Área de estudio a nivel local.

Los elementos más destacables para el área de estudio que configuran la estructura física del término de Arcos es la Peña de Arcos, en la zona central de la Figura 5, escarpe de entidad que, declarado monumento natural, discurre alrededor de 1,2 km de manera lineal sobre una cota superior a los 100m de altitud formando parte de la génesis fluvial derivada del discurrir del Guadalete. Los materiales que constituyen la Peña de Arcos y el entorno de esta localidad representan los primeros sedimentos postorogénicos que se depositaron en las áreas que quedaron sumergidas tras el levantamiento y formación de la Cordillera Bética.

Situado al Sur del área de estudio, aparece otro hito geomorfológico de similares características llamado Cerro de la Herradura, al sur de la Figura 5, a tenor de la forma de

herradura que el río Guadalete encaja sobre el territorio. Resultan de interés de la misma manera las laderas de orientación Sureste que se sitúan al Oeste del área de estudio. Con unas pendientes medias del orden del 60% a medida que descienden pasan a ser del orden del 20 – 25%, aunque entre cada una de las laderas se han conformado vaguadas de importante entidad cuyo desagüe se produce en el Guadalete. Por lo que dicha área resulta de interés y especial vigilancia por la escorrentía añadida al modelo.

3.2. MEDIO BIÓTICO Y ABIÓTICO

3.2.1. CLIMATOLOGÍA

El clima resulta determinante en la configuración de los factores bióticos y abióticos que se asientan sobre un territorio, condicionándose entre otros aspectos, los usos del suelo, la vegetación, las formas erosivas o la hidrología superficial y subterránea.

El ámbito se integra dentro del dominio climatológico Csa de Köppen, templado, contando con una estación seca que recae en los meses de verano. La temperatura media de los meses estivales es superior a 22°C, y la media más baja situada en los meses de invierno del hemisferio norte no inferior a 10°C. Tal clasificación podría complementarse añadiendo que se trata de un clima mediterráneo con rasgos de continentalización. Ésto quiere decir que presenta variables climáticas algo más extremas en el caso de la temperatura, y precipitaciones algo menores que su homólogo costero, del cual se estandariza el término “mediterráneo” para establecer un clima demasiado general a veces.

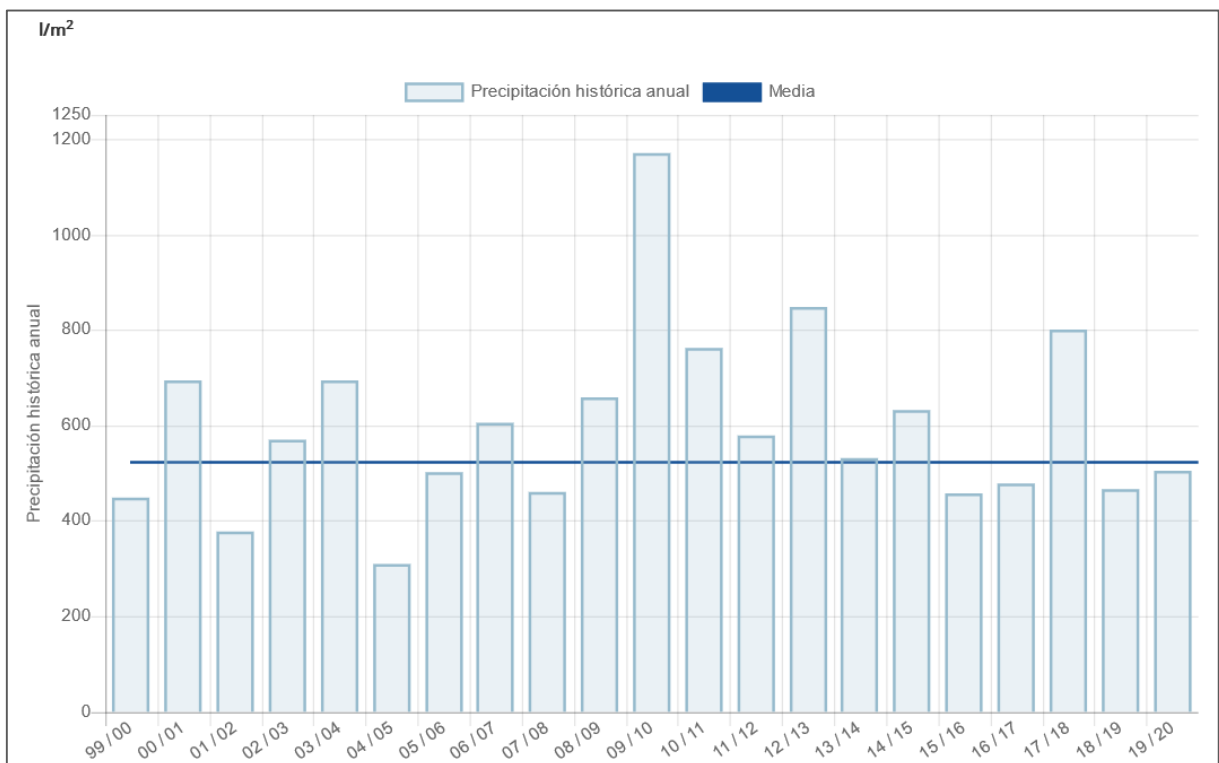


Figura 6. Precipitación histórica para Arcos de la Frontera. Datos de la estación nº271 de la Red SAIH Hidrosur.

Los datos de precipitación de la Figura 6 se corresponden a la estación más cercana al área de estudio y confiable situada en las inmediaciones de Arcos de la Frontera, más concretamente en el Embalse del Arcos. Como se puede observar, la media de los últimos 24 años es de 597 mm, siendo un clima relativamente seco sujeto a dinámicas atmosféricas muy concretas que se dan en el marco del mediterráneo. Estando flanqueada al oeste por el Océano Atlántico y al este por el Mar Mediterráneo, la población de Arcos recibe vientos de ambas componentes siempre cargadas de humedad, lo que resulta positivo para la formación de pequeños centros de acción de bajas presiones que acaban descargando en la zona o en inmediaciones, siendo en muchas ocasiones y sobre todo en otoño y primavera de carácter torrencial. La distribución de lluvias es irregular. Los meses que presentan mayor precipitación son los comprendidos entre octubre y febrero, destacando noviembre con 96 mm de media, mes que suele ser intercalado con octubre cuando el sur peninsular se ve sujeto a circulaciones atmosféricas que favorecen la torrencialidad.

De manera opuesta, los meses de julio y agosto se obtienen los mínimos anuales pluviométricos, superándose rara vez los 3 o 4 mm, por lo que se pueden identificar 2 estaciones contrarias, una húmeda y otra seca, de manera muy evidente. También en este aspecto se deja sentir la influencia del relieve con un escalonamiento en sentido creciente de las cantidades recogidas a medida que se asciende en altitud. La torrencialidad, pendientes acusadas, la falta de cobertura vegetal, los suelos muy delgados y de textura gruesa, se conjugan para determinar en algunos puntos sometidos a actividades agrícolas la escorrentía de la mayor parte de las aguas de lluvia. De ahí la escasa acumulación de reservas hidráulicas en sus suelos.

A escala regional, los centros de acción dominantes son el anticiclón subtropical de las Azores, altas presiones polares atlánticas, altas presiones continentales de tipo térmico originadas por las bajas temperaturas continentales, depresiones ligadas al Frente Polar, depresiones continentales de tipo térmico generadas por las altas temperaturas de verano, frente Mediterráneo y frente de los alisos. Las situaciones anticiclónicas suponen alrededor del 75% frente al 25% de las ciclónicas, tendencia que se va acentuando con el paso de los años, muy probablemente condicionadas por dinámicas derivadas del Cambio Climático. El mismo está aumentando las condiciones anticiclónicas en prácticamente todos los territorios de Andalucía, y, por otro lado, favoreciendo las ciclónicas torrenciales en puntos concretos sobre todo del Mediterráneo.

	Promedio de las máximas (°C)	Promedio de las mínimas (°C)	Temperatura promedio (°C)
Enero	16,48	5,02	10,40
Febrero	17,58	5,81	11,54
Marzo	19,83	7,91	13,72
Abril	22,07	9,99	15,96
Mayo	26,01	12,23	19,17
Junio	29,92	15,46	22,76
Julio	32,80	17,20	24,91
Agosto	33,31	18,01	25,43
Septiembre	29,78	16,27	22,75
Octubre	25,89	13,57	19,34
Noviembre	20,14	8,91	14,18

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.

Diciembre	17,41	6,41	11,53
General últimos 20 años	24,27	11,40	17,64

Tabla 1. Temperaturas para el periodo 2000 – 2020 por meses. Estación meteorológica de la red RIA en Jerez de la Frontera

La distribución de las temperaturas (tabla 1) evidencia un régimen térmico caracterizado por el contraste estacional. Tienen una distribución anual en la que se refleja que los meses de julio y agosto son los más calurosos, con unas medias mensuales superiores a los 25°C. La media de las máximas para ésta época, situándose Arcos en un área variable climatológicamente hablando, también reflejan valores altos con medias para ambos meses prácticamente de 33°C.

La especial configuración topográfica de la zona que actúa como pantalla protectora frente a los vientos fríos del interior y húmedos del atlántico, su situación de solana y la proximidad a la Sierra de Cádiz, determinan las características que mejor definen el clima del área del municipio de Arcos: la suavidad de las temperaturas, excepto en verano, y la escasez de las precipitaciones. Sin embargo, este carácter alomado de la zona introduce una serie de matices térmicos y pluviométricos, que crean pequeños microclimas a nivel local.

La media anual de temperatura es de 17,64°C y no hay meses con medias inferiores a 5°C. Los valores de las mínimas absolutas indican un riesgo de heladas inapreciable, sólo posible en los meses de enero y febrero.

El verano es cálido, con máximas absolutas que habitualmente superan los 40°C, siendo más habitual cuando el sur peninsular se encuentra sujeto a intrusiones de aire subsahariano. El contraste térmico anual medio es de 12,87°C. Así, pues se puede calificar el clima de este entorno como "mediterráneo, de inviernos moderados y veranos cálidos".

3.2.2. MEDIO BIÓTICO

Una correcta caracterización de la vegetación actual del área de estudio se hace necesaria en tanto la frondosidad y la vegetación riparia en el tramo del Guadalete que atañe el estudio crea fuertes interferencias a la hora de modelar un MDT. La fuerte antropización que ha venido sufriendo la zona aledaña del Guadalete se ha traducido en la práctica eliminación de la vegetación original y en la introducción de especies foráneas. Las principales formaciones arboladas se localizan en la margen izquierda con un predominio importante de eucaliptales (*Eucalyptus spp.*) y algunos rodales de pino carrasco (*Pinus halepensis*), acompañados en gran medida por el álamo blanco y negro.

Estas formaciones desarrollan una función primordial para evitar la erosión de la orilla y frenar la colmatación del cauce en algunos puntos, aunque en otros, el régimen no natural de caudales que sufre el río ha hecho que algunas especies vegetales se encuentren en situación de clímax durante prácticamente todo el año.

La interferencia del régimen no natural en el ecosistema trae consigo la consiguiente invasión en muchos casos de barras arenosas y espacios donde poco a poco fijan sedimentos,

antropizando en sobremanera el cauce del río. De importancia también son los materiales arrastrados de las laderas agrícolas adyacentes. También es posible encontrar algunas muestras muy degradadas del primitivo bosque mediterráneo (serie de la encina carrasca) que se extendía por el área.

En la zona próxima al cauce, y concretamente la zona de DPH (Dominio Público Hidráulico), es donde se desarrolla una vegetación riparia, con especies como la adelfa (*Nerium oleander*), chopos (*Populus nigra*), cañas (*Arundo donax*), juncos (*Juncus acutus*), zarzas (*Rubus ulmifolius*), tarajes (*Tamarix africana*), etc., y en algunos sectores de aguas más remansadas pueden aparecer eneas (*Typha dominguensis*) y carrizos (*Phragmites australis*). En algunas zonas la vegetación riparia aparece acompañada de eucaliptos que crecen de forma espontánea (Figura 7).



Figura 7. Vista elevada del Guadalete a su paso por el área de estudio.

El resto de la vegetación corresponde a especies anuales de pradera, que crecen durante los períodos libres de inundación, pereciendo bajo las aguas con las subidas de nivel, y a comunidades nitrófilas que hacen acto de presencia a consecuencia de la actividad ganadera que existe en algunas zonas. La mayor parte del área se compone principalmente de especies características de la vegetación mediterránea que en tiempos pasados se extendían por la zona, como el acebuche (*Olea sylvestris*), la coscoja (*Quercus coccifera*), la encina (*Quercus rotundifolia*) y el lentisco (*Pistacia lentiscus*), formando manchas densas y aisladas.

3.2.3. MEDIO ABIÓTICO

El término municipal de Arcos de la Frontera se encuentra situada en la zona norte de la provincia de Cádiz. La zona objeto de estudio se encuentra enclavada dentro de las Cordilleras Béticas las cuales forman, junto con las Cordilleras del Rif del norte de África, el segmento más occidental del Orógeno Alpino Mediterráneo. Estas dos cordilleras, separadas en la actualidad por la cuenca neógena de Alborán, se localizan entre dos zócalos hercínicos, el Ibérico al norte y el africano al sur. Las Cordilleras Béticas se formaron como consecuencia del régimen compresivo que comenzó a finales del Cretácico y en ellas se pueden distinguir distintos dominios o zonas siendo las más importantes, ordenadas de norte a sur, las zonas externas y las zonas internas. Estas zonas, separadas y diferenciadas por un contacto tectónico, presentan además un origen paleo geográfico distinto. Además de estas dos grandes zonas, existen otros. El Término Municipal presenta las siguientes características geológicas:

- En primer lugar, hay que referirse a la situación de la región dentro del contexto tectónico global, justo en la zona de confluencia de las placas africana y eurasiática. Este hecho resulta fundamental en la caracterización tectónica de la región, que aun presentando distintos niveles dependiendo de las zonas, soporta un alto grado de dinamismo. Este dinamismo se traduce, lógicamente, en una importante incidencia de la sismicidad en la región, con manifestaciones de moderada intensidad y frecuencia, si bien en algún momento y para ciertas zonas han llegado a constituir auténticos terremotos catastróficos. A estas manifestaciones se suman el conjunto de fenómenos naturales que suelen asociarse a su ocurrencia (desprendimientos, hundimientos, etc.).
- Respecto a la historia geológica de la región, merece destacarse la circunstancia de su génesis relativamente reciente, lo que supone entre otras cosas, que se encuentre sometida a importantes procesos de formación y estabilización geológica.



Figura 8. Vista de las areniscas que conforman la Peña de Arcos, junto el río Guadalete y uno de los puentes implicados en el área de estudio.

En tanto a lo que a hidrología superficial se refiere, el municipio de Arcos de la Frontera se halla enclavado en la vertiente atlántica, sometido al clima mediterráneo con influencia atlántica y situado a media altura en la cuenca del Guadalete (Figura 8). Este río objeto de estudio supone uno de los accidentes geográficos más determinantes en la morfología del municipio. Dos son los elementos que definen la hidrografía de Arcos de la Frontera: por una parte, el carácter torrencial de las lluvias, propio del clima mediterráneo y, por otra parte, la permeabilidad variable de los materiales, finalmente responsables de un exorreísmo muy acusado pero efímero y una tendencia al encajamiento de los cauces principales (Figura 9):

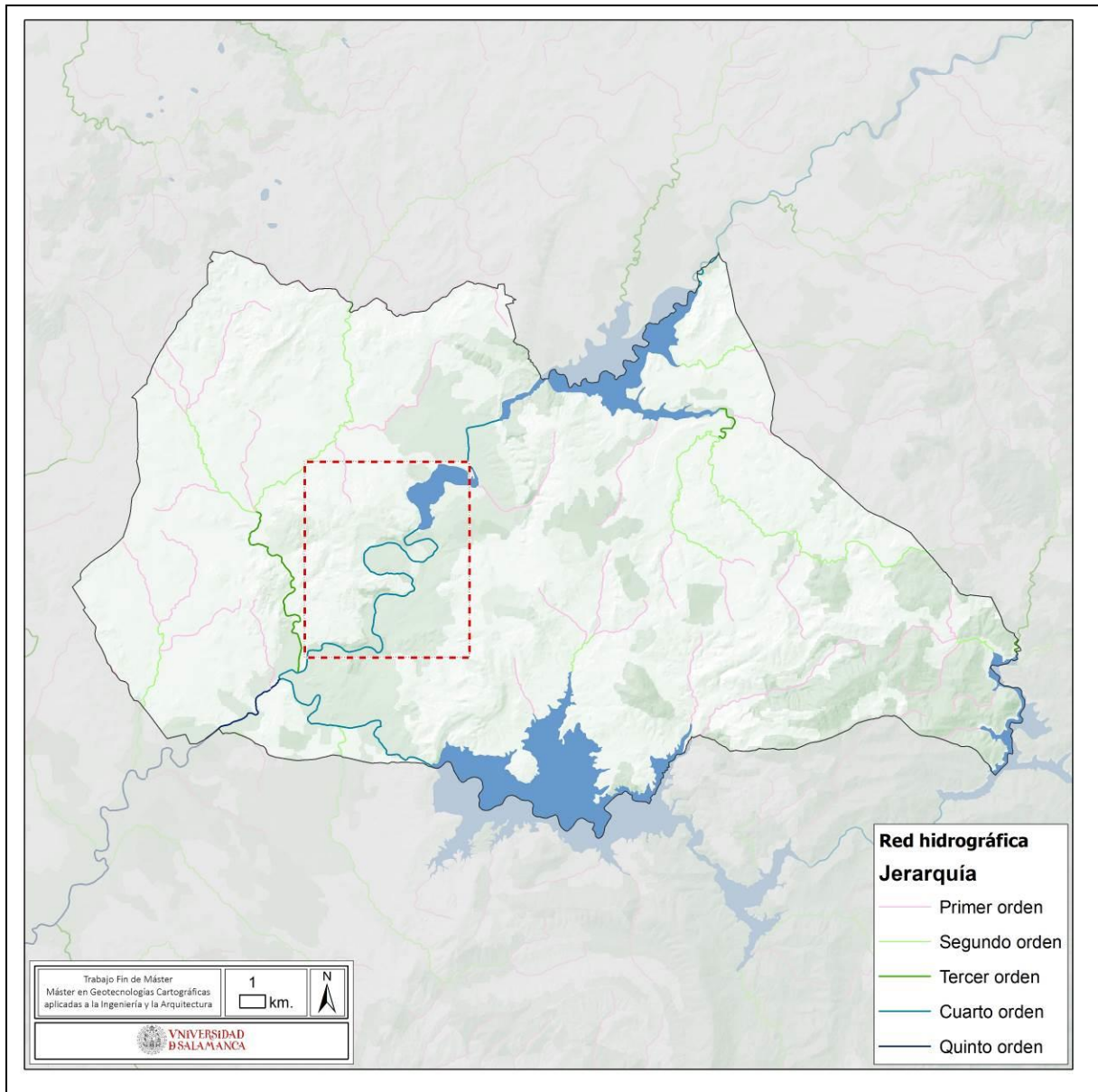


Figura 9. Red hidrológica pormenorizada para el término municipal de Arcos de la Frontera.

En el área de estudio, además del río Guadalete, no aparecen otros cauces de relevancia como sí aparecen más al sur, principalmente representados por el Arroyo Salado o el Río Majaceite. Sin embargo, y como se verá más adelante, se han modelizado datos LiDAR para obtener los principales cauces vertientes al Guadalete dentro del área de estudio, y de la misma manera, se ha corroborado su precisión.

La cuestión de los embalses también resulta de interés para el presente trabajo (Tabla 2). El régimen de caudales ha condicionado de manera determinante la evolución del territorio fluvial. El río Guadalete se encuentra condicionado en la actualidad por varios embalses construidos en diferentes épocas en su propio cauce y en el de su principal afluente, el río Majaceite.

Embalses	Año de inauguración	Volumen del embalse (hm ³)	Uso principal
Embalse de Zahara	1992	223,00	Riego
Embalse de Bornos	1961	215,40	Hidroeléctrico/Riego
Embalse de Arcos	1965	14,00	Hidroeléctrico/Riego
Embalse de los Hurones	1964	135,00	Abastecimiento/Hidroeléctrico
Embalse de Guadalcacín	1995	800,00	Abastecimiento/Riego

Tabla 2. Embalses en el cauce del Guadalete y algunas de sus características.

Los datos de aforos existentes de la cuenca del río Guadalete no están accesibles desde internet como lo están los aforos de muchos otros ríos españoles, y son escasos en cuanto a número de estaciones de aforos y número de años con registros. Los embalses que afectan directamente al área de estudio son los de Zahara, Bornos y Arcos, por lo que para el estudio hidrológico se ha optado por seguir estimaciones de salidas del embalse de Arcos en un evento meteorológico extremo.

4. ESTUDIO GEOMORFOLÓGICO

El análisis geomorfológico fluvial del presente documento tiene como intención el estudio de la relación existente entre las evidencias topográficas que han sido generadas durante el transcurso de las pasadas inundaciones tanto en la llanura aluvial como en el cauce y en sus inmediaciones. El uso de datos LiDAR se hace un elemento indispensable para discernir aquellas marcas topográficas que alteran sustancialmente la morfología y la topografía del terreno perdurando en la superficie de las zonas inundables durante décadas que corresponden con la intervención de procesos erosivos y sedimentarios.

De manera similar, el uso de otra geotecnología como es la fotogrametría aérea se hace indispensable en términos de geomorfología fluvial para poder discernir evidencias efímeras que tienden a desaparecer o camuflarse en un plazo más reducido de tiempo. Las observaciones de campo pertinentes han conseguido corroborar gran cantidad de los elementos que eran observables en los modelos y ortofotografías.

Los datos LiDAR, una vez modelados como un MDT de distinta resolución o tamaño de celdilla, pueden ser visualizados de maneras muy diversas haciendo uso del álgebra de mapas, así como de filtros (que no son filtros de imagen, sino más bien suavizados matemáticos). Las visualizaciones de un MDT para ayudar a discernir hitos topográficos o estructuras sobre el terreno, véase el caso del LiDAR aplicado a la prospección como técnica de arqueología no invasiva. Las distintas visualizaciones se basan principalmente en la topografía del terreno a analizar (terrenos llanos, poco rugosos, algo más rugosos, con pendiente pero llanos, con pendiente pero rugosos, complejos, etc.). Existen, así a grandes rasgos, 3 tipos de visualizaciones:

- Basadas en la propia topografía y la diferencia de valores de celdillas aledañas
- Basadas en la iluminación y observadores
- Modelos mixtos

De esta manera los tipos de visualización utilizados para discernir la geomorfología fluvial del entorno inmediato del Guadalete han sido los que se muestran a continuación.

4.1. LOCAL DOMINANCE

Se basa en la computación, para cada píxel del MDT, de cuán dominante sería un observador parado en ese punto para un área circundante local (figura 10). El área circundante local es el *radius* (10 píxeles o 20 píxeles es lo habitual, pero si se buscan elementos de gran envergadura resulta más adecuado 100 o 150). Los valores del modelo obtenido serán más altos para puntos en elevaciones locales, así como en pendientes, y más bajos para puntos en depresiones locales y/o sutiles concavidades.

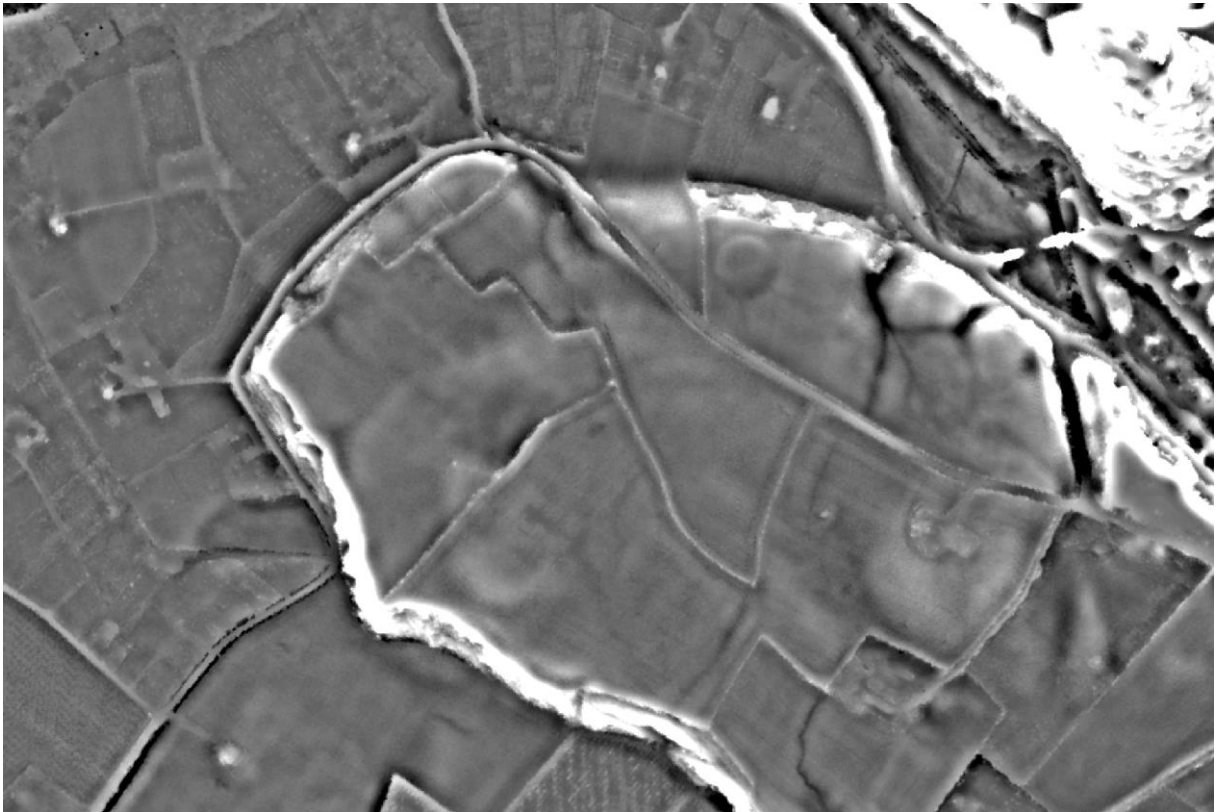


Figura 10. Ejemplo de Local Dominance donde se puede discernir la llanura de inundación, cauce y algunas terrazas.

4.2. SKY VIEW FACTOR

Se basa en la porción de cielo visible desde un píxel en concreto (figura 11). Los valores cercanos a 1 indican que casi todo el hemisferio sobre el píxel es visible, que es el caso en las características expuestas (riscos, crestas y picos), mientras que los valores cercanos a 0 están presentes en sumideros profundos y partes inferiores de valles profundos donde casi no hay cielo visible. Los elementos que reciben más iluminación obtienen valores más altos en la imagen obtenida, mientras aquellos que menos reciben valores más bajos. Todo ello respecto a sus píxeles circundantes y su radio de búsqueda.



Figura 11. Ejemplo de Sky View Factor donde se observa parte del cauce actual y un cauce secundario, anteriormente cauce principal.

4.3. LOCAL RELIEF MODEL

Se basa en la eliminación de la tendencia entre las formas del paisaje a gran escala de las tendencias locales a pequeña escala, lo que finalmente, acaba favoreciendo a las formas de pequeña escala respecto a las grandes (figura 12).

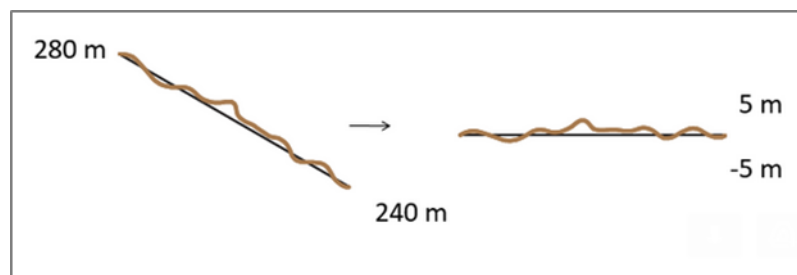


Figura 12. Funcionamiento de Local Relief Model

Muy útil en la búsqueda de elementos poco visibles con el resto de visualizaciones. Combinado con una paleta de colores que consiga discernir el rango negativo hasta 0, se pueden llegar a mostrar elementos del terreno que ya no son prácticamente visibles ni perceptibles sobre el mismo. Ejemplo de ello ha sido la identificación de dos posibles paleocauces (figura 13), aplicando una paleta de colores adecuada a los valores que se quieren visualizar más claramente, haciendo uso de las curvas de nivel y en transparencia con otra

visualización basada en el modelado de sombras. En posteriores apartados referentes al estudio hidráulico pueden observarse unos mayores calados sobre éstas áreas:

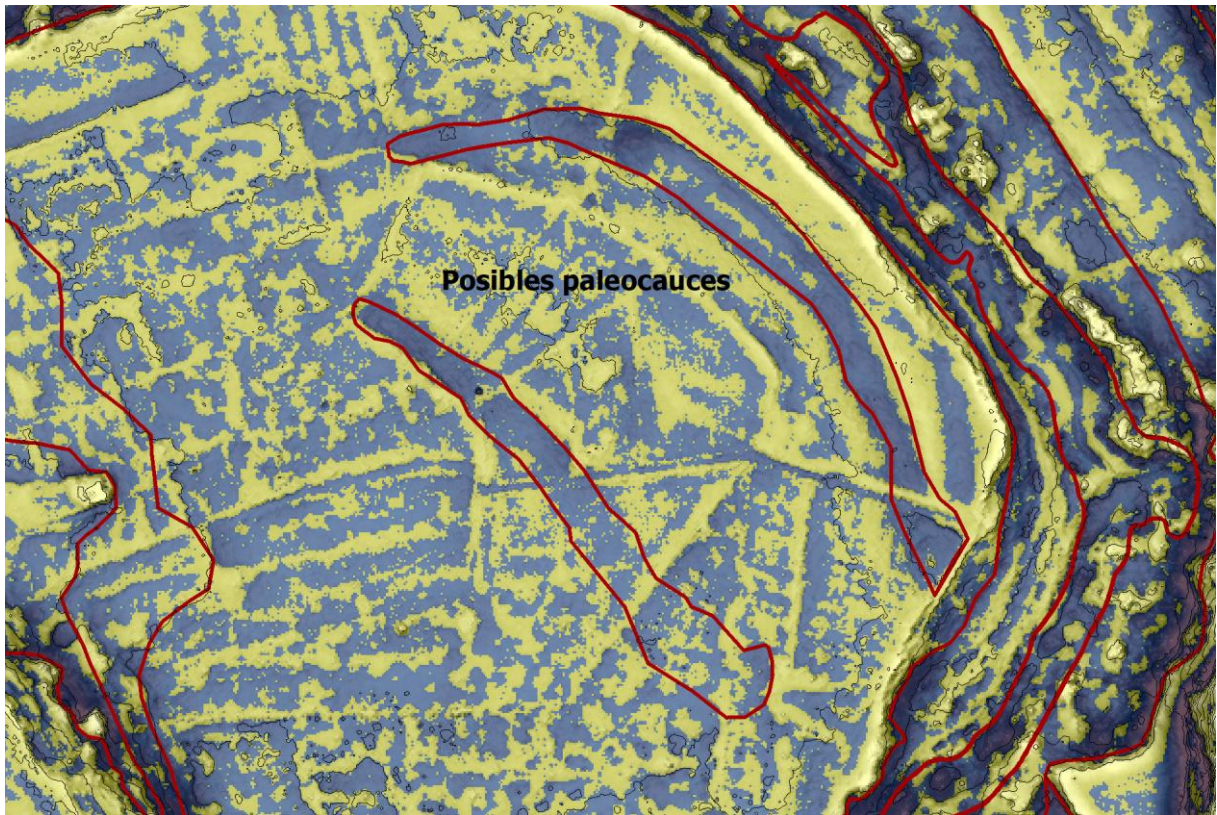


Figura 13. Posibles paleocauces o meandros abandonados identificados en el área de estudio a partir del Local Relief Model.

4.4. RED RELIEF IMAGE MAP (RRIM) Y MORPHOMETRIC PROTECTION INDEX-RED RELIEF IMAGE MAP (MPI-RRIM):

Se basa en la diferencia entre concavidades y convexidades utilizando las técnicas de visualización Openess Positive y Openess Negativo. El positivo arroja las convexidades, el negativo las concavidades. Para obtener el RRIM se realiza álgebra de mapas con una serie de parámetros concretos. Uno de los primeros pasos es la diferencia entre Openess positivo y negativo, el cual arroja el RVI (Ridge-Valley Index). Ésto se combina con la pendiente y aparecen imágenes muy visuales con una gran carga de información. El Red Relief Image Map es ampliamente utilizado en algunos sectores relacionados con la geotecnia y la topografía, principalmente en países asiáticos (en el cual fue inventado) para el análisis mediante distintos tipos de datos, pero principalmente LiDAR de fenómenos topográficos como deslizamientos o análisis geomorfológicos de volcanes. También se está probando su uso en cuestiones arqueológicas (Rondán, 2020) o sencillamente, para obtener una mejor visualización de los datos de elevación para afrontar distintas decisiones. Fue inventada por Tatsuro Chiba y patentada por Asia Air Survey, Co., Ltd.

El MPI-RRIM se realiza a partir de una calculadora proporcionada por Heitaro Kaneda, investigador de gran renombre en el mundo de la geomorfología. Al añadirle el MPI (*Morphometric Protection Index*) se consigue que las zonas más bajas, respecto a las colindantes, consigan un color levemente azulado o celeste, depende de la diferencia entre la

concauidad y la convexidad. Resulta especialmente apropiado a la hora de discernir vaguadas y leves diferencias de cota (figura 14).

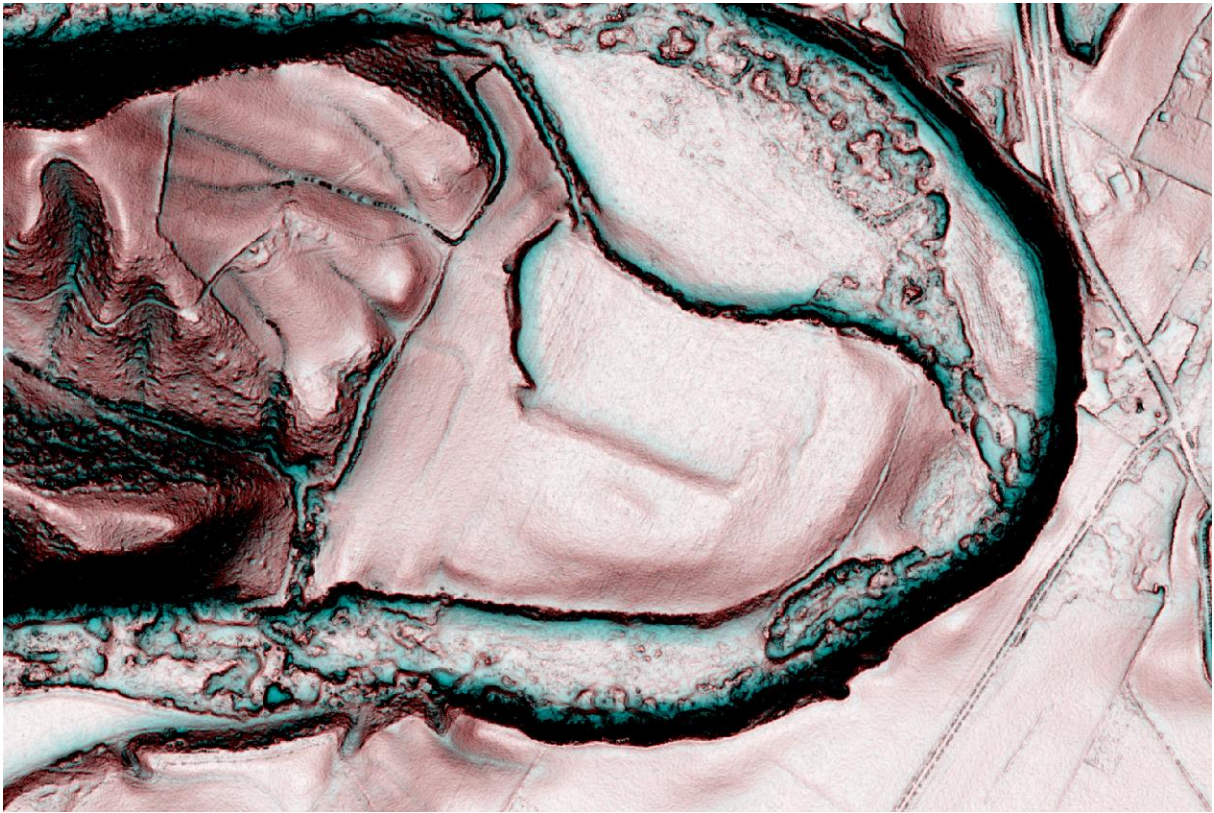


Figura 14. Definición del MPI-RRIM a la hora de discernir el cauce y algunas terrazas.

4.5. RESULTADOS

Antes de la exposición de los resultados del estudio geomorfológico, cabe destacar que cada una de las visualizaciones resulta adecuada para la correcta delineación de los elementos geomorfológicos, por lo que se han ido intercalando y mezclando mediante técnicas de visualización como la multiplicación de bandas o las transparencias. Como herramienta de apoyo, se ha utilizado el *Relief Visualization Toolbox*, herramienta creada por ZRC Sazu y que resulta de gran interés y facilidad a la hora de generar distintas visualizaciones, facilitando un innumerable flujo de operaciones sobre el MDT a utilizar como base.

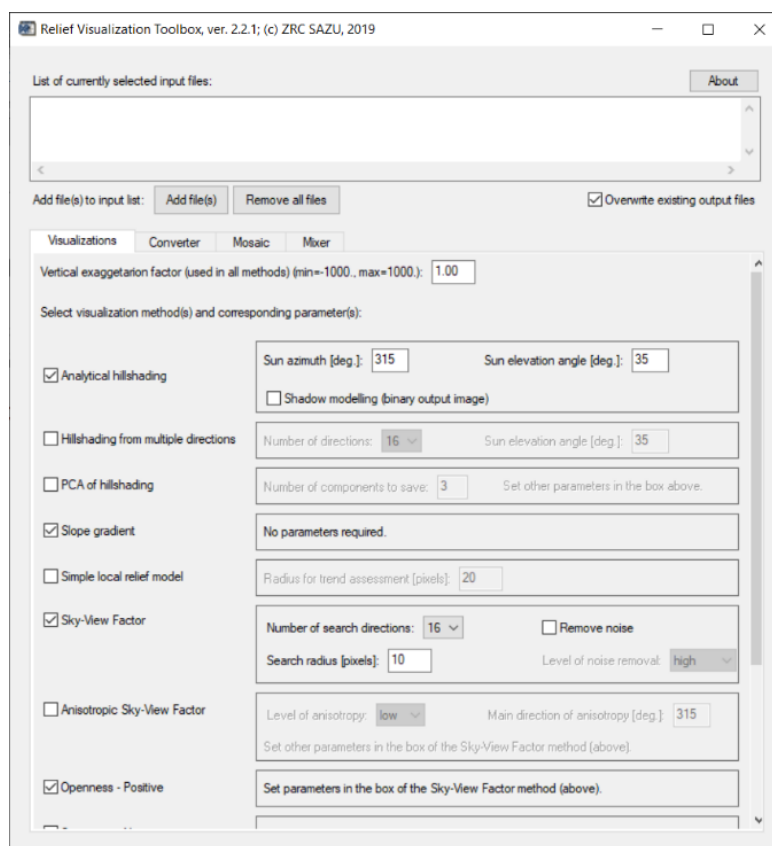


Figura 15. Imagen de la interfaz del Relief visualization toolbox.

Tal como se puede apreciar en la Figura 15, solo se deben ajustar los parámetros de cada técnica de visualización, que debe ser correctamente estudiada en función de aquello lo que se busque. Por ejemplo, el uso del Hillshade puede ser apropiado con una elevación del sol y un azimuth concretos para discernir elementos orientados hacia una dirección, por ejemplo, el oeste, y sin embargo esconder parcial o totalmente otros elementos que estén orientados hacia el este, debido al modelado de las sombras que se daría.

Así pues, los elementos que han sido cartografiados a través del entorno del Guadalete en el área de estudio son los siguientes, con escala de trabajo aproximada 1:1500:

- **Lecho actual:** Se trata de la franja longitudinal por donde discurre frecuentemente agua. Queda perfectamente caracterizada, si no existe vegetación excesivamente frondosa, mediante el MPI-RRIM.
- **Cauce actual:** Es el cauce principal actual del río extraído a partir de los datos LiDAR y de las ortofotografías históricas. Es fácilmente discernible con cualquier método de visualización basado en la propia topografía y la diferencia de valores de celdillas aledañas, gracias al encajonamiento del río en la mayoría de sus tramos. Tiene el mismo problema con la vegetación que el anterior.
- **Cauce secundario:** Para el caso del área de estudio, se trata de un cauce que existía en 1956 que posteriormente fue antropizado debido a la ubicación de

una EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales). Se encuentra activo y puede ser fácilmente inundable de nuevo en determinados eventos. Se tiene constancia de otros cauces secundarios de menor envergadura en el área de estudio, pero que, debido a la densa vegetación de ribera, no son accesibles visualmente por parte de las visualizaciones del MDT, por lo que no han sido cartografiados.

- **Llanuras de inundación:** Siguiendo la definición de Leopold et al. (1964), son los terrenos llanos a ambos márgenes del cauce formados con material sedimentario no consolidado que ha sido transportado por el cauce y que sufren inundaciones en periodos de retorno elevados. La diferencia altitudinal que presentan estos terrenos respecto al cauce es, como máximo 2 m. Mediante modelos de iluminación y la adición de curvas de nivel son fácilmente identificables.
- **Paleocauces:** Se trata de cauces primitivos del río Guadalete los cuales han sido identificados en el área de estudio. En este caso, se trata de meandros que el río ha ido abandonando en tanto se llevaba a cabo su evolución fluvial, quedando leves reflejos en el relieve, casi imperceptibles incluso en el propio campo. Resultan áreas de fácil inundabilidad.
- **Terraza baja:** Son aquellos lugares que, siendo reflejo de la evolución sedimentaria del cauce, aún pueden quedar inundados en eventos extraordinarios. En algunos casos resulta imposible diferenciarlas de algunas llanuras de inundación, por lo que se ha optado por delimitarlas en caso de existir también terrazas altas. En algunos casos, debido a la antropización directa del lugar, se conservan terrazas altas y se han perdido las bajas.
- **Terraza alta:** Pueden existir a distintas alturas, correspondientes a distintas épocas, siendo las más altas las más antiguas. Para este caso no se han distinguido cronológicamente, siendo sólo un acercamiento al entorno geomorfológico del lugar. Son difíciles de discernir en algunos casos, aunque el uso de Local Relief Model ha arrojado buenos resultados en este caso.
- **Barras:** Son características de los tramos de río trenzados y, generalmente, son móviles. Surgen debido a la elevada carga de sedimentos que arrastra el cauce, el cual acaba depositando en algunos lugares. Su identificación, al menos cuando presentan vegetación arbórea, resulta especialmente dificultosa en un LiDAR de baja densidad de puntos.

El resultado final de la aproximación geomorfológica ha sido una cartografía a una escala aproximada de 1:10.000 en la que se han distinguido los principales hitos geomorfológicos de manera generalista.

Siendo una aproximación, los hitos serán más visibles si se indagara en un mayor número de visualizaciones o se acotaran mejor los parámetros y, por supuesto, cuanto mejor es la densidad de puntos del LiDAR que sustenta el análisis (Figura 16):

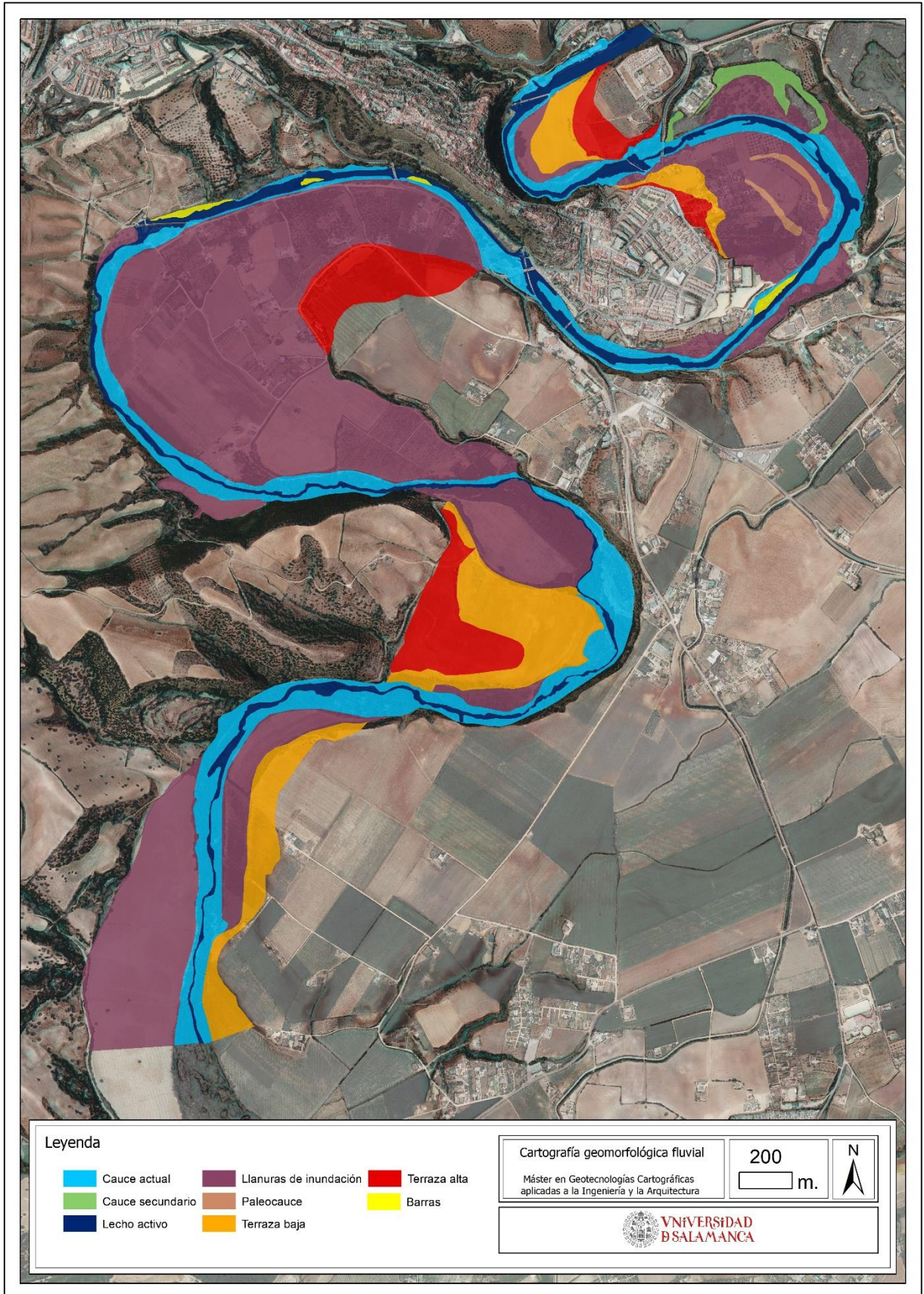


Figura 16. Cartografía geomorfológica fluvial obtenida.

5. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ESTUDIO HIDROLÓGICO

5.1.INTRODUCCIÓN AL MÉTODO RACIONAL SEGÚN LA INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS 5.2-IC "DRENAJE SUPERFICIAL" MODIFICADO POR TÉMEZ.

En este primer apartado, se determinan cuáles son los caudales hídricos de los cauces, con un periodo de retorno de caudal de máxima crecida ordinaria, 5, 50, 100 y 500 años. A través de estos valores se hallan las posibles zonas de inundabilidad que pudieran formarse al sobrepasar, dichos caudales hídricos, determinadas secciones de los cauces fluviales. El presente apartado se ha realizado siguiendo la *Instrucción 5.2-IC Drenaje Superficial* (Ecuación 1), adaptándolo con las pequeñas matizaciones y precisiones que han ido imponiéndose tras la publicación de la referida norma (Témez). La mayor parte de estas modificaciones han sido desarrolladas por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), recogiendo en sus correspondientes publicaciones.

Además, se han seguido las indicaciones recogidas en los documentos sobre los "Aspectos a tener en cuenta para la redacción de estudios hidrológicos e hidráulicos destinados a las diferentes figuras del planeamiento", y "Las Instrucciones para la realización de Estudios de Inundabilidad", elaborados por la Agencia de Medio Ambiente y Agua (A.M.A.). La metodología ira exponiéndose a medida que se van realizando los distintos cálculos, de esta manera cálculos y metodología avanzan por el estudio simultáneamente.

$$Q = \frac{C * I * A}{3,6} * K$$

Ecuación 1. Cartografía geomorfológica fluvial obtenida.

Dónde: Q = caudal de referencia en el punto en que desagüe una cuenca o superficie. (Unidad m³/s).

C= coeficiente medio de escorrentía de la cuenca o superficie drenada, típicamente 0,2 a 0,7. (Unidad adimensional).

I = intensidad media de precipitación correspondiente al periodo de retorno considerado y a un intervalo igual al tiempo de concentración. (Unidad mm/h).

A = superficie de la cuenca. (Unidad km²).

K = coeficiente dependiente de las unidades en que se exprese

Q y A, y que incluye un aumento del 20% en Q para tener en cuenta el efecto de las puntas de precipitación. (Unidad adimensional).

5.2. CÁLCULO DE LA SUPERFICIE DE LA CUENCA DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO

Para el análisis hidrológico del ámbito es necesario estudiar la cuenca hidrográfica sobre la que se sitúa. Para la obtención de la cuenca se ha hecho uso del LiDAR descrito en el [apartado 1](#), modelando de manera adecuada la cuenca gracias a los Sistemas de Información Geográfica.

Para la generación del MDT base para la delineación de la cuenca implicada se ha hecho uso de Global Mapper (Figura 17). En el mismo, se ha llevado a cabo la carga de la información LiDAR pública brindada por el IGN, habiendo sido modelado un MDS de la siguiente manera:

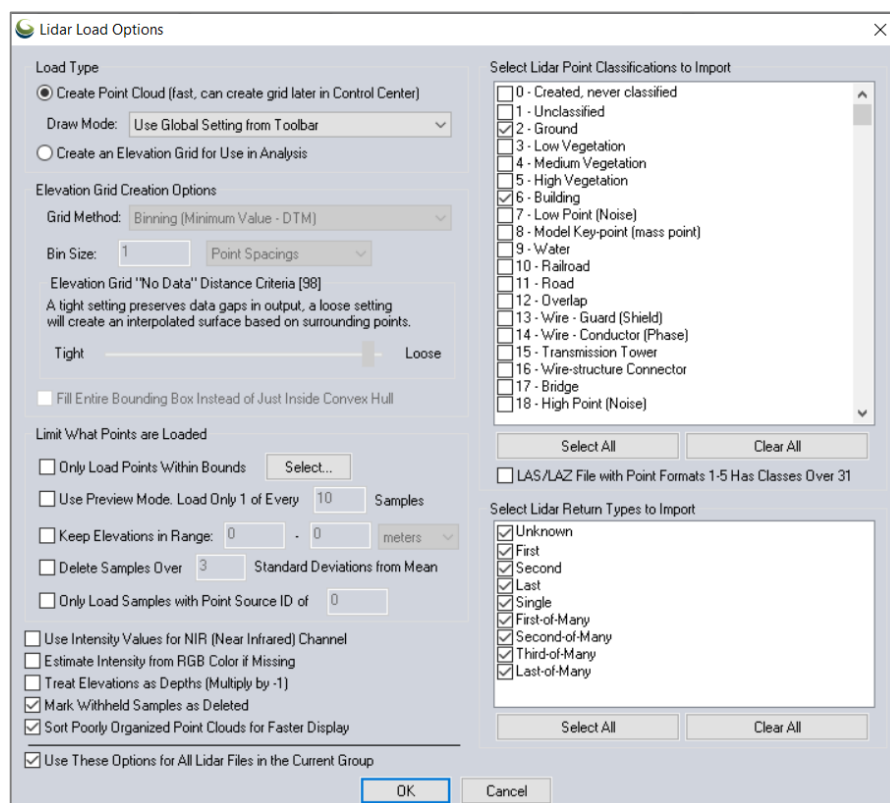


Figura 17. Determinación de puntos a implicar en la creación del MDS.

La inclusión de los edificios dentro del MDS necesario para la correcta modelización, a raíz de que los mismos influyen en la línea divisora de aguas, al igual que su no inclusión también puede provocar una serie de distorsiones que, a la hora de calcular con el SIG la cuenca implicada, haga que la misma contenga un error de varios cientos de metros que sobre el terreno son fácilmente corroborables, no siendo, por tanto, fiel a la realidad, cosa que es de mayor relevancia dadas las características urbanas del área de estudio.

El MDS resultante se ha modelado con una resolución de 1m, por lo que cada píxel del modelo que contiene un valor altimétrico representa 1m² de la realidad, siendo una buena resolución para la medida de 0,5 p/m² del LiDAR. La delineación de la cuenca mediante el MDT se realiza mediante un flujo de trabajo en ArcGis, flujo de trabajo que no se entiende necesario

explicar en el presente documento. Tras la generación de las orientaciones y las zonas de acumulación de flujo, mediante otras herramientas se consigue delinear la cuenca implicada en cada corriente identificada a través del MDT (Figura 18).

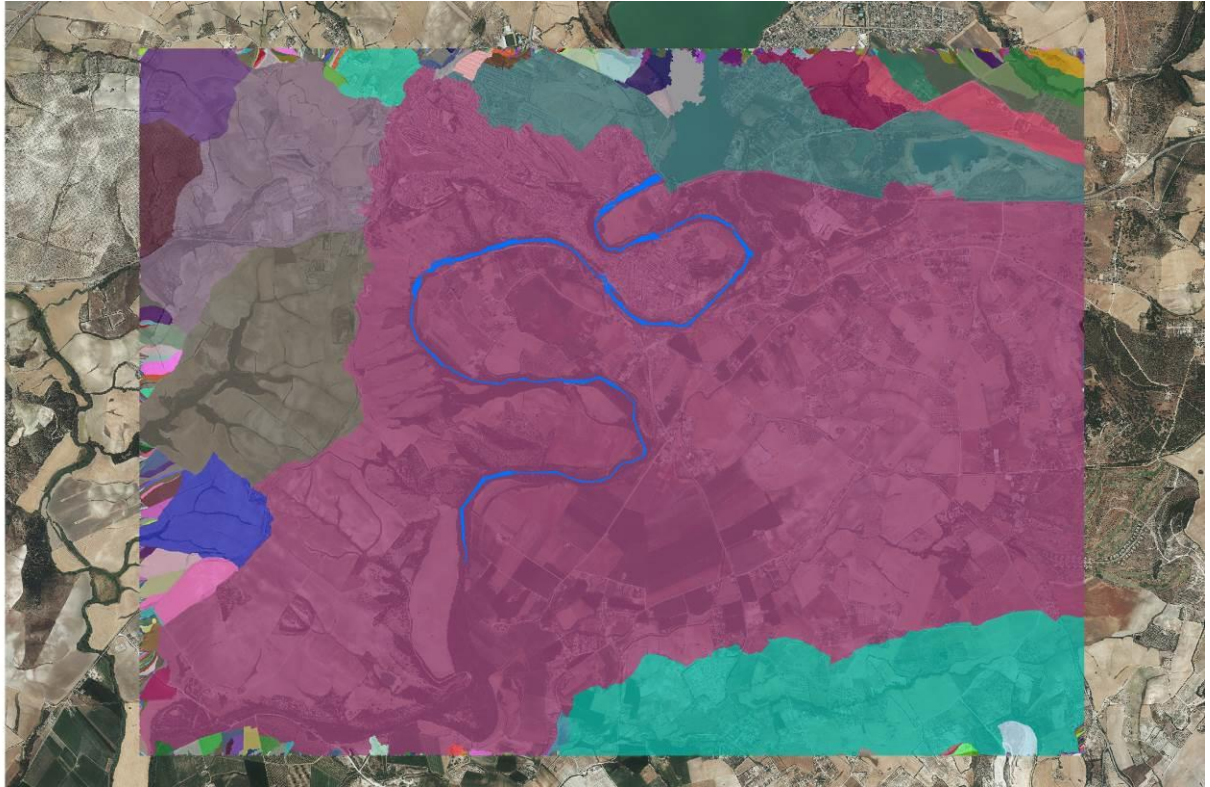


Figura 18. Cuencas delineadas mediante Modelo Digital de Elevaciones derivado de nube de puntos LiDAR

La precisión con la que ha sido delineada la cuenca responde a la precisión del LiDAR usado, la cual en altimetría (Z), ronda los ± 20 cm. La precisión a la hora de delinear cauces de escorrentía también resulta muy adecuada (Figura 19) (Tabla 3):



Figura 19. Arroyos de escorrentía delineados automáticamente a partir de Modelo Digital de Elevaciones derivado de nube de puntos LiDAR

Cuenca del Guadalete	Área cuenca	Longitud del cauce principal	Pendiente media del cauce	Cota max	Cota min	Coordenadas centroide	
	A (km ²)	L (Km)	J (m/m)			X	Y
	21,61	11,11	2,91	68,79	35,41	250284,26	4068672,4

Tabla 3. Operadores necesarios para los cálculos hidrológicos. Su obtención se deriva de los MDT generados a partir de LiDAR.

5.3. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN PARA LA CUENCA

Los cálculos necesarios para acometer el análisis se realizan mediante el apoyo de la publicación “*Máximas lluvias diarias en la España Peninsular*” del Ministerio de Fomento (CEDEX), aplicación aceptada por el documento sobre “Aspectos a tener en cuenta para la redacción de estudios hidrológicos e hidráulicos destinados a las diferentes figuras del planeamiento” (Agencia de Medioambiente y Agua), (Figura 20).

Según la misma publicación, en uno de sus anexos, los cálculos se acometen de la siguiente manera:

El **primero de los métodos** consiste en usar los planos y tablas incluidos en esta publicación, siguiendo el siguiente procedimiento:

- 1) Localizar en los planos el punto geográfico deseado con la ayuda del **plano-guía**
- 2) Estimar mediante las isolíneas presentadas el coeficiente de variación C_v (líneas rojas con valores inferiores a la unidad) y el valor medio \bar{P} de la máxima precipitación diaria anual (líneas moradas).
- 3) Para el periodo de retorno deseado T y el valor de C_v , obtener el factor de amplificación K_T mediante el uso de la **tabla K_T**
- 4) **realizar el producto** del factor de amplificación K_T por el valor medio \bar{P} de la máxima precipitación diaria anual obteniendo la precipitación diaria máxima para el periodo de retorno deseado P_T .

Ejemplo: precipitación diaria máxima en **Albacete** para un periodo de retorno de 25 años:

- en el **mapa** se obtiene $\bar{P} = 41$ (mm/día) y $C_v = 0,41$
- para $C_v = 0,41$ y $T = 25$ en la **tabla** se obtiene $K_{25} = 1,854$
- **multiplicando** se obtiene: $P_{25} = K_{25} \cdot \bar{P} = 1,854 \cdot 41 = 76,014$ (mm/día)

Figura 20. Captura de la publicación *Máximas lluvias diarias en la España Peninsular* con el método a seguir para la obtención de caudales máximos

Siendo el resultado de los cálculos el siguiente:

Cv				
0,4				
T05	T10	T50	T100	T500
1,247	1,492	2,113	2,403	3,128
69,83	83,55	118,33	134,57	175,17
P=56				

Tabla 4. Máximas lluvias diarias para el entorno de la Cuenca.

Otro de los parámetros que necesariamente hay que calcular para la obtención de la intensidad máxima diaria, es el **tiempo de concentración** (Ecuación 2). Se opta por el método de Témez, que se muestra válido para cuencas de 1km² hasta alrededor de 3000 km²:

$$t_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{j^{0,25}} \right)^{0,76}$$

Ecuación 2. Tiempo de concentración.

Dónde:

t_c = Es el tiempo de concentración de la cuenca natural, en horas

L= Es la longitud del curso principal, en Km.

i= Es la pendiente media del curso principal, en m/m.

Siendo $t_c = 1,526$

5.4. CÁLCULO DEL UMBRAL DE ESCORRENTÍA

El umbral de escorrentía P_0 se podrá obtener de las siguientes tablas (en función de los Usos y Clasificación de la tierra; o en función del Tipo de Terreno); multiplicando los valores en ella contenidos por el coeficiente corrector, el cual se contempla en el mapa del coeficiente corrector del umbral de escorrentía.

Este coeficiente refleja la variación regional de la humedad habitual en el suelo al comienzo de aguaceros significativos, e incluye una mayoración (del orden del 100%) para evitar sobrevaloraciones del caudal de referencia a causa de ciertas simplificaciones del tratamiento estadístico del método hidrometeorológico, el cual ha sido contrastado en distintos ambientes de la geografía española.

Así, para el uso de la Tabla 5, los suelos se clasificarán en los grupos de la Tabla 6, en cuya definición interviene la textura definida por la figura de diagrama triangular.

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADELETE.

Uso de suelo	[1]	Pen- diente (%)	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Mosaico de cultivos permanentes en secano		≥3	62	28	15	10
		<3	75	34	19	14
Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes en secano		≥3	39	20	12	8
		<3	66	29	15	10
Mosaico de cultivos anuales con prados o praderas en regadío	R	≥3	37	20	12	9
	N		42	23	14	11
	R/N	<3	47	25	16	13
Mosaico de cultivos permanentes en regadío		≥3	80	34	19	14
		<3	95	42	22	15
Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes en regadío		≥3	75	33	18	14
		<3	106	48	22	15
Mosaico de cultivos mixtos en secano y regadío	R	≥3	31	17	10	8
	N		34	20	13	10
	R/N	<3	37	22	14	11
Mosaico de prados o praderas con espacios significativos de vegetación natural y seminatural		≥3	70	33	18	13
		<3	120	55	22	14
Sistemas agroforestales		≥3	53	23	14	9
		<3	80	35	17	10
Pastizales naturales. Pastizales, praderas o cultivos agrícolas con arbolado adhesado		≥3	53	23	14	9
		<3	80	35	17	10
Frondosas, Perennifolias, Caducifolias y marcescentes			90	47	31	23
Otras frondosas de plantación		≥3	79	34	19	14
		<3	94	42	22	15
Bosques de ribera			76	34	22	16
Bosques de coníferas, bosque mixto. Laurisilva			90	47	31	23
Prados alpinos, Pastizales supraforestales		≥3	70	33	18	13
		<3	120	55	22	14
Formaciones herbáceas de llanuras aluviales inundadas y llanuras costeras, tierras bajas		>3	70	33	18	13
		<3	120	55	22	14
Pastizales mediterráneos		≥3	24	14	8	6
		<3	57	25	12	7
Otros pastizales templado oceánicos		≥3	53	23	14	9
		<3	79	35	17	10
Landas y matorrales mesófilas, Landas y matorrales en climas húmedos. Vegetación mesófila			76	34	22	16
Fayal-brezal macaronésico, vegetación esclerófila			60	24	14	10
Matorrales subarborescentes o arbustivos muy poco densos			60	24	14	10
Matorrales xerófilos macaronésicos, Claras de bosques			40	17	8	5
Zonas empantanadas fijas o en transición			60	24	14	10
Matorral boscoso			75	34	22	16
Playas y dunas			152	152	152	152
Ramblas con poca o sin vegetación			15	8	6	4
Afloramientos rocosos y canchales		≥3	2	2	2	2
		<3	4	4	4	4
Espacios con vegetación escasa, Xeroestepa subdesértica		≥3	24	14	8	6
		<3	58	25	12	7
Cárcavas y zonas en proceso de erosión, zonas quemadas			15	8	6	4
Humedales y zonas pantanosas			2	2	2	2
Marismas			2	2	2	2

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADELETE.

Uso de suelo	[1]	Pen- diente (%)	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Mosaico de cultivos permanentes en secano		≥3	62	28	15	10
		<3	75	34	19	14
Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes en secano		≥3	39	20	12	8
		<3	66	29	15	10
Mosaico de cultivos anuales con prados o praderas en regadío	R	≥3	37	20	12	9
	N		42	23	14	11
	R/N	<3	47	25	16	13
Mosaico de cultivos permanentes en regadío		≥3	80	34	19	14
		<3	95	42	22	15
Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes en regadío		≥3	75	33	18	14
		<3	106	48	22	15
Mosaico de cultivos mixtos en secano y regadío	R	≥3	31	17	10	8
	N		34	20	13	10
	R/N	<3	37	22	14	11
Mosaico de prados o praderas con espacios significativos de vegetación natural y seminatural		≥3	70	33	18	13
		<3	120	55	22	14
Sistemas agroforestales		≥3	53	23	14	9
		<3	80	35	17	10
Pastizales naturales. Pastizales, praderas o cultivos agrícolas con arbolado adhesado		≥3	53	23	14	9
		<3	80	35	17	10
Frondosas, Perennifolias, Caducifolias y marcescentes			90	47	31	23
Otras frondosas de plantación		≥3	79	34	19	14
		<3	94	42	22	15
Bosques de ribera			76	34	22	16
Bosques de coníferas, bosque mixto. Laurisilva			90	47	31	23
Prados alpinos, Pastizales supraforestales		≥3	70	33	18	13
		<3	120	55	22	14
Formaciones herbáceas de llanuras aluviales inundadas y llanuras costeras, tierras bajas		>3	70	33	18	13
		<3	120	55	22	14
Pastizales mediterráneos		≥3	24	14	8	6
		<3	57	25	12	7
Otros pastizales templado oceánicos		≥3	53	23	14	9
		<3	79	35	17	10
Landas y matorrales mesófilas, Landas y matorrales en climas húmedos. Vegetación mesófila			76	34	22	16
Fayal-brezal macaronésico, vegetación esclerófila			60	24	14	10
Matorrales subarbustivos o arbustivos muy poco densos			60	24	14	10
Matorrales xerófilos macaronésicos, Claras de bosques			40	17	8	5
Zonas empantanadas fijas o en transición			60	24	14	10
Matorral boscoso			75	34	22	16
Playas y dunas			152	152	152	152
Ramblas con poca o sin vegetación			15	8	6	4
Afloramientos rocosos y canchales		≥3	2	2	2	2
		<3	4	4	4	4
Espacios con vegetación escasa, Xeroestepa subdesértica		≥3	24	14	8	6
		<3	58	25	12	7
Cárcavas y zonas en proceso de erosión, zonas quemadas			15	8	6	4
Humedales y zonas pantanosas			2	2	2	2
Marismas			2	2	2	2

Tablas 5 y 6: Valor inicial del umbral de escorrentía P_0 (mm). *Simplificado de Ministerio de Fomento (BOE, 10 marzo 2016, tabla 2.3), agrupando varios usos del suelo con valores idénticos y eliminando algunos muy poco usuales.*

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.

Grupo	Infiltración (cuando están muy húmedos)	Potencia	Textura	Drenaje
A	Rápida	Grande	Arenosa Areno- limosa	Perfecto
B	Moderada	Media a grande	Franco- arenosa Franca Franco- arcillosa- arenosa Franco- limosa	Bueno a moderado
C	Lenta	Media a pequeña	Franco- arcillosa Franco- arcillosa- arenosa Arcillo- arenosa	Imperfecto
D	Muy lenta	Pequeño (litosuelo) u horizontes de arcilla	Arcillosa	Pobre o muy pobre

Tabla 7: Clasificación de suelos a efectos del umbral de escorrentía

Diagrama triangular para la determinación de la textura.

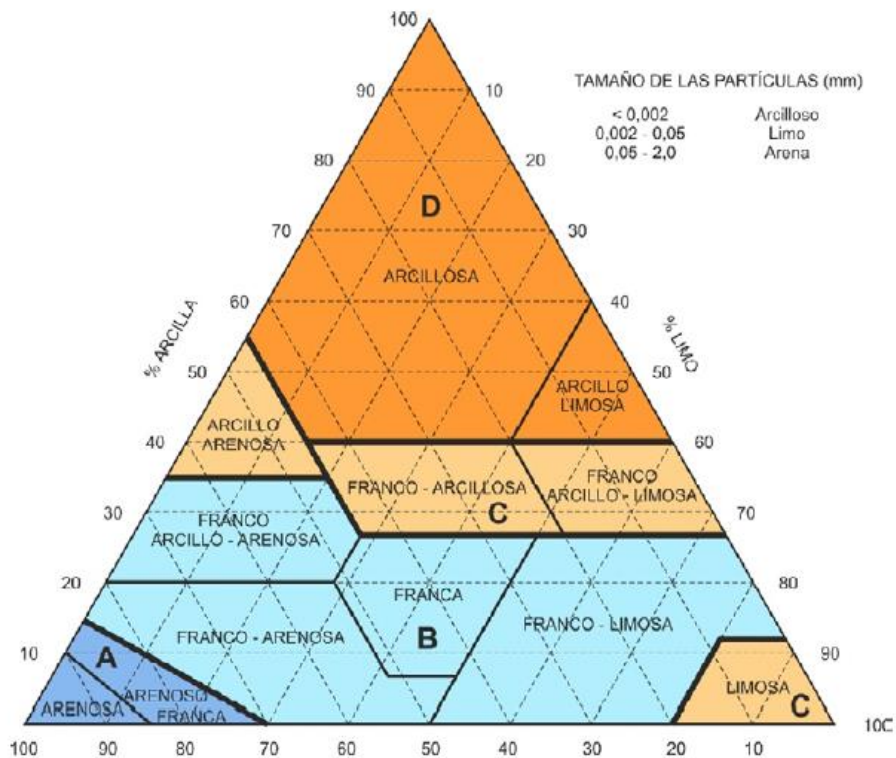


Figura 21. Determinación de la textura

Regiones para la caracterización del Coeficiente Corrector de Escorrentía.



Figura 22. Regiones contempladas en la caracterización del Coef. Corrector de escorrentía.

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADELETE.

Región	Valor medio, β_m	Desviación respecto al valor medio para el intervalo de confianza del			Periodo de retorno T (años), F_T				
		50% Δ_{50}	67% Δ_{67}	90% Δ_{90}	2	5	25	100	500
11	0,90	0,20	0,30	0,50	0,80	0,90	1,13	1,34	1,59
12	0,95	0,20	0,25	0,45	0,75	0,90	1,14	1,33	1,56
13	0,60	0,15	0,25	0,40	0,74	0,90	1,15	1,34	1,55
21	1,20	0,20	0,35	0,55	0,74	0,88	1,18	1,47	1,90
22	1,50	0,15	0,20	0,35	0,74	0,90	1,12	1,27	1,37
23	0,70	0,20	0,35	0,55	0,77	0,89	1,15	1,44	1,82
24	1,10	0,15	0,20	0,35	0,76	0,90	1,14	1,36	1,63
25	0,60	0,15	0,20	0,35	0,82	0,92	1,12	1,29	1,48
31	0,90	0,20	0,30	0,50	0,87	0,93	1,10	1,26	1,45
32	1,00	0,20	0,30	0,50	0,82	0,91	1,12	1,31	1,54
33	2,15	0,25	0,40	0,65	0,70	0,88	1,15	1,38	1,62
41	1,20	0,20	0,25	0,45	0,91	0,96	1,00	1,00	1,00
42	2,25	0,20	0,35	0,55	0,67	0,86	1,18	1,46	1,78
511	2,15	0,10	0,15	0,20	0,81	0,91	1,12	1,30	1,50
512	0,70	0,20	0,30	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
52	0,95	0,20	0,25	0,45	0,89	0,94	1,09	1,22	1,36
53	2,10	0,25	0,35	0,60	0,68	0,87	1,16	1,38	1,56
61	2,00	0,25	0,35	0,60	0,77	0,91	1,10	1,18	1,17
71	1,20	0,15	0,20	0,35	0,82	0,94	1,00	1,00	1,00
72	2,10	0,30	0,45	0,70	0,67	0,86	1,00	-	-
81	1,30	0,25	0,35	0,60	0,76	0,90	1,14	1,34	1,58
821	1,30	0,35	0,50	0,85	0,82	0,91	1,07	-	-
822	2,40	0,25	0,35	0,60	0,70	0,86	1,16	-	-
83	2,30	0,15	0,25	0,40	0,63	0,85	1,21	1,51	1,85
91	0,85	0,15	0,25	0,40	0,72	0,88	1,19	1,52	1,95
92	1,45	0,30	0,40	0,70	0,82	0,94	1,00	1,00	1,00
93	1,70	0,20	0,25	0,45	0,77	0,92	1,00	1,00	1,00
941	1,80	0,15	0,20	0,35	0,68	0,87	1,17	1,39	1,64
942	1,20	0,15	0,25	0,40	0,77	0,91	1,11	1,24	1,32
951	1,70	0,30	0,40	0,70	0,72	0,88	1,17	1,43	1,78
952	0,85	0,15	0,25	0,40	0,77	0,90	1,13	1,32	1,54
101	1,75	0,30	0,40	0,70	0,76	0,90	1,12	1,27	1,39
1021	1,45	0,15	0,25	0,40	0,79	0,93	1,00	1,00	1,00
1022	2,05	0,15	0,25	0,40	0,79	0,93	1,00	1,00	1,00

En Ceuta y Melilla se adoptarán valores similares a los de la región 61.
 Pueden obtenerse valores intermedios por interpolación adecuada a partir de los datos de esta tabla
 En todos los casos $F_{10}=1,00$

Tabla 8. Valores de Coeficiente Corrector correspondiente a calibraciones según regiones. (BOE, 10 marzo 2016, tabla 2.5).

Partiendo de la nube de puntos LiDAR con la que se ha venido trabajando correspondiente a la zona donde se sitúa el ámbito de estudio, se ha determinado que la pendiente media de la cuenca es mayor del 3%.

Según las unidades litológicas consultadas en el DERA (Datos Espaciales de Referencia de Andalucía), dentro de la zona se identifican suelos tipo C, con texturas franco-arcillosas (Figura 21) muy extendidas en el municipio (Infiltración lenta y drenaje imperfecto).

La pendiente media de la cuenca es del 13,40%, dato que ha sido calculado a partir de LIDAR, que el ámbito presenta suelos del grupo B, las características hidrológicas y los usos del suelo y sus coberturas que se han obtenido a partir del Sistema de Información del Patrimonio Natural de Andalucía (SIPNA 2019) existiendo una predominancia de suelos desnudos con cultivos herbáceos sobre pendientes relativamente escarpadas, se obtiene el siguiente valor de escorrentía:

$$P_0 \text{ inicial ponderado} = 27,13$$

5.5. CÁLCULO DE CAUDALES DE CRECIDA EXTRAORDINARIA

Para la correcta caracterización de los caudales de crecida extraordinaria en el área de estudio, dada la gran cantidad de coeficientes correctores y cálculos que no son objeto del presente Trabajo Fin de Máster, se han introducido los cálculos de los datos anteriormente expuestos más otros datos consultados en la norma, como (I_1/I_d) - Factor Torrencialidad = 9 y β - Factor de Corrección de Humedad = 2.7.

Todo ello ha sido introducido en la calculadora brindada por el Área de Ingeniería Hidráulica del Dpto. de Ingeniería Civil e Ingeniería Industrial de la UCA, más concretamente gracias al profesor Olegario Castillo, la cual puede ser consultada en la siguiente dirección:

http://lab-hidrologia.uca.es/drenaje_superficial_52IC_2016/index.php

Los resultados para cada periodo de retorno han sido los siguientes:

T= 5 años


DATOS INICIALES			
Región nº:	511	Tipo de obra:	Drenaje auxiliar
Periodo de Retorno (años):	5		
GEOMETRÍA DE LA CUENCA			
Área de la Cuenca (km ²):	21.61	Cota Máxima del cauce (m):	68.79
Longitud del Cauce (km):	11.11	Cota Mínima del Cauce (m):	30.12
T _c - Tiempo de Concentración (h):	5.48	Pendiente del Cauce (%):	0.35
PRECIPITACIONES			
P _d - Máxima Lluvia diaria (mm):	69.83	F _a - Relación (I ₁ /I _d) según fórmula:	3.21
P _d (T10) Regiones 72-821-822:	1	F _b - Relación (I ₁ /I _d) según pluviómetro:	0
K _a - Factor Reductor de Precipitación:	0.91	I _{IDF} (T,t _c):	
<input type="checkbox"/> Forzar valor de Ka = 1		I ₂₄ (T,24):	
P' _d - Máxima Lluvia Corregida (mm/h):	63.62	F _{int} - Factor de Intensidad:	3.21
I' _d - Intensidad Media Diaria (mm/h):	2.65	I(5,5.48)- Intensidad(mm/h):	8.51
(I ₁ /I _d)- Factor Torrencialidad:	9		
PERDIDAS			
P _o - Umbral de Escorrentía (mm):	27.13	Forzar valor del Coef. corrector β:	2.7
β _m - Coef. corrector Umbral de Escorrentía:	2.15	β- Coef. corrector utilizado:	2.7
Δ50% - Intervalo de confianza:	0.1	P' _o - Umbral Escorrentía Corregido (mm):	73.17
F _T - Factor Periodo de Retorno:	0.91	Relación P' _d /P' _o :	0.87
β ^{DT} - Coef. Drenaje Transversal:	1.87	C - Coeficiente de Escorrentía:	0
β ^{PM} - Coef. Drenajes Auxiliares:	1.96	K _t - Coeficiente de Uniformidad:	1.37
RESULTADOS			
 Universidad de Cádiz Dpto. Ing. Civil e Ing. Industrial Área de Ingeniería Hidráulica Olegario Castillo http://lab-hidrologia.uca.es/ olegario.castillo@uca.es		CAUDAL TOTAL (m³/s): 0	

Figura 23. Datos de escorrentía para T=5. Fuente: Área de Ingeniería Hidráulica. UCA. Olegario Castillo.

T = 10 años



DATOS INICIALES			
Región nº:	511	Tipo de obra:	Drenaje auxiliar
Período de Retorno (años):	10		
GEOMETRÍA DE LA CUENCA			
Área de la Cuenca (km ²):	21.61	Cota Máxima del cauce (m):	68.79
Longitud del Cauce (km):	11.11	Cota Mínima del Cauce (m):	30.12
T _c - Tiempo de Concentración (h):	5.48	Pendiente del Cauce (%):	0.35
PRECIPITACIONES			
P _d - Máxima Lluvia diaria (mm):	83.55	F _a - Relación (I ₁ /I _d) según fórmula:	3.21
P _d (T10) Regiones 72-821-822:	1	F _b - Relación (I ₁ /I _d) según pluviómetro:	0
K _a - Factor Reductor de Precipitación:	0.91	I _{IDF} (T,t _c):	
<input type="checkbox"/> Forzar valor de Ka = 1		I ₂₄ (T,24):	
P' _d - Máxima Lluvia Corregida (mm/h):	76.12	F _{int} - Factor de Intensidad:	3.21
I' _d - Intensidad Media Diaria (mm/h):	3.17	I(10,5.48)- Intensidad(mm/h):	10.18
(I ₁ /I _d)- Factor Torrencialidad:	9		
PERDIDAS			
P _o - Umbral de Escorrentía (mm):	27.13	Forzar valor del Coef. corrector β:	2.7
β _m - Coef. corrector Umbral de Escorrentía:	2.15	β- Coef. corrector utilizado:	2.7
Δ50% - Intervalo de confianza:	0.1	P' _o - Umbral Escorrentía Corregido (mm):	73.25
F _T - Factor Periodo de Retorno:	1	Relación P' _d /P' _o :	1.04
β ^{DT} - Coef. Drenaje Transversal:	2.05	C - Coeficiente de Escorrentía:	0.01
β ^{PM} - Coef. Drenajes Auxiliares:	2.15	K _t - Coeficiente de Uniformidad:	1.37
RESULTADOS			
		CAUDAL TOTAL (m³/s): 0.55	
 Universidad de Cádiz Dpto. Ing. Civil e Ing. Industrial Área de Ingeniería Hidráulica Olegario Castillo http://lab-hidrologia.uca.es/ olegario.castillo@uca.es			

Figura 24. Datos de escorrentía para T=10. Fuente: Área de Ingeniería Hidráulica. UCA. Olegario Castillo.

T = 50 años

DATOS INICIALES			
Región nº:	511	Tipo de obra:	Drenaje auxiliar
Periodo de Retorno (años):	50		
GEOMETRÍA DE LA CUENCA			
Área de la Cuenca (km ²):	21.61	Cota Máxima del cauce (m):	68.79
Longitud del Cauce (km):	11.11	Cota Mínima del Cauce (m):	30.12
T _c - Tiempo de Concentración (h):	5.48	Pendiente del Cauce (%):	0.35
PRECIPITACIONES			
P _d - Máxima Lluvia diaria (mm):	118.33	F _a - Relación (I ₁ /I _d) según fórmula:	3.21
P _d (T10) Regiones 72-821-822:	1	F _b - Relación (I ₁ /I _d) según pluviómetro:	0
K _a - Factor Reductor de Precipitación:	0.91	I _{IDF} (T,t _c):	
<input type="checkbox"/> Forzar valor de Ka = 1		I ₂₄ (T,24):	
P' _d - Máxima Lluvia Corregida (mm/h):	107.8	F _{int} - Factor de Intensidad:	3.21
I' _d - Intensidad Media Diaria (mm/h):	4.49	I(50,5.48)- Intensidad(mm/h):	14.42
(I ₁ /I _d)- Factor Torrencialidad:	9		
PERDIDAS			
P _o - Umbral de Escorrentía (mm):	27.13	Forzar valor del Coef. corrector β:	2.7
β _m - Coef. corrector Umbral de Escorrentía:	2.15	β- Coef. corrector utilizado:	2.7
Δ50% - Intervalo de confianza:	0.1	P' _o - Umbral Escorrentía Corregido (mm):	73.25
F _T - Factor Periodo de Retorno:	1.21	Relación P' _d /P' _o :	1.47
β ^{DT} - Coef. Drenaje Transversal:	2.48	C - Coeficiente de Escorrentía:	0.07
β ^{PM} - Coef. Drenajes Auxiliares:	2.6	K _t - Coeficiente de Uniformidad:	1.37
RESULTADOS			
			CAUDAL TOTAL (m³/s): 8.83



Universidad de Cádiz
 Dpto. Ing. Civil e Ing. Industrial
 Área de Ingeniería Hidráulica
 Olegario Castillo
<http://lab-hidrologia.uca.es/>
olegario.castillo@uca.es

CAUDAL TOTAL (m³/s): 8.83

Figura 25. Datos de escorrentía para T=50. Fuente: Área de Ingeniería Hidráulica. UCA. Olegario Castillo.

T=500 años


DATOS INICIALES			
Región nº:	511	Tipo de obra: Drenaje auxiliar	
Periodo de Retorno (años):	500		
GEOMETRÍA DE LA CUENCA			
Área de la Cuenca (km ²):	21.61	Cota Máxima del cauce (m):	68.79
Longitud del Cauce (km):	11.11	Cota Mínima del Cauce (m):	30.12
T _c - Tiempo de Concentración (h):	5.48	Pendiente del Cauce (%):	0.35
PRECIPITACIONES			
P _d - Máxima Lluvia diaria (mm):	175.17	F _a - Relación (I ₁ /I _d) según fórmula:	3.21
P _d (T10) Regiones 72-821-822:	1	F _b - Relación (I ₁ /I _d) según pluviómetro:	0
K _a - Factor Reductor de Precipitación: 0.91		I _{DF} (T,t _c):	
<input type="checkbox"/> Forzar valor de Ka = 1		I ₂₄ (T,24):	
P' _d - Máxima Lluvia Corregida (mm/h):	159.58	F _{int} - Factor de Intensidad:	3.21
I' _d - Intensidad Media Diaria (mm/h):	6.65	I(500,5.48)- Intensidad(mm/h):	21.35
(I ₁ /I _d)- Factor Torrencialidad:	9		
PERDIDAS			
P _o - Umbral de Escorrentía (mm):	27.13	Forzar valor del Coef. corrector β:	2.7
β _m - Coef. corrector Umbral de Escorrentía:	2.15	β- Coef. corrector utilizado:	2.7
Δ50% - Intervalo de confianza:	0.1	P' _o - Umbral Escorrentía Corregido (mm):	73.25
F _T - Factor Periodo de Retorno:	1.5	Relación P' _d /P' _o :	2.18
β ^{DT} - Coef. Drenaje Transversal:	3.08	C - Coeficiente de Escorrentía:	0.17
β ^{PM} - Coef. Drenajes Auxiliares:	3.23	K _ξ - Coeficiente de Uniformidad:	1.37
RESULTADOS			
		CAUDAL TOTAL (m³/s): 30.11	
 Universidad de Cádiz Dpto. Ing. Civil e Ing. Industrial Área de Ingeniería Hidráulica Olegario Castillo http://lab-hidrologia.uca.es/ olegario.castillo@uca.es			

Figura 27. Datos de escorrentía para T=500. Fuente: Área de Ingeniería Hidráulica. UCA. Olegario Castillo.

Dado el régimen no natural del Guadalete, el cual se encuentra regulado por 3 embalses aguas arriba del área de estudio, se ha consultado la publicación base para la producción de cartografía de zonas inundables, la "Guía Metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables", la cual cita:

“En general, se recomienda considerar que el embalse se encuentra en su máximo nivel normal de explotación en el instante en que llega la avenida. En el caso de que los aliviaderos dispongan de compuertas, se recomienda adoptar un criterio de gestión consistente en ir abriendo las compuertas, según llega la avenida, de tal forma que se mantenga constante el nivel de embalse (es decir, que se vierta un caudal igual al de entrada en el embalse) hasta que las compuertas estén totalmente abiertas, instante en el que los aliviaderos empezarán a funcionar como si fueran de labio fijo.”

Habiéndose realizado una consulta intensiva de los datos disponibles para caudales en el Guadalete, se ha llegado a la conclusión de que los mismos ya no son accesibles desde la web del SAIH. Durante un tiempo, cuando el SAIH de la confederación del Guadalete-Barbate era gestión del organismo de cuenca del Guadalquivir sí fueron accesibles datos como los caudales máximos, caudales instantáneos, pendiente del cauce, profundidad del cauce, etc.

Por lo tanto, realizando una búsqueda intensiva de información sobre caudales, se ha llegado a la publicación *Caracterización de la inundabilidad en el estuario del río Guadalete: efecto combinado de mareas y crecidas fluviales* (FERNANDEZ-MONTBLANC, T. et al) que ha sido de gran ayuda para la correcta caracterización de los caudales en distintos eventos meteorológicos extremos pasados. En dicha publicación se han simulado dos casos reales, acaecidos durante el invierno de 2009/2010, año recordado por la altísima pluviosidad, sin parangón en unos 25 años. También, en esta publicación, se ha modelado un caso extremo con baja probabilidad de ocurrencia.

Para la reproducción de ambos eventos tormentosos pasados se han utilizado los datos de caudal desembalsado total, por aquel entonces disponibles, medidos en el marco de control E71 en la Presa de Arcos. Ambos eventos coincidieron con un caudal máximo de 200 m³/s. Ambos temporales, según se cita en la publicación, coincidieron con avenidas y crecidas que en algunos puntos aguas abajo del embalse fueron especialmente relevantes.



Figura 28. Evento en diciembre de 2009 aguas debajo de la presa. Diario de Cádiz.

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.

En otro lugar, para el evento extremo de baja ocurrencia se utilizaron los datos de caudal de avenida para el periodo de retorno de 500 años recogidos en el proyecto para el aliviadero de la presa de Arcos de la Frontera. Este caudal se correspondería con 1200 m³/s, siendo sensiblemente menor al máximo que puede ser vertido por el aliviadero según la ficha técnica de la presa en el SNCZI, de 1730 m³/s.

Los dos primeros eventos, según la publicación citando a la Agencia Andaluza del Agua fueron los más lluviosos en los últimos 25 años, estableciéndose así un periodo de retorno aproximado, por lo que de manera grosera se han modelado dichos caudales junto con la escorrentía obtenida para los periodos de retorno más interesantes T50, T100 y T500. De manera grosera, se ha equiparado el caudal de desembalse propuesto en la publicación para los periodos de retorno que se modelaran (Tabla 9), estableciéndose la equivalencia T25=200 m³/s. Por lo tanto, para T50=400 m³/s, T100=800 m³/s y T500 como se ha comentado anteriormente, 1200 m³/s:

	Periodos de retorno				
	T05	T10	T50	T100	T500
Precipitaciones máximas diarias	69,832	83,552	118,328	134,568	175,168
Caudales de crecida extraordinaria (m ³ /s)	0 (No se da escorrentía)	0,55	8,83	14,01	30,11
Caudal total, embalse + evento extraordinario	-	-	408,83	814,01	1230,11

Tabla 9. Caudales finales obtenidos para la porción de cuenca objeto de estudio.

6. ESTUDIO HIDRÁULICO

El estudio hidráulico tiene como objetivo simular el comportamiento del agua en un conjunto de secciones establecidas. Esto permitirá conocer velocidades y calados de la lámina de agua para unos caudales determinados.

Es importante aclarar que, a diferencia del estudio hidrológico, en este apartado sólo se tienen en cuenta las variables del tramo de estudio, es decir, no se consideran parámetros referentes a la cuenca, sino que se acota la superficie para la que se quiere conocer la mancha de inundación. En términos de procesamiento, resulta imprescindible la disminución del número de celdillas a procesar juega a favor del gran número de simulaciones que quieren realizarse.

En este caso el tramo estudiado es el que afecta al ámbito de los meandros del Guadalete a su paso por el entorno urbano de Arcos de la Frontera, dados los motivos expuestos en el primer apartado del presente documento.

6.1. MODELO HIDRÁULICO IBER

El modelo IBER es un modelo matemático bidimensional desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de A Coruña, junto con el grupo FLUMEN y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería o CIMNE por sus siglas.

IBER se está convirtiendo en software de referencia a raíz de sus buenos resultados y su robusta estructura de cálculo. Cuenta en éste caso con tres módulos:

- Hidrodinámico
- Turbulencia
- Transporte de sedimentos

En su módulo hidrodinámico resuelve, al igual que HEC-RAS, las ecuaciones de Saint Venant 2D. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos, formada en cada caso por elementos triangulares o cuadriláteros, y derivada de un MDT o MDS según corresponda.

Su interesante módulo de turbulencia permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, pudiéndose utilizar para ello diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con diferente grado de complejidad. En su módulo asociado al transporte de sedimentos, es posible resolver ecuaciones que arrojen resultados respecto a la masa de sedimento arrastrada desde el fondo o transporte turbulento en suspensión.

Por otro lado, IBER permite introducir distintas barreras de manera muy precisa, como puentes o azudes, que, mediante un levantamiento topográfico de cada uno de ellos, es posible añadir al modelo de forma que se obtengan unos resultados bastante acordes a la realidad.

Otra gran ventaja y elemento decisivo a la hora de elegirlo como modelo base del presente documento es la ventaja que supone que IBER sea software libre y su precisión y fiabilidad en el formato 2D respecto a llanuras de inundación ha hecho que, aun siendo un modelo con pocos años de vida, se haya posicionado como uno de los más fiables y robustos a disposición de la mayoría de las personas.

La introducción de datos geomáticos en IBER es total y natural con amplios formatos leídos por el programa. Lee nativamente formatos como shapefile o ASCII, además de TIF u otros formatos raster. También es posible la introducción de datos generados en AutoCAD, por lo que se facilita enormemente la integración de datos geomáticos gestionados y creados en SIG, por ejemplo, con la introducción de dichos datos al modelo sin tener que pasar por intercambios de formato.

6.2. TRATAMIENTO NECESARIO DEL MDS

El tramo objeto de análisis, tal como se ha indicado en apartados anteriores, se identifica como un tramo de especial dificultad a la hora de modelar una malla para su uso en el modelo hidráulico que sea lo más fiable a la realidad y comportamiento del agua posible.

Algunos de los potenciales inductores de problemas a en la recogida de datos LiDAR con la densidad de puntos que actualmente ofrece la primera cobertura son:

- Excesiva vegetación de ribera fruto del régimen de caudales marcado por la Confederación. Esta vegetación actúa como pantalla en los retornos, por lo que existen muchos tramos que no tienen recogidos retornos de suelo. Esto podría ser relativamente subsanable en caso de utilizar una densidad de puntos mayor. Por tanto, se debe hacer una revisión de los puntos clasificados como vegetación, de distinto porte, en la zona de ribera y corroborar que la clasificación es correcta.
- Interacción de la lámina de agua en los retornos. A raíz de su entidad y las regulaciones de caudal, el Guadalete posee una lámina de agua constante durante todo el año. Esto juega en contra de una adecuada captura, dado que el cauce no aparece bien representado debido a que la tecnología LiDAR actual no mide debajo de agua, por lo que, en cualquier caso, los puntos que retornan sobre la lámina de agua se corresponden al nivel de la misma en ese momento. La verdadera forma del cauce queda oculta bajo una interpolación o triangulación que no representa la realidad sobre el territorio (Figura 29).
- Se hace necesario la eliminación de puentes del MDS. Según suscribe la guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables:

"El proceso necesario para la eliminación de los puentes se describe a continuación:

1. Identificación de las zonas que son candidatas a ser clasificadas como puentes o pasos elevados.

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.

2. Comprobación de si realmente se trata de un puente- paso elevado o, de lo contrario, se trata de un falso positivo.

3. En el caso de tratarse de un puente, retoque manual de la parte del mismo que se quiere eliminar (zona marcada con círculos en la Ilustración 2.7).

4. Eliminación de las alturas de los puntos del MDS correspondientes a la zona que se haya seleccionado como puente. Si se interpolan directamente los puntos que se han borrado, habrá problemas con la calidad del MDT obtenido porque también se expandirán las alturas de la parte alta del puente hacia la zona eliminada. Para evitar este problema, será necesario definir líneas de rotura por medio de puntos que representen geoméricamente la estructura. Estos puntos se seleccionan de forma visual, con la seguridad de que pertenecen al punto más bajo del puente. Posteriormente, sobre el MDS al que se le han eliminado los puntos del puente, se dibujan las líneas de rotura desde el valor de altura de los puntos rojos hasta el valor de altura de los azules.

5. Generación del MDT final.”



Figura 29. Retornos clasificados procedentes del LiDAR del PNOA. Obsérvese la ausencia de puntos en el cauce, que posteriormente será interpolado por los puntos de tierra más cercanos.

A la hora de acometer las operaciones necesarias para la correcta caracterización del cauce se han encontrado los siguientes problemas:

- Para la cuestión de la definición del cauce, actualmente necesario a raíz de las dificultades del LiDAR para penetrar en la lámina de agua, se ha intentado hacer uso de batimetrías oficiales. Sin embargo, las mismas no se encuentran accesibles al público, habiéndose puesto en contacto con la empresa que realizó una de ellas para pedir referencias respecto sin obtener respuesta. El organismo oficial para el que fue realizada la batimetría ya no existe al uso.
- La caracterización de un cauce de estas características hace necesaria una mayor densidad de puntos que consiga discernir, aunque sea de manera parcial, las cotas y morfología del mismo. En un análisis de la nube de puntos

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.

existen zonas de más de 4 metros que no cuentan con ningún retorno cercano clasificado como "suelo".

Así pues, el flujo de trabajo seguido para subsanar las deficiencias detectadas es el siguiente, expuesto en la Tabla 10:

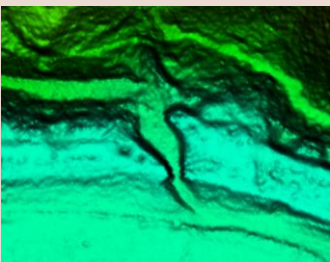
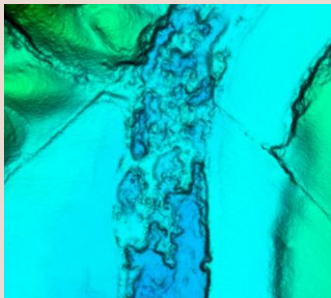

Expresión gráfica	Orden	Área del río	Deficiencia detectada	Solución
	1º	Aquellas afectadas por puentes	Resultados inválidos debido a una incorrecta geometría del puente, donde los puntos registrados no dejarían fluir el agua.	Solución aportada por el SNCZI
	2º	Lecho del río y cauce del río	Resultados inadecuados del lecho del río, no pudiéndose mostrar su profundidad real. Debido a la ineficacia del LiDAR en agua, no se hace posible una correcta caracterización del cauce, por lo que durante la simulación el nivel del agua no sería el adecuado	Creación de una máscara poligonal del Río Guadalete, a partir de ortofotografías aéreas históricas, sobre la que ejecutar operaciones algebraicas sobre el MDT primigenio hasta conseguir modelar el cauce
	3º	Zona de servidumbre del río	La vegetación de ribera no permite una correcta caracterización del cauce, a raíz de no existir retornos del suelo por la frondosa vegetación.	Adecuación de los puntos clasificados como vegetación y uso de la máscara anterior

Tabla 10. Flujo de trabajo para la obtención de un Modelo Digital de Superficies apto para la simulación hidráulica.

Se han eliminado un total de 4 puentes (Figura 30), los cuales finalmente no serán incorporados al modelo, al tratarse de un modelo geomático y no estrictamente hidráulico. El resultado de la eliminación derivado del ejemplo anterior queda representado en la siguiente figura que acompaña el presente texto. Han sido modelados tres MDS "limpios" de puentes con tamaños de celdillas de 1, 2 y 5 metros.

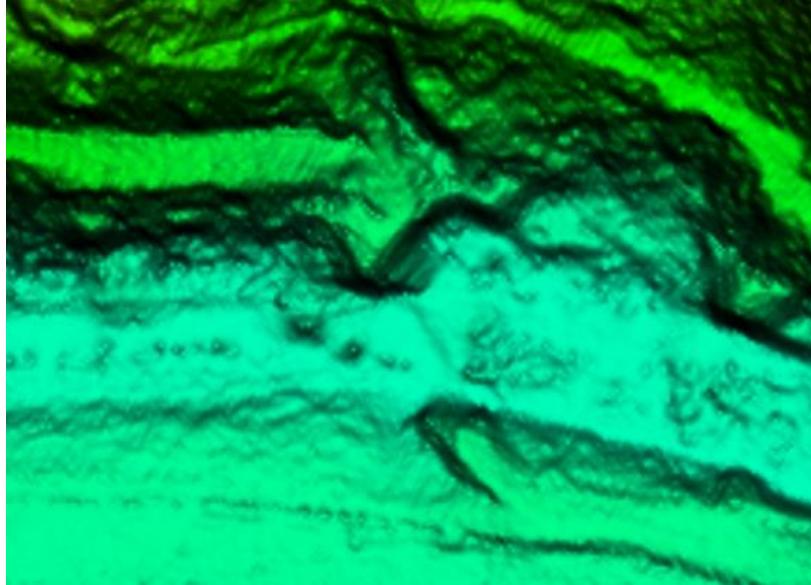


Figura 30. Resultado de la eliminación de puentes.

Por otro lado, mediante el uso de ortofotografías de distintos años todas ellas distribuidas por el PNOA y en su mayoría dentro del marco de ejecución del proyecto ha sido trazada una máscara que consigue representar el verdadero cauce del Guadalete además de las islas sedimentarias o barras interiores que aparecen enclavadas justo en su cauce en algunas ocasiones, las cuales cuentan con retornos del pulso láser y han sido modeladas (Figura 31).

Los azudes también serán modelados según los retornos y quedarán excluidos del polígono, a tenor de conseguir una diferencia lo más cercana posible a la existente en realidad, limpiando así los errores de la interpolación entre los retornos en el azud y en la lámina de agua cercana, que desembocan en la creación de un terraplén entre la cota más baja de la lámina de agua y la cota más alta del azud.

Para la creación de la máscara, no se ha avanzado más allá del año 2004, entendiéndose como el tiempo necesario para que la dinámica fluvial hubiera provocado cambios significativos en algunos tramos. De la misma manera, algunas áreas han tenido que ser completadas con trabajos de campo a raíz de la dificultad impuesta por lo boscoso del entorno del cauce.



Figura 31. Ortofotos correspondientes a 2019 y 2013, a izquierda y derecha respectivamente. En rojo, queda trazada la línea del cauce. En amarillo, las islas sedimentarias identificadas.

Por tanto, una vez se obtiene la máscara, la misma se ha transformado a raster con tamaños de celdilla de 1, 2 y 5 metros correspondientes a cada una de las mallas utilizadas en los análisis. La idea es, por un lado, conseguir rebajar la cota del cauce del río que actualmente se corresponde a la que arroja la interpolación entre puntos más cercanos que, como se ha comentado anteriormente, por un lado, corresponden a puntos sobre la lámina de agua (o muy poco por debajo) o puntos a ambas orillas. La interpolación arroja valores erróneos en el espacio de cauce, por lo que haciendo uso de la malla se ha rebajado la cota por tramos según se conoce, por los trabajos de campo, los lugares donde el nivel del agua es más bajo o más alto. Las disminuciones de cota van del orden de 0,50m a 1,75m. En la máscara se han respetado los azudes, entendiéndose como elementos determinantes en el cauce y que sí han sido bien medidos por el LiDAR.



Figura 32. Hillshade multidireccional que del modelo LiDAR. Se puede observar el tratamiento preliminar dado al lecho del río y el azud.

Posteriormente, se ha llevado a cabo una revisión de los puntos de las zonas más conflictivas por el hándicap de la vegetación de ribera, analizando si los puntos han sido correctamente clasificados en dichas áreas. Dado que el algoritmo de clasificación no es infalible, se han encontrado varios puntos clasificados como vegetación alta con cotas más asimilables al suelo desnudo que a la vegetación colindante, por lo que se han reclasificado como suelo.

Una vez obtenido el modelo preliminar, el mismo es cargado como RTIN en Iber:

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADELETE.

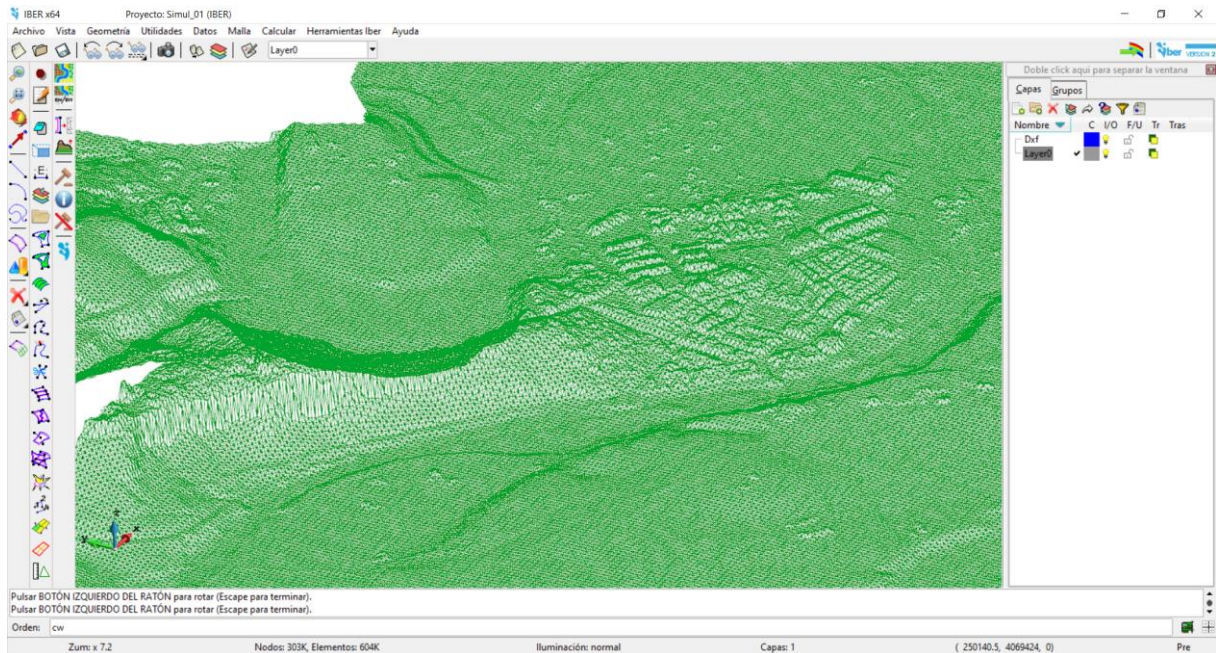


Figura 33. Vista de la malla creada.

La geometría se encuentra compuesta por puntos, líneas y superficies a partir del MDS (suelo + edificios). Para ello se utiliza la metodología RTIN que consiste en dividir la superficie del terreno en triángulos rectángulos de diferentes tamaños. Estos triángulos son planos inclinados. A mayor número de triángulos es mayor la aproximación de la geometría con la topografía, pero mayor tiempo de cálculo y simulación.

El mallado generado cuenta con una serie de parámetros que deben ser ajustados para obtener una correcta correlación entre tiempo de procesado y calidad de la salida hidráulica:

- **Tolerancia:** Resulta de la diferencia máxima que debe existir entre el MDS y la geometría a crear. Los valores más habituales la sitúan entre 0.1 y 0.3, debiendo ajustarse adecuadamente según el tamaño del proyecto. Cuanto más elevado sea el valor, de mayores proporciones serán los triángulos, alejándose en mayor medida del MDE original. Para el caso del presente documento, todos los tamaños de celdilla utilizados (1m, 2m y 5m) han sido ajustados a 0.1.
- **Tamaño máximo:** Longitud máxima del triángulo más grande que puede haber en la geometría creada. Los triángulos mayores son creados primero y, si cumplen la tolerancia, se reduce su tamaño hasta que no la cumplan. El valor utilizado ha sido 10.
- **Tamaño mínimo:** Resulta de la longitud mínima que pueden tener los triángulos predispuestos alrededor de la geometría. El tamaño de los triángulos no puede ser menor que el tamaño mínimo indicado, aunque no se cumpla la tolerancia. Para el caso, se ha utilizado un valor de 4.

Una vez establecidas las condiciones de entrada y salida en régimen crítico/supercrítico con un caudal total que ya ha sido calculado para cada periodo de retorno, se lleva a cabo la introducción de la rugosidad y los usos del suelo dominantes en el área de estudio. La rugosidad del cauce y llanura dependerá sobre todo del terreno, tipo de suelo que lo forma, pendiente y vegetación predispuesta en cada polígono. La rugosidad en Iber se asigna a través de coeficiente de Manning, el cual ha sido tratado a través de lo expuesto en la Guía para la determinación de Zonas Inundables.

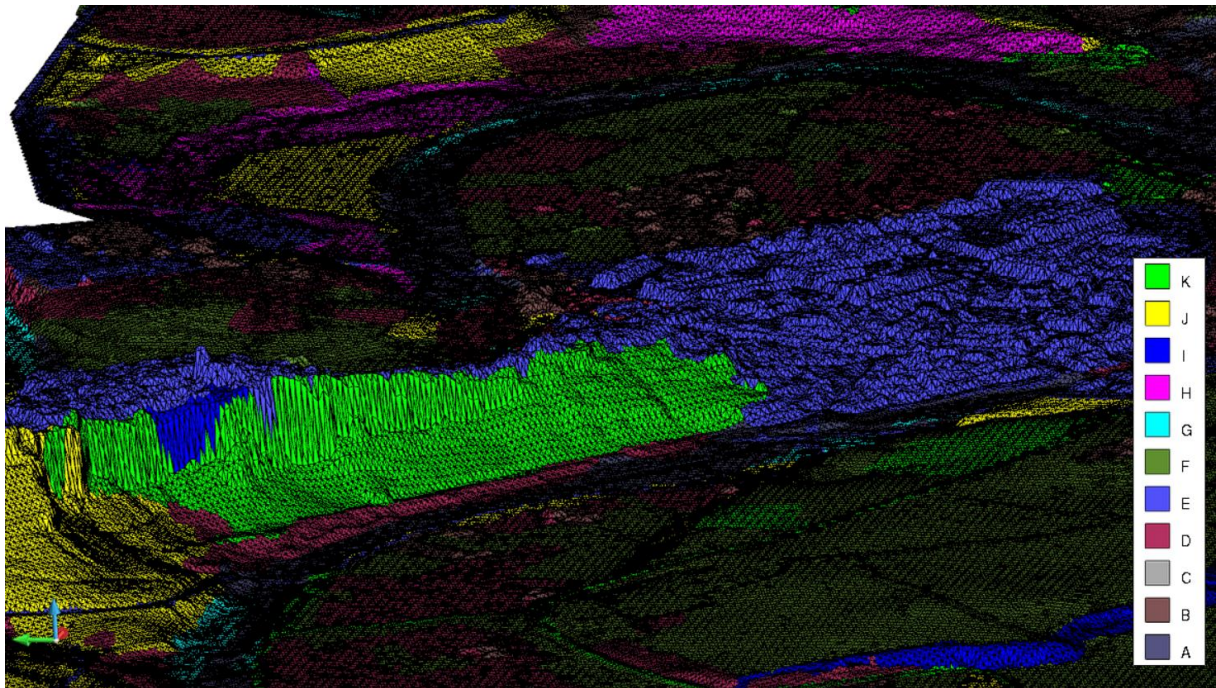


Figura 34. Rugosidad aplicada al área de estudio. Cada letra simboliza un uso del suelo generalizado.

Para este caso, los usos del suelo han sido tomados del Sistema de Información del Patrimonio Natural de Andalucía (SIPNA) con datos de 2019. A su vez, han sido afinados los polígonos mediante GIS y agrupados algunos usos según características comunes. Al estar el SIPNA basado en las categorizaciones del SIOSE no ha sido difícil discernir los valores correctos de rugosidad expuestos en la Guía.

En el marco del presente documento que versa sobre la aplicación del LiDAR público en análisis de inundabilidad se intenta discernir la fiabilidad y variabilidad del mismo y de las distintas coberturas y densidades de puntos cuando es modelado en distintos tamaños de celdilla. Estos tamaños de celdillas son necesarios en tanto cada tamaño de celdilla se ajusta a una escala, no pudiendo realizarse algunos análisis a gran escala con un tamaño de celdilla bajo, a raíz de unos tiempos de procesado verdaderamente impracticables. Por tanto, se han realizado un total de 9 simulaciones, correspondiente a $T=500$, $T=100$ y $T=50$ para tamaños de celdilla de 1, 2 y 5 metros.

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.

Por otro lado, se ha hecho uso de un LiDAR también público pero mayor densidad de puntos, con el objetivo de discernir como una mayor densidad de puntos y no tanto un menor tamaño de celdilla juega inevitablemente a favor del realismo en la simulación hidráulica.

El LiDAR utilizado es el correspondiente al Vuelo LiDAR realizado por la Confederación Hidrográfica del Guadalete Barbate en el año 2008. Este vuelo LiDAR cuenta con una densidad de puntos de 14 p/m², resolución muy alta para la media de resoluciones de los vuelos LiDAR realizados hasta hoy día. Ha sido proporcionado mediante solicitud a la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía, que rápidamente y sin ningún tipo de problema hizo llegar los .LAS necesarios.

Sin embargo, al no ser un LiDAR accesible al público y remontarse a más de 13 años atrás, la clasificación brindada por el mismo resulta difícil de ejecutar en tanto muchas clases no se encuentran correctamente clasificadas. Aparecen una gran cantidad de puntos "unclassified" que principalmente representan a la vegetación, que no se encuentra clasificada en este caso. También existen un gran número de edificaciones no clasificadas, sobre todo aquellas lejanas al cauce del Guadalete. Otro gran número de puntos "ground" se encuentran sin clasificar, y la mayoría de puntos se corresponden con solapamientos donde el ángulo de captura fue menos cenital que aquellos reflejados como suelo. Por lo tanto, mediante el algoritmo de clasificación automática de suelo de Global Mapper, se ha llevado a cabo una reclasificación preliminar:

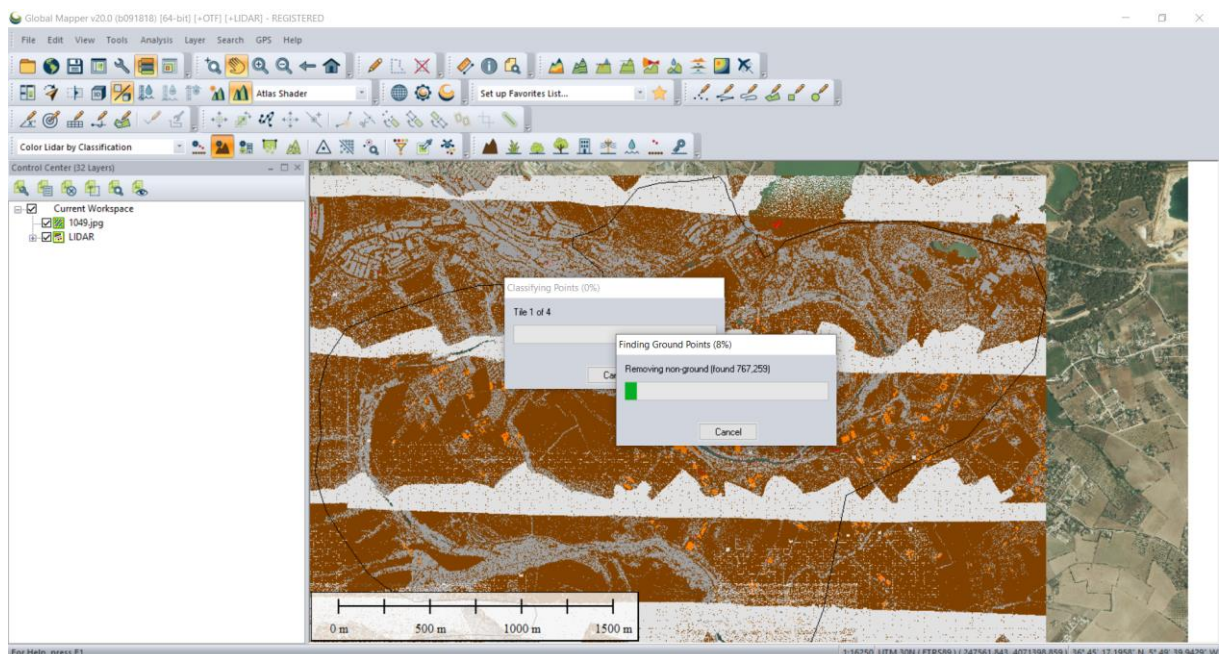


Figura 35. Reclasificación preliminar de la nube de puntos.

Por otro lado, los edificios cercanos al cauce que mediante ortofografía aérea se corrobora su presencia, son clasificados manualmente mediante la herramienta de clasificación manual de Global Mapper:

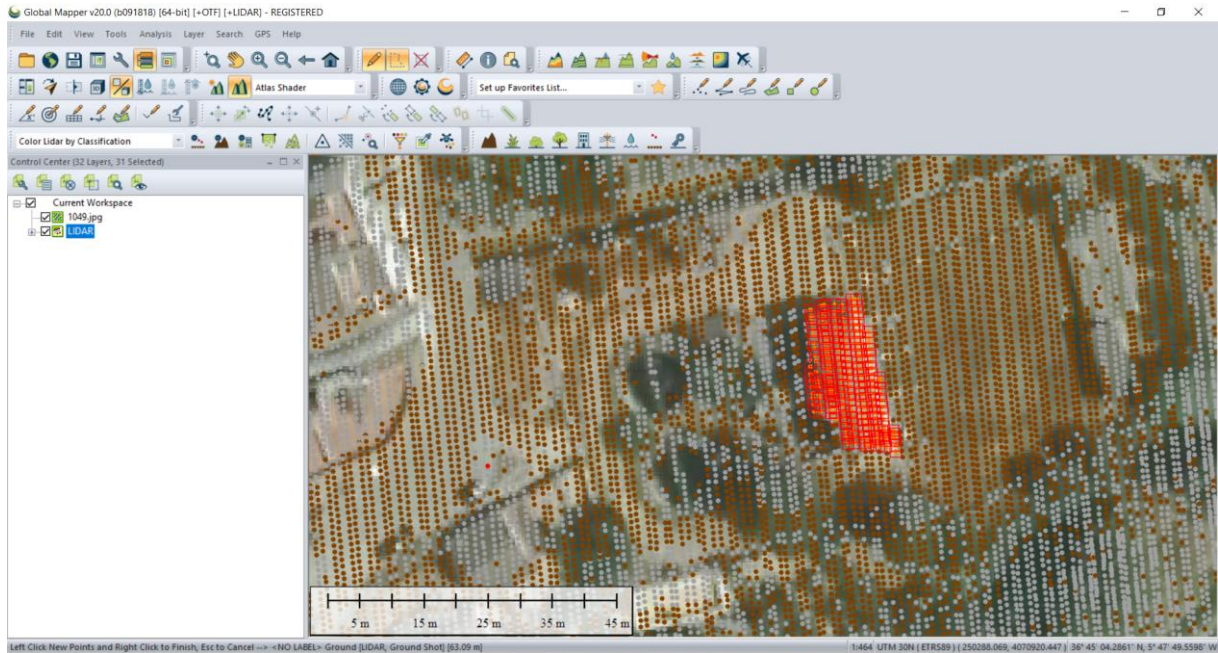
USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADELETE.

Figura 36. Reclasificación manual de edificios.

Por tanto, tras someter a la nube de puntos al mismo flujo de trabajo que el LiDAR anterior, con la eliminación de puentes y caracterización del cauce, se consigue las siguientes densidades de puntos solo con los puntos del terreno y edificios en uso, según muestra Global Mapper. Las densidades de puntos del vuelo de la Confederación rondan los 2 p/m², mientras que las densidades del PNOA y su primera cobertura para el área de estudio quedan enmarcadas en los 0,5 p/m², como ya se sabía, con densidades muy bajas en los puntos de mayor afluencia de vegetación:

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUALETE.

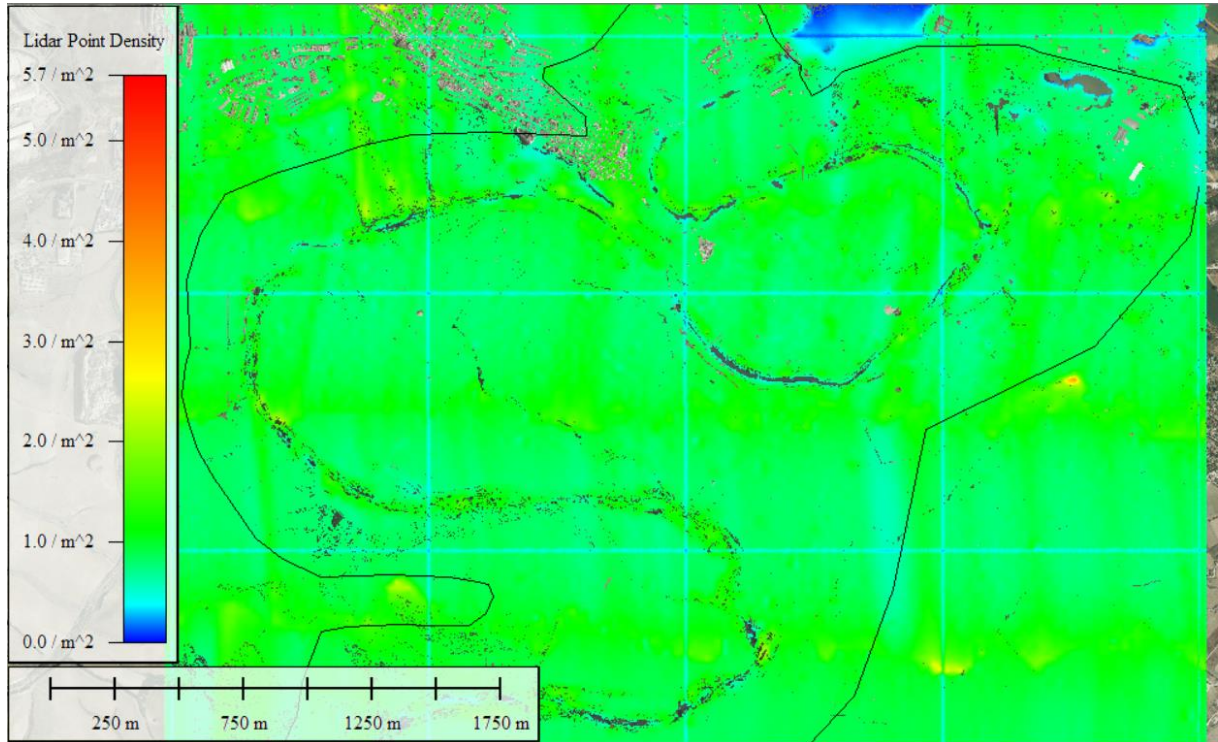


Figura 37. Densidad de puntos final del LiDAR de la Cuenca del Guadalete-Barbate

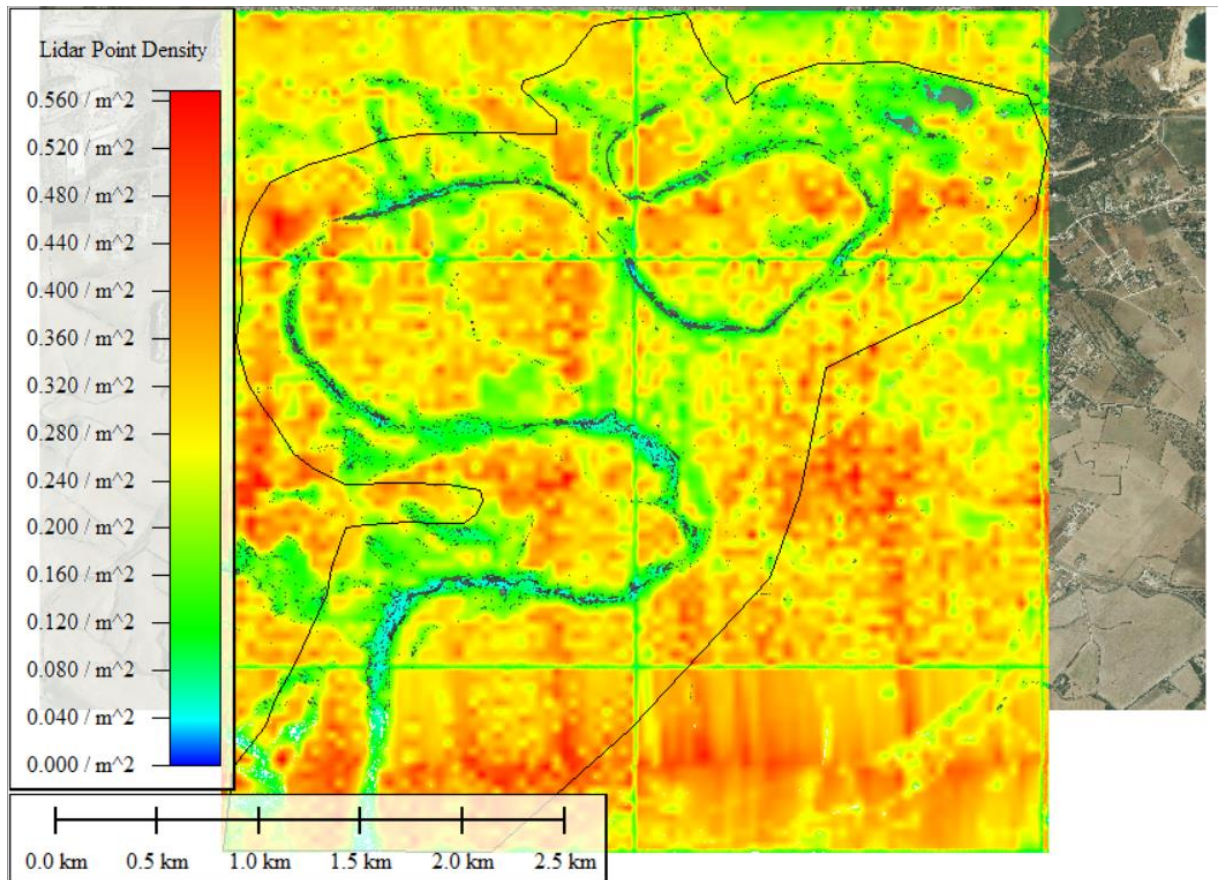


Figura 38. Densidad de puntos de la primera cobertura del PNOA para el área de estudio

Tras ello, se ha modelado un MDS de 1m de resolución, cuyas diferencias en el cauce y edificaciones son evidentes a simple vista en comparación con el MDS de 1m del PNOA:

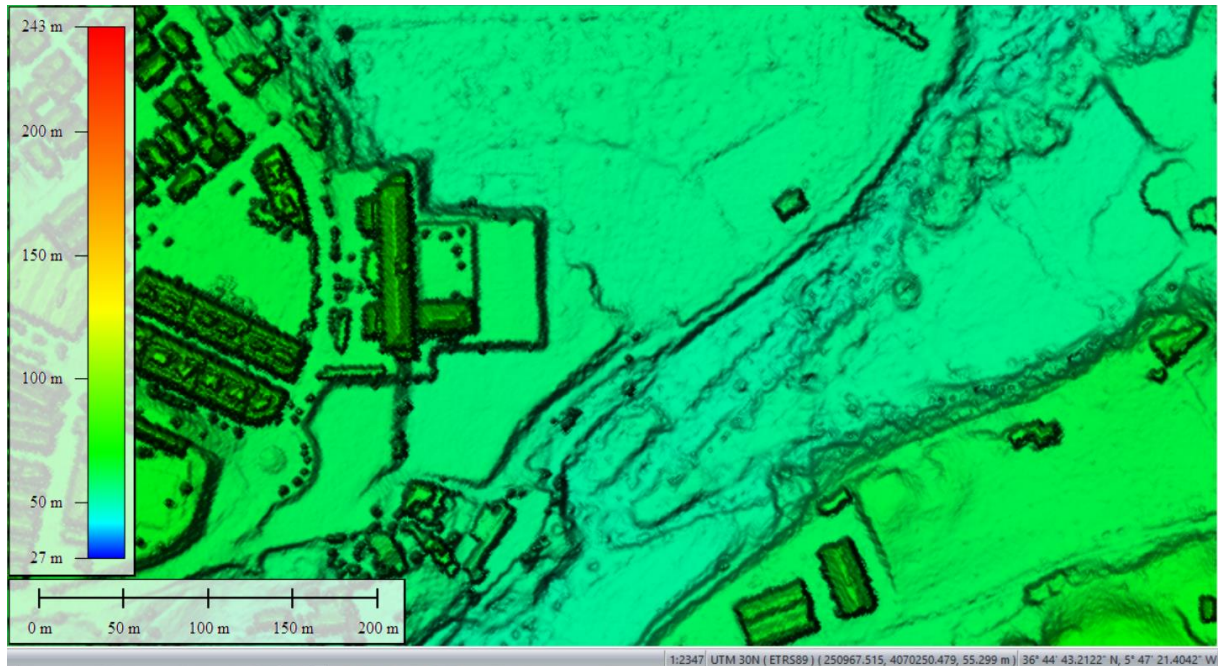


Figura 39. MDS con nube de puntos del PNOA

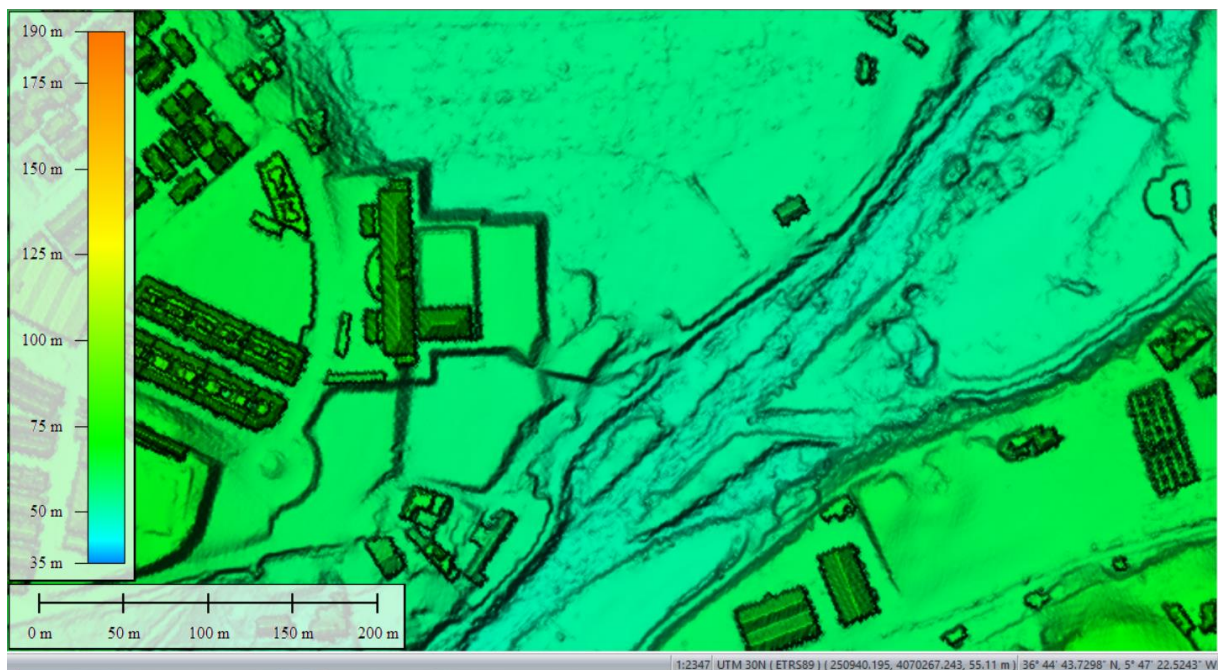
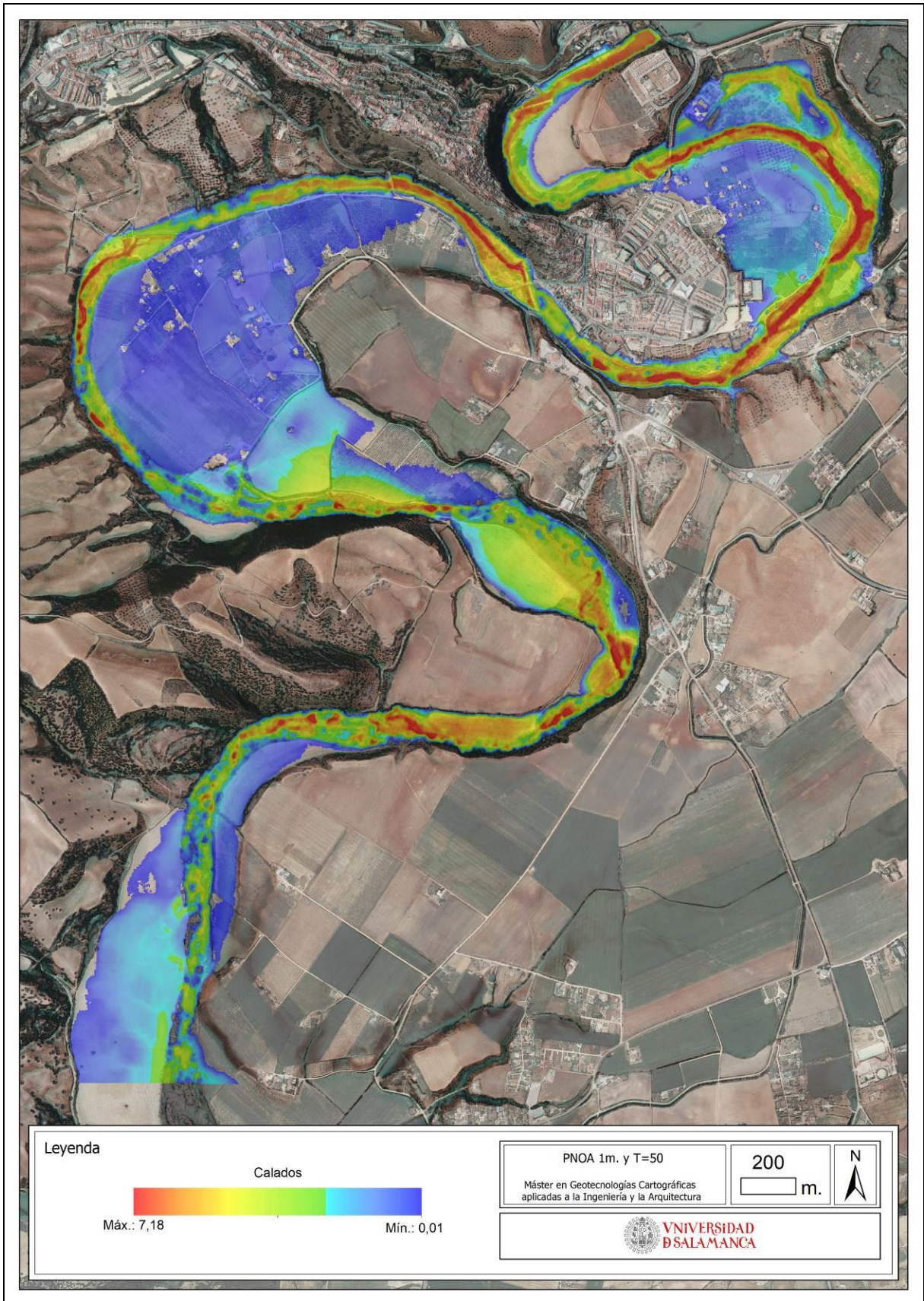


Figura 40. MDS con nube de puntos de la Confederación.

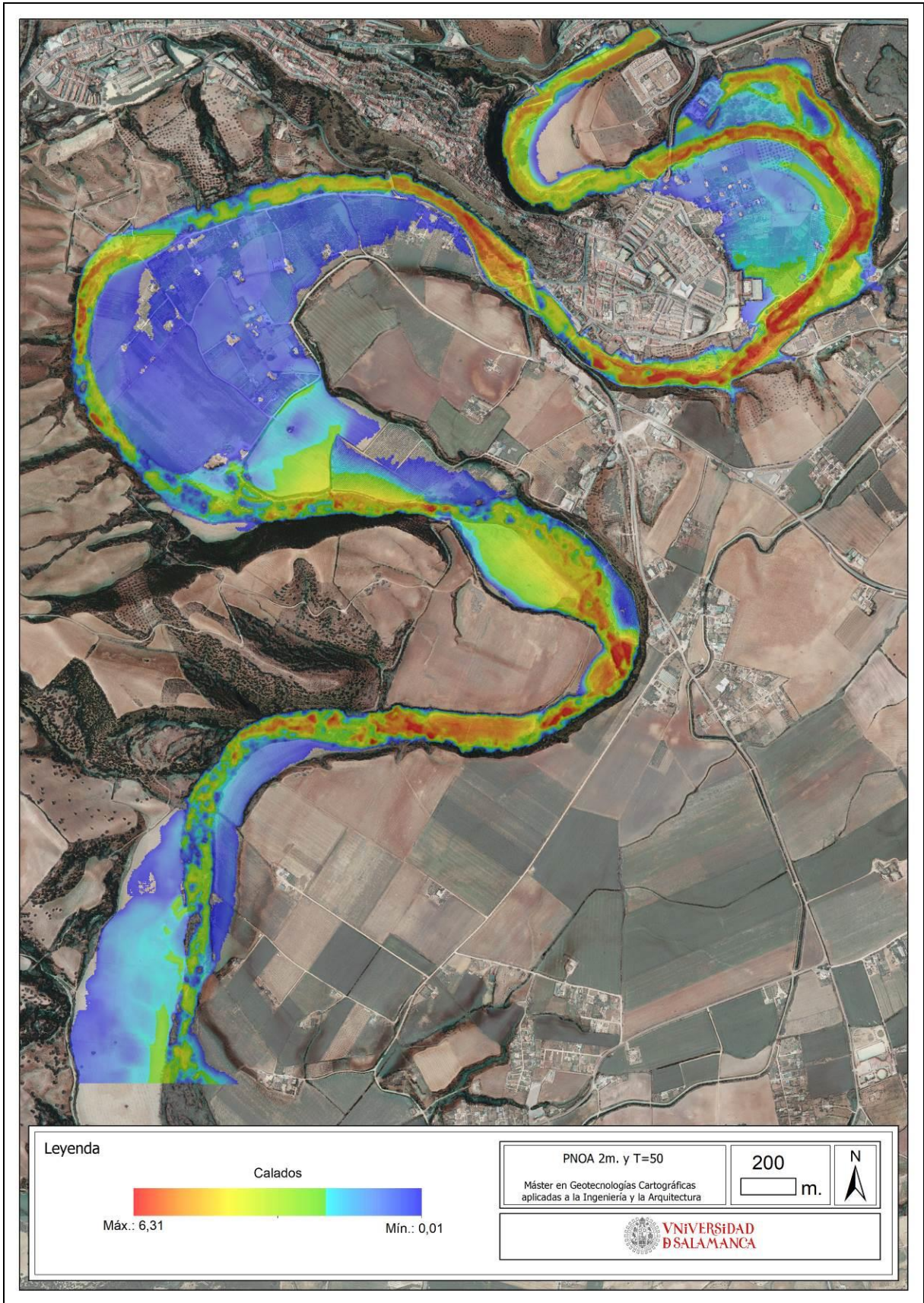
6.3.RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN HIDRÁULICA

A continuación, se presentan, gráficamente, los resultados agrupados para cada periodo de retorno con el tamaño de celdilla correspondiente:

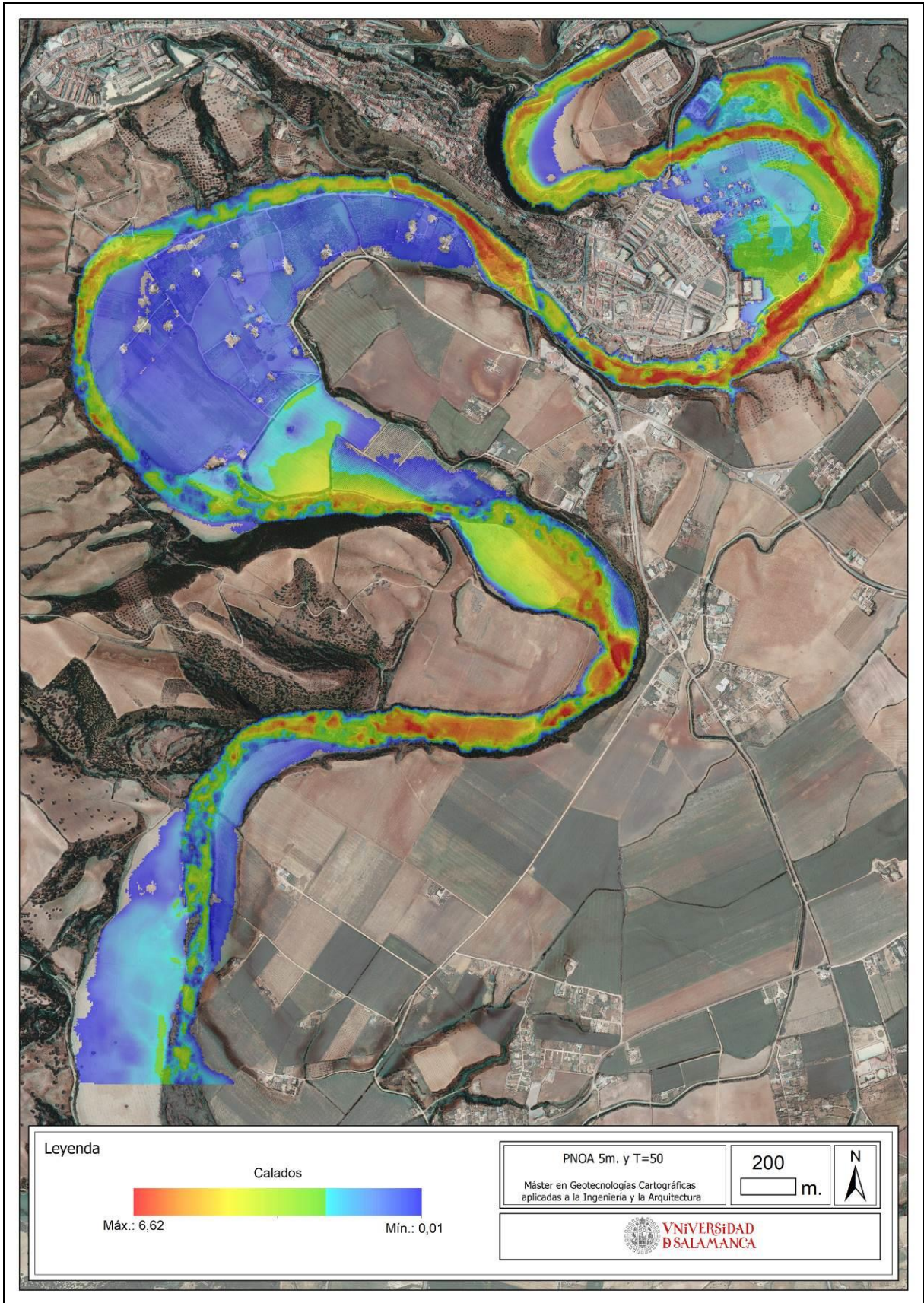
T=50. 13000s



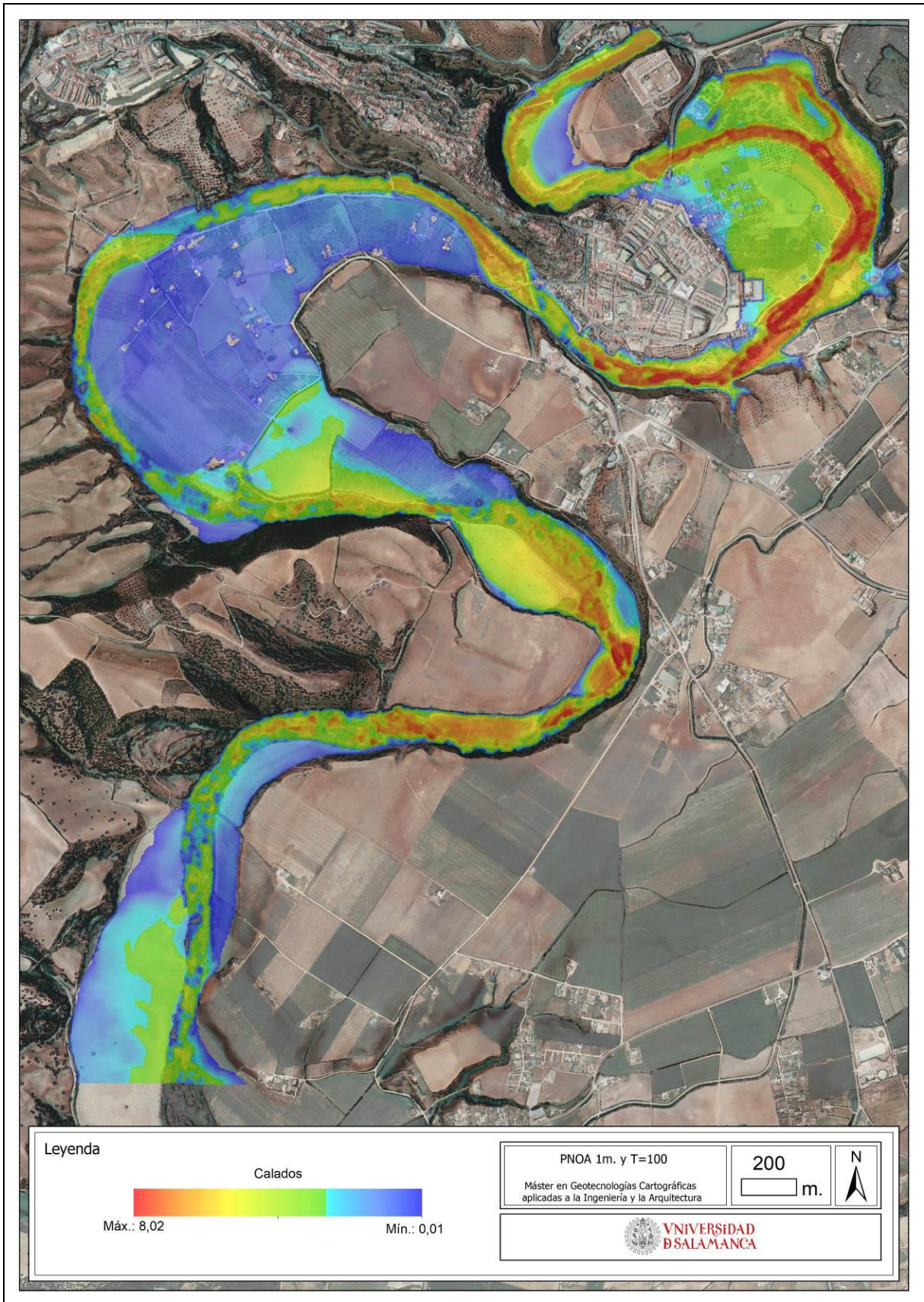
USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.



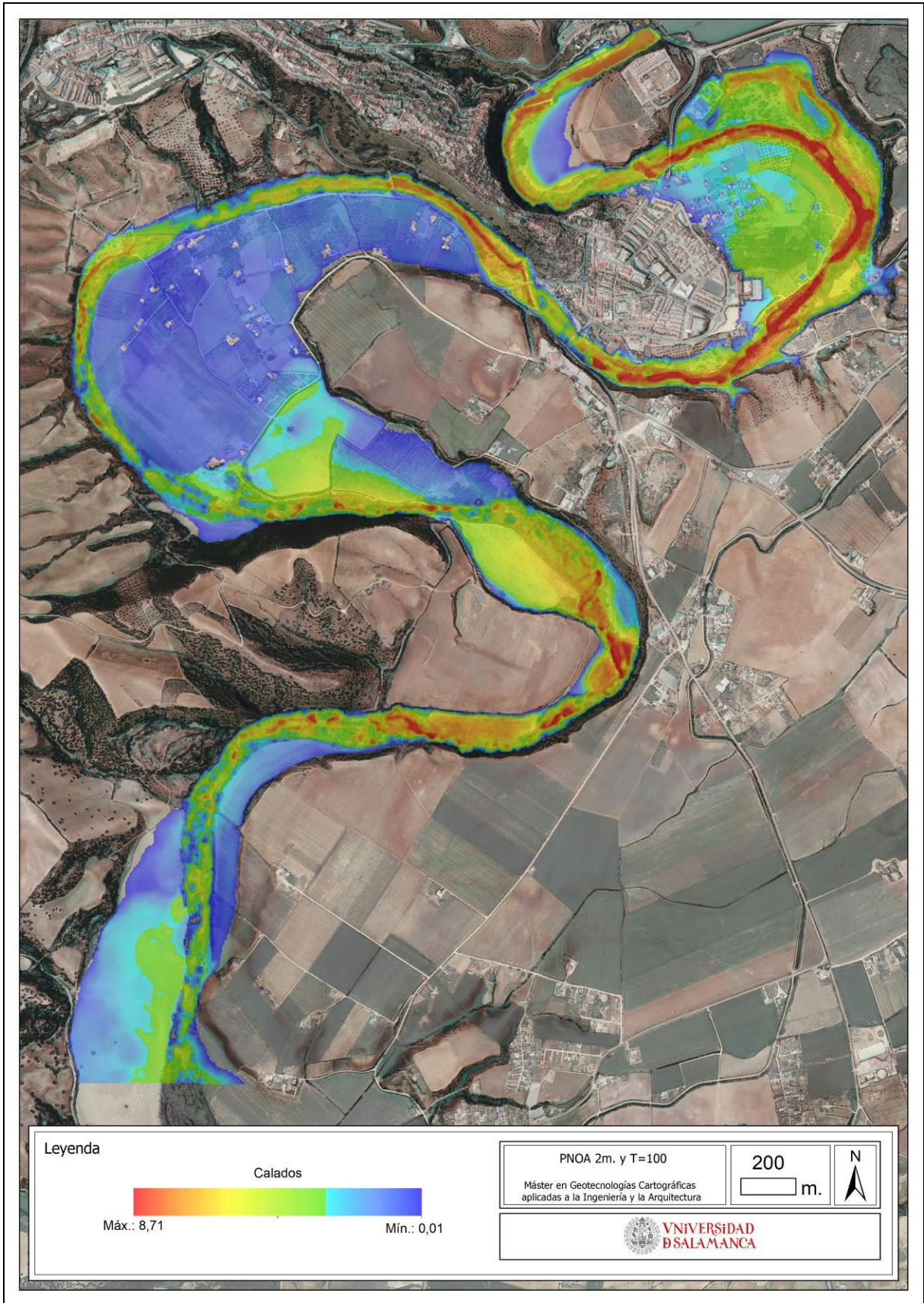
USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.



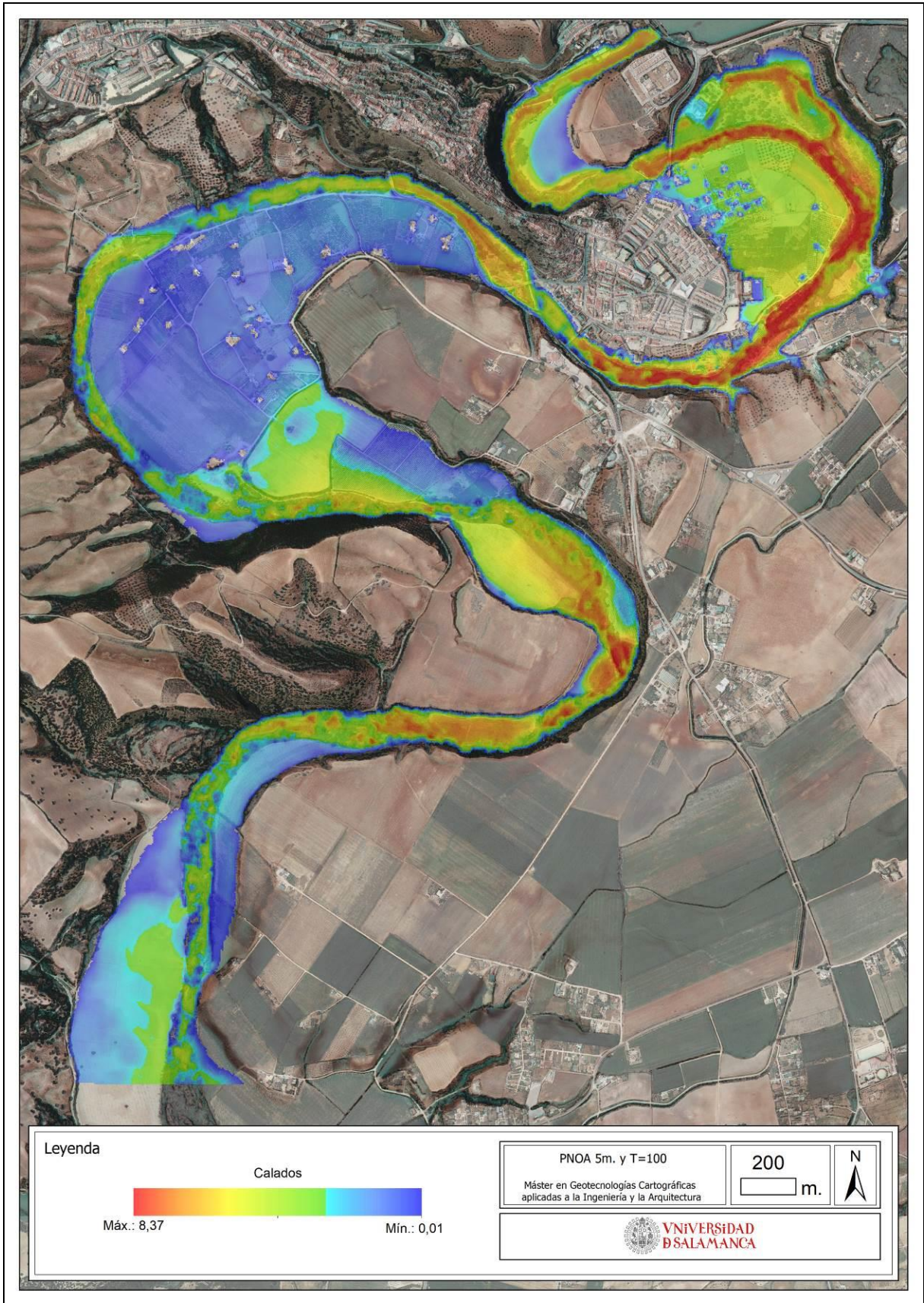
T=100. 13000s



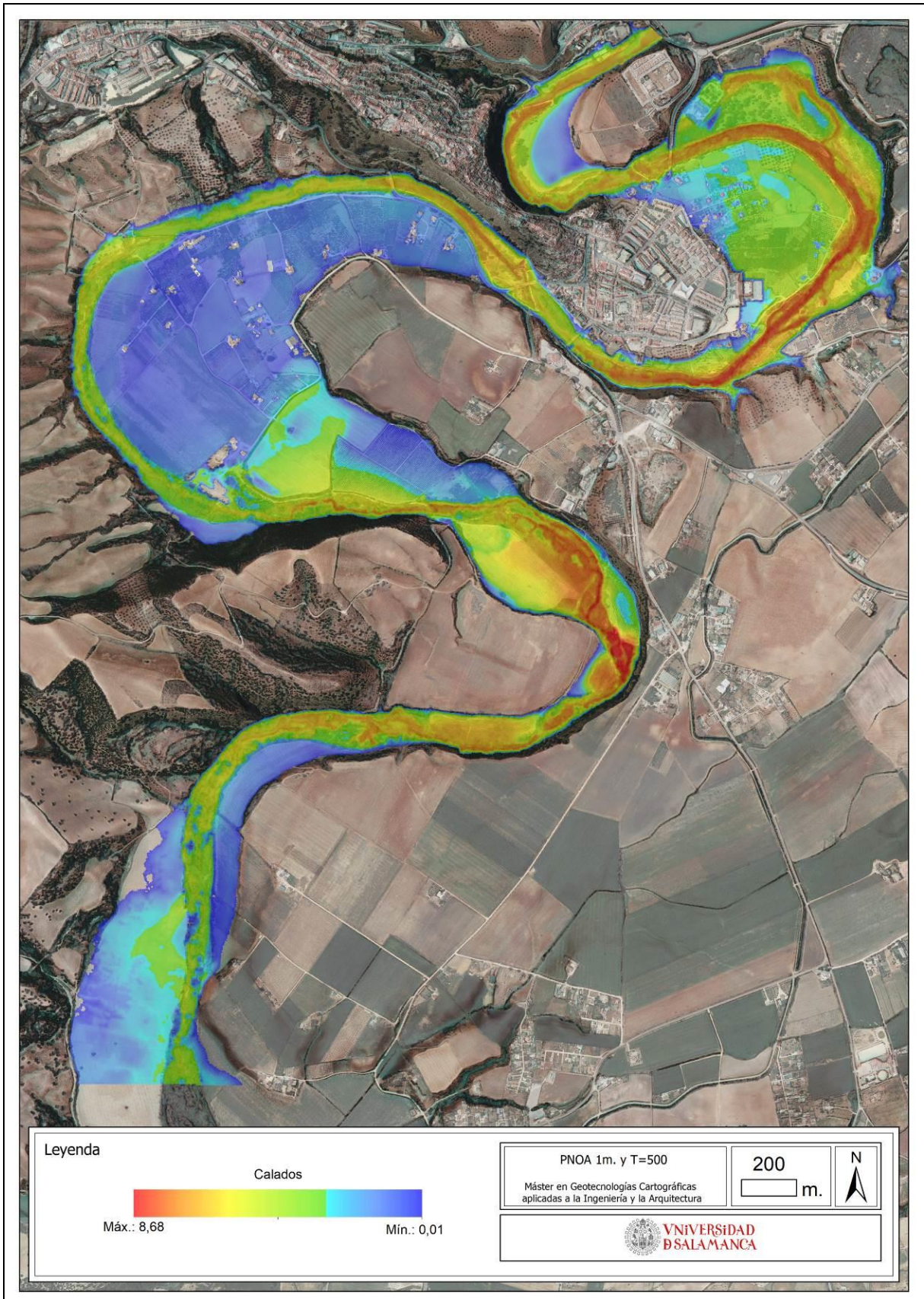
USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADELETE.



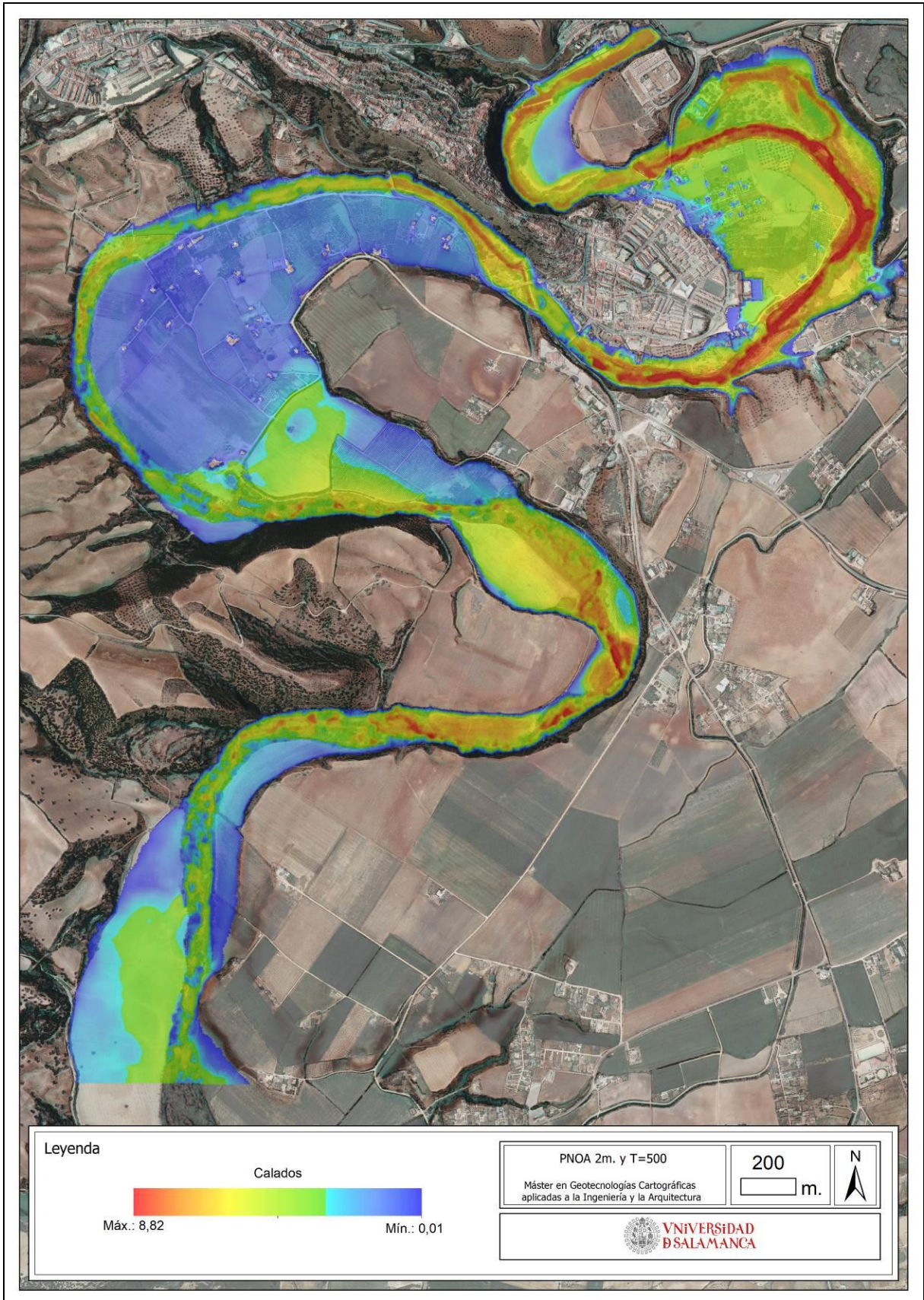
USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADELETE.



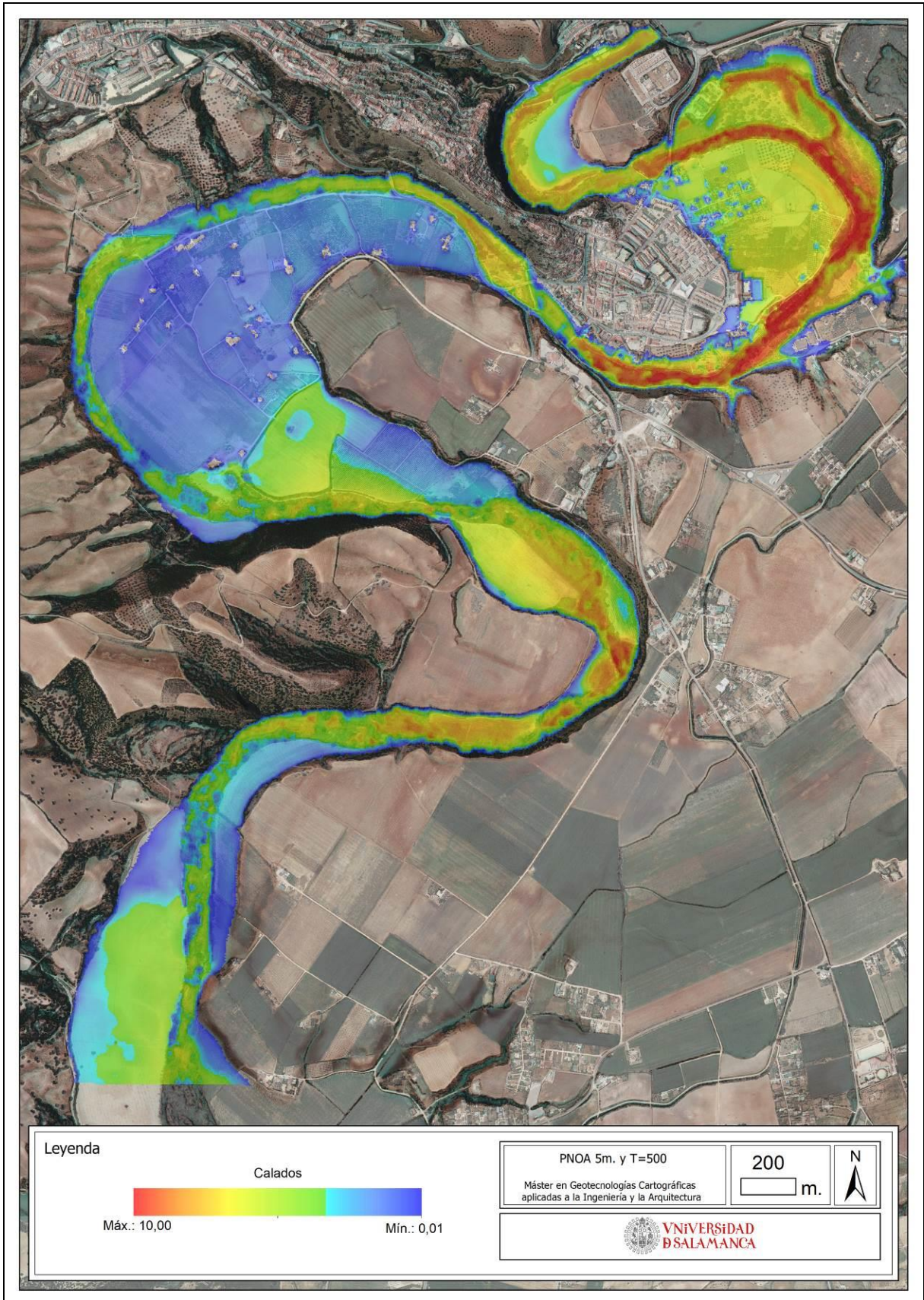
T=500. 13000s



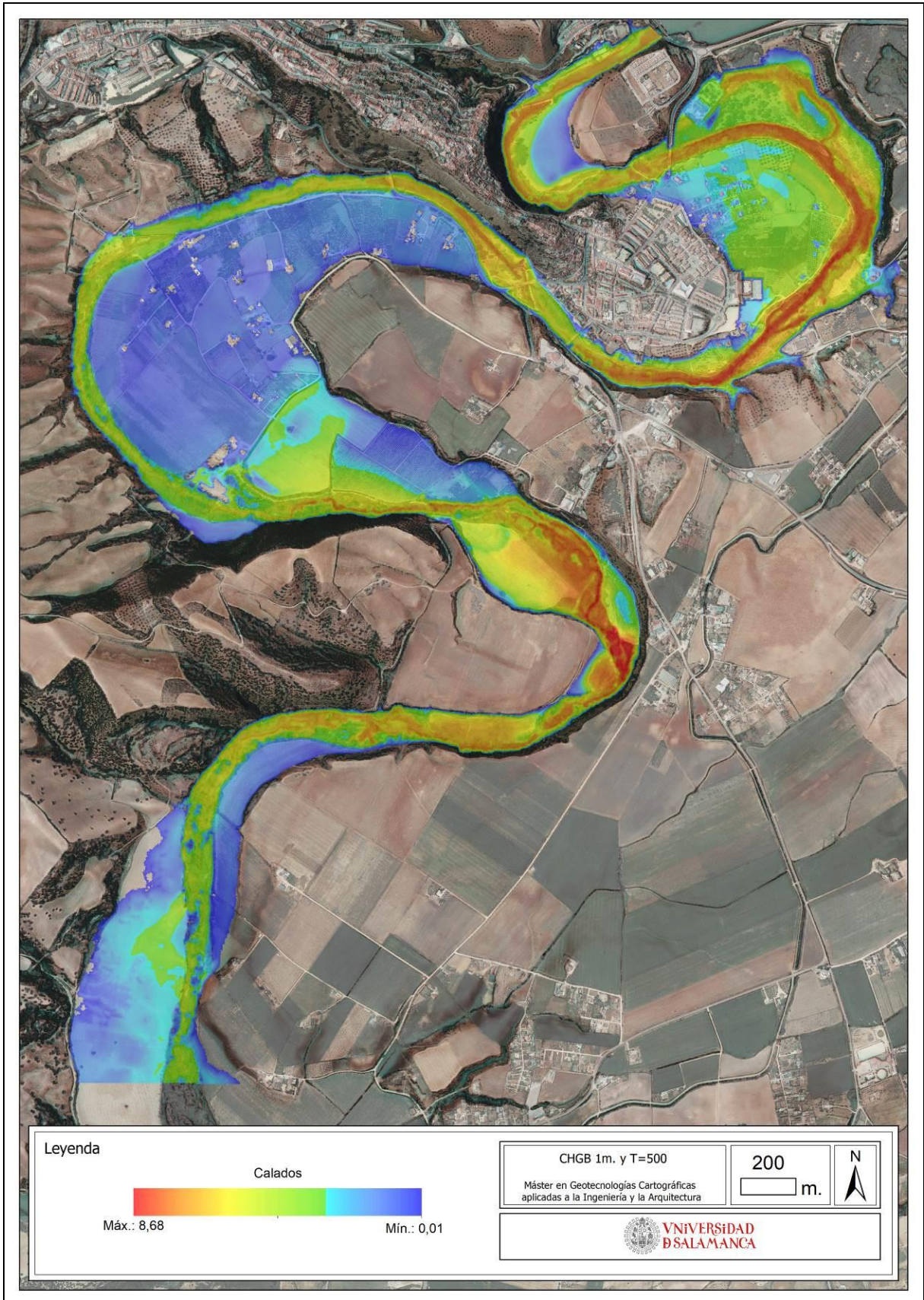
USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.



USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.



USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.



6.4. DESGLOSE DE RESULTADOS

Posteriormente, para el análisis de resultados, se han colocado una serie de puntos de control (Figura 41) en lugares de interés a través del modelo, para los cuales se ha extraído la información brindada por el modelo para cada periodo de retorno. La disposición de los puntos se muestra a continuación:

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.



Figura 41. Puntos de control establecidos a través del área de estudio para obtener datos del modelo.

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.

Siendo los valores extraídos los siguientes para cada periodo de retorno y realizadas las siguientes comparaciones:

Puntos de control	PNOA 1m & t=50	PNOA 2m & t=50	PNOA 5m & t=50	Dif. 1m & 2m	Dif. 1m y 5m	dif 2m & 5m	Promedio
1 - Primera llanura de inundación	No se inunda	No se inunda	0,02	-	-	-	-
2 - Cauce con abundante vegetación	6,323	5,477	5,512	0,846	0,811	0,035	0,564
3 - Última llanura de inundación recurrente	1,637	1,647	1,541	0,010	0,096	0,106	0,071
4 - Segunda llanura de inundación recurrente	0,544	0,678	0,728	0,134	0,183	0,050	0,122
5 - Tercera llanura de inundación recurrente	0,406	0,735	1,158	0,329	0,752	0,423	0,501
6 - Cauce secundario abandonado	4,485	4,807	4,880	0,322	0,394	0,073	0,263
7 - Cauce con abundante vegetación en último tramo	2,407	1,551	1,335	0,856	1,072	0,216	0,715
8 - Extremo del tercer meandro	3,132	2,992	2,943	0,140	0,189	0,049	0,126
9 - Área de mayores calados	6,271	5,598	5,475	0,673	0,796	0,123	0,531
10 - Salida de la presa	5,471	4,840	4,908	0,631	0,563	0,068	0,420
Promedio				0,438	0,540	0,127	

Tabla 11. Comparativas para T=50 de mallas con distinta resolución.

Puntos de control	PNOA 1m & t=100	PNOA 2m & t=100	PNOA 5m & t=100	Dif. 1m & 2m	Dif. 1m y 5m	dif 2m & 5m	Promedio
1 - Primera llanura de inundación	1,012	0,720	1,334	0,292	0,322	0,614	0,409
2 - Cauce con abundante vegetación	6,637	7,475	6,635	0,838	0,002	0,840	0,560
3 - Última llanura de inundación recurrente	2,601	2,498	2,571	0,102	0,030	0,073	0,068

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.

4 - Segunda llanura de inundación recurrente	1,064	0,959	1,127	0,105	0,063	0,168	0,112
5 - Tercera llanura de inundación recurrente	2,538	2,153	3,006	0,385	0,468	0,853	0,569
6 - Cauce secundario abandonado	6,665	6,227	6,732	0,437	0,067	0,505	0,337
7 - Cauce con abundante vegetación en último tramo	2,457	3,350	2,206	0,893	0,252	1,144	0,763
8 - Extremo del tercer meandro	3,345	3,481	3,291	0,136	0,054	0,190	0,127
9 - Área de mayores calados	7,331	8,021	7,330	0,689	0,001	0,691	0,460
10 - Salida de la presa	6,099	6,731	6,083	0,633	0,016	0,648	0,432
Promedio				0,469	0,106	0,568	

Tabla 12. Comparativas para T=100 de mallas con distinta resolución.

Puntos de control	PNOA 1m & t=500	PNOA 2m & t=500	PNOA 5m & t=500	Dif. 1m & 2m	Dif. 1m y 5m	dif 2m & 5m	Promedio
1 - Primera llanura de inundación	2,136	1,796	2,664	0,340	0,528	0,868	0,579
2 - Cauce con abundante vegetación	7,456	8,314	7,467	0,858	0,011	0,847	0,572
3 - Última llanura de inundación recurrente	3,763	3,298	3,808	0,465	0,045	0,510	0,340
4 - Segunda llanura de inundación recurrente	1,381	1,284	1,460	0,097	0,079	0,176	0,117
5 - Tercera llanura de inundación recurrente	3,972	3,573	4,632	0,399	0,660	1,059	0,706
6 - Cauce secundario abandonado	8,105	7,654	8,366	0,451	0,261	0,712	0,475
7 - Cauce con abundante vegetación en último tramo	3,178	4,065	2,954	0,887	0,224	1,110	0,740
8 - Extremo del tercer meandro	3,612	3,746	3,599	0,134	0,013	0,147	0,098

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADELETE.

9 - Área de mayores calados	8,772	9,448	8,964	0,676	0,192	0,484	0,451
10 - Salida de la presa	6,969	7,602	7,140	0,633	0,171	0,462	0,422
Promedio				0,511	0,184	0,612	

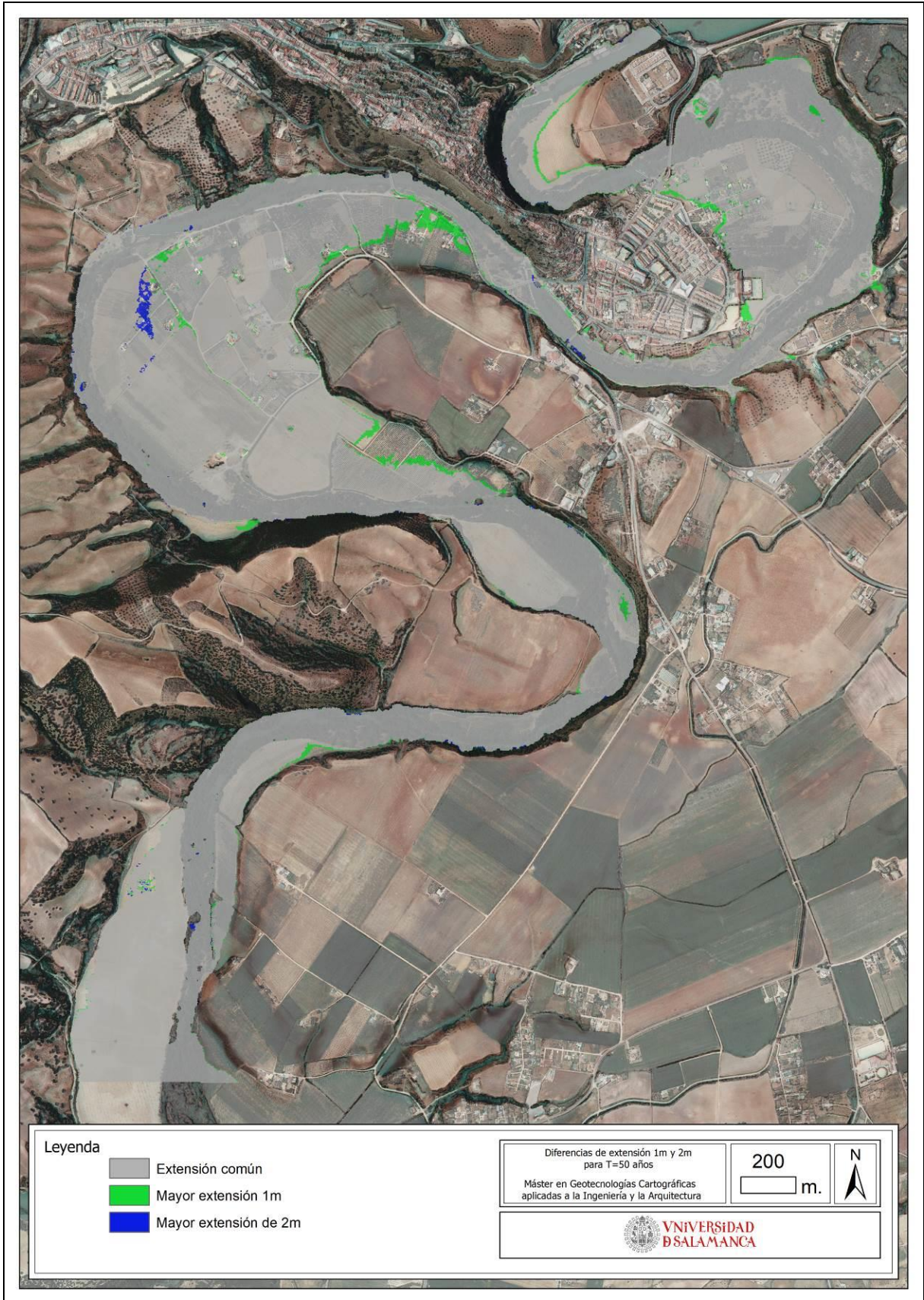
Tabla 13. Comparativas para T=500 de mallas con distinta resolución.

Puntos de control	PNOA 1m & t=500	Conf.Hidrográfica 1m & t=500	Diferencias
1 - Primera llanura de inundación	2,136	1,393	0,743
2 - Cauce con abundante vegetación	7,456	6,523	0,933
3 - Última llanura de inundación recurrente	3,763	2,691	1,072
4 - Segunda llanura de inundación recurrente	1,381	1,102	0,279
5 - Tercera llanura de inundación recurrente	3,972	2,605	1,367
6 - Cauce secundario abandonado	8,105	6,686	1,419
7 - Cauce con abundante vegetación en último tramo	3,178	3,693	0,515
8 - Extremo del tercer meandro	3,612	4,417	0,805
9 - Área de mayores calados	8,772	7,818	0,954
10 - Salida de la presa	6,969	6,043	0,926
Promedio			0,901

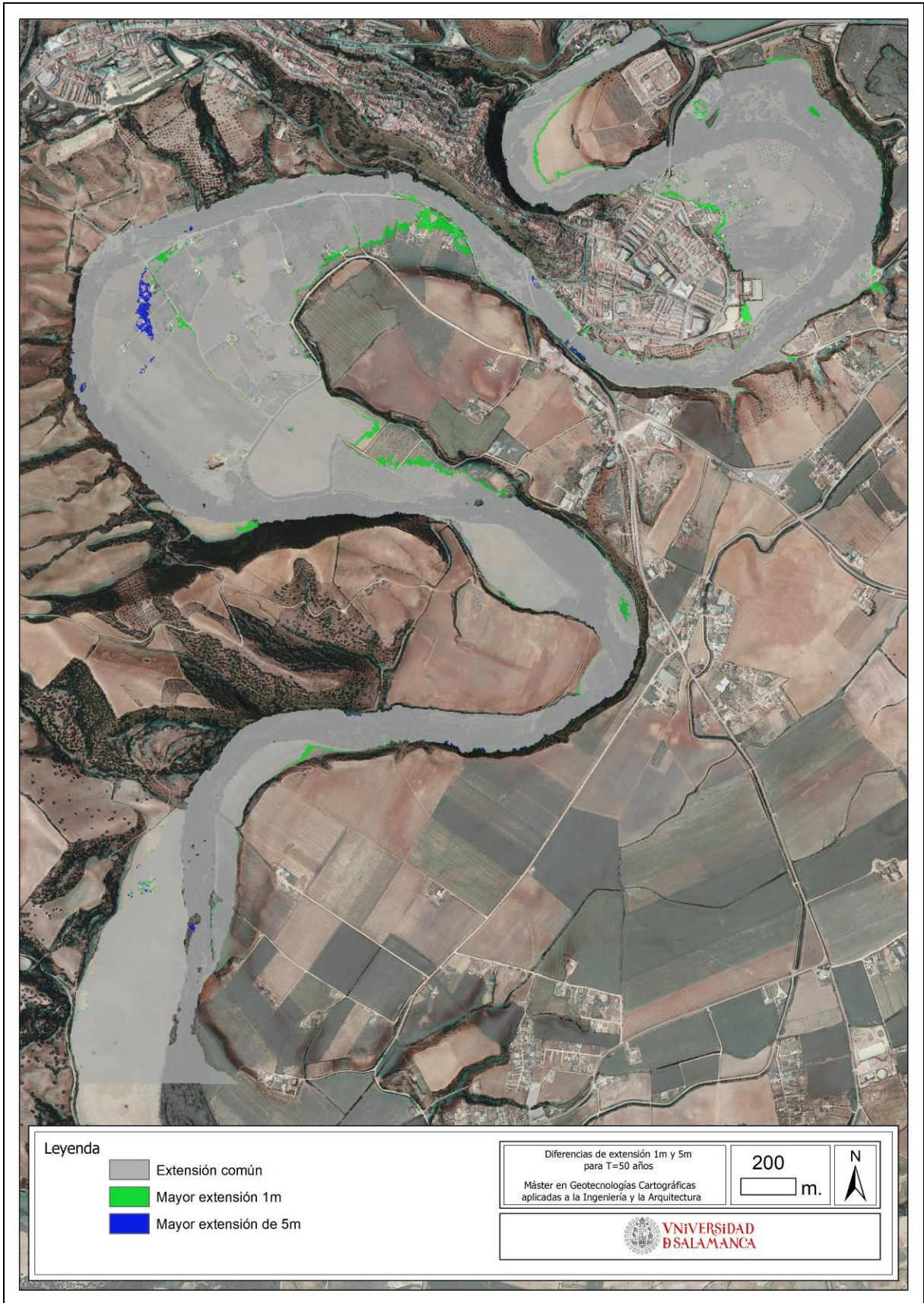
Tabla 14. Comparativas para T=500 de mallas de una misma resolución, pero distinta densidad de puntos.

En otro orden, resulta de interés computar gráficamente las diferencias en tanto a extensión de la inundación por parte de la avenida. Por lo tanto, mediante un sistema de información geográfica se han computado las mismas, tomando como referencia la modelización realizada en base a datos del PNOA LiDAR a 1m de resolución, siendo la manera más extensamente utilizada:

T=50



USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADELETE.



T=100



USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.



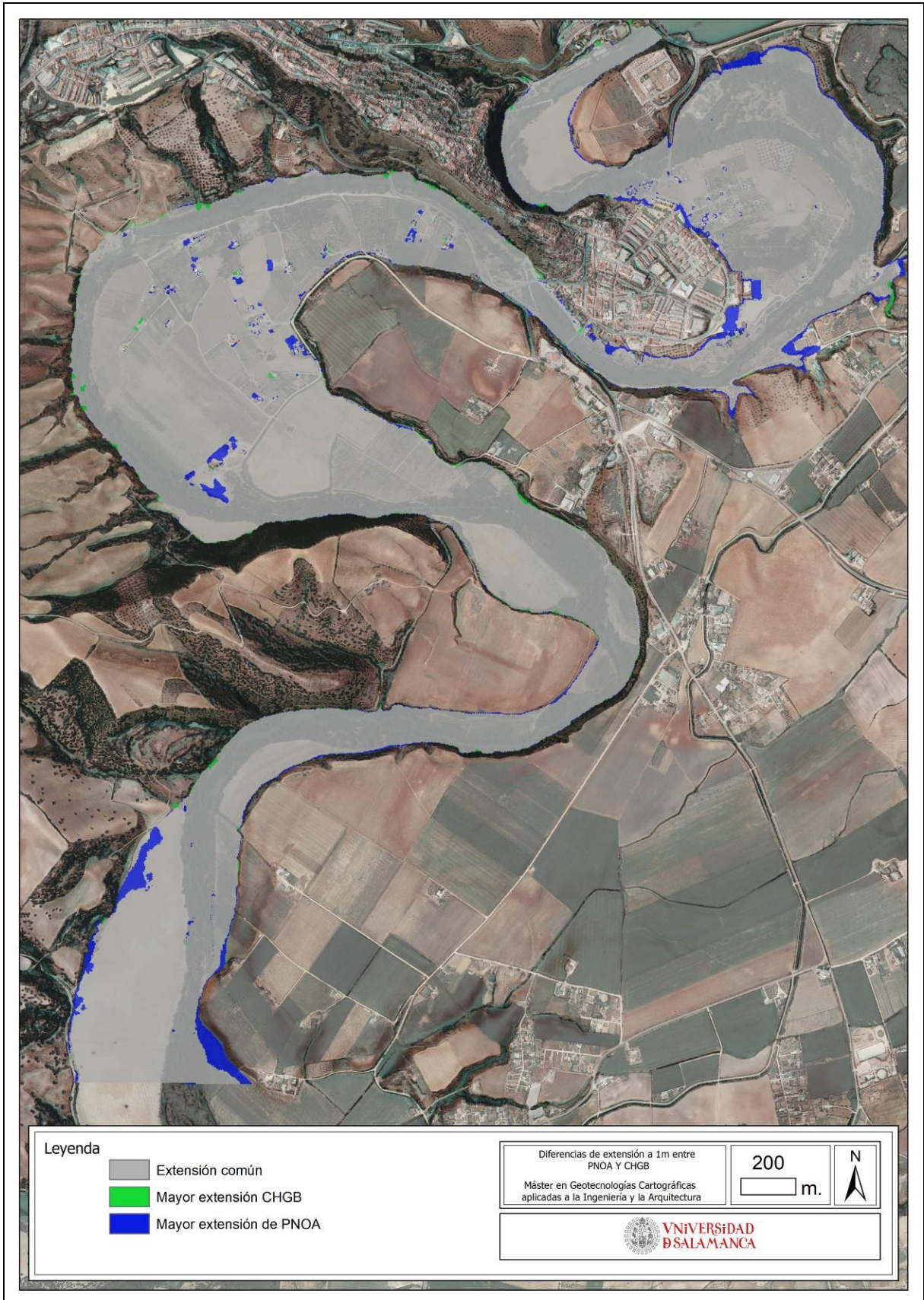
T=500



USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.



USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.



6.5. CORRESPONDENCIA CON EL ESTUDIO GEOMORFOLÓGICO

Para una correcta perspectiva de las áreas inundables y como manera de dotar de fiabilidad al modelo hidráulico, se han cotejado distintas áreas del estudio geomorfológico con la avenida simulada para el periodo de retorno de 500 años viendo así las similitudes y algunas diferencias que ambos muestran:

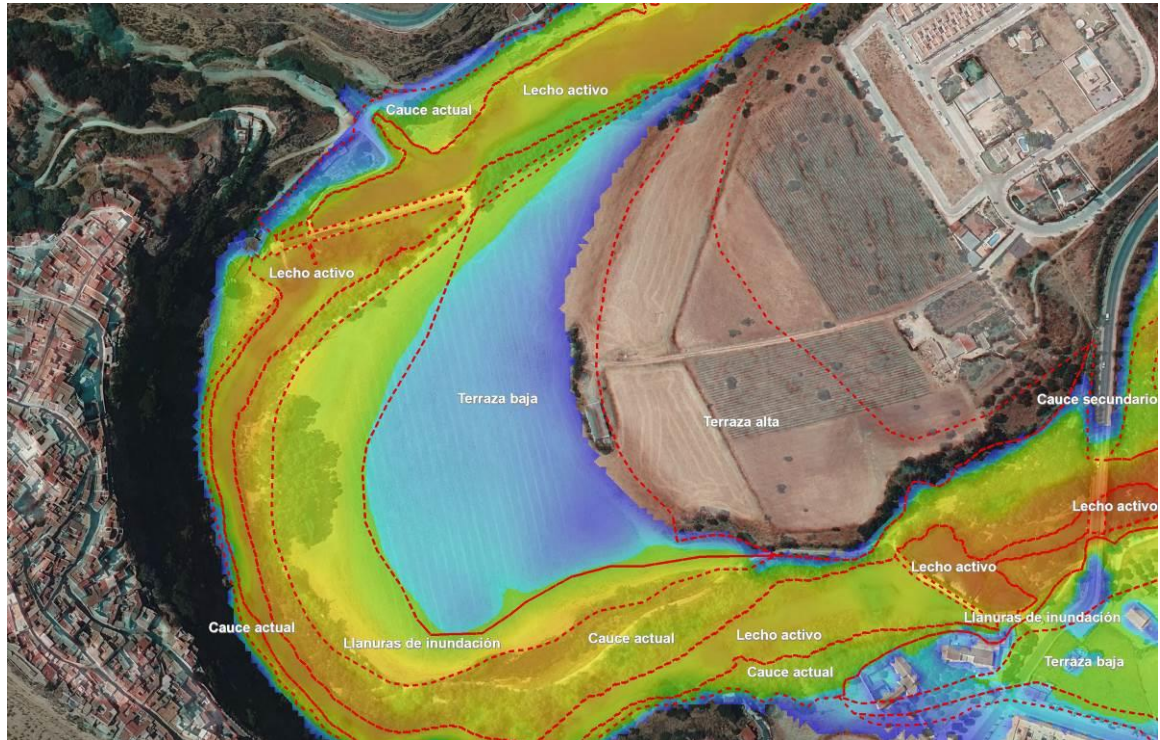


Figura 42. Zona norte del modelo.

En la Figura 42 se puede observar como la terraza baja queda inundada, levemente, con calados no superiores a los 2,5 metros, no llegando a inundarse la terraza alta y sí la llanura de inundación anterior a ambas terrazas. Los resultados para la inundación de $t=500$ son coincidentes con las cotas y las delimitaciones del estudio geomorfológico, dándose unos calados de mayor entidad en la llanura de inundación, delimitando y creando la misma respecto al resto de hitos geomorfológicos del entorno. El lecho activo y el cauce actual también consiguen discernirse con facilidad, siendo las áreas de mayores calados.

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.

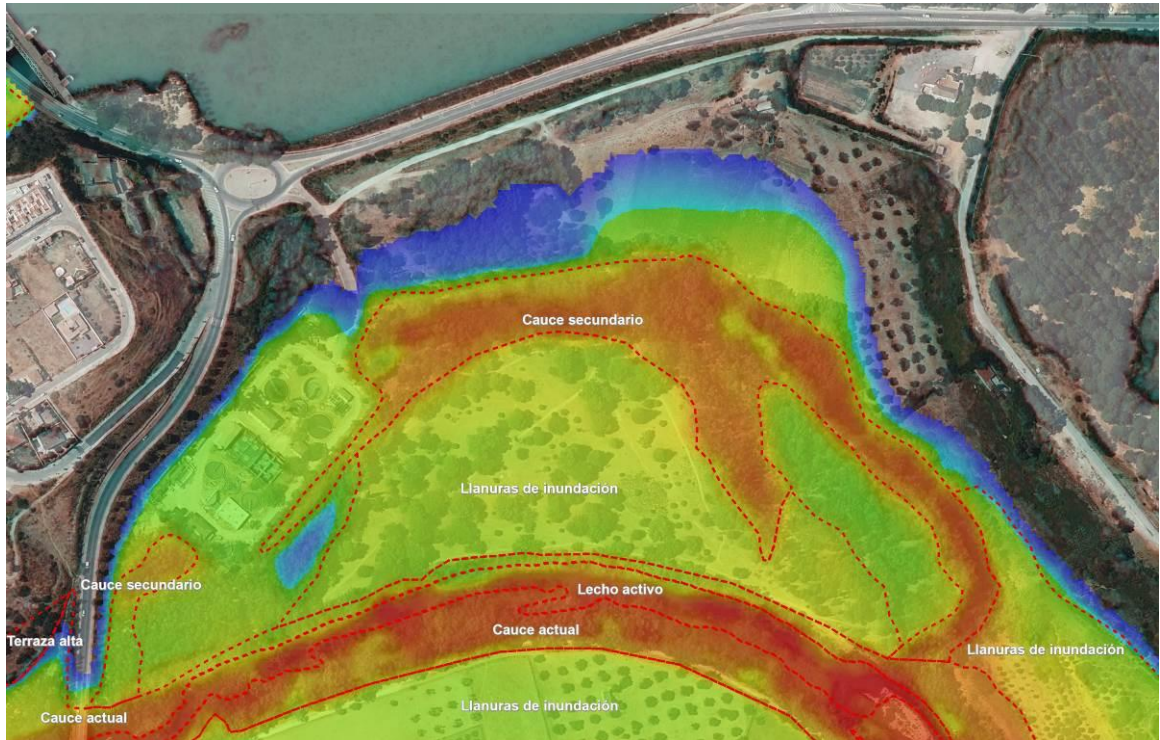


Figura 43. Parte superior del primer meandro.

En la Figura 43 se puede observar como la llanura de inundación ha quedado perfectamente definida, quedando totalmente bajo las aguas con calados en torno a los 3,5 metros, al igual que el cauce secundario, el cual fue abandonado por el río y ante un evento de tales características quedaría perfectamente delimitado y mostraría algunos de los mayores calados del modelo.

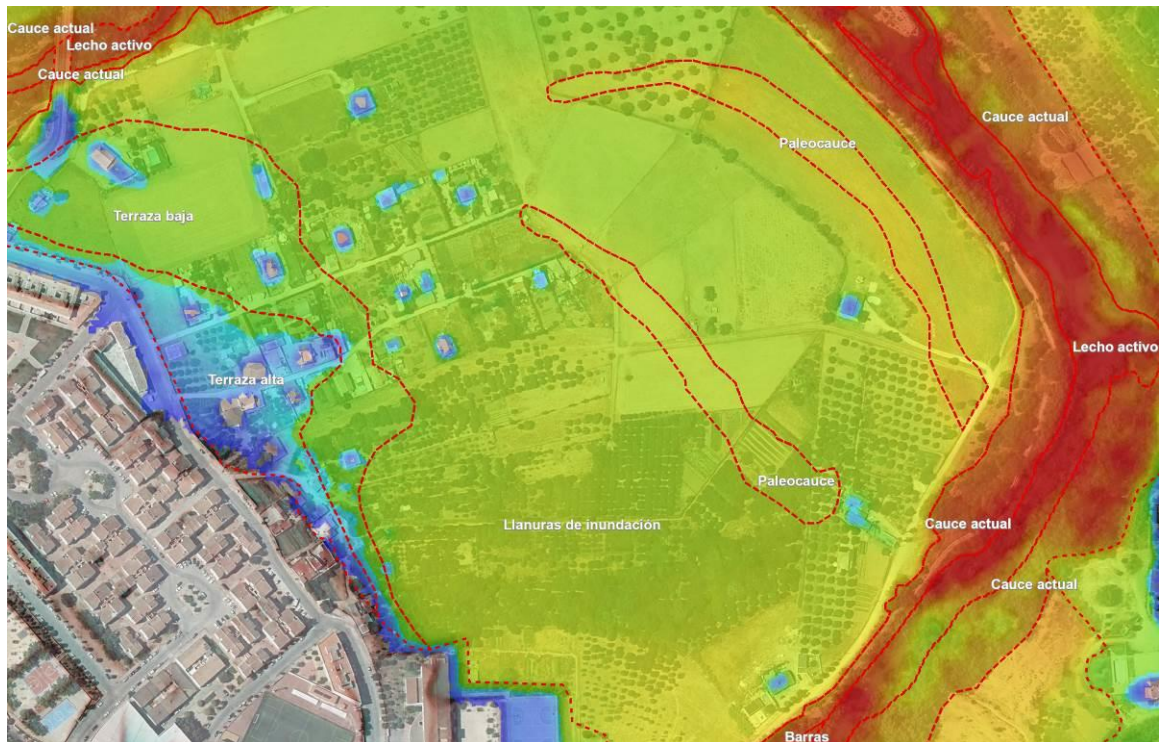


Figura 44. Parte superior del primer meandro.

En este tercer caso, la Figura 44 muestra la segunda llanura de inundación de mayores proporciones del área de estudio queda perfectamente definida respecto al estudio hidráulico. De la misma manera, los supuestos paleocauces o meandros abandonados también adquieren una mayor profundidad sobre el terreno, lo que da pistas de su menor cota, aunque tal como se pudo comprobar durante la visita de campo, casi imperceptible, tal como se puede observar en la siguiente fotografía realizada con dron y extraída de google maps, donde puede realizarse su consulta (Figura 45):



Figura 45. Vista de dron de uno de los paleocauces delimitados. Andalucía Panorámica en Google Maps.

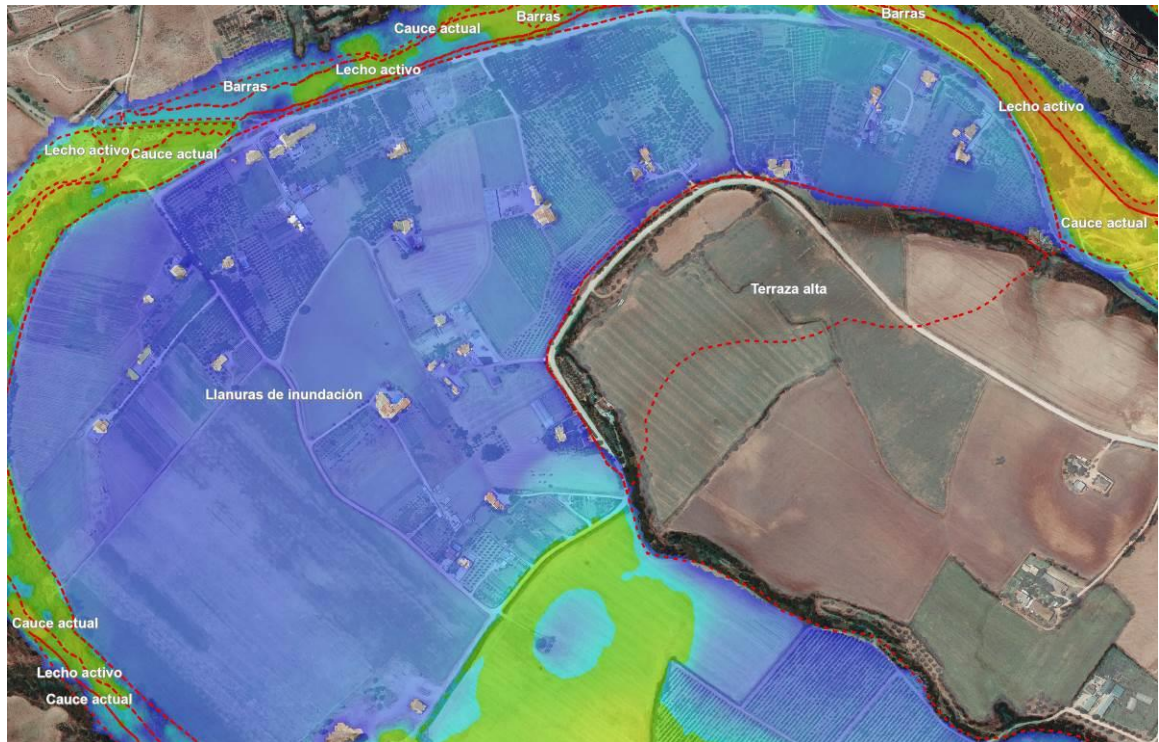


Figura 46. Llanura de inundación de mayores proporciones.

La llanura de inundación de mayores proporciones (Figura 46), aunque con calados por lo general inferiores al metro, queda completamente afectada por la avenida para periodo de retorno de 500 años. Se refleja claramente el cauce actual o estado de bankfull y la terraza alta, aunque no se pudo delinear con precisión la terraza baja que se intuye, a tenor de la proporción de la zona afectada, ha quedado prácticamente destruida a raíz de los usos agrícolas que se establecieron sobre el territorio, siendo fruto de desmontes y allanados.

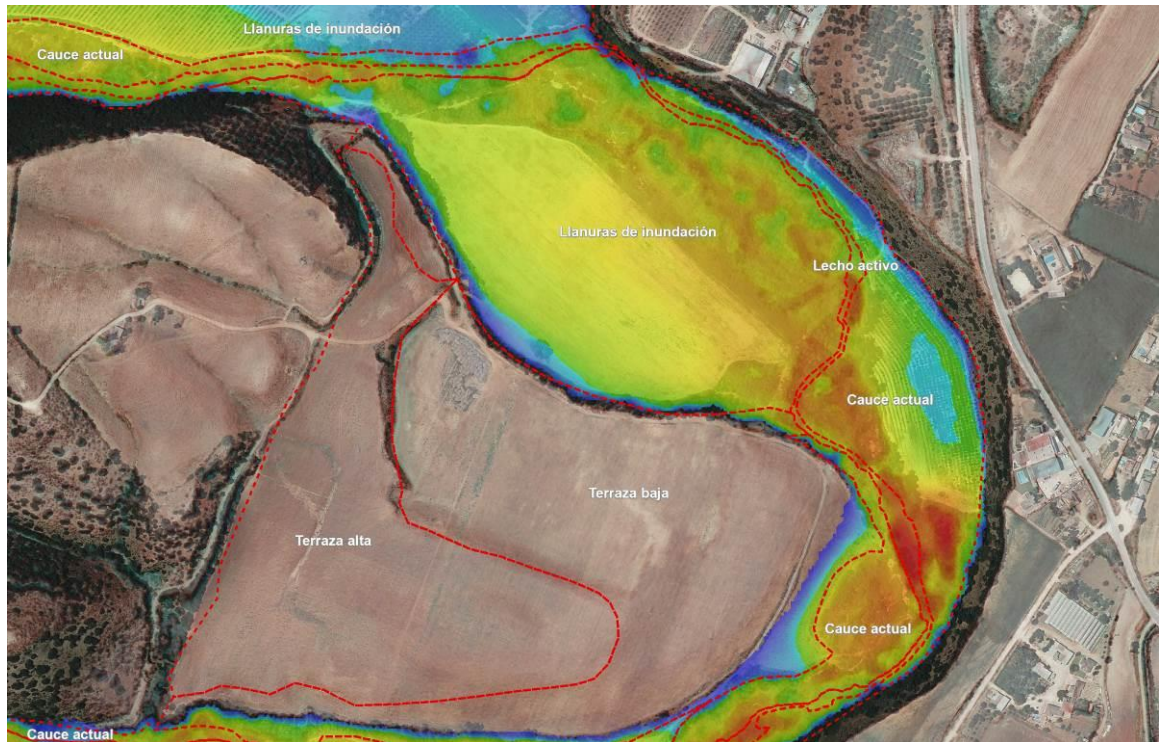


Figura 47. Llanura de inundación de mayores proporciones.

En último lugar, en la Figura 47, se puede observar el error a la hora de delimitar la terraza baja delimitada al sur, que nunca sería alcanzada por el agua al menos bajo las condiciones actuales. No se tiene certeza de lo mismo en caso de no existir el actual sistema de regulación del Guadalete. Las llanuras de inundación son perfectamente delimitadas.

6.6. CORRESPONDENCIA CON INUNDACIONES HISTÓRICAS

6.6.1. GRANDES INUNDACIONES DE 1917

Durante el otoño de 1916 fueron documentadas una serie de eventos con grandes cantidades de precipitaciones asociadas en toda la Sierra de Cádiz. Tales eventos, según la documentación consultada, llegaron a "reventar los caños" del Tajo de Grazalema, lo que era un claro síntoma del nivel freático que habían podido llegar a alcanzar los acuíferos.

El 21 de noviembre de 1916, un reputado meteorólogo de aquel momento, anota para el entorno de Grazalema la cantidad de 213,6 litros que, recién comenzado el año hidrológico, resulta una cantidad relevante para el entorno y quizás, para los meses venideros. El otoño continuó con la misma tónica hasta llegada la primavera. Todas las alarmas se desataron en marzo cuando, en apenas 36 horas, queda registrado lo siguiente en los cuadernos de seguimiento con los que contaba el meteorólogo:

*"la lluvia caída desde las 4 de la tarde del 5 de marzo, hasta las 4 de la madrugada del día 7 de marzo de 1917 fue de **289 litros por m²**".*

Para esta fecha, según el relato de Juan Gavala, un insigne geólogo:

*"después de cuatro meses de lluvias continuadas, durante los cuales **cayeron en Grazalema 1.948,7 milímetros de agua**, se sucedieron, desde el 26 de febrero hasta el 5 de marzo, **ocho días de lluvias** bastante persistentes y algunas de carácter torrencial como la que cayó el día 4 (95,1 mm.) acompañadas de **nevadas copiosísimas** en la parte alta de las montañas. Además, el día 5, a las cuatro de la tarde, empezó a llover torrencialmente en toda la Serranía con **viento huracanado del Sudoeste** y no cesó la lluvia ni disminuyó su intensidad hasta las cuatro de la mañana del día 7"*

Aguas abajo, la riada provocó efectos de los cuales aún hoy perduran algunas señales en los territorios afectados. Como recuerda Juan Gavala:

"fue tal la fuerza de la corriente, que arrastró los dos arcos que quedaban aún en pie del antiguo puente de Villamartín y parte del estribo de la margen izquierda; el puente de San Miguel, en Arcos de la Frontera; el llamado de la Junta de los Ríos, situado unos metros aguas debajo de la confluencia del Majaceite con el Guadalete, y el puente metálico y los arcos de avenida por donde cruzaba el río, en la Florida, uno de los sifones del acueducto de Tempul"

Dicho desastre podría haber sido de peor envergadura aguas debajo de no ser por el pantano de Guadalcazín (aguas abajo del área de estudio también) el cual retuvo buena parte de las aguas del Majaceite (afluente del Guadalete) y consiguió laminar parte del aporte al mismo. El Ingeniero Pedro M. González Quijano, director del Pantano, lo contaba así unos días después: *"en Grazalema han caído en diez y seis horas de un solo día, 215 mm, y que pasan de 70 los recogidos ese mismo día en dos pluviómetros de la cuenca del Majaceite, afluente el más importante del Guadalete. En dicho afluente está situado el pantano de Guadalcazín, que estaba lleno, y en el que la lámina de aliviadero de superficie llegó a tres metros de altura, correspondientes a un caudal de unos 500 metros cúbicos por segundo, en el momento en el que quedaban embalsados por encima del nivel normal, y sustraídos por consiguiente al máximo de la avenida, más de 25 millones de metros cúbicos. Sin este embalse regulador, el máximo del Majaceite hubiera pasado seguramente de 1000 m³ por segundo y hubiera igualado próximamente al del Guadalete, a pesar de tener la cuenca más pequeña y sin comparación mucho más arbolada que la del río principal. Un embalse análogo en este río hubiese reducido tal vez su caudal a la mitad y en una tercera parte el que produjo la inundación de la región situada aguas debajo de la confluencia, disminuyendo considerablemente o quizás evitando en absoluto la inmensa mayoría de los daños causados"*.

Expuesto todo lo anterior y analizado junto con más documentación histórica, se estima que la avenida se correspondió con un periodo de retorno si no de **500 años** bastante cercano, por lo que se tomará el modelo presentado en apartados anteriores con resolución de 1m, tanto el generado a partir de datos del PNOA como el generado a partir de datos de la Confederación Hidrográfica, de mayor densidad de puntos.

Para el caso concreto del área de estudio, al igual que aconteció en toda la provincia, se cita en los periódicos locales que descargó en Arcos *"una espantosa tormenta de agua y granizo"* a lo que seguiría:

*"desde las primeras horas de la noche del lunes (5 de marzo) hasta las nueve de la mañana de hoy miércoles (7 de marzo), **no ha cesado de llover** en esta ciudad unas veces, la mayoría, de un modo torrencial y otros aguaceros, todo acompañado de un **viento***

fortísimo que impedía el tránsito del vecindario por las calles. Los daños causados por el temporal en la población y riberas del río Guadalete son enormes. Jamás se ha conocido una crecida tan alta... pues ha subido **más de ocho metros sobre su nivel ordinario**"

Aquí ya se podría establecer la primera de las comparativas: la altura adquirida por la avenida. Según ambos modelos, la altura de la avenida alcanzaría en algunos puntos más de 8,5 metros, llegan el modelo del PNOA a predecir hasta 9,46 metros de altura en un tramo punto de entre los tramos de mayor altura de la avenida, situados en el segundo meandro (Figura 48).

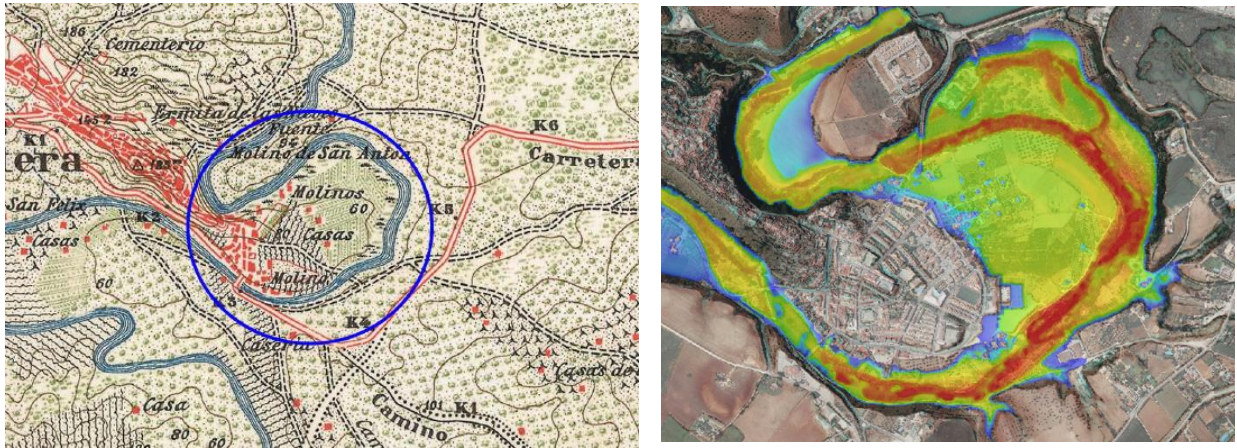


Figura 48. Zonificación de la zona más afectada según la publicación "La gran riada" y su equivalencia en el modelo de la CHGB.

Según continua la narrativa, la peor parte de la avenida se la llevaron los molinos, infraestructuras situadas en las cercanías del río para aprovechar parte de su energía como motor de su principal proceso de molido. Según se suscribe, la corriente:

"Arrancó de cimiento el molino harinero llamado de **Angorrilla**", inundándose también en el **Barrio Bajo** varios molinos de aceite "entrando las aguas en las tinajas y depósitos donde se encerraba el precioso líquido subiendo éste a la superficie de aquellas, siendo arrastrado por la corriente. En el molino de D. Francisco Martel, se calculan en más de tres mil arrobas de aceite las llevadas por el río. En el D. Antonio Matos, llamado **Valdespino** son incalculables los perjuicios y destrozos causados por la riada. Todo el aceite que se encerraba en sus depósitos ha desaparecido... Igual le ha ocurrido a D. Antonio Dueñas en su molino **La Condesa** en el cual no ha quedado una gota de aceite, de las quinientas y pico arrobas que tenía almacenadas"

Tanto a partir de los conocimientos del lugar como a partir de las minutas del MTN50 proporcionadas por el IGN y de acceso público se han señalado en el modelo de calados y velocidades que emana del PNOA la ubicación de los anteriores molinos (Figura 49):

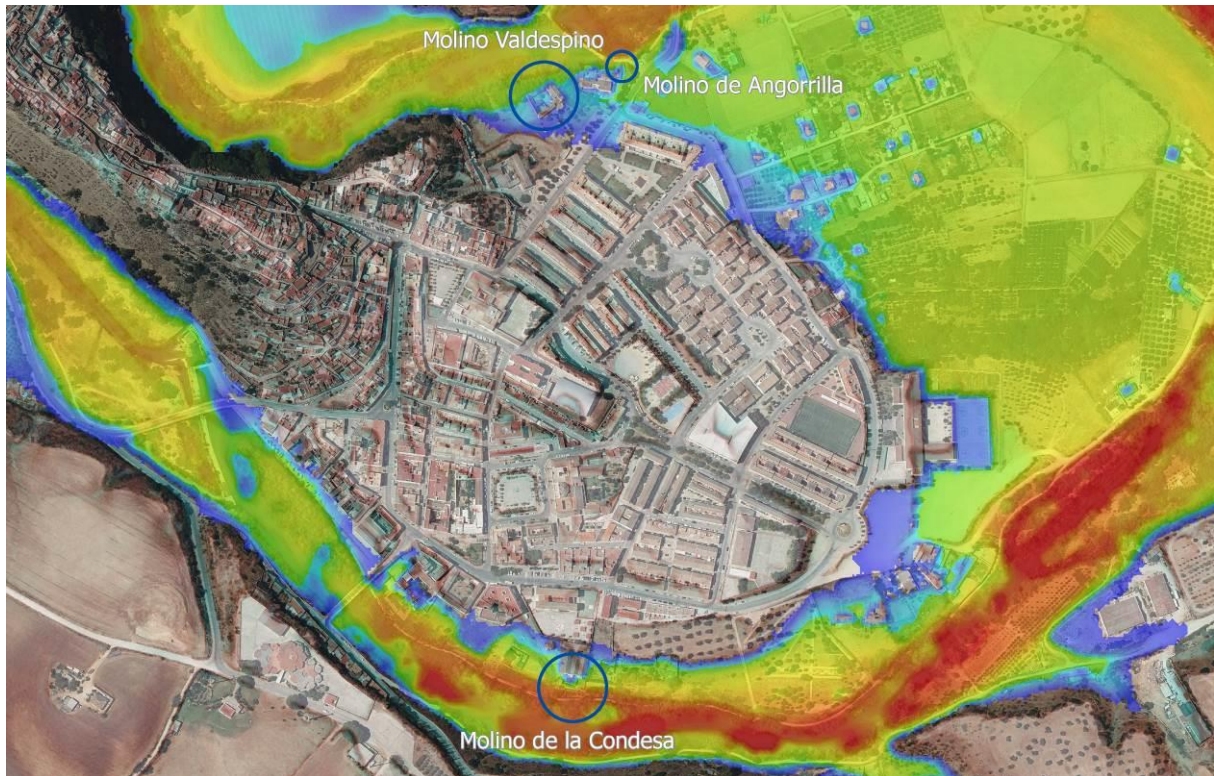


Figura 49. Ubicación de los molinos destruidos durante la gran riada de 1917. Calados.

Para el caso de los calados se puede observar como prácticamente todo el Molino de la Condesa queda anegado bajo la avenida, dándose calados de entre los 6 y los 2 metros. El Molino de Valdespino, al norte, siendo el de mayor entidad, llega a calarse parcialmente en su zona más cercana al Río, que en su momento estuvo compuesta por muros y espacios libres. El Molino de Angorrilla, según el modelo propuesto, llega a calarse por completo (Figura 50).

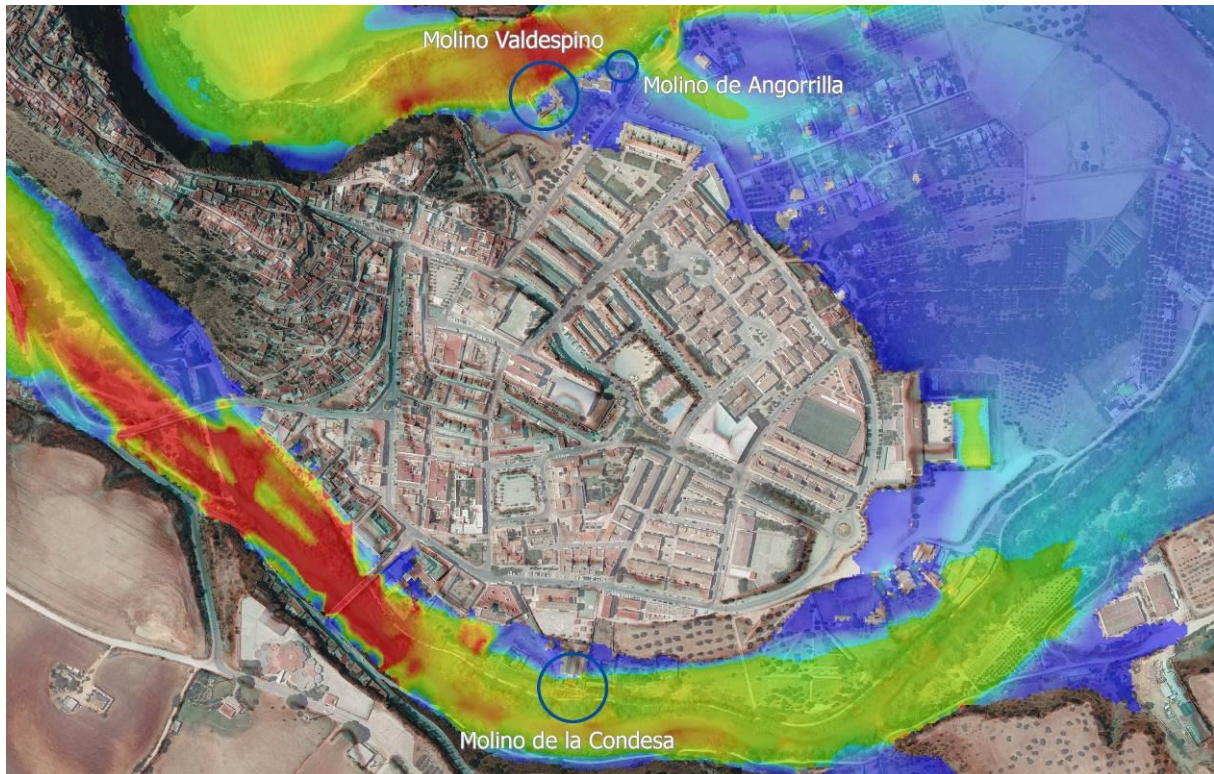


Figura 50. Ubicación de los molinos destruidos durante la gran riada de 1917. Velocidades obtenidas.

La obtención del modelo de velocidades resulta más controvertida, en tanto no es posible recrear todas las condiciones y elementos en el cauce de 1917 que influyen en una mayor velocidad, más si cabe en este caso en el que no se han recreado los puentes. Para el caso de los molinos situados al Norte, no se encuentran aguas arriba ningún elemento que no haya sido recreado en el modelo. Obtienen velocidades del orden de los 2,4 a 0,75 m³/s. El Molino de la Condesa sin embargo, sí que se encuentra en una zona donde las velocidades son del orden 2,45 a 1,80 m³/s, siendo potencialmente más destructiva la riada en esta zona.

Las llanuras de inundación que se sitúan entre los meandros quedaron peor paradas. El diario local "El Guadalete" describía en su crónica del día en cuestión las difíciles escenas que la riada había dejado en los campos cercanos al río, y más concretamente, en la zona conocida con el topónimo de "Los Llanos de las Huertas" (Figura 51):

*"La ribera de huertas está completamente inundada viéndose solamente las copas de los árboles, y en los tejados de las casas, los colonos, sus familia y operarios aguantando el temporal desde media noche, ateridos de frío, dando gritos de socorro que nadie podía prestarle. Multitud de personas que habían acudido al **Paseo de Boliches** para desde allí contemplar la arriada, se retiraban con los ojos arrasados en lágrimas al ver el horroroso cuadro... Han perecido cientos de cabezas de ganado lanar, cabrío, cerda, vacuno y algunas caballerías"*

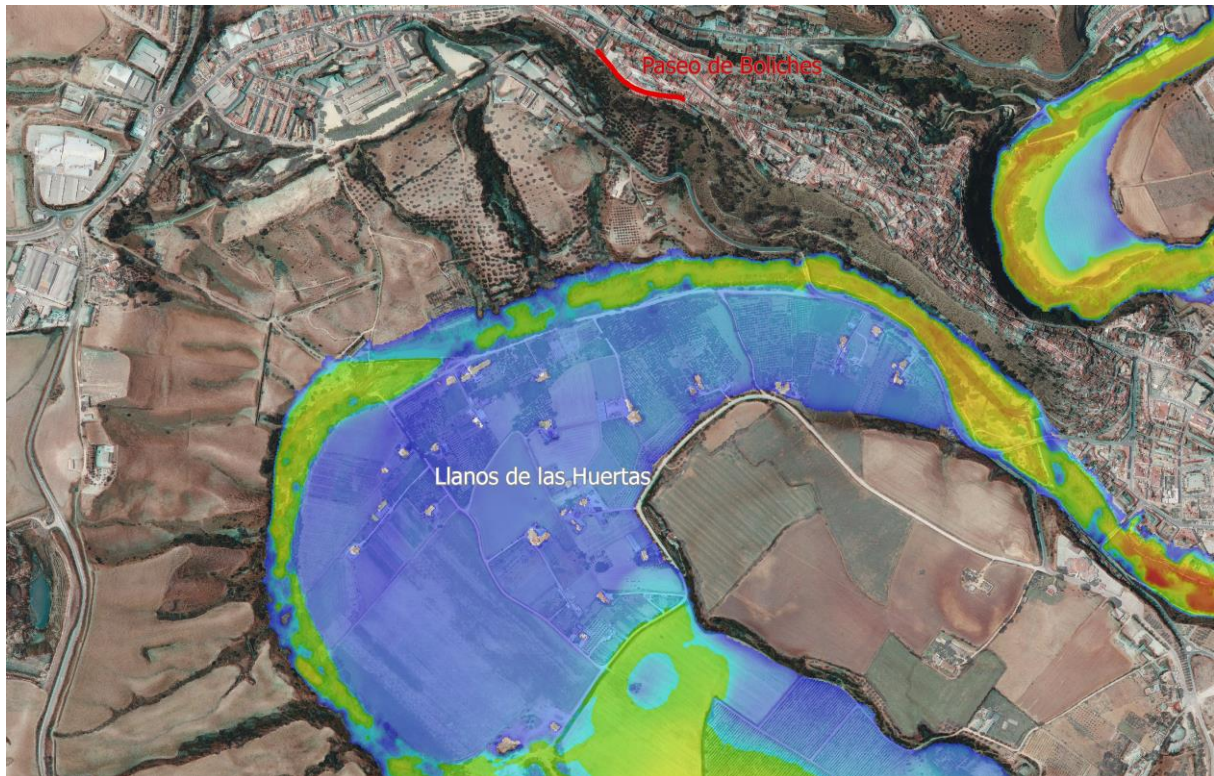


Figura 51. Recreación de la situación anteriormente citada.

Tal como se puede apreciar en la Figura 51, la inundación que se daría según el modelo del PNOA para $T=500$ en la zona citada, tomando como referencia los observadores del Paseo de Boliches, sería de características muy parecidas al descrito por la prensa para el evento de la gran riada. Se pueden observar una serie de edificaciones en los Llanos de las Huertas que no quedan completamente anegadas, suponiéndose que la altura de las mismas fuese parecida a actualmente, pero dándose calados del orden de los 0,55m hasta los 2,45 metros en el extremo Sur, los cuales pueden corresponderse con la altura suficiente como para que los habitantes del momento debieran subir a los tejados para poner a salvo. En términos de velocidades, también se alcanzan velocidades intermedias, siendo del orden de los 1,30 m3/s. Resulta llamativas los calados alcanzados en la ribera de las huertas, tal como se cita en el fragmento de periódico, que alcanzan los 5 metros, por lo que muy probablemente por aquel entonces solamente pudieron ser visibles las copas de algunos árboles, tal como se cita.

Pero el hecho más llamativo del evento de la gran riada de 1917 fue la caída del Puente de San Miguel (Figura 52). Dicho puente fue construido en 1867, y tras aguantar en embiste de la riada durante algunas horas, acumulando restos de árboles y casas arrastradas hasta allí, sucumbió a la fuerza de la onda de avenida, que resquebrajó sus pilares y lo hizo derrumbarse sobre sí mismo.



Figura 52. Postal con el antiguo puente de San Miguel. Cedida por el Archivo Provincial Histórico de Cádiz.

Probablemente, a raíz de la especial configuración de los meandros del Guadalete, el efecto de la avenida en la zona se entiende bastante mayor, según arrojan los datos de los modelos del presente documento. En prácticamente todos los modelos (distintos tamaños de celdilla) con periodo de retorno de 500 años aparece dicha zona como una de las que mayores velocidades consigue, así como mayores calados y caudales específicos (Figuras 53, 54 y 55):

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.

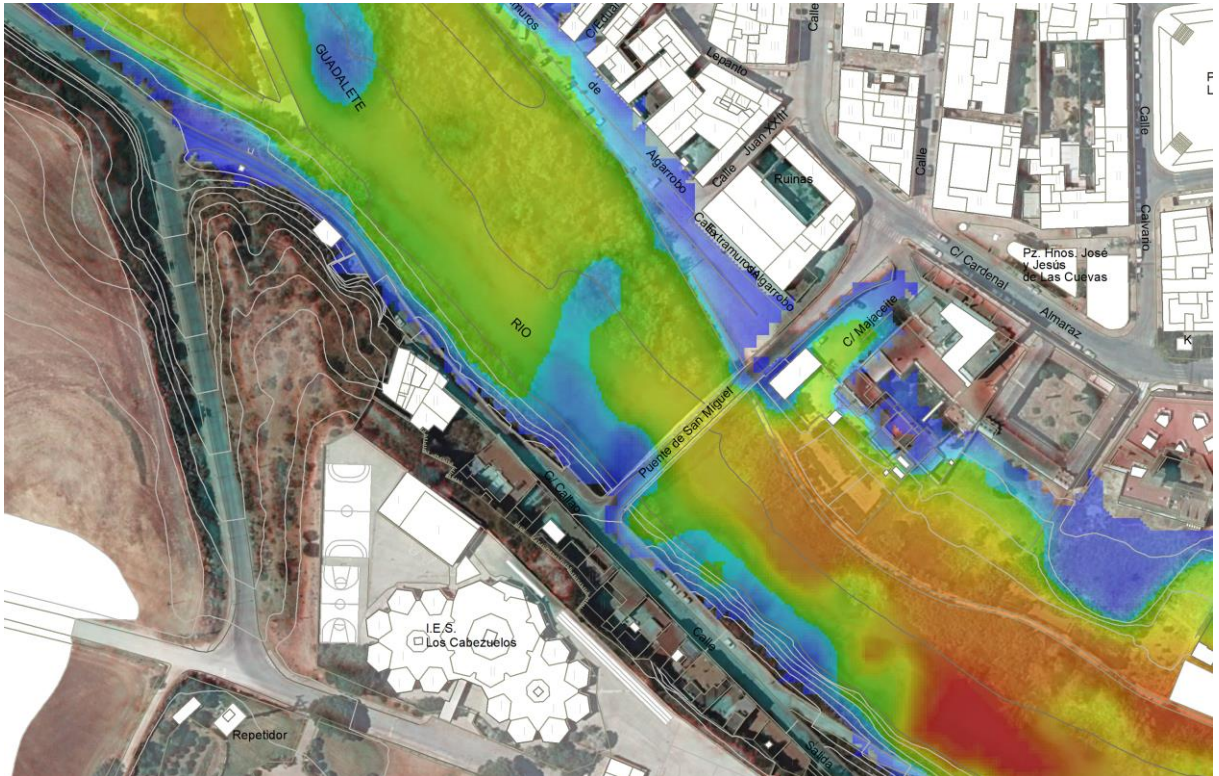


Figura 53. Calados para T=500 en el entorno del puente de San Miguel.

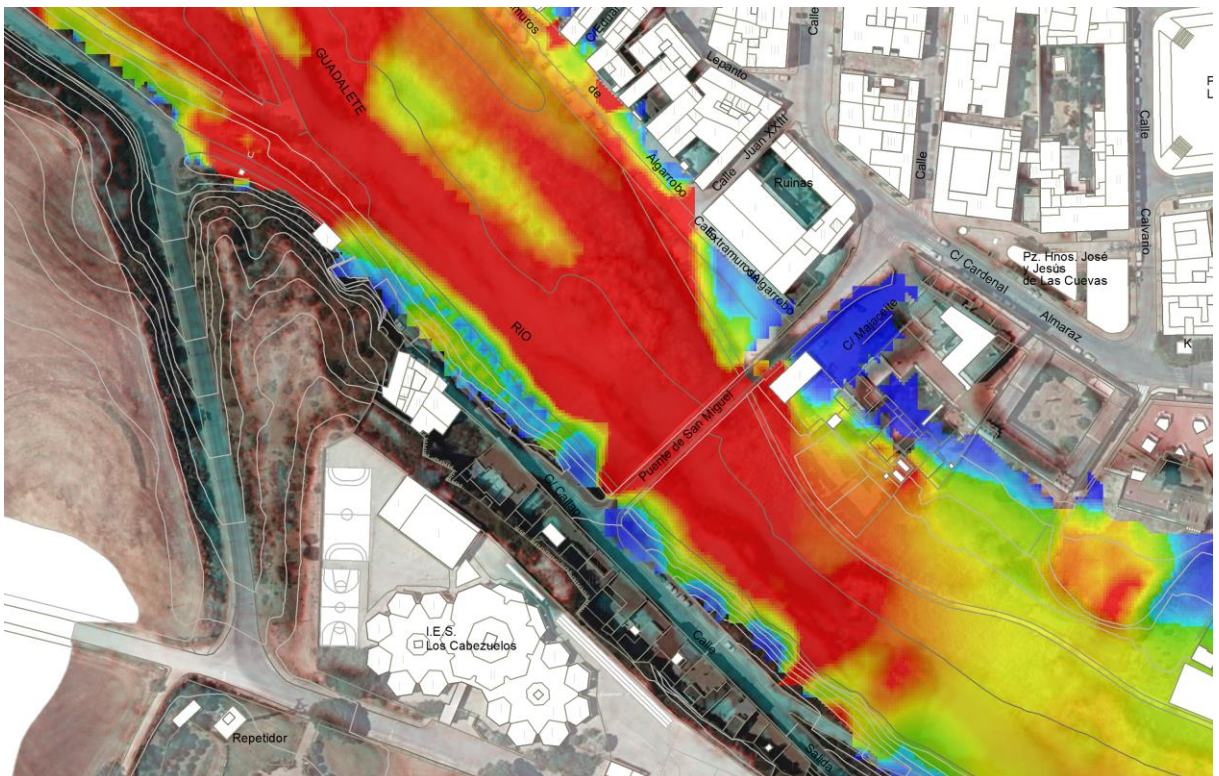


Figura 54. Velocidades para T=500 en el entorno del puente de San Miguel.



Figura 56. Estado actual del Puente de San Miguel. Mayo 2021.

6.6.2. ÚLTIMAS INUNDACIONES DE 2009/2010

El año hidrológico 2009-2010 fue un año de especial relevancia hidrológica, por sus cantidades acumuladas, en los últimos 21 años en toda la cuenca del Guadalete-Barbate. Observando los registros históricos de precipitaciones en la localidad y en las localidades aguas arriba, se observa que no se registran año de semejantes cifras desde el año 1996, que sin embargo, quedó un poco por debajo del caso objeto de estudio.

Dicha precipitación se extendió por toda la cuenca, provocando frecuentes desbordamientos del Guadalete en algunos puntos. Son recordadas las inundaciones que durante ese invierno acontecieron en toda la campiña de Jerez, donde el encajonamiento del río es menor y existen una gran cantidad edificaciones rurales cercanas a los cauces. El año estuvo compuesto por varios eventos de grandes magnitudes, a recordar un primero en diciembre de 2009 y un segundo en febrero de 2010, prácticamente de similares características. El año es citado como el más lluvioso de los últimos 25 años (Del Río *et al.*, 2012) (Agencia Andaluza del Agua, 2010) con unos caudales punta vertidos por la presa de Arcos de 200 m³/s (Fernandez-Montblanc, *et al.*, 2014).

Con estos datos y en conjunto con los cálculos realizados en el [Estudio Hidrológico](#) se ha modelado la crecida de diciembre de 2009 con los datos del vuelo de la Confederación Hidrológica del Guadalete - Barbate, realizado un año antes (2008) a un tamaño de celdilla de 1m y con un periodo de retorno de 25 años, siendo la densidad de puntos de 2 p/m², aproximadamente, con los resultados los siguientes expuestos en la Figura 57:

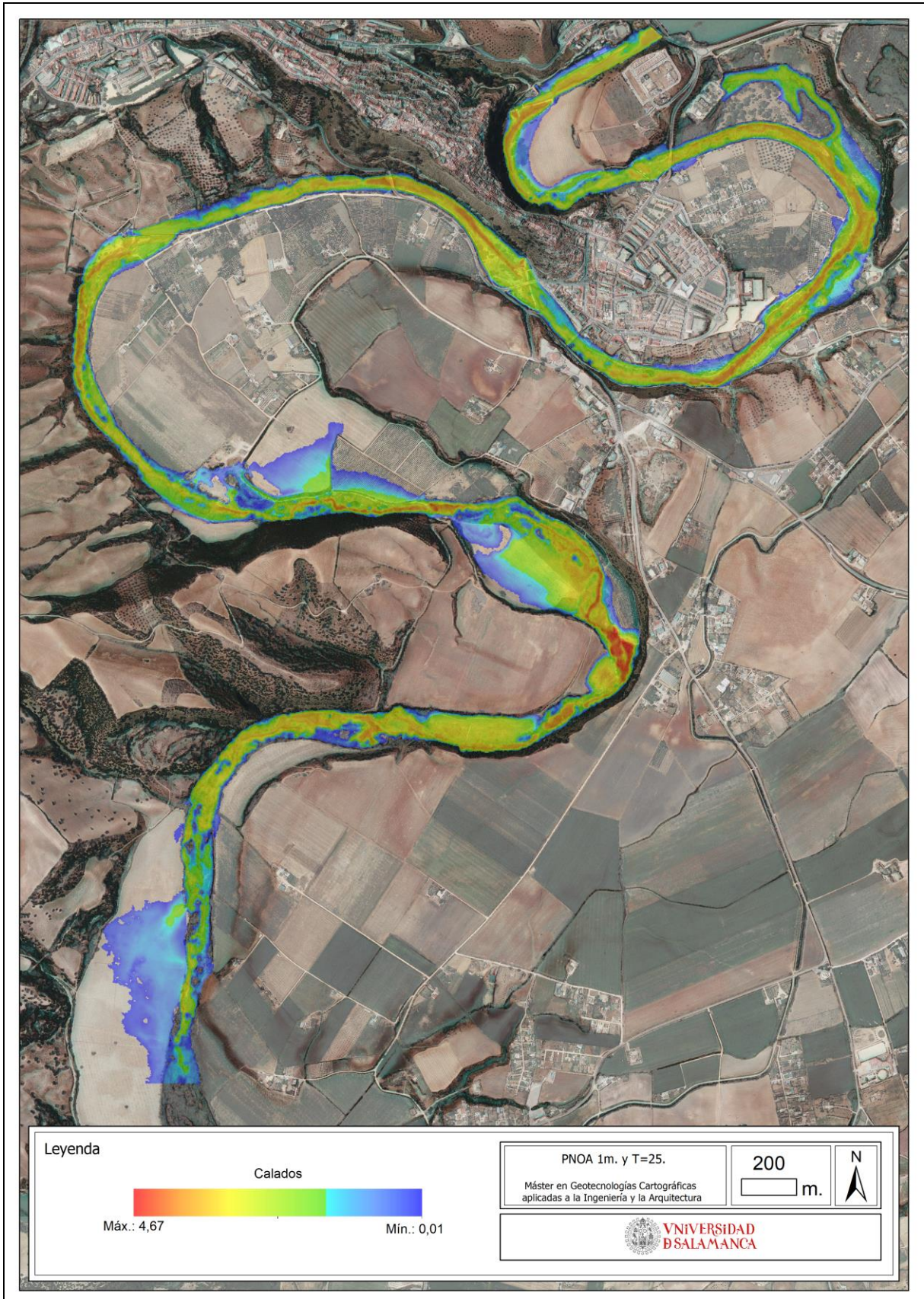


Figura 57. Modelado de inundaciones de 2009.

Se puede observar como la extensión de las inundaciones es mucho más reducida en este modelo que en los anteriores, no llegando excepto en puntos concretos a alcanzar las llanuras de inundación y terrazas bajas que fueron delimitadas en el estudio geomorfológico.

Habiéndose podido recuperar fotografías de aquel evento de una cámara digital familiar, se ha podido contrastar la extensión de las inundaciones en algunos puntos junto con lo arrojado por el modelo. A continuación, se exponen una serie de fotografías y la ubicación de los hitos y extensiones visibles en cada una de las fotografías en el modelo de inundabilidad a 25 años. El triángulo rojo marca la posición y la flecha la dirección de la fotografía (Figura 58):

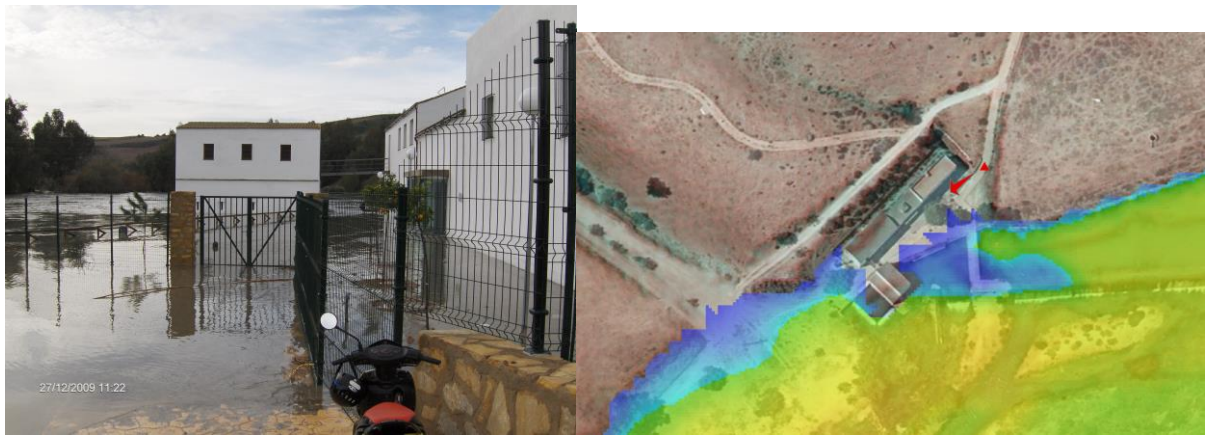


Figura 58. Calados y extensión de la avenida en Molino San Félix.

La extensión alcanzada por la avenida en el modelo resulta muy similar a la mostrada en la foto, quedando el modelo un poco más reducido. Los calados parecen ser similares, del orden de los 10-20 cm tal como arroja el modelo.



Figura 59. Calados y extensión de la avenida en Molino San Félix.

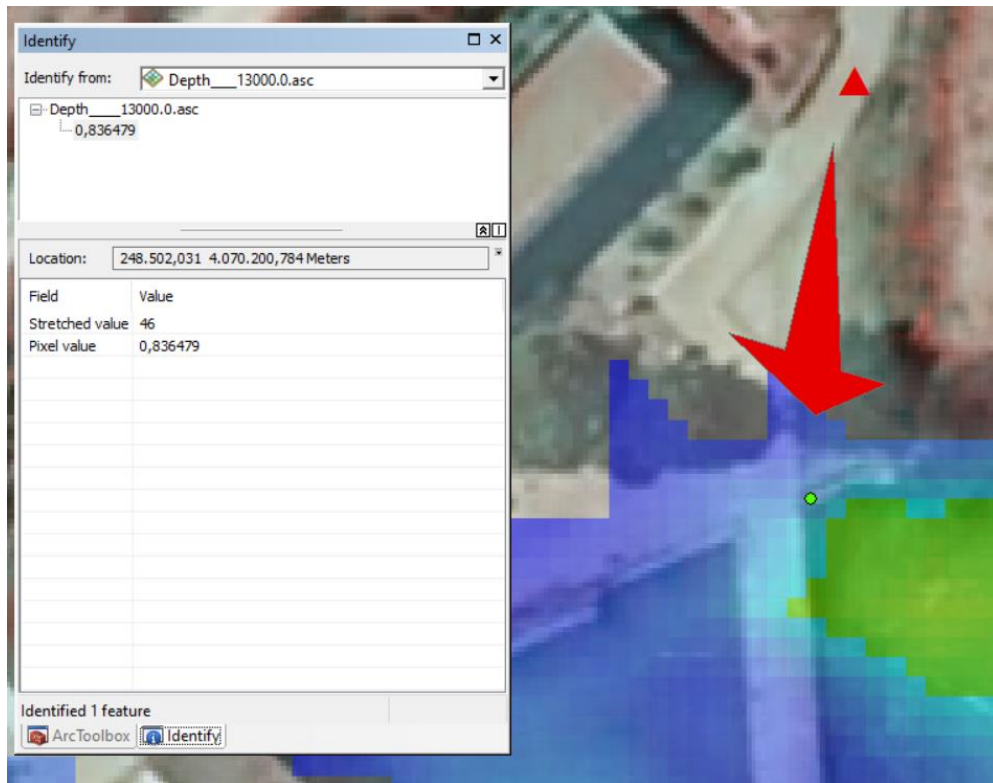


Figura 60. Calados y extensión de la avenida, comprobación de calados en ArcGIS.

En la anterior fotografía (Figura 59) se encuentra señalado un poste que es parte del conjunto de llos que protegen de accidentales caídas a los visitantes del lugar, muy frecuentado por los amantes del senderismo. En el mismo se puede ver el nivel que alcanza el agua, algo por encima de la mitad del mismo. En la figura inmediatamente posterior se puede observar que el nivel del agua, justo en ese mismo poste, alcanza los 83 centímetros según el modelo. Habiéndose medido el poste, tal como se muestra en la fotografía adjunta (Figura 61), se puede de manera grosera, argumentar que el modelo resulta cercano a la realidad de aquellos días de diciembre. Se podría estimar que el agua caló hasta los 70-73cm aproximadamente si se analiza detenidamente la fotografía. Para el modelo, se arroja una cifra de 83 cm, por lo que en este caso el error en el orden de los calados, con el caudal estimado con el que se ha realizado el modelo, se estima en torno a los 10-15cm.



Figura 61. Comprobación/aproximación de los calados en campo.



Figura 62. Inundación de 2009 junto a Molino San Félix.

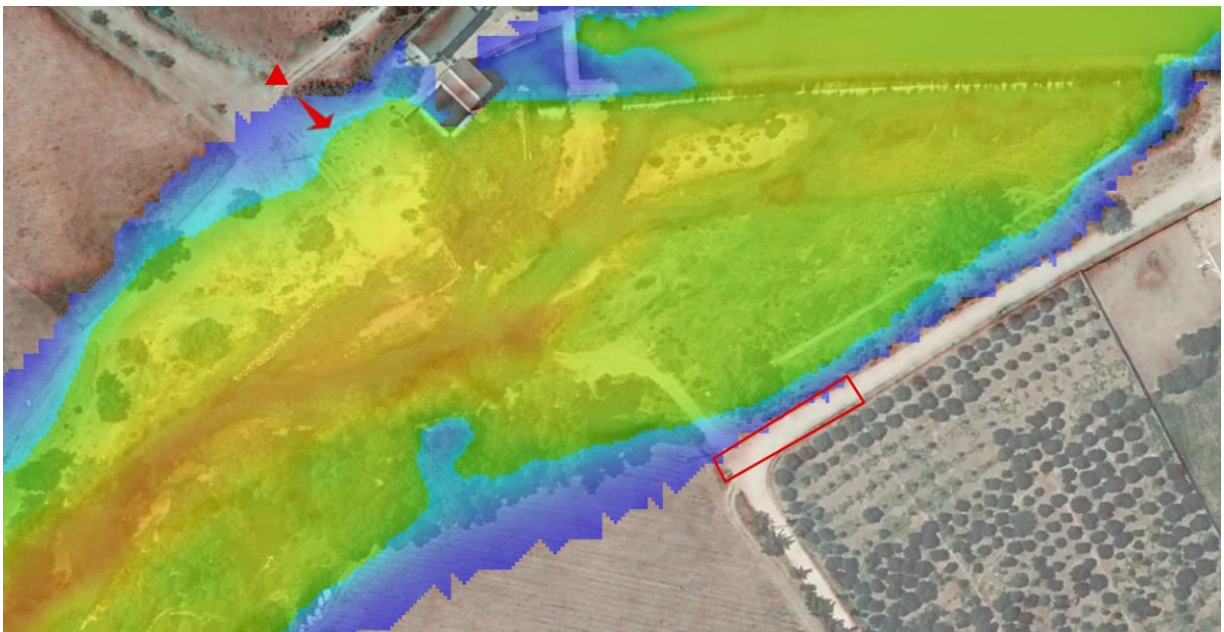


Figura 63. Calados para inundación junto al Molino San Félix.

En la anterior fotografía (Figura 62), al fondo de la misma, se pueden ver una serie de coches aparcados durante la gran riada de la zona. Estos coches, se corresponden con la arista del camino señalado (Figura 63) en los Llanos de las Huertas, por lo que se puede corroborar

USO EXTENSIVO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR PÚBLICA EN ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD. EL CASO DEL GUADALETE.

que el modelo refleja de lleno la extensión de la inundación. Respecto a calados, los mismos pueden ser observados en la apred del molino y en la valla sumergida presentes en la fotografía, siendo esta última de una altitud aproximada de 2 metros, coincidiendo con el 1,80 propuesto por el modelo para ese punto.

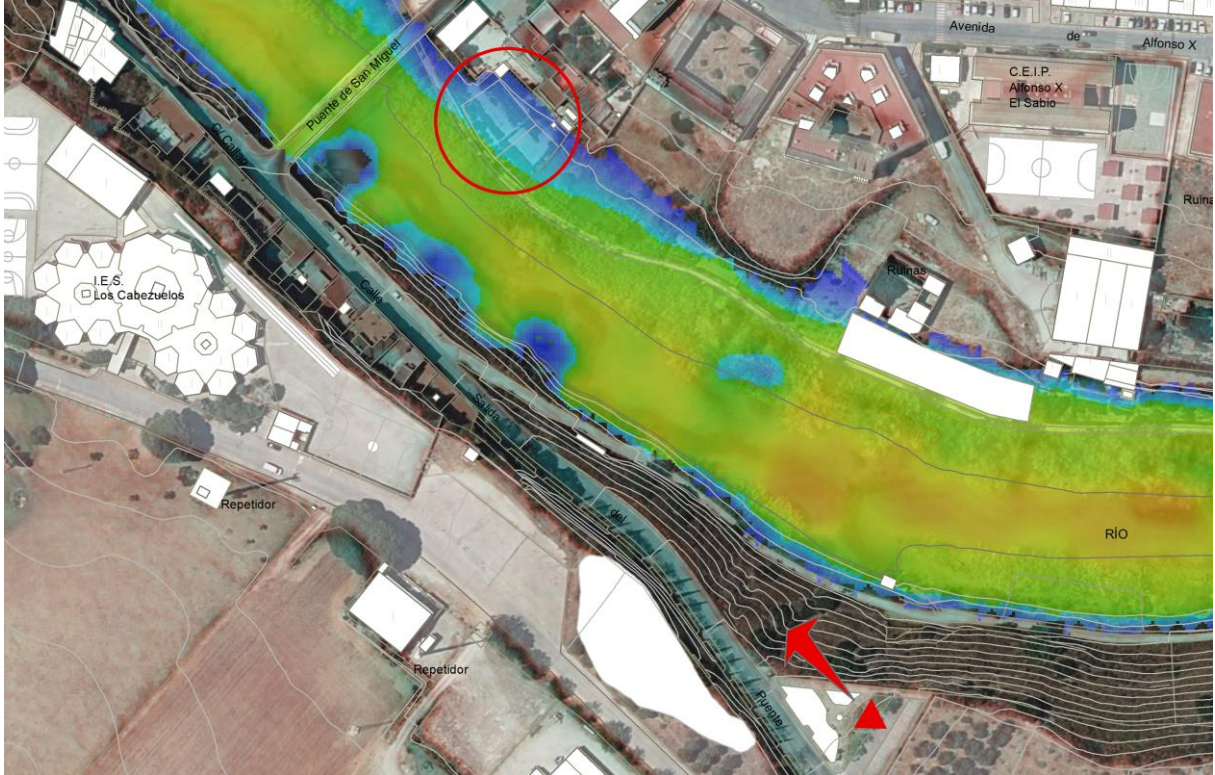


Figura 64. Calados para inundación junto al Puente de San Miguel.



Figura 64. Fotografía del evento de 2009 a la altura del Puente de San Miguel.

El modelo corrobora una vez más la extensión del agua (Figura 64), tal como puede deducirse de la zona inundada en la margen derecha del Puente de San Miguel, siendo la misma un patio privado (Figura 63). El mismo patio queda reflejado con un círculo en el modelo. Por otra parte, también se delimita perfectamente la extensión tomada por el agua en todo su cauce.



Figura 65. Fotografía del evento de 2009.

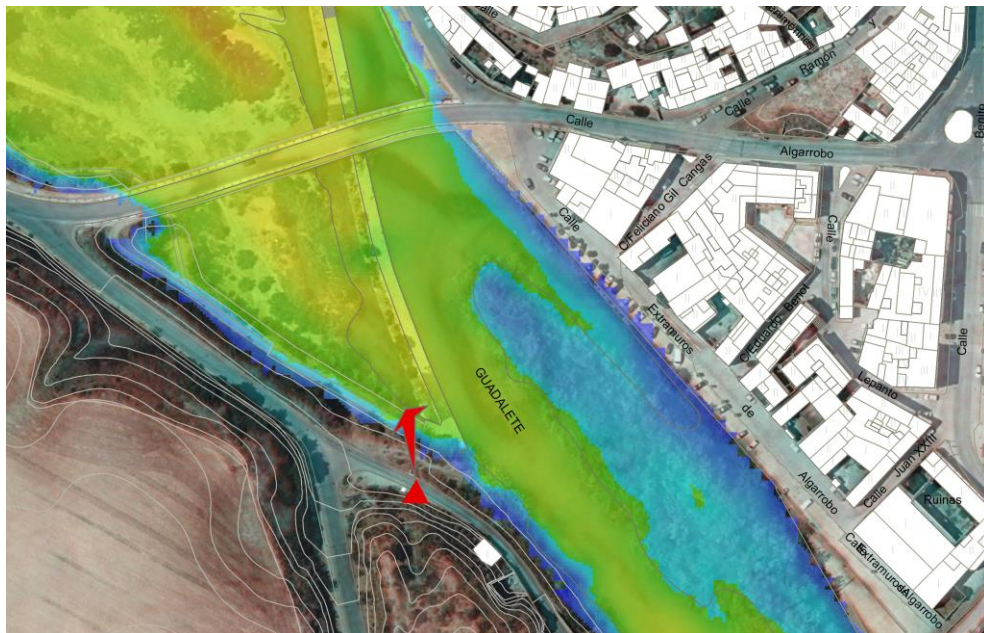


Figura 66. Punto de toma de la fotografía de la Figura 65 y modelo.

En esta última fotografía (Figura 65), se puede observar el calado que se dio en el Puente de Entrada a la zona del Barrio Bajo. Dicho puente no fue modelado en la simulación,

aunque pueden verse los grandes calados que se dieron en la zona (Figura 66), los cuales son perfectamente reflejados por el modelo, llegando el agua a la parte superior de las bóvedas. La magnitud de los calados puede ser comparada en la siguiente fotografía de mayo de 2021 donde se puede apreciar la altura de las bóvedas que componen el puente (Figura 67):



Figura 67. Puente de entrada, mismo que en la Figura 65.

Por lo tanto, el modelo generado para un periodo de retorno de 25 años derivado de los datos LiDAR de la primera cobertura pública del PNOA se considera que ha conseguido recrear la inundación del año 2009 de correcta manera, mostrándose que, tanto por parte de los calados como por parte de la extensión adquirida (siendo las dos únicas variables que se pueden medir por las fotografías) el modelo acierta en prácticamente todos los puntos analizados.

7. CONCLUSIONES

El objetivo del presente estudio ha tenido como objetivo la creación de un modelo geomático de un cauce, poniendo el foco en los datos LiDAR públicos y su idoneidad para la determinación de zonas inundables y análisis de inundabilidad. La tecnología LiDAR resulta actualmente una fuente de información imprescindible para gran parte de las empresas y grupos de investigación de este país, por lo que el contar con un acceso público a estos datos con precisiones que oscilan entre los 0,5 p/m² y los 14 p/m² para todo el territorio español, unidos a una tasa de actualización de alrededor de 5 - 7 años es primordial en el desarrollo del tejido empresarial dependiente en gran parte de los datos geoespaciales y de grupos de investigación que fundamenten gran parte de sus investigaciones en el LiDAR, como base.

Se ha comenzado por analizar el área de estudio, justificándose su adopción por ser un tramo sin estudios accesibles al público en general en el SNCZI, además de ser una zona históricamente sujeta a grandes inundaciones, por lo que resulta una zona idónea para establecer las necesarias comprobaciones y comparaciones.

Una vez expuestos algunos de los principios de la tecnología LiDAR de manera generalista, se ha procedido a una descripción del medio físico, también de manera muy general, pero describiendo la composición del territorio objeto de estudio, lo cual resulta de fundamental importancia a la hora de trabajar con datos geoespaciales y más si cabe, con datos tan sensibles a errores en la captura como son los datos LiDAR. Ya han sido profusamente descritos, por ejemplo, los errores que el LiDAR puede tener en zonas de vegetación boscosa si el mismo posee una densidad de puntos baja.

A continuación, se ha acometido un estudio geomorfológico general, sin poder entrar a grandes detalles, para intentar no sobrepasar la extensión del documento propia para este objeto de estudio. Durante dicho apartado se ha intentado corroborar como las distintas técnicas de modelización y visualización de MDTs derivados del LiDAR son de gran utilidad para la correcta caracterización del terreno, dada su precisión, en este caso, de la geomorfología fluvial. Se ha msotrado también una técnica alternativa como son las visualizaciones y modelados de MDT como base para distintas disciplinas, siendo ya utilizados de manera extensiva en disciplinas como la arqueología.

Posteriormente, se ha realizado una propuesta metodológica para el cálculo de caudales de manera sencilla, basándose en aplicaciones oficiales y herramientas proporcionadas por instituciones y grupos de investigación, simplificándose así los cálculos y obteniendo unos caudales que posteriormente según las salidas hidráulicas parecen ser muy próximos a la realidad.

En el último apartado, se ha llevado a cabo el estudio hidráulico del presente estudio con Iber. Comenzando con el tratamiento necesario del MDS según la Guía para la determinación de zonas inundables, para pasar a los resultados y desglose de los resultados de manera más comprensible. Por último, se muestra la correspondencia de los resultados con el estudio geomorfológico y sus conclusiones anteriormente estudiadas así como con inundaciones históricas, intentando mostrar la fiabilidad de los modelos conseguidos mediante el presente flujo de trabajo.

De esta manera, como resultado de todo lo anterior se puede concluir:

1.- El acceso a datos hidrológicos ha resultado muy complicado en tanto son gestionados por la Confederación Hidrográfica del Guadalete-Barbate (CHGB). Haciendo comparativas con las Confederaciones aledañas, la CHGB resulta la menos transparente en cuanto a acceso público, a datos de aforos, precipitaciones, etc.

2.- Gracias al estudio geomorfológico acometido, en tanto ha tenido como base los datos LiDAR del Instituto Geográfico Nacional, se han conseguido identificar los grandes hitos geomorfológicos fluviales del entorno del Guadalete en el tramo de estudio. El uso de técnicas novedosas de visualización de MDTs sumado a la precisión que brindan los datos LiDAR consigue afinar en muchos aspectos la delimitación, aunque el mismo debería ser más completo y a su vez, completado con orotofotografías aéreas históricas, principalmente de las áreas más boscosas, y trabajos de campo. Por si mismo, no resulta suficiente para un nivel de calidad excelente.

3.- Respecto al estudio hidráulico:

3.1.- Se hace necesario un correcto tratamiento de los datos de la primera cobertura del LiDAR del IGN (densidad 0,5 p/m²). Principalmente, se ha de determinar cada uno de los elementos del cauce, y ver hasta qué punto los resultados de los retornos son correctos y cómo están categorizados. Para el caso del presente estudio la situación se vuelve más compleja debido a la topografía del lugar, en muchos puntos llana (llanura de inundación) que, junto con la elevada densidad de vegetación en el cauce y la lámina de agua presente en el río, ha hecho necesario un tratamiento intensivo del MDT en este caso.

Se ha intentado acometer con los medios posibles lo más cercano a lo necesario para la correcta ejecución del análisis hidráulico (por ejemplo, batimetrías o levantamientos del cauce en puntos concretos), hecho que debe ser necesario en todos los trabajos que lo necesiten si se quiere contar con un mínimo de calidad.

Son muchos los trabajos de profesionales del sector que, sin realizar un análisis intensivo del territorio o espacio a modelar, realizan simulaciones hidráulicas donde el cauce modelado es completamente incorrecto. Esto repercute negativamente en los resultados, en tanto el lecho puede obtener una cota más alta de la real o el cauce estar compuesto por formas irregulares derivadas de la interpolación TIN de la nube de puntos, en las que el agua discurre de manera incorrecta arrojando resultados totalmente incorrectos. No han sido pocos los trabajos consultados con este hándicap, donde una incorrecta relación de conceptos ha llevado al técnico o investigador a preocuparse por el modelo.

Algunas de estas incorrectas relaciones de conceptos son, por ejemplo, el hecho de que "el LiDAR atraviesa la vegetación" como si el retorno láser consiguiera atravesar cada una de las hojas que componen el estrato arbóreo. Esto es totalmente incorrecto, y puede provocar una serie de errores a la hora de interpretar los resultados. Un LiDAR con una densidad de puntos muy alta sí puede proveer de una cantidad de retornos suficientes por los cuales la calidad del modelo pueda ser superior, pero dicha cantidad de retornos debería rondar los 2-5 p/m². Esta misma cuestión ocurre en muchos casos con los retornos en el agua, creyéndose que los mismos consiguen tocar el lecho del río.

3.2.- Los resultados de la modelización se corresponden con t=13000s (alrededor de 3,5 horas) elegido como tiempo intermedio en el cual una presa se encuentra expulsando agua

de manera casi ininterrumpida en algunos casos extremos. Esta medida ha sido tomada del estudio de distintas publicaciones y noticias. Se ha elegido dicho momento a raíz de conseguir homogeneizar para cada caudal propuesto en cada periodo de retorno analizado. Los resultados, según las descripciones gráficas aportadas, parecen ser muy cercanos a la realidad vivida por los habitantes de Arcos en momentos concretos de la historia.

3.3.- Del análisis del mallado y del modelado de distintos tamaños de celdilla pueden emanar distintas conclusiones:

3.3.1.- Para $t=50$, las mayores diferencias entre distintos tamaños de malla se concentran en las zonas de cauce con abundante vegetación, y en los tamaños de celdilla de 1 y 5m, en comparativa entre ambos. En ambos puntos de control ubicados sobre zonas con abundante vegetación. Las mayores diferencias se producen entre las mallas de 1 y 5m, como era de esperar.

3.3.2.- Para $t=100$, ya con un caudal mayor y un mayor número de celdillas afectadas, se vuelven a repartir los peores promedios en las áreas de mayor vegetación, siendo como se ha comentado anteriormente, las áreas con un mayor handicap a la hora de modelar por la densidad de puntos de la primera cobertura para la zona de estudio. Resulta llamativo que, sin embargo, el mayor consenso se produce entre los tamaños de celdilla de 1m y 5m, a diferencia del periodo de retorno anterior, explicándose únicamente por la suavidad que la malla de 5 metros adhiere al terreno, que más allá de la zona inundable, consigue parar el agua del modelo a calados similares que el modelo de 1m. Otra zona relativamente conflictiva es la tercera llanura de inundación, la situada más aguas abajo, donde la resolución resulta muy necesaria a raíz de ser una zona llana pero frecuentemente sembrada de distintas especies que pueden llegar a distorsionar las cotas, por retornos dispares entre ellos en Z pero cercanos en X e Y.

3.3.3.- Para $t=500$, se continua en la misma tónica que el caso anterior. Siendo la simulación de mayor caudal, el mayor consenso se da entre los tamaños de malla de 1 a 5m, siendo bastante más elevadas en comparativa que en el resto. Se debería estudiar en profundidad si un mayor suavizado en términos de vecindad en la interpolación de la nube de puntos favorece la precisión en tanto un mayor número de vecinos arroja, aunque sea para un tamaño de celdilla mayor, una cota de mayor precisión que para aquellos modelos que con una resolución de 2 metros, queden en "en tierra de nadie" a la hora de interpolar los retornos.

Por supuesto, se da como mejor precisión demostrada el modelo de 1m para la densidad de puntos de $0,5 \text{ p/m}^2$ en casi todas las áreas. Si la densidad de puntos fuera mayor, posiblemente el modelo de 2m fuese más cercano al de 1m, aunque para las densidades que atañen al presente documento, pareciese que resultan más correctos los modelos de 1 y 5m.

3.3.4.- Existen diferencias notables para el vuelo de la CHGB y el del PNOA LiDAR, aunque las mismas se concentran principalmente en el cauce secundario abandonado y la tercera llanura de inundación. Esta última llanura se presupone mejor caracterizada con el LiDAR de la CHGB, que resulta además coincidente al 100% en esa zona con la cartografía de áreas inundables propuesta por la Junta de Andalucía en la siguiente dirección: <https://cutt.ly/5nz1WJ8>

Para el cauce secundario, habiéndose corroborado que no existen diferencias fruto de la desactualización del vuelo de 2008 respecto al de 2015, las diferencias se deben a una mejor caracterización de las microformas fluviales, lo cual juega en favor de una mayor densidad de puntos, que consigue predisponer un mayor número de retornos en el cauce y zonas con vegetación. Las diferencias entre ambos modelos son notables, entendiéndose más fiable el de la Confederación, gracias a su mayor densidad de puntos, tal como ha sido expuesto en el [correspondiente apartado](#). Sin embargo, también ha debido ser objeto de tratamiento la nube de puntos de la CHGB.

3.3.5.- En términos de extensión de la inundación, dado que las diferencias anteriormente expuestas se centraban en los calados, sí se ha dado una extensión mucho más similar entre las mallas de 1m y 2m, siendo las mayores diferencias entre la malla de 1m y 5m, en algunos casos notables, como en el caso de los Llanos de las Huertas donde unas cuantas hectáreas aparecen como inundables en el modelo de 5m, y, sin embargo, muy posiblemente no lo fuesen en la realidad. Existen también diferencias palpables entre los modelos del PNOA y la CHGB.

3.4.- Existe una gran correspondencia entre los resultados conseguidos en el estudio hidráulico y los del estudio geomorfológico, para $t=500$ que son los eventos que mayores marcas consiguen dejar sobre el territorio. Por ello, se valida el uso del LiDAR y las visualizaciones de MDT como herramienta válida para estudios de geoformas fluviales, siendo solo válida la técnica bajo tamaños de celdillas adecuados y por supuesto, bajo la calidad que ofrece el LiDAR.

3.5.- También existe una gran correspondencia entre las inundaciones históricas y los modelos conseguidos. Para cada caso:

3.5.1.- En el caso de las inundaciones acontecidas durante 1917, identificadas con aquellas con un periodo de retorno aproximado a $T=500$, el modelo generado con el PNOA LiDAR ha conseguido cuadrar en muchos de los puntos con los relatos de la época, adquiriéndose un modelo muy cercano al momento histórico base del análisis.

3.5.2.- En el caso de las inundaciones de 2009, el modelo de la CHGB ha demostrado una certera fiabilidad tanto en los calados como en la extensión de la inundación. Al existir notables diferencias con el modelo del PNOA, se entiende que la densidad de puntos del LiDAR de la CHGB es mejor para acometer los cálculos hidráulicos. Igualmente, para modelar los edificios, ya que un mayor número de retornos se da sobre los tejados de los mismos, por lo que si se quisieran acometer estudios de inundabilidad a nivel urbano, se debe contar con una densidad muy elevada de puntos o prescindir de los edificios en la malla para incluirlos de manera manual a partir de capas vectoriales.

3.6.- La delimitación de zonas inundables ha dejado al descubierto una planificación deficiente por parte de las administraciones con voz sobre el territorio. Una gran cantidad de edificios modelados sobre la malla son afectados por inundaciones con un periodo de retorno tan bajo como de 50 años.

En definitiva, gracias al Instituto Geográfico Nacional, España, cuenta con un adecuado acceso a la información LiDAR y un LiDAR más que adecuado para simulaciones hidráulicas, a nivel de detalle. Sin embargo, los datos no pueden ser utilizados de manera extensiva y sin un

adecuado tratamiento de los mismos, ya que tanto si tienen una baja densidad de puntos como si existen particularidades propias de la tecnología, los modelos deben ser refinados para no falsear los resultados. No pueden ser utilizados los datos de manera simplista, si no puede caerse en resultados que, en casos tan delicados como son las inundaciones, falseen los modelos con los consiguientes daños materiales y humanos que pueden darse.

8. PROPUESTAS DE MEJORA EN EL ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD A PARTIR DEL USO DE GEOTECNOLOGÍAS

1.- Las delimitaciones y caracterizaciones de rugosidades aplicadas a los modelos de inundabilidad pueden ser mucho mejor ajustadas gracias al uso de las geotecnologías, en tanto las mismas ayudan a actualizar y mejorar las cartografías base utilizadas habitualmente. Haciendo uso de la fotogrametría obtenida mediante VANTs (Vehículos Aéreos No Tripulados) se pueden identificar y delimitar con una mayor precisión los usos del suelo del área objeto de estudio. El uso de coberturas del SIOSE o SIPNA (para el caso de Andalucía) puede conllevar la desactualización del modelo, por lo que, si es necesaria una alta precisión, se recomienda incluir en el flujo de trabajo las fotogrametrías obtenidas por VANTs.

2.- En caso de que el VANTs pudiera ser dotado con una cámara multispectral, la rugosidad podría ser mejor definida mediante el uso de índices de vegetación, donde poder discriminarse de manera más certera las diferencias suelo – vegetación o entre la misma vegetación, ya sea baja, intermedia o alta. Una vegetación intermedia en desecación no ofrece una misma rugosidad que una en plena efervescencia, por lo que sobre todo en zonas de calados de baja entidad, puede ser de ayuda ajustar correctamente la rugosidad si se desea una precisión excepcional.

3.- La adición de muros y otros impedimentos al flujo de agua pueden ser igualmente delimitados mediante la fotogrametría de precisión, y a su vez, discriminada su altura mediante la nube de puntos en aquellos lugares del muro o barrera donde existan retornos. Una correcta edición de la nube de puntos podría ayudar a conseguir un modelo de mayor fiabilidad en ese sentido, en caso de tratarse de un LiDAR de "insuficiente" densidad de puntos.

4.- Una correcta caracterización de los cauces tributarios y sus cuencas puede llevarse a cabo a partir del uso de LiDAR. Llevando a cabo un flujo de trabajo para cada cauce tributario en concreto según sus necesidades, se puede determinar con gran exactitud qué cauces verdaderamente consiguen verter al cauce principal de estudio e incluirlos en el modelo, mejorándose así la calidad del análisis de inundabilidad.

5.- En los casos en los que el LiDAR no pueda representar con exactitud un cauce, deben realizarse levantamientos mediante otro método como los escáneres láser terrestre, los cuales sí consiguen solventar el problema de la vegetación y la precisión en la definición del cauce, y en caso de querer incluirse, de los puentes.

9. BIBLIOGRAFÍA

- 1.- CEDEX, 2009. *Mapa de caudales máximos de avenida para la red fluvial de la España peninsular*. Informe Técnico para la Dirección General del Agua del MARM. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.
- 2.- IGME, 2008. *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie: Riesgos Geológicos/ Geotecnia, nº 1. Ministerio de Ciencia e Innovación.
- 3.- CEDEX, IGME, INDUROT, UTE KV, 2011. *Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables*. Publicación. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- 4.- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL, LIDAR 1ª Cobertura 2008-2015, Centro de Descarga. Recuperado en <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=CAANE>
- 5.- Felicísimo, A. M. 1999. "Modelos Digitales del Terreno". [En línea]. Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente. Universidad de Vigo. Dirección: <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/index2.html> consultado por última vez el 31/05/2021.
- 6.- Molina J, et al. 2014. "Geomatic methods at the service of water resources modelling". *Journal of Hydrology*. 509 150-162.
- 7.- Zazo S, et al. 2019. "Flood Analysis Supported by Low-cost Geometric Modelling". *Journal of Hydrology*. 524 522-537.
- 8.- Espejo Almodóvar, F. 2017. "Caracterización del funcionamiento y control hidráulico frente a la rotura de balsas de riego, mediante un marco de trabajo estocástico". Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca.
- 9.- Elmqvist, M., et al. 2001. "Terrain modelling and analysis using laser scanner data". *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* vol. XXXIV (3/W4, Annapolis): pg.219-226.
- 10.- H. Kaneda, T. Chiba, 2019. "Stereopaired Morphometric Protection Index Red Relief Image Maps (Stereo MPI-RRIMs): Effective Visualization of High-Resolution Digital Elevation Models for Interpreting and Mapping Small Tectonic Geomorphic Features", 99-109. *Bulletin of the Seismological Society of America* 109.
- 11.- Z. Kokalj, K. Oštir, K. Zakšek. 2016. "Visualization of lidar derived relief models", en R.S Opitz y D. C. Cowley (eds.), *Interpreting Archaeological Topography: Airborne laser scanning, 3D data and ground observation*, 100-114. Oxbow Books.
- 12.- Z. Kokalj, K. Zakšek, K. Oštir, P. Pehani, K. Čotar,. 2016. "Relief Visualization Tollbox, ver. 1.3 Manual".

13.- Rondán Sevilla, I. 2020. "El asentamiento de Puente Melchor (Puerto Real, Cádiz): Integración de fotogrametría y teledetección aérea y sus visualizaciones con resultados arqueológicos en un yacimiento de carácter litoral", *Riparia*, Vol. 6: 30-73. Universidad de Cádiz, Cádiz.

14.- Lázaro Agustín, Lázaro J.García, 2017. *La gran riada*. Publicación. Entorno a Jerez.