

**Trabajo Fin de Máster**

**ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD DE  
INUNDACIÓN DE SA POBLA POR  
DESBORDAMIENTO DE LOS TORRENTES DE  
SAN MIGUEL Y BÚGER, MALLORCA (ISLAS  
BALEARES)**

**Intensificación: ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE  
CUENCAS**

**Autor:**  
**BYRON RODRIGO CHACHA CABRERA**

**Tutor:**  
**DR. FRANCISCO JOSÉ VALLÉS MORÁN**

**Cotutor:**  
**ING. BEATRIZ NÁCHER RODRÍGUEZ**

**FEBRERO, 2019**



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Análisis de la peligrosidad de inundación de Sa Pobra por desbordamiento de los torrentes de San Miguel y Búger, Mallorca (Islas Baleares)

**Título del TFM en inglés:** Analysis of the danger of flooding of Sa Pobra due to the overflow of the torrents of San Miguel and Búger, Mallorca (Balearic Islands)

**Título del TFM en Valenciano:** Anàlisi de la perillositat d'inundació de Sa Pobra per desbordament dels torrents de Sant Miquel i Búger, Mallorca (Illes Balears)

**Alumno:** BYRON RODRIGO CHACHA CABRERA

**Tutor:** DR. FRANCISCO JOSÉ VALLÉS MORÁN

**Cotutor:** ING. BEATRIZ NÁCHER RODRÍGUEZ

**Fecha de Lectura:** FEBRERO, 2019

## Resumen

### Español

El presente estudio se centra en el análisis de la peligrosidad de inundación debido al desbordamiento de los torrentes Sant Miquel y Búger en el entorno del municipio de Sa Pobra, que se localiza en las islas Baleares, Mallorca-España. Este estudio se lleva a cabo mediante modelación matemática bidimensional con ayuda del programa HEC-RAS en su versión 5.0.5., desarrollado por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos (USACE).

Para ello se contó con el apoyo de la Universidad de las Islas Baleares y del Departamento de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia en lo que se refiere a la obtención de datos hidráulicos, hidrológicos y usos del suelo de la cuenca vertiente. Para la construcción y calibración del modelo hidráulico se emplearon datos históricos de eventos de inundación ocurridos en Sa Pobra, particularmente el evento del 8 de octubre de 1990, registrado y analizado mediante estudios geomorfológicos. El modelo obtenido muestra un acuerdo más que satisfactorio con la realidad observada en el evento de referencia, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo. A nivel cualitativo, el flujo desbordado desde el cauce del Torrente de Búger incide en la población y produce una

inundación coherente con la descrita en los documentos históricos. Mientras que, a nivel cuantitativo, se obtiene un caudal punta de avenida al paso por la sección de control en el Torrente de Sant Miquel prácticamente coincidente con el estimado en estudios previos, con valores de velocidad y un nivel de lámina libre consistentes.

Para la representación de los mapas de peligrosidad de inundación, se tuvo en cuenta los criterios de la Demarcación Hidrológica Balear que considera una probabilidad de ocurrencia de fenómenos de inundación de 10, 100 y 500 años de periodo de retorno y los 6 niveles de peligrosidad del PATRICOVA, en el que la misma se define a partir de un umbral de calado y de su probabilidad de ocurrencia, proponiendo coherentemente, unos niveles de peligrosidad ad-hoc y de mayor detalle, adaptados a la normativa de las Islas Baleares. De esta manera, se ha llegado a determinar la peligrosidad de inundación a una escala más detallada que la existente en la actualidad, para la localidad de Sa Pobla por el desbordamiento de los torrentes de Sant Miquel y Búger, que únicamente se recogía a una mayor escala en el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, y que ni siquiera se recoge en el Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de la Demarcación Hidrográfica de las Islas Baleares.

### **Valenciano**

El present estudi se centra en l'anàlisi de la perillositat d'inundació a causa del desbordament dels torrents Sant Miquel i Búger a l'entorn del municipi de Sa Pobla, que es localitza a les illes Balears, Mallorca-Espanya. Aquest estudi es duu a terme mitjançant modelatge matemàtic bidimensional amb ajuda del programa HEC-RAS en la seua versió 5.0.5., desenvolupat pel cos d'enginyers dels Estats Units (USACE).

Per a això es va comptar amb el suport de la Universitat de les Illes Balears i del Departament d'Hidràulica i Medi Ambient de la Universitat Politècnica de València pel que fa a l'obtenció de dades hidràuliques, hidrològics i usos del sòl de la conca vessant. Per a la construcció i calibratge del model hidràulic es van emprar dades històriques d'esdeveniments d'inundació ocorreguts a Sa Pobla, particularment l'esdeveniment del 8 d'octubre de 1990, registrat i analitzat mitjançant estudis geomorfològics. El model obtingut

mostra un acord més que satisfactori amb la realitat observada en l'esdeveniment de referència, tant a nivell qualitatiu com quantitatiu. A nivell qualitatiu, el flux desbordat des del llit del Torrent de Búger incideix en la població i produeix una inundació coherent amb la descrita en els documents històrics. Mentre que, a nivell quantitatiu, s'obté un cabal punta d'avinguda al pas per la secció de control en el Torrent de Sant Miquel pràcticament coincident amb l'estimat en estudis previs, amb valors de velocitat i un nivell de làmina lliure consistents.

Per a la representació dels mapes de perillositat d'inundació, es va tindre en compte els criteris de la Demarcació Hidrològica Balear que considera una probabilitat d'ocurrència de fenòmens d'inundació de 10, 100 i 500 anys de període de retorn i els 6 nivells de perillositat del PATRICOVA, en el qual la mateixa es defineix a partir d'un llinar de calat i de la seua probabilitat d'ocurrència, proposant coherentment, uns nivells de perillositat ad hoc i de major detall, adaptats a la normativa de les Illes Balears. D'aquesta manera, s'ha arribat a determinar la perillositat d'inundació a una escala més detallada que l'existent en l'actualitat, per a la localitat de Sa Pobla pel desbordament dels torrents de Sant Miquel i Búger, que únicament es recollia a una major escala en el Sistema Nacional de Cartografia de Zones Inundables, i que ni tan sols es recull en el Pla de Gestió del Risc d'Inundació de la Demarcació Hidrogràfica de les Illes Balears.

### **Inglés**

The present study focuses on the analysis of the flood hazard due to the overflow of the Sant Miquel and Búger torrents in the surroundings of the municipality of Sa Pobla, which is located in the Balearic Islands, Mallorca-Spain. This study is carried out using two-dimensional mathematical modeling with the help of the HEC-RAS program in its 5.0.5 version, developed by the United States Army Corps of Engineers (USACE).

This was supported by the University of the Balearic Islands and the Department of Hydraulics and Environment of the Polytechnic University of Valencia in terms of obtaining hydraulic and hydrological data and soil use of the watershed. For the construction and calibration of the hydraulic model, historical data of flood events occurred in Sa Pobla were

used, particularly the event of October 8, 1990, recorded and analyzed through geomorphological studies. The model obtained shows a more than satisfactory agreement with the reality observed in the reference event, both qualitatively and quantitatively. At a qualitative level, the flow overflowed from the stream of the Búger torrent affects the population and produces a flood consistent with the one described in the historical documents. While, at the quantitative level, a peak flow of average is obtained by passing through the control section in the Sant Miquel torrent, practically coinciding with the estimate in previous studies, with velocity values and a consistent free water surface.

For the representation of the flood hazard maps, the criteria of the Balear Hydrological Demarcation were taken into account, which considers a probability of occurrence of flood phenomena of 10, 100 and 500 years of return period and the 6 levels of danger of the PATRICOVA, in which it is defined from a depth threshold and its probability of occurrence, proposing coherently, levels of dangerousness ad-hoc and of greater detail, adapted to the regulations of the Balearic Islands. In this way, it has been possible to determine the flood hazard on a more detailed scale than the one currently existing for the town of Sa Pobla due to the overflow of the Sant Miquel and Búger torrents, which were only collected on a larger scale in the National Cartographic System of Flood-Prone Areas and that is not even included in the Flood Risk Management Plan of the Hydrographic District of the Balearic Islands.

**Palabras clave español:** Inundación, torrente, calibración, modelo hidráulico.

**Palabras clave valenciano:** Inundació, torrent, calibratge, model hidràulic.

**Palabras clave inglés:** Flood, torrent, calibration, hydraulic model.

## INDICE GENERAL

1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	2
2.1    Objetivo General.....	2
2.2    Objetivos Específicos .....	2
3. Marco Conceptual.....	3
3.1    Fenómeno de inundación.....	3
3.1.1    Tipos de Inundación .....	3
3.1.2    La inundación de origen fluvial .....	4
3.1.3    Efectos de la inundación .....	4
3.1.4    Métodos para análisis de peligrosidad .....	5
3.2    Eventos Torrenciales en Cuencas Hidrográficas.....	7
3.2.1    Descripción.....	7
3.2.2    Características de cauces torrenciales.....	7
3.2.3    Medidas de protección.....	8
3.3    Modelación matemática.....	9
3.3.1    Modelos matemáticos en la hidráulica fluvial .....	10
3.3.2    Modelación hidráulica bidimensional .....	11
3.3.3    Modelación Hidráulica con HEC-RAS .....	15
4. Caso de estudio.....	18
4.1    Cuenca de los torrentes de Sant Miguel y Búger .....	18
4.1.1    Localización .....	18
4.1.2    Relieve y Geología .....	19
4.1.3    Clima.....	21
4.1.4    Hidrología .....	21

4.1.5	Flora y Fauna .....	24
4.1.6	Uso del suelo .....	24
4.2	Municipio de Sa Pobla .....	25
4.2.1	Medio Geográfico.....	25
4.2.2	Demografía .....	26
4.2.3	Socioeconomía .....	27
4.2.4	Inundaciones históricas.....	28
5.	Modelación bidimensional del torrente San Miguel y Búger .....	30
5.1	Modelación Digital del Terreno .....	30
5.2	Geometría del modelo bidimensional.....	31
5.3	Condiciones de contorno.....	32
5.4	Estructuras consideradas en la modelación hidráulica .....	34
5.4.1	Obras de drenaje transversal .....	34
5.4.2	Líneas de rotura del flujo .....	36
5.4.3	Sección de control .....	36
5.5	Parámetros del modelo .....	37
5.5.1	Rugosidad de Manning.....	37
5.5.2	Condición de Courant y método de resolución .....	38
5.6	Calibración del modelo matemático .....	39
6.	Análisis de la peligrosidad de inundación.....	49
6.1	Criterios para determinar la peligrosidad de inundación en las Islas Baleares. ....	49
6.2	Hidrogramas de avenida para T = 10, 100 y 500 años .....	49
7.	Resultados y Discusión.....	53
8.	Conclusiones .....	58
9.	Bibliografía .....	60

## ANEXO

### MAPAS DE PELIGROSIDAD DE INUNDACIÓN DE SA POBLA POR DESBORDAMIENTO DE LOS TORRENTES SANT MIQUEL Y BÚGER.

1. Peligrosidad de inundación para el municipio de Sa Pobra.
2. Mapa de inundación de Sa Pobra para periodo de retorno  $T=10$  años.
3. Mapa de inundación de Sa Pobra para periodo de retorno  $T=100$  años.
4. Mapa de inundación de Sa Pobra para periodo de retorno  $T=500$  años.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Zona de estudio para análisis de peligrosidad de inundación, Sa Pobla-Mallorca-España.....	1
Figura 2: Morfología de un torrente en su cuenca vertiente.....	8
Figura 3: Diagrama de las componentes de una partícula de flujo.....	13
Figura 4: Localización de la cuenca de Sant Miquel, Mallorca. Red de monitorización y drenaje de la cuenca. ....	19
Figura 5: Geología de la Isla Mallorca.....	20
Figura 6: (a) Torrente Sant Miquel y Búger, (b) Surgencias de Ses Fonts Ufanes, Sierra de Tramuntana. ....	22
Figura 7: Presas de laminación y contención en tributarios de la cuenca de Sant Miquel. ....	23
Figura 8: Usos del suelo, estaciones de aforo y presas de laminación en la cuenca de Sant Miquel.....	25
Figura 9: Delimitación del municipio de Sa Pobla.....	26
Figura 10: Demografía de Sa Pobla, año 1996 hasta 2018.....	27
Figura 11: Modelo Digital de Terreno de 2x2 metros de píxel y estaciones de aforo dentro de la zona de estudio. ....	30
Figura 12: MDT (píxel 2x2 metros), sobre el mapa web de Google Satélite. ....	31
Figura 13: Construcción de la geométrica para el modelo. a) geometría inicial, b) geometría optimizada. ....	32
Figura 14: Tipología y dimensiones del puente existente. ....	35
Figura 15: Culvert empleado para simular el puente existente.....	35
Figura 16: Línea de rotura en la autovía Ma-13, Sa Pobla-Alcúdia.....	36
Figura 17: Sección de control ubicada en la modelación hidráulica.....	37
Figura 18: Rango de tiempo de cálculo basado en la condición de Courant. ....	39
Figura 19: Puntos de estudio para la obtención de caudales punta de la precipitación de octubre de 1990.....	40
Figura 20: Distribución horaria de las precipitaciones del 8 de octubre de 1990 en puerto de Pollença.....	41

Figura 21: Esquema de caudales punta analizados en la vertiente de Sant Miquel mediante métodos geomorfológicos. ....	41
Figura 22: Ficha de levantamiento de información para analizar caudales punta del evento del 8 de octubre de 1990, mediante métodos geomorfológicos.....	42
Figura 23: Análisis del tamaño de malla con relación al caudal observado en la inundación del 8 de octubre de 1990.....	45
Figura 24: Malla híbrida empleada para la simulación hidráulica bidimensional, dimensiones 20x20, 10x10 y 5x5 metros. ....	46
Figura 25: Velocidad media de la sección de control simulada del evento 8 de octubre de 1990. ....	47
Figura 26: Calado de agua de la sección de control simulada del evento 8 de octubre de 1990. ....	47
Figura 27: Secuencia de desbordamiento del torrente Búger simulado del evento 8 de octubre de 1990. ....	48
Figura 28: Altura del nivel de agua (calado) simulada para periodo de retorno de 10 años. ...	53
Figura 29: Altura del nivel de agua (calado) simulada para periodo de retorno de 100 años. .	54
Figura 30: Altura del nivel de agua (calado) simulada para periodo de retorno de 500 años. .	54
Figura 31: Velocidad de agua simulada para periodos de retorno de 10 años.....	55
Figura 32: Velocidad de agua simulada para periodos de retorno de 100 años. ....	55
Figura 33: Velocidad de agua simulada para periodos de retorno de 500 años. ....	56

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Precipitaciones registradas con duración de 24 horas.....	28
Tabla 2: Condición para la calibración del modelo aguas abajo, pendiente de los tramos del terreno cerca de las Estacones de Aforo. ....	33
Tabla 3: Condiciones para la calibración del modelo aguas arriba, hidrogramas de avenida de los torrentes Sant Miquel y Búger del 8 de octubre de 1990. ....	34
Tabla 4: Valores de rugosidad para la cuenca de estudio.....	38
Tabla 5: Resultados del cálculo para hidrogramas con periodo de retorno 10, 100 y 500 años. ....	51
Tabla 6: Hidrogramas para los torrentes de Sant Miquel y Búger con periodos de retorno establecido por la Demarcación Hidrográfica Balear.....	52
Tabla 7: Clasificación en base a criterios de la Demarcación Hidrológica Balear y PATRICOVA. para determinar la peligrosidad de inundación.....	57

## 1. INTRODUCCIÓN

España, un país donde el régimen pluviométrico es muy variable, ya que se puede encontrar desde estados de sequía hasta fuertes precipitaciones, mismas que en pocas horas alcanzan valores superiores a los promedios. Estos procesos naturales que responden a procesos físicos e hidrológicos dan como resultado elevados caudales, que al incrementarse en zonas pobladas provocan un problema territorial de inundación, considerado en el país, como el fenómeno natural con mayor impacto económico y social. (Ministerio del Interior, Gobierno de España, 2013)

Con estos antecedentes, se considera el estudio y análisis de la peligrosidad de inundación de la localidad de Sa Pobla mediante modelación matemática, debido al desbordamiento de los torrentes Sant Miquel y Búger, situados dentro de la cuenca de Sant Miquel, en la isla de Mallorca, España (Figura 1). Para ello, se cuenta con información detallada de la topografía de la cuenca y de los torrentes, datos de caudales tomados de las estaciones de aforo de estos principales cursos fluviales, uso del suelo y eventos históricos de inundación que se han registrado.



Figura 1: Zona de estudio para análisis de peligrosidad de inundación, Sa Pobla-Mallorca-España.

En el “Plan de gestión del riesgo de inundación de la Demarcación Hidrográfica de las Islas Baleares” (Govern de les Illes Balears, 2016), los torrentes de Búger, Sant Miquel y sus llanuras de inundación no están estudiados como “Áreas de Riesgo Potencial Significativo en la isla de Mallorca”. Sin embargo, en los planos del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) (MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA, s.f.), se observa como la zona de inundación para  $T = 500$  años está muy próxima a la localidad de Sa Pobla. Además, existen evidencias históricas de inundaciones pasadas que han afectado seriamente a la población. Motivo por el cual es importante analizar la peligrosidad de inundación a una escala más detallada para determinar la peligrosidad de este municipio por el desbordamiento de los torrentes Sant Miquel y Búger.

La modelación matemática se realiza mediante el programa HEC-RAS, en su versión 5.0.5 (junio, 2018), que utiliza modelación numérica bidimensional para estos fenómenos de inundación. El modelo es abastecido con información actual de la cuenca, datos de eventos históricos de inundación, usos de suelo, con la finalidad de simular adecuadamente la dinámica fluvial que se origina dentro de la zona de estudio.

El análisis de inundación nos permite gestionar de una mejor manera el desarrollo urbano de la cuenca hidrográfica, además aplicar medidas que permitan contrarrestar la peligrosidad y vulnerabilidad de daños futuros ocasionados por fenómenos naturales de carácter torrencial.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Analizar la peligrosidad de inundación del municipio de Sa Pobla por desbordamiento de los torrentes Sant Miquel y Búger.

### 2.2 Objetivos Específicos

Comprender la dinámica fluvial mediante el uso y aplicación de la modelación matemática en cauces torrenciales destacando de esta manera las ventajas de la modelación bidimensional mediante HEC-RAS en su versión 5.0.5.

Abordar la calibración de un modelo hidráulico a partir de información de eventos históricos de inundación, comparando niveles de agua, velocidades y calados en las zonas afectadas.

Establecer un criterio de peligrosidad de inundación coherente con la normativa de las Islas Baleares, a partir de umbrales de variables hidráulicas para diferentes probabilidades de ocurrencia o periodos de retorno.

### 3. MARCO CONCEPTUAL

#### 3.1 Fenómeno de inundación

La nueva Directiva Europea de Inundaciones (2007/60/EC) define a la inundación como el “anegamiento temporal de terrenos que no están normalmente cubiertos por el agua” (artículo 2.1). De esta manera se puede evidenciar que desde el punto de vista que se analice, una inundación puede considerarse como una sumersión temporal de terrenos que a escala humana pasan más tiempo emergidas que sumergidas bajo el agua (Díez Herrero, et al., 2009).

##### 3.1.1 Tipos de Inundación

Las inundaciones como se conoce tienen relación con las características propias de la cuenca hidrológica, su magnitud resulta una consecuencia de la superficie y el tipo de cuenca de drenaje; es por ello, que se considera diferentes tipos de inundaciones, las cuales se puede clasificar de acuerdo con el tipo y origen en que se efectúan.

De esta manera se toma en cuenta diversos criterios como son: El lugar geográfico donde se producen (terrestres, litorales o costeras), la causa que la genera (naturales y antrópicas), el tipo de agua que la produce (dulce o salada), origen y tipología de las precipitaciones (frontales, convectivas y orográficas), según la época o estación del año que se producen (estivales, otoñales, invernales y primaverales) y según su relación con la red de drenaje: riadas (asociadas a ríos, arroyos y torrentes), arreicos (sin vinculación con redes fluviales), fluviales (asociadas a ríos), torrenciales (producidas en ramblas o rieras) (Díez Herrero, et al., 2009).

### 3.1.2 La inundación de origen fluvial

Existen diversas formas de conceptualizar una inundación fluvial. En este trabajo, se considera como el agotamiento de la capacidad hidráulica de un río, debido al incremento de caudal ya sea por eventos extraordinarios de precipitación o rotura de estructuras hidráulicas, lo que ocasiona una anegación de terrenos aledaños al lecho.

Existen diferentes causas directas o indirectas que actúan como desencadenantes e intensifican los fenómenos de inundación, entre los más destacados tenemos los parámetros topográficos, pendiente de la cuenca hidrográfica y de las corrientes fluviales, tamaño y forma de la cuenca, tipo de suelo, la geometría y su cubierta vegetal del terreno.

Considerando una igualdad en condiciones de otro factor como es la precipitación, se tienen mayores inundaciones en cuencas de tipo: pequeñas y de montaña, altas pendientes, forma redondeada, deforestadas (poca vegetación), suelos impermeables y de poca profundidad además de urbanizados; que ocasiona el aumento de los caudales superficiales circundantes (Díez Herrero, et al., 2008).

### 3.1.3 Efectos de la inundación

Los acontecimientos de inundación han ocurrido durante muchos años en diversas zonas sobre la superficie terrestre, conociendo de antemano que existen consecuencias de ello tanto positivas como negativas. Si bien es cierto las inundaciones tienen diferentes maneras de originarse como se mencionó anteriormente, es por ello, que hoy en día debemos conocer el alcance que tiene el fenómeno dentro del medio natural y antrópico.

Los efectos positivos para este fenómeno suelen evidenciarse principalmente en lugares donde no haya intervenido el hombre, ya que la misma naturaleza del cauce encuentra zonas o valles que sirven como llanuras de inundación, que son áreas de la cuenca donde las pendientes del cauce hacen posible este fenómeno. Las inundaciones ayudan manteniendo ecosistemas equilibrados de flora y fauna de la cuenca mediante la conectividad del lecho y riberas, en esta interacción se puede transportar nutrientes hacia las llanuras que enriquece estos sectores volviéndolos más fértiles, además, recargan acuíferos periódicamente con la ocurrencia de este fenómeno y sin duda cuando se produce un incremento repentino del

cauce en sus condiciones hídricas, disminuye la fuerza erosiva y velocidad del río hacia aguas abajo (Rodríguez, 2012).

Por su parte, los efectos e impactos negativos de las inundaciones ocurren en zonas donde existe actuaciones del hombre sobre los cursos fluviales o en llanuras de inundación. Las afecciones más destacadas se pueden dar de acuerdo a la profundidad alcanzada y velocidad del flujo, fuerza y energía de la corriente, carga transportada en suspensión, reactivación de zonas geológicas, entre otros; que conllevan a diversas consecuencias como son: el aumento de la humedad del suelo que disminuye su capacidad portante afectando la estabilidad de edificaciones, pérdida de determinados cultivos/vegetación por quedar sumergidas y sin oxígeno, daños en las vías de comunicación, tendidos eléctricos, viaductos, etc., además de la integridad física de las personas (Díez Herrero, et al., 2008).

De esta manera, podemos considerar que la ocurrencia de estos efectos es sin duda consecuencia de la gestión de la cuenca, para ello se debe considerar aspectos como el uso del suelo y sus cambios, la construcción de estructuras hidráulicas en el cauce y, por último, la distribución o asentamientos de la población en espacios adecuados.

#### 3.1.4 Métodos para análisis de peligrosidad

Es importante conocer la peligrosidad, que hace referencia a la probabilidad de ocurrencia en el tiempo de ciertos fenómenos, con el fin de establecer directrices para el desarrollo y con ello evitar daños futuros por eventos repentinos debido a la dinámica fluvial de las cuencas hidrográficas.

Dentro de la Unión Europea y por lo tanto en España, como indica la Directiva Europea de Inundaciones (2007/60/EC) y su transposición a la normativa española mediante el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, se procede mediante una serie de técnicas y procedimientos para el análisis de la peligrosidad de inundación en determinadas zonas de interés (Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs)). Esta metodología puede tener tres aproximaciones, considerando métodos históricos y paleohidrológicos, métodos geológicos y geomorfológicos y los métodos hidrológicos e hidráulicos (Díez Herrero A. , 2002).

Los **métodos históricos y paleohidrológicos**, utilizan datos de eventos de inundación efectuados en el pasado, los históricos emplean marcas en elementos (casas, edificios, vías), documentos históricos y testimonios de inundaciones; mientras que los paleohidrológicos, si no existen datos históricos, recurren a técnicas paleontológicas, dendrocronológicas, radiométricas y arqueológicas, para de esta manera conseguir información relevante para poder reconstruir las extensiones a las que llegó la inundación, alturas del nivel de agua y mediante modelación hidráulica, llevar esto a valores de caudal y poder asignarles probabilidades de ocurrencia.

**Métodos geológicos y geomorfológicos**, estos por su parte analizan tanto los depósitos de material realizados en la cuenca, su disposición y tipología de las formas del terreno tras procesos de avenidas, lo cual nos ayudan a delimitar las zonas que han sido anegadas por las inundaciones y su frecuencia en el marco de la dinámica fluvial, además a estimar valores característicos del flujo como es la velocidad de la corriente hídrica, el calado y la carga de sólidos.

Los **métodos hidrológicos e hidráulicos** emplean la estimación de caudales generados en una cuenca hidrográfica y con ello calculan las velocidades y calados con los que circulará el flujo por el cauce en determinados tramos fluviales. Los métodos hidrológicos obtienen datos de caudales, mediante el análisis estadístico de los caudales máximos o a partir de datos de precipitación con ayuda de modelos hidrometeorológicos de lluvia-escorrentía; mientras que, los modelos hidráulicos simulan el paso de esos caudales por el cauce y las llanuras de inundación.

Los métodos hidráulicos parten de varias hipótesis, simplificaciones y aproximaciones al flujo de agua en el medio natural (unifásico-bifásico, unidimensional, bidimensional, tridimensional, uniforme o variado, lento-rápido, etc.), que ayudan a simplificar las ecuaciones en la modelización hidráulica, mediante esta resolución se nos permite simplificar los cálculos de la energía, velocidad y calados de un curso fluvial (Díez Herrero, et al., 2008).

Los métodos citados anteriormente analizan y emplean diferentes metodologías para obtener datos y características hidráulicas de los eventos de inundación, pudiendo ser empleados y

aplicados de forma integrada para analizar la peligrosidad de inundación, siempre y cuando sea posible con relación a la información disponible.

## 3.2 Eventos Torrenciales en Cuencas Hidrográficas

### 3.2.1 Descripción

Los eventos torrenciales dentro de las cuencas hidrográficas vertientes, constituyen un factor importante de análisis y gestión debido a que nos permite, por un lado, conocer los ciclos del agua y sedimentos, que adquieren una importante relevancia cuando se produce el fenómeno del geo-dinamismo torrencial, originado por los eventos de precipitaciones torrenciales, desprendimientos de aludes o fusiones de nieve. Y, por otro lado, la importancia de la cuenca, ya que existen zonas pobladas que requieren recursos naturales para su desarrollo, siendo los más importantes el agua y suelo, los cuales deben ser aprovechados eficazmente atendiendo a su comportamiento físico y estableciendo la ordenación dentro de la cuenca.

El comportamiento de una cuenca, ante eventos torrenciales no solo implica alteraciones en el ciclo hidrológico, sino que, al tratarse de importantes volúmenes de agua que se ponen en movimiento en poco tiempo, activan en la cuenca el fenómeno del geo-dinamismo torrencial que se manifiesta en procesos de erosión del suelo, incrementando la descarga de sólidos en los cauces fluviales. Por lo tanto, se debe efectuar medidas para evitar estos procesos que lleven al deterioro paulatino de la cuenca (UNESCO, 2008).

### 3.2.2 Características de cauces torrenciales.

Un río de fuerte carácter torrencial y un torrente, sobre todo en este segundo caso, pueden experimentar avenidas en las cuales el flujo se presenta como frente de onda, transportando una mezcla de caudal líquido y sólidos muy destructiva, estos eventos hidráulicos son diferentes a los ríos de naturaleza no torrencial.

A pesar de que se denominan torrentes Sant Miquel y Búger, desde el punto de vista geomorfológico son cauces de carácter torrencial, que indican una respuesta hidrológica rápida, presentan pendientes elevadas, pero no llegan a tener una morfología de típica de un torrente.

Generalmente un torrente se diferencia del resto de cauces, por características generales como: su morfología, hidrología y régimen hidráulico. Morfológicamente, el torrente presenta tres partes importantes que lo identifican, que son: la **cuenca receptora**, que tiene varios afluentes donde domina la erosión, la **garganta** que funciona como cauce de desagüe donde predomina el transporte de material sólido y el **lecho de deyección** o abanico aluvial donde se produce sedimentación del material transportado de la cuenca Figura 2.

Hidrológicamente, lo diferenciamos del río debido a la ausencia de caudal circulante durante la mayor parte del año, y al incremento o aparición en cortos periodos de tiempo de los caudales, que son representados en las curvas del hidrograma. Por último, hidráulicamente debido a la gran pendiente que presentan en las zonas donde nacen estos torrentes y tienen flujos muy rápidos con una mayor potencia erosiva (Martín Vide, 2006).



Figura 2: Morfología de un torrente en su cuenca vertiente (López Sardá, 2018).

### 3.2.3 Medidas de protección

Con la idea de evitar daños principalmente en las zonas bajas de la cuenca por eventos torrenciales, es necesario realizar ciertas correcciones para proteger generalmente las zonas pobladas que se encuentran dentro del área de influencia de la dinámica torrencial. Se conoce

que los problemas se originan por el aumento de caudales, fuerza erosiva y consecuente a esto el arrastre de sólidos, por lo tanto, controlar el fenómeno torrencial en las cuencas significa controlar la escorrentía superficial.

Para ello, existen diferentes técnicas que pueden ser aplicadas en la morfología de la cuenca que ayudan a la protección y corrección de los efectos debido a fenómenos torrenciales.

En la cuenca receptora, se puede aplicar acciones biológicas (cobertura vegetal, reforestación), prácticas mecánicas (terrazas y drenajes) y pequeñas obras transversales (albarradas, palizadas y fajinas), cuyo propósito de estas acciones es: controlar la erosión laminar y remontante, mejorar la infiltración, controlar las escorrentías directas, humedad del suelo, movimientos en masa y producción de cárcavas.

Por su parte en la garganta de la cuenca, se puede aplicar para el área de erosión, obras transversales como son los diques de consolidación y retenida, ya sea parcial o total; para el área de sedimentación obras longitudinales como son: cubiertas vegetales, revestimientos, espigones, muros de defensa, soleras y perfiles escalonados, todo ello con el propósito de realizar la consolidación de laderas marginales, retención de sedimentos, defensa de instalaciones hidroeléctricas, control de la erosión del lecho y mejorar la concentración del agua en cauce fijo y estable (López Sardá, 2018).

Mediante la buena gestión y aplicación de estas técnicas es posible evitar que se generen procesos torrenciales que afecten a diferentes partes importantes de carácter civil, ambiental, estructural que se tenga en una cuenca hidrológica.

### 3.3 Modelación matemática

En el medio natural los fenómenos hidráulicos resultan muy complejos a la hora de analizarlos y describirlos. Para ello se cuenta con los modelos matemáticos que son un instrumento que nos permite conocer y comprender el comportamiento del agua y su interacción en el medio natural (Rocha Felices, 2003).

La modelación matemática es el conjunto de varias hipótesis y la relación entre variables que nos permite analizar la dinámica fluvial, dando como resultado diferentes ecuaciones

diferenciales que describen al fenómeno físico ya sea natural o antrópico. Resulta conveniente utilizar técnicas apropiadas para su resolución debido a que normalmente no existe una solución analítica, siendo necesario utilizar métodos de resolución numérica mediante procesos de computación, como son los métodos de elementos finitos, diferencias finitas y volúmenes finitos, aplicados a una malla de cálculo que representa la geometría del terreno.

En general, la modelación matemática implementada en la hidráulica fluvial nos ayuda a conocer el comportamiento del flujo para luego facilitar la predicción de problemas asociados a ello y establecer medidas preventivas y correctivas dentro de las cuencas y sus cursos fluviales. La precisión para la modelación está íntimamente ligada al costo de explotación computacional, por lo que deben tomarse en cuenta diferentes factores como: la fuente y validez de los datos iniciales, el tipo de fenómeno a estudiar y por último la exactitud de las ecuaciones que desarrolla un modelo matemático.

### 3.3.1 Modelos matemáticos en la hidráulica fluvial

De acuerdo con el fenómeno a estudiar se pueden tener diversos modelos matemáticos para su aplicación. En la hidráulica fluvial estos están relacionados al número de dimensiones, tipo de régimen y tipos de contorno.

Los modelos según su dimensionalidad pueden ser: Unidimensionales (1D), que asumen únicamente la dimensión longitudinal a lo largo del tramo de estudio, el mismo que prevalece sobre las demás dimensiones. La información para estos modelos tanto hidráulica como topográfica se ingresa mediante secciones transversales, por lo que asumen el flujo perpendicular en cada sección significando en la mayoría de las veces su limitación para otros fenómenos hidráulicos, generalmente son aplicables a tramos de río bien definidos y canales muy largos.

Por otro lado, los modelos bidimensionales (2D), consideran la variación del flujo en las dimensiones  $x$  e  $y$  en el plano horizontal. Para estos modelos la información hidráulica se introduce mediante condiciones de contorno como caudales constantes o hidrogramas de avenida y para la topográfica se utiliza modelos de elevación digital del terreno. Estos modelos promedian las condiciones del flujo en la vertical en cada área discretizada y las asume como

valores únicos para cada celda de análisis, siendo usados comúnmente donde el flujo llega a desbordarse del cauce o se vuelve muy extenso en una dimensión con respecto a la dirección del flujo.

Los modelos tridimensionales (3D), analizan la variación del flujo en sus tres dimensiones “x”, “y” y “z” Son modelos que trabajan a detalle y ejercen un alto coste computacional, normalmente no son utilizados para estudios de cauces por su alto coste computacional. Por otro lado, para estudiar fenómenos puntuales como afección en pilas de puentes o erosión en estructuras hidráulicas resultan adecuados.

Los modelos de tipo de régimen pueden ser estacionarios, donde nos interesa conocer el comportamiento del flujo para caudales pico con periodos de retorno establecidos en el estudio, y de régimen transitorio que se utiliza cuando nos interesa conocer el comportamiento y respuesta del cauce frente a un hidrograma de avenida.

Por su parte, en lo que respecta a modelos del tipo de contorno, se conoce los de lecho fijo y lecho móvil, utilizados generalmente de acuerdo con la naturaleza del cauce en estudio y para el análisis de transporte de sedimentos y variación de las formas del lecho en cauces (Nácher Rodríguez & Vallés Morán, 2018), en el caso de los modelos de lecho móvil.

### 3.3.2 Modelación hidráulica bidimensional

Actualmente, la modelación matemática resulta una herramienta importante que nos permite optimizar en lo posible el tiempo de análisis y recurso económico para diferentes actuaciones que se vaya a realizar en el medio natural. De acuerdo con el fenómeno a estudiar y con el incremento de la capacidad de procesamiento de los sistemas de cómputo, se nos permite hacer modelos numéricos cada vez más complejos. En la hidráulica fluvial, cuando se presenta el tema de desbordamientos de agua del cauce o flujos desbordados, es conveniente trabajar con modelos en dos dimensiones o bidimensionales (Moya Quiroga, et al., 2016).

Para estudios de inundación, es importante que los modelos nos ayuden a identificar donde se inician los desbordamientos y conocer el tiempo de llegada hasta la zona de interés del estudio. Además, que nos permita conocer la profundidad a la que llega el nivel de agua, velocidad y como varían estas con relación al tiempo. Por tanto, la modelación bidimensional

nos sirve como una herramienta de alta importancia para interpretar la hidrodinámica de los cauces fluviales en las cuencas.

### 3.3.2.1 Ecuaciones en modelos bidimensionales

Las ecuaciones que gobiernan los fenómenos bidimensionales son: las ecuaciones de Saint-Venant, que se obtienen a partir de las leyes físicas de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. Para un fluido newtoniano e isótropo, aplicando las ecuaciones de conservación de la masa y de cantidad de movimiento, se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales, particularizadas para describir las variables promediadas en un pequeño incremento del tiempo, se concentran en las ecuaciones de Reynolds. (Bladé & Gomez, 2006).

Generalmente, en los problemas de propagación de avenidas de los flujos en lámina libre, el valor de las variables hidráulicas no presenta variaciones importantes en una misma vertical, lo que nos permite realizar una simplificación de las ecuaciones de Reynolds a dos dimensiones mediante un promedio vertical de las ecuaciones tridimensionales, que son las ecuaciones de Saint Venant. Para la validez de esta simplicidad se considera las siguientes hipótesis:

- a. Profundidad de la capa de agua pequeña con relación a las otras dimensiones del problema (aguas someras).
- b. Distribución hidrostática de presiones en la vertical.
- c. Pendiente de fondo o lecho reducida.

El cumplimiento de estas hipótesis se da siempre y cuando las componentes de la velocidad y aceleración en el eje  $z$  sean despreciables frente a los otros ejes, y que estas últimas tengan una marcada uniformidad vertical (Gómez Valentín, et al., 2009).

Las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales en su expresión más completa, en forma conservativa de acuerdo con el esquema de la Figura 3, se expresan de la siguiente manera: Para la conservación de la masa de acuerdo con la ecuación 1, para la cantidad de movimiento de la partícula en  $u$  y  $v$ , ecuación 2 y 3 respectivamente.

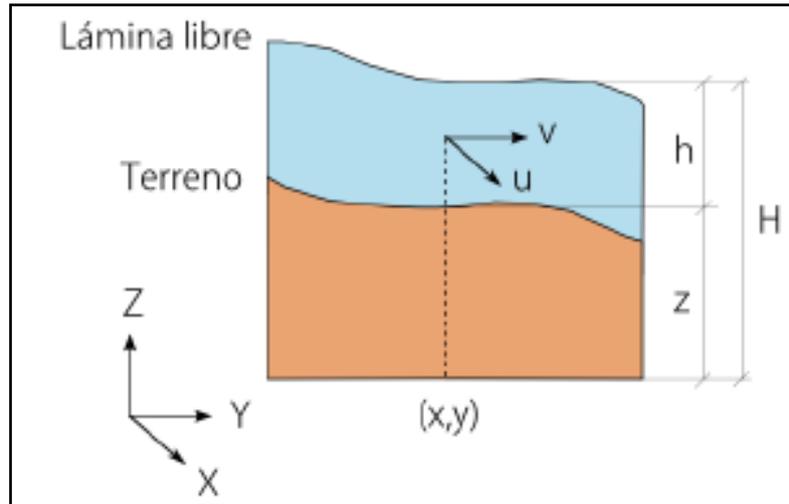


Figura 3: Diagrama de las componentes de una partícula de flujo. (Nácher Rodríguez & Vallés Morán, 2018)

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t} + \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}\right)}_{\text{Aceleración}} = \underbrace{-g \frac{\partial H}{\partial x}}_{\text{Hidrostática}} + \underbrace{v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)}_{\text{Turbulencia}} - \underbrace{c_f u}_{\text{Fricción}} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t} + \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right)}_{\text{Aceleración}} = \underbrace{-g \frac{\partial H}{\partial y}}_{\text{Hidrostática}} + \underbrace{v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)}_{\text{Turbulencia}} - \underbrace{c_f v}_{\text{Fricción}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Los términos de aceleración se dividen en: Locales, que representan la variación de la velocidad con el tiempo en un punto fijo, siendo los responsables del carácter no permanente del flujo. Y por otro lado los convectivos, que representan el efecto del transporte con el flujo del gradiente de la velocidad, que son los causantes de la formación de los vórtices, su efecto es importante mientras mayor es el número de Reynolds (relación entre fuerzas inerciales y viscosas). La suma de la aceleración local y convectiva representa la aceleración total de las partículas del fluido.

Los términos hidrostáticos, relacionan la pendiente de la superficie libre afectada por la acción de la gravedad (acción de fuerzas gravitatorias), que mediante el uso de formulaciones de Reynolds utilizando hipótesis de presión hidrostática llegan a definir la simplificación del término, resultando principal para la homogeneidad de las ecuaciones, su presencia aumenta la complejidad de los esquemas numéricos de resolución.

Por su parte, los términos de turbulencia describen físicamente una serie de movimientos en forma de vórtice o torbellino que cumplen un amplio rango de tamaños, la distribución de vórtices es altamente aleatoria y no permanente en el tiempo.

Por último, los términos de fricción tienen un efecto no lineal que retardan el flujo debido a las pérdidas que se producen por la naturaleza física del fluido y su interacción con el medio. En ella intervienen ecuaciones que para casos bidimensionales se las puede calcular mediante ecuaciones de Manning (Gómez Valentín, et al., 2009).

### 3.3.2.2 Simplificación de las ecuaciones

Una forma de resolver las ecuaciones (cantidad de movimiento) que describen los procesos físicos en el medio natural, es la introducción de simplificaciones para ciertos términos que nos ayudan en la resolución más rápida de estos fenómenos, por lo general los modelos bidimensionales simulan el flujo de canales y cauces naturales, por lo que, es común despreciar términos de turbulencia dentro de la modelación. Además, si consideramos en ríos con crecimiento de avenidas suave y baja pendiente, resulta adecuado utilizar la simplificación denominada onda difusiva, que involucra la igualdad de la pendiente motriz y la de superficie libre de agua, donde las fuerzas inerciales son despreciables frente a las gravitacionales (Martín Vide, 2006).

De esta manera las ecuaciones de Saint-Venant se pueden reescribir despreciendo los términos de aceleración y turbulencia. Quedando únicamente los términos hidrostáticos y de fricción, para este último, el parámetro fundamental para su desarrollo resulta el número de Manning, que representa la rugosidad de la superficie por donde se mueve el flujo.

Existen diversas metodologías para fijar el coeficiente de rugosidad de Manning (Barnes, 1967; Chow, 1994; Puertas y Sánchez-Juny 2000; Sánchez-Juny, Bladé y Puertas, 2005), aunque en

la mayoría de los casos se proporciona un cierto grado de subjetividad, debido a la dificultad de simplificar en un solo término diferentes condiciones como: el uso del suelo, irregularidades de la sección, geología y cobertura vegetal (Gómez Valentín, et al., 2009).

### 3.3.3 Modelación Hidráulica con HEC-RAS

HEC-RAS, en su versión 5.0.5 y de libre acceso, desarrollado por USACE (Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés); es muy demandado actualmente debido a la continua actualización y amplio uso dentro de la modelación hidráulica, donde hace posible analizar los flujos de agua que se mueven a través de una superficie.

El programa contiene cuatro componentes para el análisis hidráulico que son: Cálculos de perfil de la superficie de agua de flujo constante, simulaciones de flujo transitorio 1D y 2D, cálculos de transporte de sedimentos de lecho móvil (sedimentos cohesivos y no cohesivos) y modelos de temperatura del agua y transporte de contaminantes. Además, el sistema contiene varias características de diseño hidráulico que pueden llamarse una vez calculado los perfiles básicos de la superficie de agua, y con ello realizar el mapeo de inundaciones directamente dentro del software (US Army Corps of Engineers, 2018).

#### 3.3.3.1 Capacidades y ventajas

HEC-RAS en su versión actual, cuenta con varias características que permiten simular de una forma óptima los fenómenos que se originan por el dinamismo hidráulico de los cauces fluviales, estos se presentan a continuación:

- Permite realizar modelaciones 1D, 2D o un caso híbrido donde intervienen 1D y 2D; esta capacidad nos ayuda para el análisis de sistemas fluviales extensos donde resulta conveniente modelar el cauce del río en una dimensión y en dos dimensiones la zona donde se produce el desbordamiento del flujo.
- El programa nos permite elegir las ecuaciones a emplear, entre las de Saint-Venant en su forma completa bidimensional y las de Onda Difusiva; las primeras nos posibilitan aplicar a una gran gama de problemas de análisis hidráulico, mientras que las últimas cuentan con propiedades de estabilidad y permiten al software procesar la información con mayor rapidez.

- Para la resolución de las ecuaciones, el programa utiliza métodos de volumen finito implícito, los cuales mejoran la estabilidad y robustez sobre las técnicas de diferencias finitas y elementos finitos, permitiendo modelar en condiciones de flujo en regímenes subcrítico, supercrítico y mixto.
- Otra característica importante es el desarrollo del algoritmo para solucionar el acoplamiento de modelos 1D y 2D, este desarrollo permite una retroalimentación en cada paso de tiempo entre los elementos del flujo 1D y 2D (río modelado con 1D y zona de desbordamiento 2D), el paso del caudal hacia las zonas 2D lo realiza empleando las ecuaciones de vertedero, con los resultados de los modelos en cada paso del tiempo, lo que permite una contabilización efectiva del vertedero sumergido.
- La utilización de mallas computacionales estructuradas y no estructuradas. HEC-RAS fue diseñado para utilizar en su procesamiento mallas no estructuradas, pero también se puede trabajar con mallas estructuras, el tipo de malla puede ser: triangular, cuadrada, rectangular o poligonal con un número no mayor de 8 lados.  
El programa nos permite manipular las celdas generadas y así tener más detalle donde sea necesario conocer las características del flujo. La malla no necesariamente debe ser ortogonal, pero esto ayuda a que la discretización numérica sea simplificada y más eficiente.
- Basándose en el terreno de análisis y mediante el pre procesado de las celdas y sus contornos, hace posible la obtención de tablas con propiedades hidráulicas de cada una de ellas. Teniendo dentro de cada celda calculada una relación de Elevación y Volumen, y para sus contornos Elevación-Perímetro mojado, Elevación-Área, Elevación-Rugosidad, entre otras. A diferencia de la mayoría de modelos de flujo bidimensional, las celdas de la malla de cálculo en HEC-RAS no representan un único valor de cota de terreno, sino que guardan información de la topografía subyacente (modelo de submalla). El tamaño de las celdas para el análisis dependerá en cierta medida del tamaño de píxel que tenga la capa del terreno, MDT o la precisión de análisis requerida en el modelo, pero será generalmente mayor que en otros modelos, por lo que el tiempo computacional se reduce también considerablemente por este motivo.

- Mediante la herramienta RAS Mapper, dentro de la interfaz del programa, nos permite obtener mapas detallados de inundación y su respectiva animación, es decir, como varía el calado de agua dentro de una zona de influencia.
- HEC-RAS utiliza los procesadores que tiene el ordenador donde se ejecuta y así permite disminuir el tiempo de cálculo. Puede trabajar en ordenadores con procesadores de 32 y 64 bits.

### 3.3.3.2 Limitaciones del programa

Debido a que la versión 2D es bastante reciente, presenta las siguientes limitaciones dentro de la modelación 2D:

- Ofrece poca flexibilidad para ingresar obras no hidráulicas como puentes, pero es posible mediante el ícono de **SA/2D Area Conn** que se encuentra dentro de la interfaz RAS Mapper ingresar alcantarillas o culvert, vertederos y roturas de presas para la modelación.
- No es posible ejecutar la simulación para el transporte de sedimentos.
- Dentro de esta versión no es posible ejecutar el análisis de calidad de agua.
- No es posible conectar centrales de bombeo.

### 3.3.3.3 Parámetros en HEC-RAS

Dentro de la modelación se puede considerar dos parámetros fundamentales, uno de ellos el coeficiente de rugosidad, es el que representa la pérdida de energía que se generan por el rozamiento con los contornos. Para modelos bidimensionales este parámetro toma mayor importancia dentro de la llanura de inundación, siendo necesario estimarlo adecuadamente en función del material de lecho o de las márgenes (llanura de inundación, si fuere el caso), obstrucciones y cambios bruscos de geometría, presencia de vegetación y obstáculos, además de grado de sinuosidad del cauce.

Por ello resulta de mucha importancia realizar una buena elección y calibración de este parámetro, además de realizar un análisis de sensibilidad para conocer cómo se comporta el modelo con relación al coeficiente de rugosidad (Nácher Rodríguez & Vallés Morán, 2018).

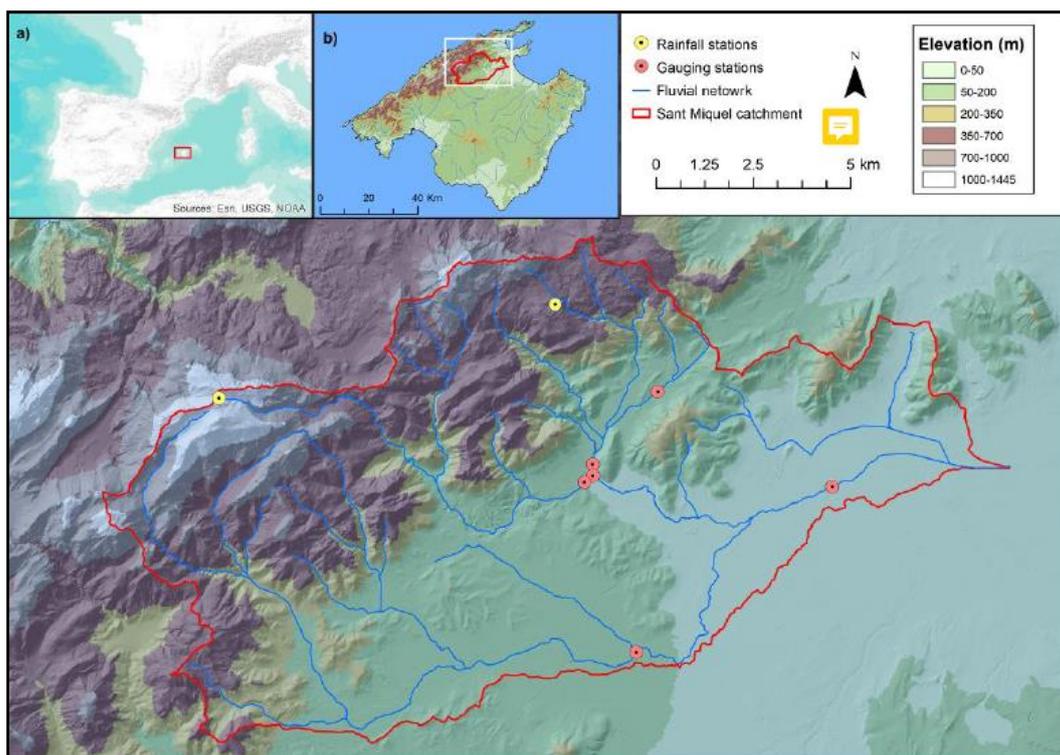
El otro parámetro es la turbulencia, que cuantifica la variación irregular del flujo en tiempo y espacio, es importante en las zonas de separación del flujo, por lo tanto, se presta mayor atención en estudios muy precisos o cauces sinuosos; se presenta mediante un coeficiente de viscosidad turbulenta y un coeficiente de mezcla, para estudios de inundación resulta de poca influencia frente al coeficiente de rugosidad.

## 4. CASO DE ESTUDIO

### 4.1 Cuenca de los torrentes de Sant Miquel y Búger

#### 4.1.1 Localización

El estudio de análisis de la peligrosidad de inundación se centra en la cuenca de Sant Miquel localizada al noreste de la isla Mallorca, España (Figura 4), su extensión superficial es de 152 Km<sup>2</sup>, desemboca al Mar Mediterráneo mediante la vertiente de Alcúdia, atravesando el humedal s'Albufera, zona que es de importancia internacional incluida en la lista RAMSAR que tiene 1700 hectáreas protegidas. En la parte baja de la cuenca se encuentran generalmente zonas agrícolas y representa la zona de regadío más importante de la isla (7% de la cuenca), lo que genera el deterioro del sistema fluvial de la cuenca de Sant Miquel y del humedal protegido (MEDhyCON, 2018).



**Figura 4: Localización de la cuenca de Sant Miquel, Mallorca. Red de monitorización y drenaje de la cuenca (MEDhyCON, 2018).**

#### 4.1.2 Relieve y Geología

Desde su parte alta de cabecera que tiene lugar en las montañas de la Sierra de Tramuntana hasta los valles de Inca-Sa Pobla, el rango de altitud varía desde los 13000 m.s.n.m. hasta decenas de metros sobre el nivel del mar. La pendiente media de los canales supera el 20 % en las partes altas, lo que ocasiona respuestas torrenciales ante eventos pluviométricos (Figura 4).

Por su parte, según (Govern de les Illes Balears, 2016), lo que respecta a la geología de la cuenca de Sant Miquel, está caracterizada por las formaciones de la isla en general (Figura 5), contrastando dos zonas como son: La Sierra de Tramuntana y los valles centrales.

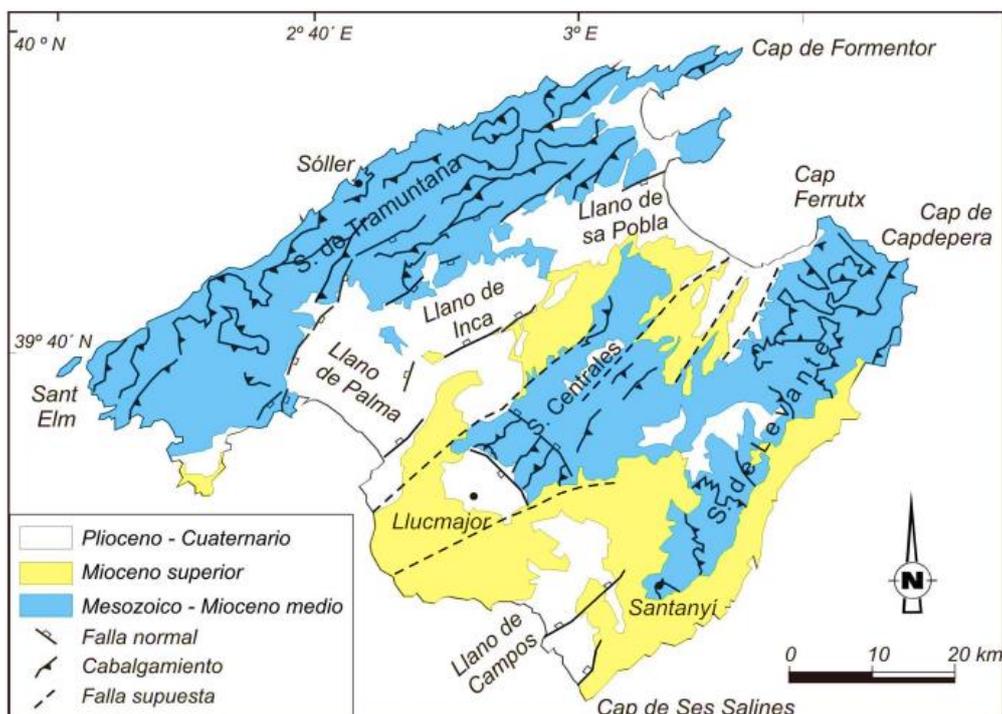


Figura 5: Geología de la Isla Mallorca (Govern de les Illes Balears, 2016).

La Sierra de Tramuntana, situada al Noroeste de la cuenca, constituye una zona abrupta y discurre con orientación Suroeste-Noreste, está formada por pliegues superpuestos constituidos por dolomías, margas y calizas del Jurásico y Cretácico, que deslizan sobre materiales del Trías, en conjunto con niveles de conglomerados, calizas detríticas, margas y arcillas del mioceno. Presenta diversas fallas longitudinales y transversales además de cabalgamientos que hacen que la zona tenga una geología muy compleja. Una característica para destacar es la formación de numerosas y variadas formas kársticas en los materiales calcáreos de este lugar.

En los valles centrales, la llanura está formada por materiales de la edad contemporánea entre el Mioceno y Cuaternario, apareciendo pocos afloramientos mesozoicos que constituyen las sierras centrales. En el lugar aparecen formaciones de margas, conglomerados, calizas, areniscas, calcarenitas y margas arenosas en el Mioceno y alternancias de conglomerados sueltos, areniscas y limos en el Cuaternario. También existen depósitos de facies costero-lagunar formados por margas azules y amarillentas, además depósitos lacustres y continentales, terrazas marinas y depósitos de dunas más o menos consolidadas.

#### 4.1.3 Clima

El clima de la cuenca responde típicamente a un entorno mediterráneo, presentando en lugares ciertos matices debido a su relieve, el cual se hace notar en el aumento de la aridez en dirección norte-sur de la cuenca. La temperatura media anual varía entre 5 y 31 °C. Siendo enero el mes más frío con -1.2°C y los meses de mayor temperatura julio y agosto donde se alcanza hasta los 38 °C (Ayuntamiento de Sa Pobla, 2003).

La pluviometría en las sierras de Tramuntana alcanzan valores de 1400 mm/año; por su parte en las zonas bajas de la cuenca, se llega a los 400 mm anuales. La distribución estacional de la precipitación es una característica importante de la cuenca, debido a que más del 60 % de ella se produce en los meses de octubre a enero y un porcentaje menor al 10% en los meses de estiaje (junio - agosto).

#### 4.1.4 Hidrología

En lo que respecta a la hidrología y por la naturaleza geológica de la cuenca, se tienen diversos torrentes que discurren desde la Sierra de Tramuntana hacia los llanos centrales, uno de los principales es el torrente de Sant Miquel, que atraviesa y desemboca en s'Albufera. Parte de sus aportaciones se originan por la escorrentía superficial generada en la cuenca pero también recibe aportaciones de las surgencias de Ses Fonts Ufanés (Las Fuentes Alegres) (Figura 6, b) y resulta ser el cauce de mayor caudal instantáneo de Mallorca y de la cuenca de Sant Miquel (Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient i Territori Direcció General de Recursos Hídrics, 2018). A este torrente, se une desde el sur otro tributario de importancia en la cuenca llamado Búger (Figura 6, a).



Figura 6: (a) Torrente Sant Miquel y Búger, (b) Surgencias de Ses Fonts Ufanes, Sierra de Tramuntana.

#### 4.1.4.1 Torrente Sant Miquel

El tramo fluvial principal para el desagüe de la cuenca es el torrente de Sant Miquel, cuya aportación media anual es de  $16 \text{ hm}^3$ , este cauce cuenta con tres estaciones de aforo (EA), pero las de importancia para el control total del caudal y sedimentos que genera gran parte de la cuenca son las EA de Sant Miquel y Sa Marjal (Figura 6, a), la longitud entre las estaciones es de 7 Km y el ancho promedio del cauce varía entre 12 y 15 metros. En este trayecto, presenta una sinuosidad baja ( $\text{sinuosidad} < 1.5$ ), siendo el cauce de tipo rectilíneo, (Leopold & Wolman, 1957) y está canalizado lateralmente en la mayoría de este tramo (márgenes fijadas y protegidas). Su pendiente media varía desde su parte alta hacia la baja desde 1.2 hasta 0.4 por mil.

#### 4.1.4.2 Torrente Búger

El torrente de Búger se inicia en Mancor de la Vall y confluye en el torrente de Sant Miquel. La extensión de este cauce hasta la zona de confluencia es de 7 km. aproximadamente, presentando una pendiente media entre 1.1 y 1.3 por mil en su parte baja y alta respectivamente. Tiene un ancho medio de canal entre 10 metros, la morfología del cauce representa un tipo rectilíneo (sinuosidad < 1.5). En la parte inicial de este cauce, donde se incorporan diferentes fuentes hídricas, se cuenta con una estación de aforo (EA Búger) (Figura 6, a), la cual permite registrar principalmente datos sedimentológicos y de caudales que desagua este torrente hacia S'Albufera mediante el torrente de Sant Miquel.

Cabe indicar que el régimen hidro-sedimentológico en la cuenca se ve alterado debido a la presencia de presas de laminación, que fueron construidas en los principales tributarios a la salida de la Sierra de Tramuntana a principios de los años 90 y por abundantes medidas para la conservación del suelo como terrazas o muros de contención (estructuras de control de sedimentos), todo ello debido a la naturaleza de las subcuencas de Sant Miquel que son pequeñas y de respuesta inmediata a los eventos de precipitación torrenciales (Figura 7).



**Figura 7: Presas de laminación y contención en tributarios de la cuenca de Sant Miquel.**

#### 4.1.5 Flora y Fauna

En lo que respecta a la flora y fauna, está típicamente marcado por su clima mediterráneo. Dentro del territorio terrestre de la isla se encuentran más de 124 especies vegetales endémicas, 32 especies de helechos, 31 de orquídeas, 67 especies protegidas y 130 introducidas (invasoras), que conviven con casi 2000 especies autóctonas del mediterráneo.

Por su parte, en cuanto a la fauna así mismo en relación con la isla se cuenta con más de 300 especies endémicas, las cuales en su mayoría corresponden a insectos, moluscos terrestres, entre otros invertebrados. Algo característico son las lagartijas (balear y pitiusa). Una especie para destacar es el *ferreret* o sapillo balear, casi un fósil viviente que habita en los torrentes de Sierra de Tramuntana, el cual representa todo un símbolo en Mallorca. Hay que considerar además que este espacio terrestre, al presentar zonas húmedas y salobres sirve como hábitat para aves migratorias (flamencos y aves pescadoras) (Illes Balears, 2018).

#### 4.1.6 Uso del suelo

Por su naturaleza geológica y pequeñas variaciones de la pendiente del terreno en la parte baja de la cuenca, además de por la existencia de acuíferos no confinados que son explotados, se propicia un territorio ideal para el uso del suelo en la agricultura, dejando unas pocas extensiones para uso forestal, matorral y urbano, tal como se puede observar en la Figura 8.

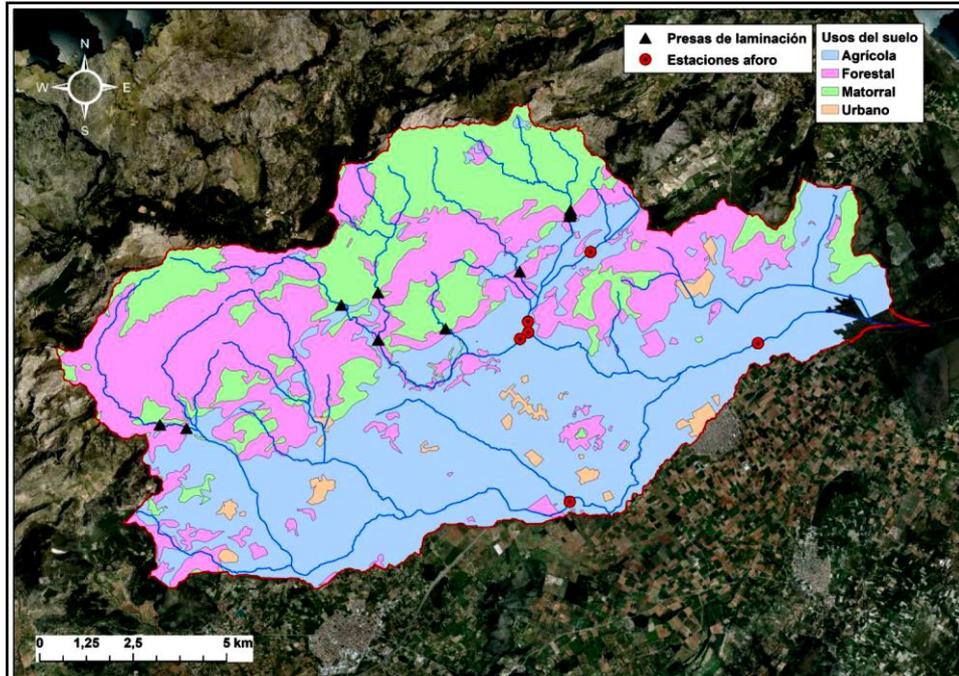


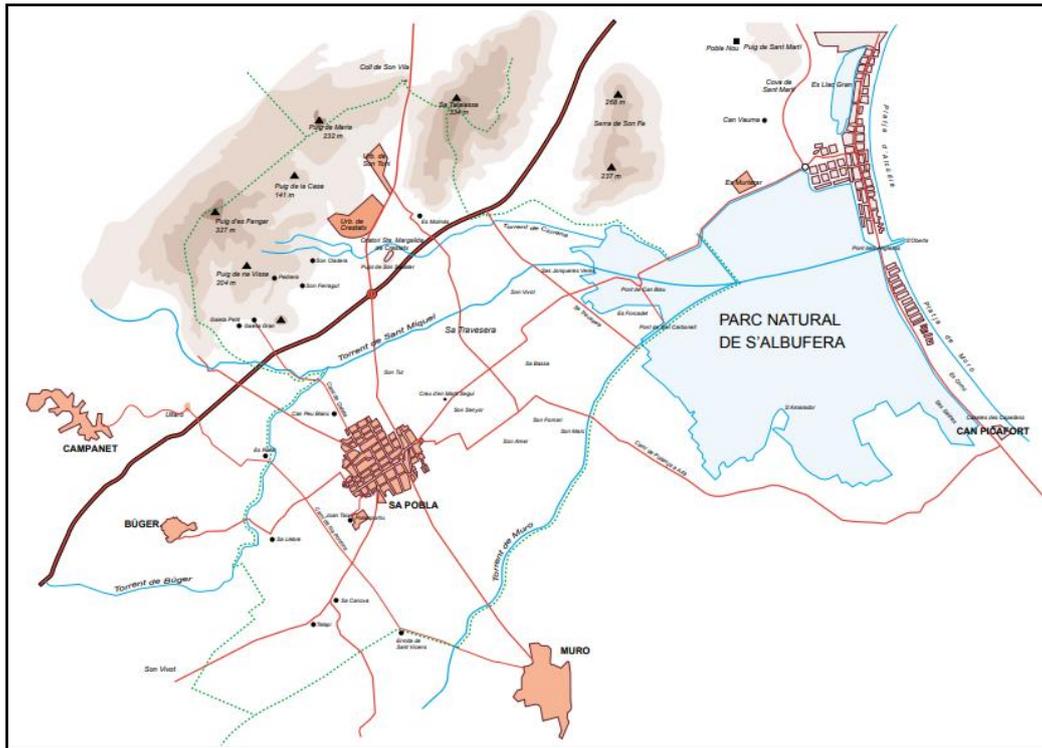
Figura 8: Usos del suelo, estaciones de aforo y presas de laminación en la cuenca de Sant Miquel (MEDhyCON, 2018).

## 4.2 Municipio de Sa Pobla

### 4.2.1 Medio Geográfico

El municipio de Sa Pobla, ubicado dentro de la cuenca de Sant Miquel, cuenta con una extensión de 48,53 Km<sup>2</sup>, delimitado por los municipios de Pollença, Alcúdia, Muro, Llubí, Inca, Búger y Campanet (Figura 9). Se caracteriza por tener un relieve plano, cuya altitud media es de 36 m.s.n.m y el núcleo de su población está alrededor de los 25 metros sobre el nivel del mar.

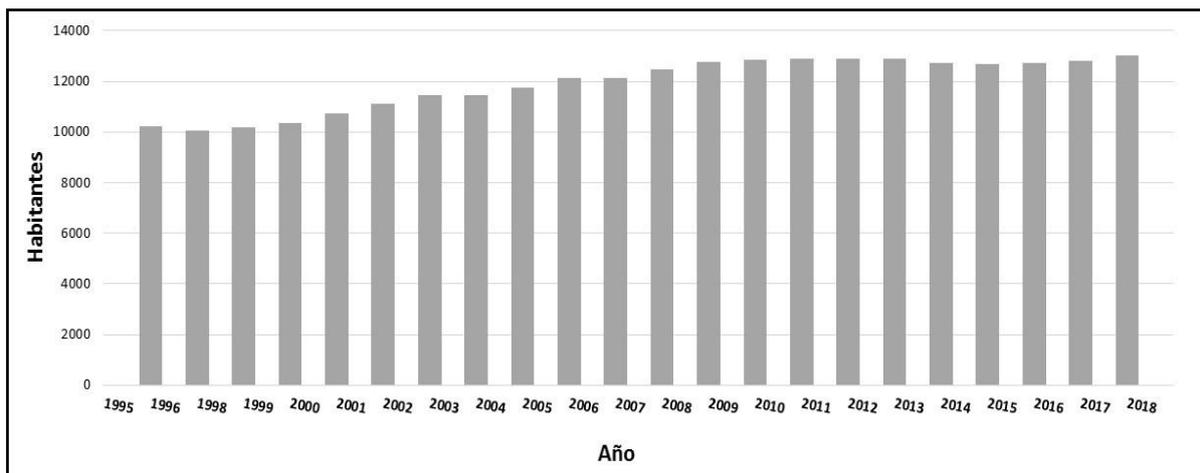
Una característica importante del municipio es su localización en la parte baja de la cuenca vertiente de Sant Miquel y su cercanía con la confluencia, entre los torrentes de Sant Miquel y Búger (950 metros al sur de esta, aproximadamente).



**Figura 9: Delimitación del municipio de Sa Pobla (Ayuntamiento de Sa Pobla, 2003).**

#### 4.2.2 Demografía

Según (Instituto Nacional de Estadística, 2018), el municipio de Sa Pobla al 1 de enero del 2018 contó con 13026 habitantes, de los cuales 6623 son hombres y 6403 mujeres, correspondiendo a una densidad poblacional de 268.41 hab./Km<sup>2</sup>. En los últimos 10 años (Figura 10), el municipio no ha tenido un crecimiento o decremento de la población mismo que ha sido constante, el máximo crecimiento mostrado en la figura corresponde a los años del 2000 a 2001 con 389 habitantes, por su parte en los años de 2013 a 2014 habido un decremento de 132 habitantes. El aumento de la esperanza de vida y la baja fecundidad que tiene este municipio ha provocado el envejecimiento paulatino de la población.



**Figura 10: Demografía de Sa Pobra, año 1996 hasta 2018 (Instituto Nacional de Estadística, 2018).**

#### 4.2.3 Socioeconomía

La economía del municipio de Sa Pobra presenta 3 sectores fundamentales que establecen el desarrollo de su población. El primero de ellos, el sector primario donde se destaca la agricultura, que ha sido el motor económico durante muchos años, se caracteriza por el cultivo intensivo de regadío en pequeñas propiedades, considerando a Sa Pobra como una de las huertas de Mallorca. Es conocido por la producción de patatas que toma un peso muy importante dentro de la economía.

El sector secundario está constituido por la industria y construcción, que generalmente supone la transformación de las materias primas producidas en la municipalidad y la elaboración de bienes. Por su parte, en lo que respecta al avance de este sector en Sa Pobra, sigue el mismo patrón de crecimiento que las islas Baleares.

Por último, el sector terciario (en su mayoría la población activa) forma parte de todas las actividades que prestan un servicio a la comunidad, como es el caso de: comercio, transporte, turismo, restauración, ocio, servicios públicos, sanidad, educación, servicios personales y administrativos finanzas y cuerpos de seguridad entre otros.

#### 4.2.4 Inundaciones históricas

Sa Pobla ha sufrido diversos eventos de inundación y desbordamientos de los torrentes, debido a la localización que tiene dentro de la cuenca vertiente de Sant Miquel, el bajo relieve topográfico, su cercanía a los cauces de los torrentes de Sant Miquel, Búger y su confluencia. Existe un registro de precipitaciones históricas con duración de 24 horas, las cuales se indican a continuación en la Tabla 1.

**Tabla 1: Precipitaciones registradas con duración de 24 horas (Ayuntamiento de Sa Pobla, 2003).**

<b>Eventos de precipitación registrados (t = 24 horas)</b>	
<b>Día</b>	<b>Precipitación (l/m<sup>2</sup>)</b>
13 de Septiembre de 1972	113
31 de Octubre de 1956	103
8 de Octubre de 1958	100
1 de Octubre 1973	100

De la tabla anterior, podemos observar que existe precipitaciones de carácter torrencial dentro de la municipalidad y cuenca vertiente, las cuales sin duda han afectado a diferentes zonas. A continuación, se presentan algunas inundaciones y las consecuencias registradas dentro de Sa Pobla y zonas periféricas mencionadas en el documento emitido por el (Ayuntamiento de Sa Pobla, 2003) y (Gelabert Grimalt, et al., 1991).

- El 30 de noviembre de **1691**, el día de San Andrés, se produjo una avenida que inundó gran parte de Sa Marjal.
- Durante el 30 de noviembre de **1852** y al día siguiente, se produjo una lluvia intensa donde los torrentes de Sant Miquel y Búger llegaron a llevar una gran cantidad de agua y al no encontrar salida al mar, se inundó gran parte de la Albufera y Sa Marjal, causando la muerte de muchos rebaños de vacas y mulas, además este caudal rompió la barra dunar en S'Oberta (puente de los ingleses).

Esta lluvia se tuvo en la mayoría de la región de Mallorca, por lo que se conoce que en Búger murió un joven ahogado en un molino de agua y en Sineu tres niñas, además se derribaron algunas casas y se produjo la pérdida de muchos cultivos.

- Debido al carácter cíclico de las lluvias torrenciales, durante los siglos XIX y XX se produjeron diversas inundaciones, entre ellas se tiene: 31 de mayo de **1871** y el 2 de

marzo de **1874**; además el 31 de septiembre de **1875** que dañó las obras de desecación de S'Albufera; el 5 de enero de **1877**; 7 de diciembre de **1883**; 1 de noviembre de **1885**; 3 de febrero de **1888** y el 7 de enero de **1893**.

- Según (Riera Femenies, Roselló Geli, & Troya López, 2010), Sa Pobla se inundó el 29 de noviembre de **1927**, después de 3 días seguidos de lluvias, ocasionando el derrumbe de un edificio en la calle céntrica Major, sin producirse víctimas en este incidente.
- Otras inundaciones más recientes a las mencionadas fueron: las de octubre de **1958**; 13 de septiembre de **1972**, cuyo registro de precipitación fue de 113 litros en 24 horas y del 12 de octubre de **1973**, cuyo registro es 77.5 litros en las 24 horas.
- En enero de **1972**, se tuvo otra inundación, donde se desbordo el torrente de Sant Miquel, cortando la carretera Inca-Alcúdia. Además, las tierras de Sa Marjal quedaron anegadas, aunque el canal de S'Albufera por el cual el torrente desemboca al mar, estaba terminado de limpiar.
- El 31 de diciembre de **1972** y el 6 de enero de **1973** se volvió a evidenciar el desbordamiento de los torrentes Sant Miquel, Búger y de Muro. Las lluvias continuadas del 17 al 20 de febrero de **1974** provocaron el desbordamiento de los torrentes en la entrada de S'Albufera. Además, hubo desbordamientos el 29 de marzo de **1974**, el 18 y 19 de octubre de **1978**; el 20 de enero de **1980** y el 22 de abril de **1981**.
- En **1982**, el desbordamiento del torrente de Búger arrasó con puentes, varias casas y molinos de la municipalidad; otras afecciones ocurrieron durante el 29 de septiembre de **1986** y en septiembre de **1989**.
- Durante los días 7 al 12 de octubre de **1990** se produjo intensas lluvias con un máximo histórico de 210 litros en 24 horas registrado el día 8, del cual existe un análisis y más adelante se utiliza en la fase de calibración para la modelación matemática. Otro evento histórico en la localidad el 25 de enero de **1991**.

## 5. MODELACIÓN BIDIMENSIONAL DEL TORRENTE SAN MIGUEL Y BÚGER

El estudio de peligrosidad de inundación para el municipio de Sa Pobla por desbordamiento de los torrentes se realizó mediante modelación matemática bidimensional en HEC-RAS, (versión 5.0.5), para lo cual se consideró los siguientes componentes:

### 5.1 Modelación Digital del Terreno

La construcción del modelo digital de terreno es una descripción física del área de estudio de la cuenca de Sant Miquel, que resulta fundamental dentro de la modelación hidráulica bidimensional (Figura 11). El modelo se obtuvo mediante vuelos LIDAR actuales (2008) del IGN en diferentes tamaños cuadrangulares de resolución 5x5, 2x2 y 1x1 metros, facilitada y procesada por (MEDhyCON, 2018) y de un vuelo LiDAR del año 2009 encargado por la Conselleria de Medi Ambient de les Illes Balears, con el objetivo de realizar estudios de inundabilidad.

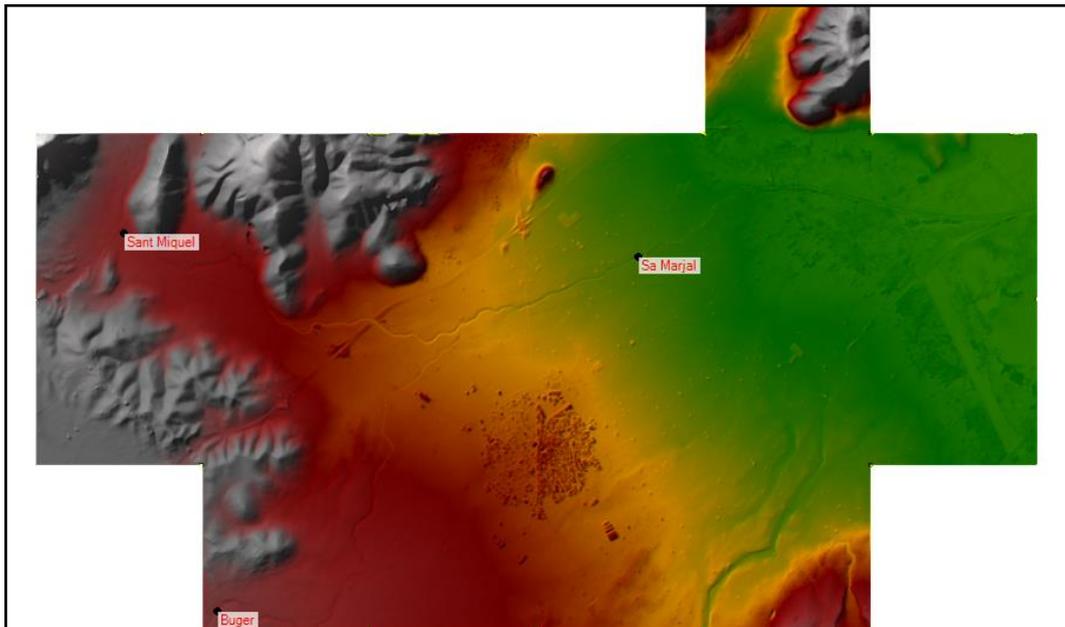


Figura 11: Modelo Digital de Terreno de 2x2 metros de píxel y estaciones de aforo dentro de la zona de estudio.

Con esta superficie se dispone de una topografía de detalle que abarca en su mayoría la cuenca de Sant Miquel y la población de Sa Pobla. Para facilitar los procesos siguientes se contrasta con topografía de Google satélite, donde se comprueba su localización de acuerdo con la georreferenciación de la cuenca de estudio, como se observa en la Figura 12.

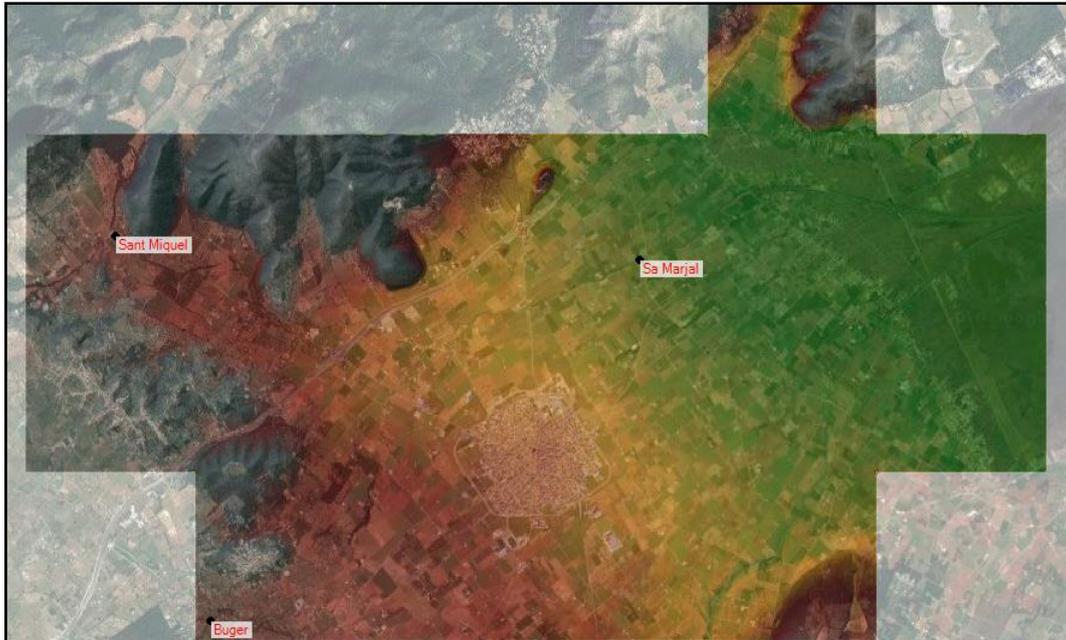


Figura 12: MDT (píxel 2x2 metros), sobre el mapa web de Google Satélite.

## 5.2 Geometría del modelo bidimensional

A partir de la topografía (Modelo Digital del Terreno), dentro de la opción de *Ras Mapper* en el programa HEC-RAS, podemos generar el dimensionamiento del área geométrica que abarca el área de influencia para el análisis. Como se observa en la Figura 13, está delimitada por las estaciones de aforo que nos permiten ingresar información hidrológica y sedimentológica aguas arriba y abajo del área de estudio, las estaciones aguas arriba son las de San Miquel y Búger, siendo Sa Marjal la condición de frontera aguas abajo.

Para llegar al perímetro de la geometría que se muestra en la Figura 13 b, se realizó un análisis del desbordamiento del flujo con igual condiciones hidráulicas, reduciendo la zona de estudio lo máximo posible, optimizando de esta manera el área geométrica para el procesamiento de cálculo dentro del programa. Tener en cuenta la topografía y su desnivel en el terreno es importante para delimitar y considerar zonas vulnerables de inundación.

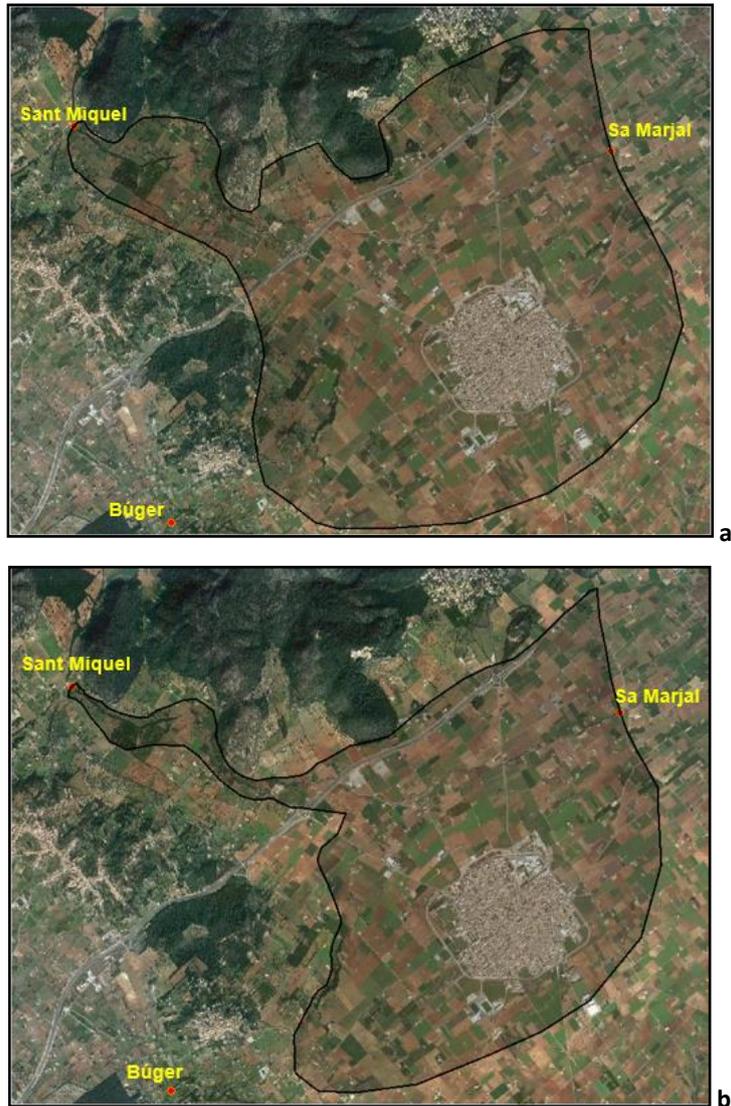


Figura 13: Construcción de la geométrica para el modelo. a) geometría inicial, b) geometría optimizada.

### 5.3 Condiciones de contorno

Las fronteras del modelo (aguas arriba y abajo), son los puntos que sirven para ingresar información hidráulica al modelo de estudio. En este caso, para la calibración del modelo, ha sido oportuno utilizar datos del registro histórico de inundación, del evento de precipitación de los días 7 al 11 de octubre de 1990, facilitados por parte de (MEDhyCON, 2018). Por otra parte, para la generación de los mapas de peligrosidad de inundación en Sa Pobla (simulación), se han introducido cómo condición de contorno de aguas arriba, los hidrogramas asociados a los diferentes periodos de retorno considerados, para cada uno de los torrentes.

De acuerdo con el fenómeno (análisis de inundación), se considera adecuado introducir al modelo dos tipos de condición de contorno que son: hidrograma de avenida con duración de 24 horas debido al fenómeno convectivo de precipitación en la zona y la condición de calado normal (introducida en HEC-RAS a partir del valor de la pendiente del terreno), que han sido colocadas aguas arriba y abajo respectivamente. Estas condiciones seleccionadas se muestran en la Tabla 2 y Tabla 3; siendo este último el hidrograma del evento de inundación histórico del 8 de octubre de 1990 y más adelante se presentará los hidrogramas de periodo de retorno para la zona de estudio.

**Tabla 2: Condición para la calibración del modelo aguas abajo, pendiente de los tramos del terreno cerca de las Estaciones de Aforo.**

<b>* EA</b>	<b>** m</b>	<b>‰</b>
<b>Sant Miquel</b>	1.161	0.0012
<b>Búger</b>	2.290	0.0023
<b>Sa Marjal</b>	0.443	0.0004

**Nota:** \* EA: Estación de Aforo, \*\* m: pendiente del lecho, Sa Marjal se considera como condición de aguas abajo.

**Tabla 3: Condiciones para la calibración del modelo aguas arriba, hidrogramas de avenida de los torrentes Sant Miquel y Búger del 8 de octubre de 1990.**

<b>Hidrograma</b>		
<b>Tiempo (h)</b>	<b>Sant Miquel (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Búger (m<sup>3</sup>/s)</b>
0	0.00	0.00
1	5.00	5.00
2	9.00	8.00
3	12.00	10.00
4	17.00	60.00
5	25.00	10.00
6	25.50	5.00
7	30.00	5.00
8	34.00	6.00
9	38.00	20.00
10	42.00	21.00
11	46.00	22.00
12	50.00	23.00
13	56.57	24.00
14	63.13	25.00
15	69.70	80.00
16	76.26	200.00
17	82.83	252.00
18	70.26	201.33
19	57.70	100.00
20	45.13	20.00
21	32.57	15.00
22	20.00	5.00
23	10.00	2.00
24	0.00	0.00

#### 5.4 Estructuras consideradas en la modelación hidráulica

##### 5.4.1 Obras de drenaje transversal

Dentro del modelo bidimensional, se ha considerado oportuno introducir una estructura de tipo alcantarilla o *culvert*, que nos permite simular el flujo a través de las obras longitudinales como caminos, carreteras y autopistas. La principal estructura de este tipo en la zona de estudio se sitúa en el torrente de Sant Miquel a 1300 metros aguas arriba de la confluencia con el torrente de Búger.

Debido a limitación para incorporar puentes en la versión utilizada de HECRAS 5.0.5 para modelación 2D y considerando la tipología de esta estructura y sus dimensiones (Figura 14), se hace asumible la simulación mediante la introducción de un *culvert*, empleando dos marcos con las dimensiones y tipología mediante la herramienta de *Ras Mapper* de HEC-RAS, que se observa en la Figura 15.

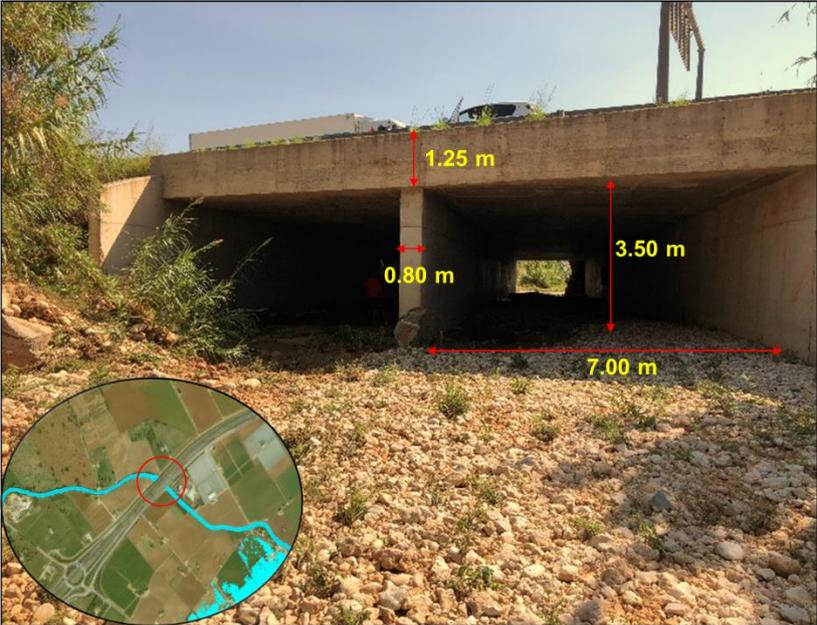


Figura 14: Tipología y dimensiones del puente existente.

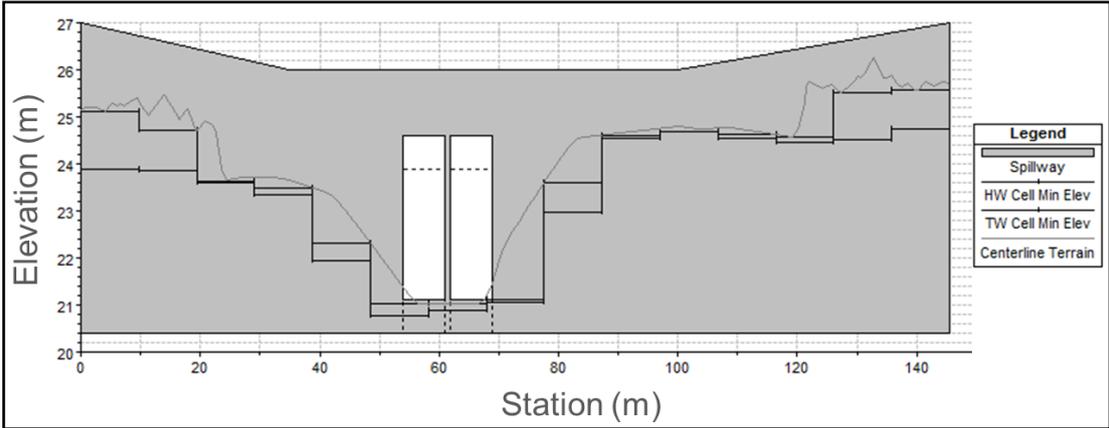


Figura 15: Culvert empleado para simular el puente existente.

#### 5.4.2 Líneas de rotura del flujo

En los fenómenos de inundación, es conveniente conocer los puntos o zonas donde resulta importante introducir líneas de rotura del flujo o *Breaklines*, permitiendo de esta manera representar estructuras como vías, pasos de ferrocarril, muros, además de relieves topográficos y tramos marcados del cauce, que actúan como una obstrucción para el paso del flujo de agua, de manera que el flujo no pase a través de estas estructuras hasta que la lámina de agua no supere la cota de coronación de la mismas (de manera similar a como funcionan los *levees* en HEC-RAS 1D) . En la cuenca de estudio se ha colocado una línea de rotura en la autovía Ma-13 que va desde Sa Pobra hacia Alcúdia, con el fin de delimitar y simular el flujo que desborda adecuadamente en el tramo de la vía (Figura 16).



Figura 16: Línea de rotura en la autovía Ma-13, Sa Pobra-Alcúdia.

#### 5.4.3 Sección de control

Del evento histórico de inundación del 8 de octubre de 1990, registrado en la cuenca vertiente de Alcúdia, se cuenta con información hidráulica de diversas secciones analizadas. (Gelabert Grimalt, et al., 1991). De este evento, resulta importante la sección que se encuentra dentro de la cuenca de estudio, la cual está ubicada en el torrente de Sant Miquel, 100 metros aguas abajo del puente de la vía Sa Pobra-Pollença, como se observa en la Figura 17.

De esta sección, resulta importante el cálculo hidráulico realizado mediante información de campo por métodos geomorfológicos, donde se analizó el nivel al que llegó el agua y la

presencia de cantos rodados arrastrados por la corriente, obteniendo en la sección un caudal punta descargado de  $168.23 \text{ m}^3/\text{s}$ . Con estos antecedentes, se introduce una sección de control en el modelo hidráulico en la zona correspondiente a la analizada en el cauce natural.

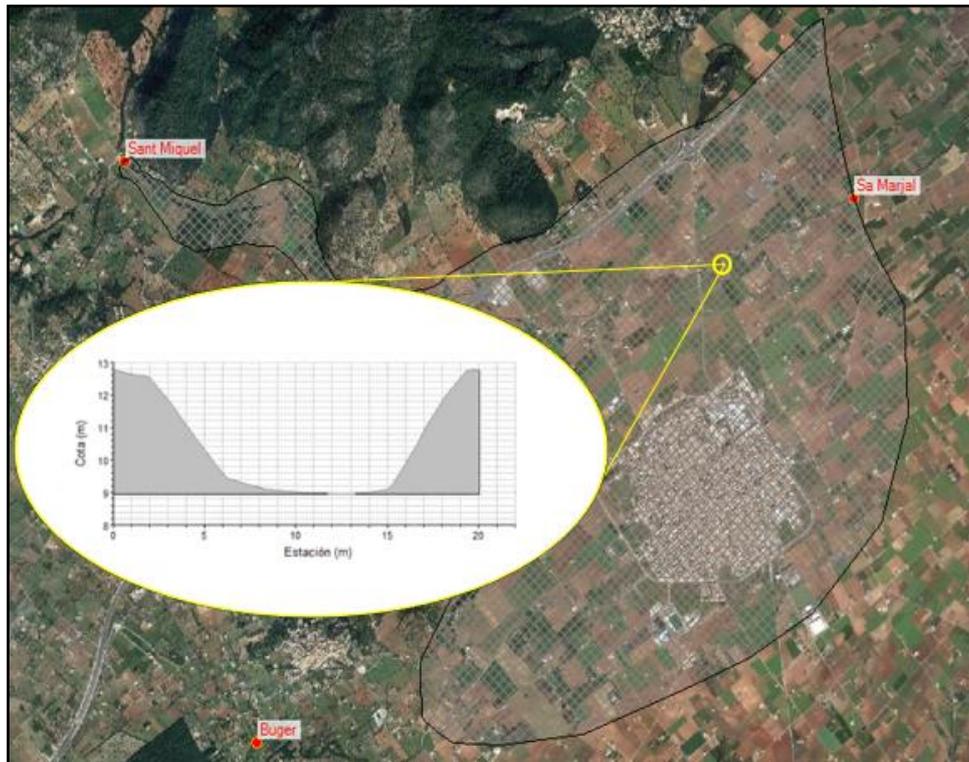


Figura 17: Sección de control ubicada en la modelación hidráulica.

## 5.5 Parámetros del modelo

### 5.5.1 Rugosidad de Manning

Mediante la información que se tiene de la cuenca de drenaje y los diferentes usos del suelo que se dan allí, se determinan los valores adecuados del coeficiente de rugosidad de Manning para introducir en el modelo hidráulico bidimensional. Este parámetro ha sido estimado en primera instancia a partir de información contenida en Ven Te Chow (1994), en la hidráulica de canales abiertos para generar el modelo, designando diferentes valores a cada torrente, zona poblada (Sa Pobla), llanura de inundación y la rugosidad de la confluencia (lecho protegido con hormigón) entre los torrentes de Sant Miquel y Búger, cuya asignación se presenta en la Tabla 4.

**Tabla 4: Valores de rugosidad para la cuenca de estudio.**

Tramo	Valor
Torrente Sant Miquel	0.028
Torrente Búger	0.028
Confluencia	0.015
Población	0.100
Llanura de inundación	0.035

### 5.5.2 Condición de Courant y método de resolución

La condición de Courant en los esquemas de resolución numérica de ecuaciones, establece el intervalo de tiempo mínimo para que los resultados de una simulación sean estables. En el caso de un modelo semi-implícito de resolución, como el que emplea HEC-RAS 2D, es posible tener mayores valores del número de Courant, pero el intervalo recomendado está entre 0.45 y 1 (en esquemas explícitos, estos valores son mucho menores). La desigualdad que ha de cumplirse es la que se indica en la ecuación 4.

$$C = V_w \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde  $V_w$  es la velocidad de la onda (aproximadamente igual a 1.5 veces la velocidad media del flujo en cauces naturales),  $\Delta x$  es el tamaño de la celda de la malla de cálculo, y  $\Delta t$  es el intervalo de cálculo necesario.

Debido a la existencia de estructuras y zonas de mayor interés, y a la variabilidad de tamaños de malla que se ha adoptado para representar éstas correctamente, no existe un único valor del  $\Delta t$  de cálculo en este modelo. HEC-RAS permite ajustar el  $\Delta t$  de manera automática a lo largo de la simulación, para lo que es necesario ingresar los valores máximos y mínimos del número de Courant (que, como se ha dicho, se recomiendan entre 1 y 0.45). De esta forma, se asegura que las celdas se resuelvan con intervalos y paso de tiempo adecuados de acuerdo con su variación de tamaño. El rango utilizado se muestra en la Figura 18.

Adjust Time Step Based on Courant

Maximum Courant:

Minimum Courant:

Number of steps below Minimum before doubling:

Maximum number of doubling base time step:

Maximum number of halving base time step:

Courant Methodology

Courant (Velocity \* dt / Length)

Residence Time (flow out \* dt / Volume)

Figura 18: Rango de tiempo de cálculo basado en la condición de Courant.

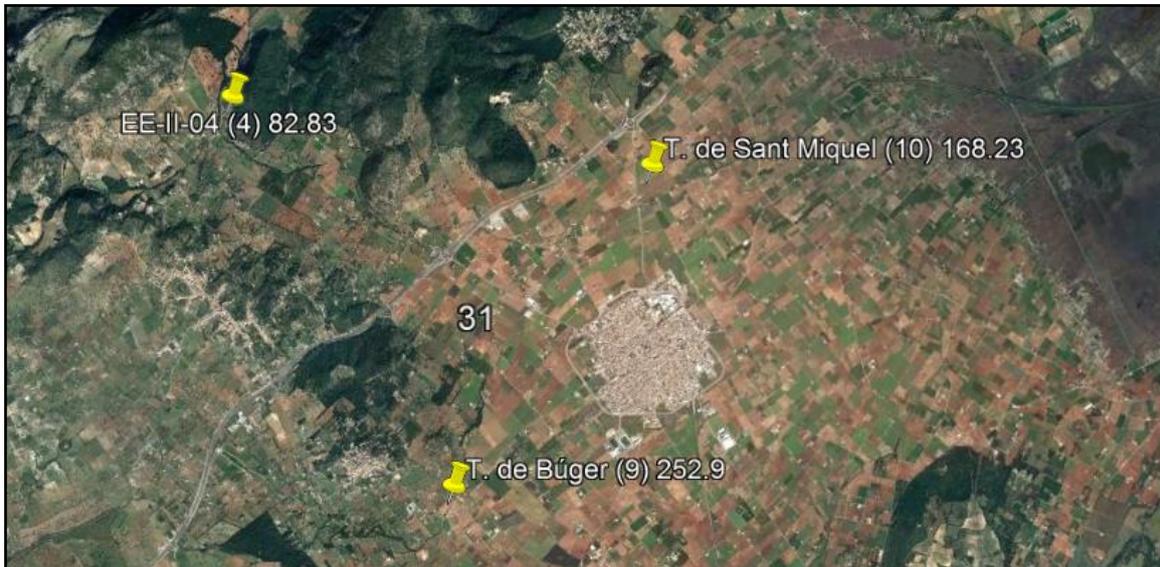
Debido a las características que presenta la cuenca vertiente de estudio (zonas planas donde el nivel de agua en la llanura de inundación no varía significativamente en su trayecto), y a la no existencia de fenómenos en los que se produzca una modificación importante de la velocidad en un corto intervalo de tiempo, se considera la simplificación en la resolución del modelo bidimensional, optando por desarrollar las ecuaciones de onda difusiva, con la finalidad de optimizar el tiempo total de cálculo del modelo.

## 5.6 Calibración del modelo matemático

Para la fase de calibración del modelo, se empleó información de un evento importante de inundación que fue registrado y analizado en campo por parte del Departamento Hidráulico del Gobierno Balear y la Universidad de las Islas Baleares, departamento de Ciencias de la Tierra. De este análisis se han podido obtener tres datos de caudal punta dentro de la cuenca de estudio, dos de ellos corresponden a los de entrada aguas arriba (condiciones de contorno) del modelo (EE-II-04 con  $82.83 \text{ m}^3/\text{s}$  y T. de Búger con  $252.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y el otro que se registra en una sección interna (T. de Sant Miquel con  $168.23 \text{ m}^3/\text{s}$ ), que en el presente estudio se utiliza como sección de control (Figura 19), tanto para comparar caudal, como nivel de lámina libre y velocidad, ya que se tiene información de todas estas variables en dicha sección.

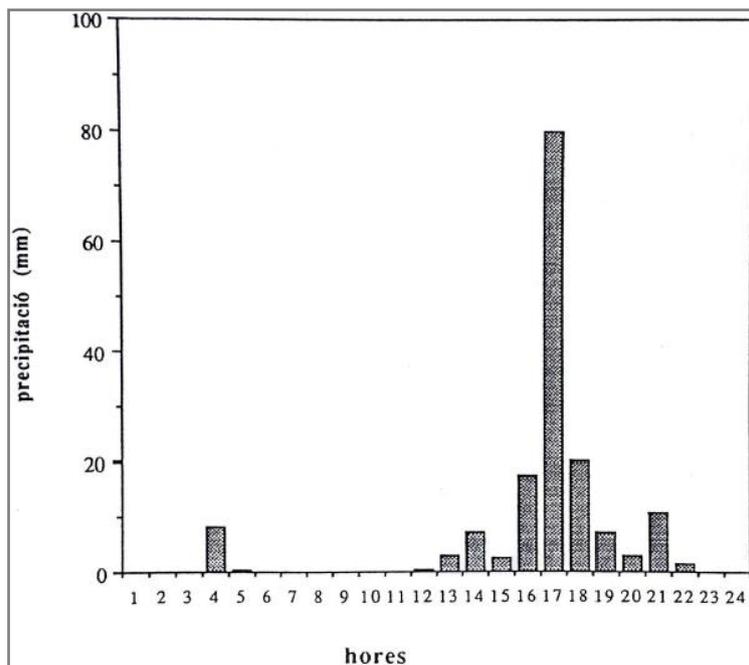
La información corresponde al episodio de inundación de la vertiente de Alcúdia, donde se encuentra inmersa la municipalidad de Sa Pobla (Figura 19). Este fenómeno se presentó debido a las precipitaciones del 7 al 11 de octubre de 1990, considerándose los días 8 y 9 de mayor afección a la zona poblada. La obtención del caudal punta de este fenómeno, se realizó

mediante métodos geomorfológicos y mediante formulación empírica se llegó a valores numéricos.



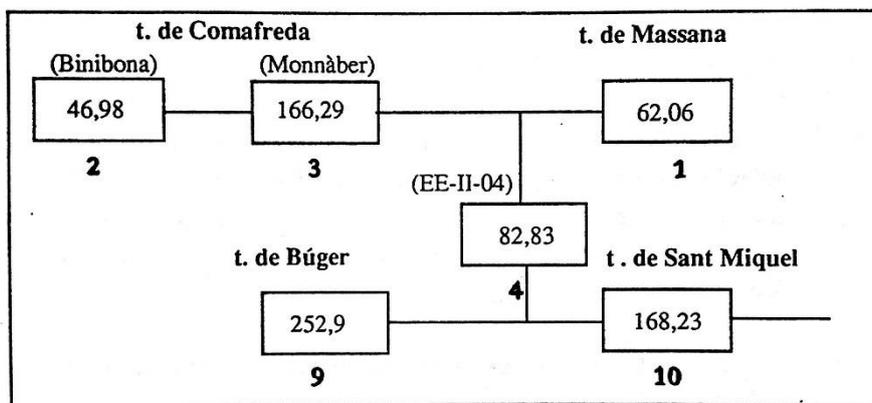
**Figura 19: Puntos de estudio para la obtención de caudales punta de la precipitación de octubre de 1990 (Gelabert Grimalt, et al., 1991).**

Además, se cuenta con el hietograma registrado en la base del puerto de Pollença el día 8 de octubre de 1990 (Figura 20), utilizado como orientación para interpretar el fenómeno convectivo de la lluvia que se puntualizó durante un tiempo de 3 horas, sobrepasando los 117 mm (Gelabert Grimalt, et al., 1991).



**Figura 20: Distribución horaria de las precipitaciones del 8 de octubre de 1990 en puerto de Pollença (Gelabert Grimalt, et al., 1991).**

El evento utilizado para la calibración del modelo hidráulico es del 8 de octubre de 1990, que cuenta con información de diversos caudales punta analizados en la cuenca vertiente de Sant Miquel (Figura 21). La información del evento ha sido registrada en diversos puntos de la cuenca mediante fichas tipo como la que se observa en la Figura 22, resultado de la aplicación de la citada metodología geomorfológica. En la que podemos observar, además, el valor de la velocidad, así como la sección mojada.



**Figura 21: Esquema de caudales punta analizados en la vertiente de Sant Miquel mediante métodos geomorfológicos (Gelabert Grimalt, et al., 1991).**

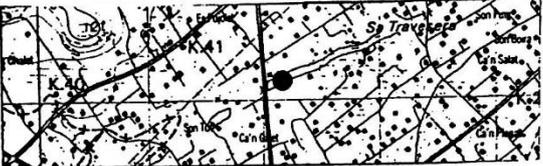
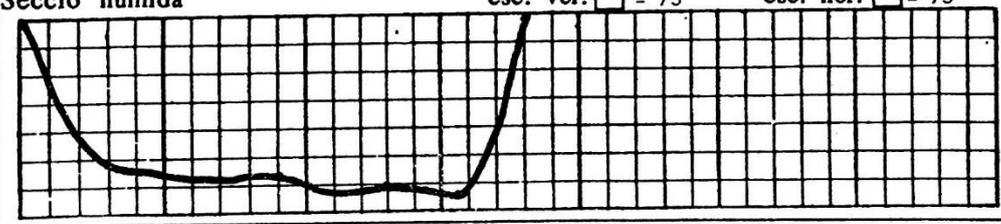
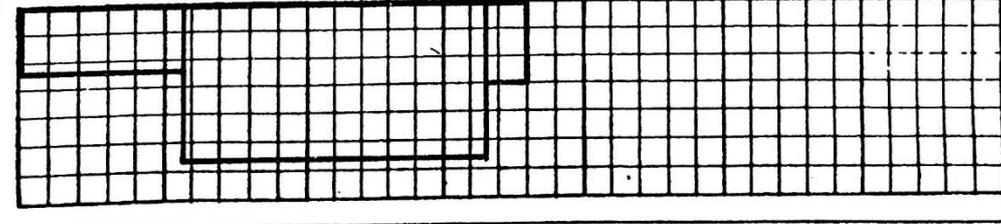
	Universitat de les Illes Balears Departament de Ciències de la Terra	<b>AFORAMENT DE CABAL MAXIM</b>
<b>Nº</b> ALCUDIA 90-10 <b>Data</b> / X / 90 <b>Vel. c.</b> 3'45 m/s <b>Secció</b> 45'2 m <sup>2</sup> <b>Cabal</b> 168'2 m <sup>3</sup> /s		
<b>Nom del torrent</b> T. de Sant Miquel		
<b>Localització</b> 100 m. aigües avall de la carretera de Sa Pobla-Pollença		
<b>Mapa de situació</b>		<b>U.T.M.</b> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 80px; margin: 2px;">502'0</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 80px; margin: 2px;">4404'2</div>
<b>Qualitat</b> bona, nivells ben marcats, presència de còdols		
<b>Secció humida</b> <div style="float: right; margin-right: 50px;">         esc. ver. <input type="checkbox"/> = 75       </div> <div style="float: right;">         esc. hor. <input type="checkbox"/> = 75       </div> 		
<b>∅ còdols (cm):</b> /54 / 36 /34 / / / / / / / / / <b>∅ promig (cm):</b> 41		
<b>Seccions homogènies</b> <div style="float: right; margin-right: 50px;">         esc. ver. <input type="checkbox"/> = 75       </div> <div style="float: right;">         esc. hor. <input type="checkbox"/> = 75       </div> 		
<b>Observacions</b> <p>El torrent va funcionar fins al límit del caixer sense desbordar-se. Uns centenars de metres aigües amunt si havia sobreixit els marges i anegat terres properes. Punt amb abocament de fems que poden entorpir el pas del corrent. Uns centenars de metres passat aquest punt el torrent comença a córrer entre malecons.</p>		

Figura 22: Ficha de levantamiento de información para analizar caudales punta del evento del 8 de octubre de 1990, mediante métodos geomorfológicos (Gelabert Grimalt, et al., 1991).

Además, para efecto de la calibración del modelo hidráulico, se considera un análisis tanto cuantitativo (caudales, niveles y velocidades del flujo) como cualitativo (en base a las observaciones de campo) del evento de inundación del 8 de octubre de 1990, que permite considerar el comportamiento de los torrentes Sant Miquel y Búger durante el episodio de precipitaciones en la llanura de inundación.

Según Gelabert Grimalt, *et al.* (1991), durante los días 8 y 9, las precipitaciones fueron muy importantes, superando los 100 mm, superando también los máximos de precipitación en 24 horas estadísticamente esperables para un periodo de retorno de 25 años. En las estaciones situadas aguas arriba del torrente Sant Miquel, se registran caudales mayores al de la propia estación 4 (EE-II-04 con 82.83 m<sup>3</sup>/s, Figura 21), debido a que la llanura de inundación es muy extensa y por lo tanto no toda el agua pasa por la estación de aforo.

Ya dentro de la zona modelada, cerca de la confluencia del torrente de Búger con el de Sant Miquel (al norte de la localidad de Sa Pobla), existe un abanico aluvial activo donde se pueden desarrollar temporalmente canales de inundación con caudales considerables.

En el abanico que forma el torrente de Búger al entrar en la depresión de Sa Pobla, su cauce principal ha ido migrando hacia la parte norte del mismo, con un cambio brusco de dirección observable que tiene el torrente en planta al atravesar esta zona.

En situaciones de avenida o crecida, el cauce no tiene la capacidad suficiente y el agua desborda originando una serie de canales esporádicos que en condiciones naturales aparecen poco definidos debido al intenso aterramiento del sector. Uno de estos canales, potencialmente el más peligroso, es el que constituye el eje central del abanico y sigue aproximadamente el recorrido de la carretera de Búger hacia Sa Pobla, apuntando directamente al área urbana de Sa Pobla, siendo La Calle *Major* la vía de paso entre el espacio urbano.

Sa Pobla se encuentra en el centro del abanico, debido a su altitud ligeramente mayor que su entorno. Esto se evidencia durante las inundaciones de octubre de 1990, en la que el agua desbordada desde el torrente de Búger hacia Sa Pobla se desorganizó antes de entrar a la zona

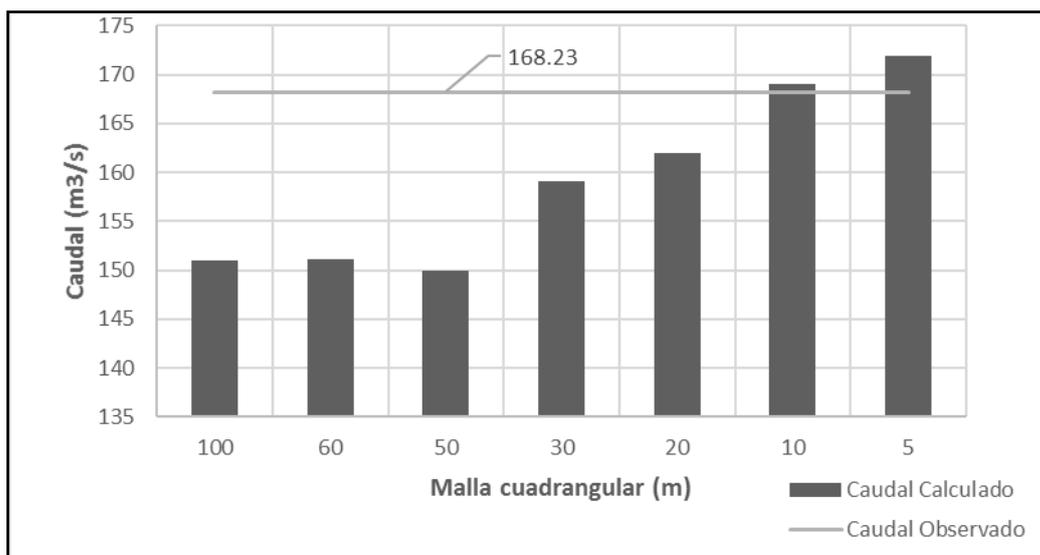
poblada proveniente del viario urbano, siendo los daños menores de los que se hubieran podido producir.

De esta manera las pérdidas de caudal punta que tuvo el Torrente de Búger son evidentes al evaluar los datos de las estaciones de aforo. De los 252.9 m<sup>3</sup>/s que se registraron aguas arriba del abanico aluvial (T. de Búger), sólo 168.2 m<sup>3</sup>/s se registraron en Sa Pobla Pollença (aguas abajo) (Figura 21), considerando además que en este punto ya se había recibido las aportaciones por la margen izquierda del torrente de Sant Miquel.

### **Dimensión de la malla geométrica**

Uno de los parámetros a calibrar en la elaboración de un modelo numérico es el tamaño de celda o de malla. Un tamaño demasiado grande implica una pérdida de precisión en los resultados, mientras que un tamaño demasiado pequeño lleva a tiempos de cálculo prohibitivos. Para definir un tamaño adecuado de malla dentro de la geometría en el modelo hidráulico, se implementan diferentes dimensiones cuadrangulares (100x100, 60x60, 50x50, 30x30, 20x20, 10x10 y 5x5 metros) y entre ellas se compara el tiempo de cálculo que toma la simulación con iguales condiciones hidráulicas (8 de octubre de 1990), hidrológicas y rugosidad de la cuenca; y los valores simulados en la sección de control con la inundación del 8 de octubre de 1990.

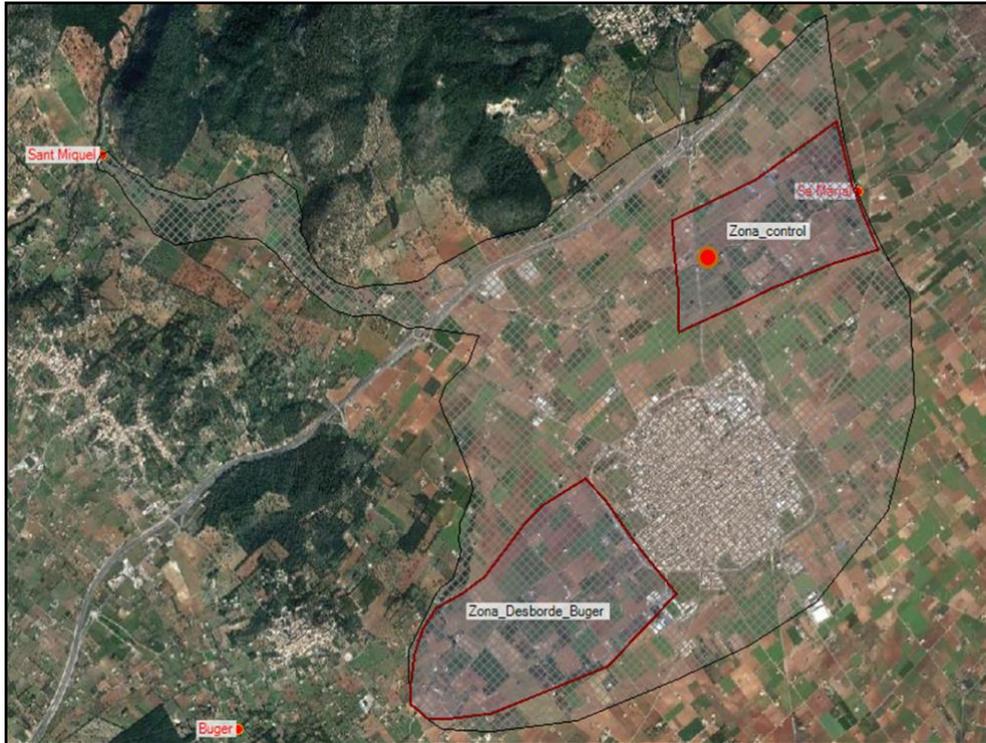
De esta manera se puede ver en la Figura 23, cómo varía el caudal punta dentro de la simulación para los diferentes tamaños de malla empleados y su respectivo error con relación al caudal punta observado en el episodio de inundación del 8 de octubre de 1990, cuyo valor es de 168.23 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 23: Análisis del tamaño de malla con relación al caudal observado en la inundación del 8 de octubre de 1990.**

En general, mientras más pequeña es la malla de cálculo, se realiza una mejor aproximación al comportamiento del flujo dentro del cauce y llanuras de inundación, pero con un alto coste de tiempo computacional. Además, teniendo en cuenta el análisis anterior, que muestra la variabilidad del resultado para el caudal calculado en la sección de control, resulta adecuado modelar el área de estudio mediante una malla híbrida, que contiene un tamaño general de 20x20 metros, y en zonas de interés para la simulación del caudal observado (zona de control) y donde se produce desbordamiento del cauce (Zona desborde Búger), 10x10 y 5x5 metros respectivamente (Figura 24).

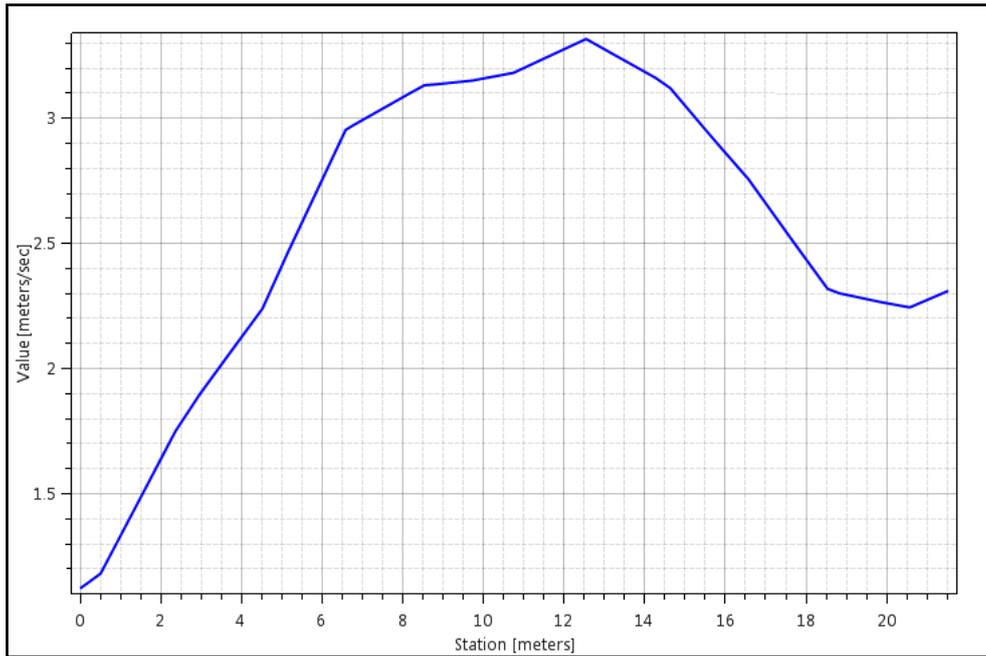
Cabe indicar que mediante este mallado se ha conseguido representar el caudal acontecido en la inundación histórica ocurrida en Sa Pobra debido a las precipitaciones del 7 al 12 de octubre de 1990. Llegando a obtener una aproximación con una desviación de 1.65 m³/s del caudal simulado con respecto al observado.



**Figura 24: Malla híbrida empleada para la simulación hidráulica bidimensional, dimensiones 20x20, 10x10 y 5x5 metros.**

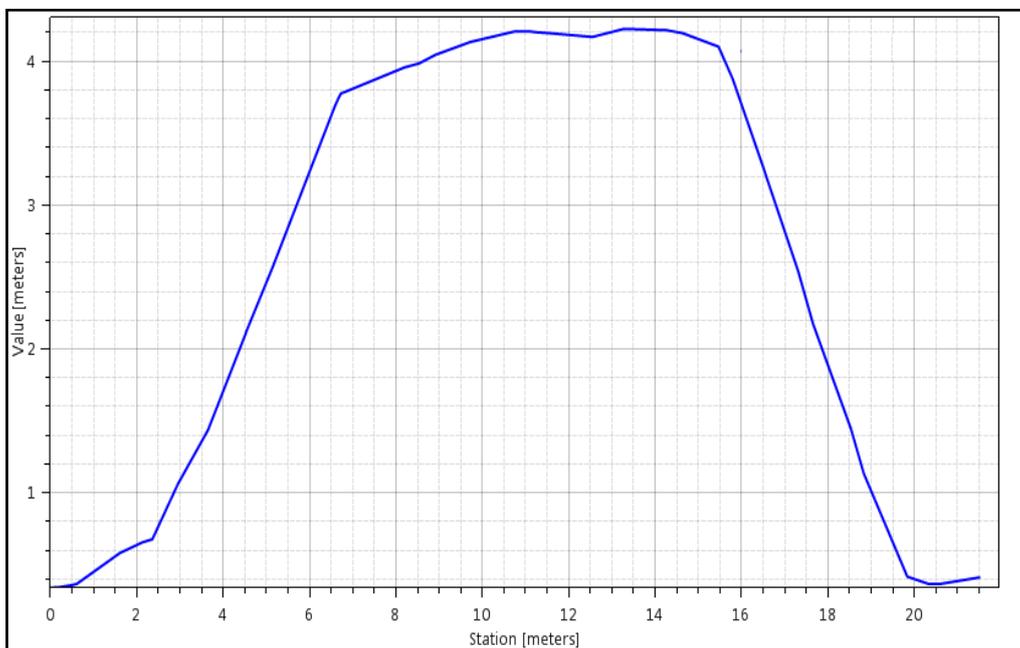
A continuación, se procede a comparar los resultados de la simulación de la inundación del 8 de octubre de 1990 con la información cualitativa y cuantitativa tomada de este evento de inundación.

Se ha comprobado anteriormente que se obtiene una muy buena aproximación del caudal punta ( $166.58 \text{ m}^3/\text{s}$ ) que pasa por la sección de control con respecto al estimado que se observa en la Figura 22 ( $168.23 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Por otra parte, también se dispone de datos de velocidad y calado (extraídos también de la ficha de la Figura 22). La velocidad en la sección de control que se obtiene del modelo hidráulico se presenta en la Figura 25. Se observan picos de  $3.32 \text{ m/s}$ . Por otra parte, la velocidad estimada durante el evento por Gelabert Grimalt, et al. (1991) es de  $3.45 \text{ m/s}$ . Por tanto, los resultados de velocidad son totalmente coherentes con los estimados en campo.



**Figura 25: Velocidad media de la sección de control simulada del evento 8 de octubre de 1990.**

En cuanto al calado, el obtenido mediante simulación de la sección de control (Figura 26) está de media en torno a los 4 m, lo que queda dentro de la horquilla de 3.60 y 4.75 metros de altura (mínimo y máximo) de agua en la sección de referencia aforada (Figura 22).



**Figura 26: Calado de agua de la sección de control simulada del evento 8 de octubre de 1990.**

Con los valores de las variables hidráulicas obtenidas en el modelo, la tensión promedio ejercida por el flujo según la formulación habitual en la hidráulica fluvial es de aproximadamente  $85 \text{ N/m}^2$ , lo que nos indica que no movilizaría ninguno de los tamaños característicos de los sedimentos hallados en la sección (54, 36, 34 cm) (Figura 22). Por tanto, es coherente también que se observara la presencia de estos tamaños en dicha sección.

En cuanto al comportamiento cualitativo del desbordamiento del torrente Búger, el modelo se asemeja a lo descrito dentro del evento histórico utilizado para la calibración, como se puede observar en la secuencia (1 a 4) de la Figura 27, el flujo desbordado del torrente de Búger toma como canal la vía que va desde Búger (población) hacia Sa Pobla.

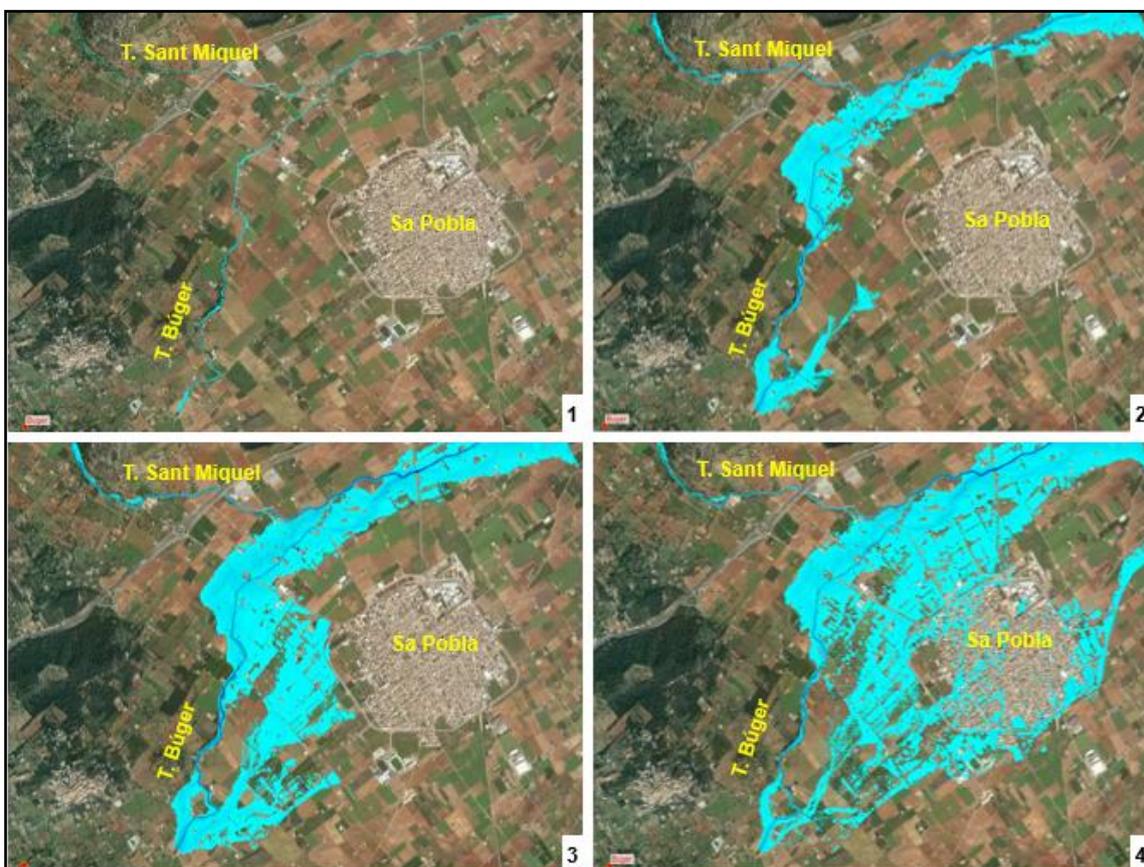


Figura 27: Secuencia de desbordamiento del torrente Búger simulado del evento 8 de octubre de 1990.

Si bien es cierto que sólo se dispone de un evento para calibrar el modelo hidráulico, hemos tenido muchas variables y parámetros de contraste donde se puede ver que el modelo funciona bien, es decir el modelo hidráulico cuadra con todos los aspectos que relaciona las

tensiones críticas, calados, velocidad, y la forma cualitativa que sigue el curso descrito para los flujos desbordado Cabe recalcar que, en muchos casos, ni siquiera se dispone de esta información, y se han de realizar análisis de sensibilidad como medio de estimación de los posibles errores cometidos.

## 6. ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD DE INUNDACIÓN

### 6.1 Criterios para determinar la peligrosidad de inundación en las Islas Baleares.

A partir de los relatos, datos y análisis de eventos históricos de inundación acontecidos en Sa Pobla, se ha realizado la calibración del modelo hidráulico bidimensional en el programa de HEC-RAS. Por tanto, este modelo puede emplearse ahora para analizar la peligrosidad de inundación en la zona de estudio, frente a otras condiciones de contorno (caudales asociados a diferentes periodos de retorno).

Además, según lo dispuesto por la Demarcación Hidrográfica de Baleares con apoyo de los artículos 8, 9 y 10 del R.D. 930/2010, establece que los mapas de peligrosidad comprenden la delimitación gráfica de la superficie inundada por el agua, cuya ocurrencia de avenidas corresponde a periodos de retorno de 10, 100 y 500 años, que representan una alta, media y baja peligrosidad de inundación respectivamente (Getinsa-Payma, 2016).

### 6.2 Hidrogramas de avenida para T = 10, 100 y 500 años

A continuación, se presenta en la Tabla 6 los hidrogramas para los periodos de retorno establecidos por la Demarcación Hidrográfica Balear que permite analizar la peligrosidad de inundación del municipio de Sa Pobla.

Estos hidrogramas han sido obtenidos a partir de los caudales pico asociados a los diferentes periodos de retorno considerados. Estos caudales pico son el resultado de un estudio hidrológico realizado por la Universidad de las Islas Baleares, basado en la aplicación del método racional a las dos subcuencas de los torrentes de objeto de estudio. A continuación, se describe brevemente dicho estudio y los resultados de este.

La formulación principal del método racional es:

$$Q = \frac{C * I * A}{3.6} * K \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde **Q** es el caudal punta correspondiente a un periodo de retorno dado, en m<sup>3</sup>/s, **C** es el coeficiente de escorrentía de la cuenca, **I** es la intensidad máxima media en el intervalo de duración **T<sub>c</sub>**, para el mismo periodo de retorno, en mm/h (que puede obtenerse a partir de los cuantiles de precipitación de ese mismo periodo de retorno), **A** es la superficie de la cuenca en km<sup>2</sup>, y **K** es un coeficiente de uniformidad, que corrige el error introducido al considerar que la escorrentía se reparte uniformemente durante el tiempo de concentración.

El Consell de Mallorca tiene publicados en su página web unos mapas de la isla de isoyetas máximas diarias para diferentes periodos de retorno realizados por la Dirección General de Recursos Hídricos de Baleares (DGRH). A partir de estos mapas, se han estimado los cuantiles de precipitación asociados a los periodos de retorno de 10, 100 y 500 años.

El umbral de escorrentía **P<sub>0</sub>** (a partir del cual puede calcularse el coeficiente de escorrentía de la cuenca) se ha estimado a partir de los usos del suelo y pendientes del terreno, asumiendo unas condiciones previas de humedad antecedente secas (como corresponde a los climas mediterráneos), y las características geométricas de las cuencas se han obtenidos a partir de los MDT de 25 x 25 metros del IGN.

Para los torrentes de San Miguel y de Búger, los principales resultados de este estudio se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados del cálculo para hidrogramas con periodo de retorno 10, 100 y 500 años.

Torrente	Área	Longitud	Pendiente media	PO corregido	Tc	K
	km2	Km	m/m		h	
Sant Miquel	52.4	13.12	0.099	66	3.3	1.24
Búger	68.7	20.67	0.063	55	5.1	1.35

	Torrente de Sant Miquel			Torrente de Búger		
	T = 10	T = 100	T = 500	T = 10	T = 100	T = 500
Pd (mm)	150	250	300	150	250	300
C	0.18	0.34	0.4	0.24	0.4	0.47
Q (m3/s)	82.9	258.4	367.0	95.5	272.8	379.2

Como input del modelo numérico, se ha empleado la teoría del hidrograma unitario de Témez (1987), para construir los hidrogramas de avenida, en base al caudal pico asociado a cada periodo de retorno, y al tiempo de concentración de cada una de las cuencas.

De esta manera, siendo  $T_c$  el tiempo de concentración,  $D$  la duración de la lluvia neta,  $T_{dp}$  el tiempo de desfase de la punta, y  $T_b$  la duración total del hidrograma, las ecuaciones que definen estos hidrogramas son las siguientes:

$$D = 0.2 * T_c \quad (\text{Ec. 6})$$

$$T_{dp} = 0.35 * T_c \quad (\text{Ec. 7})$$

$$T_b = T_c + D \quad (\text{Ec. 8})$$

Los hidrogramas resultantes se sintetizan en la siguiente tabla.

**Tabla 6: Hidrogramas para los torrentes de Sant Miquel y Búger con periodos de retorno establecido por la Demarcación Hidrográfica Balear.**

Tiempo		Caudal (m <sup>3</sup> /s)					
		T = 10 años		T = 100 años		T = 500 años	
hora	min	Sant Miquel	Búger	Sant Miquel	Búger	Sant Miquel	Búger
0	0	0	0	0	0	0	0
	30	27.6	23.9	86.1	68.2	122.3	94.8
1	60	55.3	47.8	172.3	136.4	244.7	189.6
	90	82.9	71.6	258.4	204.6	367.0	284.4
2	120	66.3	95.5	206.7	272.8	293.6	379.2
	150	49.7	83.6	155.0	238.7	220.2	331.8
3	180	33.2	71.6	103.4	204.6	146.8	284.4
	210	16.6	59.7	51.7	170.5	73.4	237.0
4	240	0	47.8	0	136.4	0	189.6
	270	0	35.8	0	102.3	0	142.2
5	300	0	23.9	0	68.2	0	94.8
	330	0	11.9	0	34.1	0	47.4
6	360	0	0	0	0	0	0
	390	0	0	0	0	0	0

Se han llevado a cabo tres simulaciones para cada uno de los periodos de retorno considerados, de una duración total de 12 horas (superior a dos veces el tiempo de concentración de la cuenca mayor), y se han extraído los resultados de calados y velocidades máximas en la zona de estudio para cada uno de ellos.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la ayuda del modelo hidráulico bidimensional en HEC-RAS (versión 5.0.5), calibrado de acuerdo con las reseñas históricas y análisis de inundación originadas dentro de la cuenca de Sant Miquel, se obtienen mapas de peligrosidad para los periodos de retorno determinados por la Demarcación Hidrográfica Balear de 10, 100 y 500 años; cabe indicar que sería importante disponer de más información histórica para poder validar el modelo.

A continuación, se presenta los resultados de calados y velocidades máximas para el área de estudio, con relación a los periodos de retorno establecidos 10, 100 y 500 años.

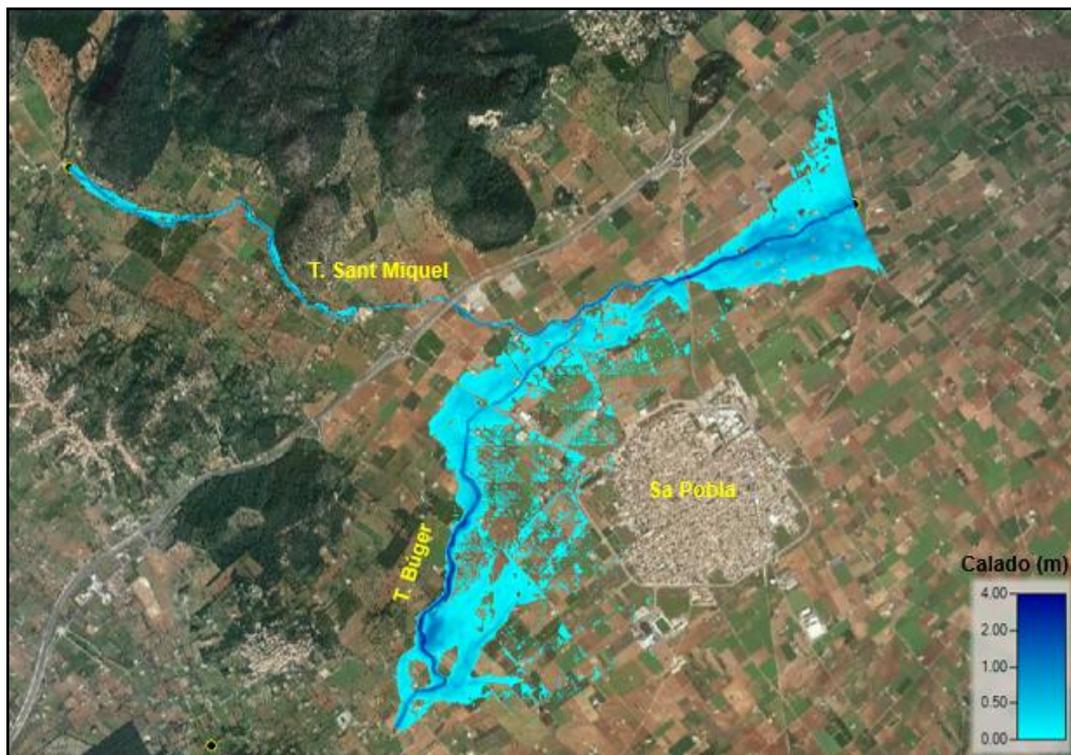


Figura 28: Altura del nivel de agua (calado) simulada para periodo de retorno de 10 años.

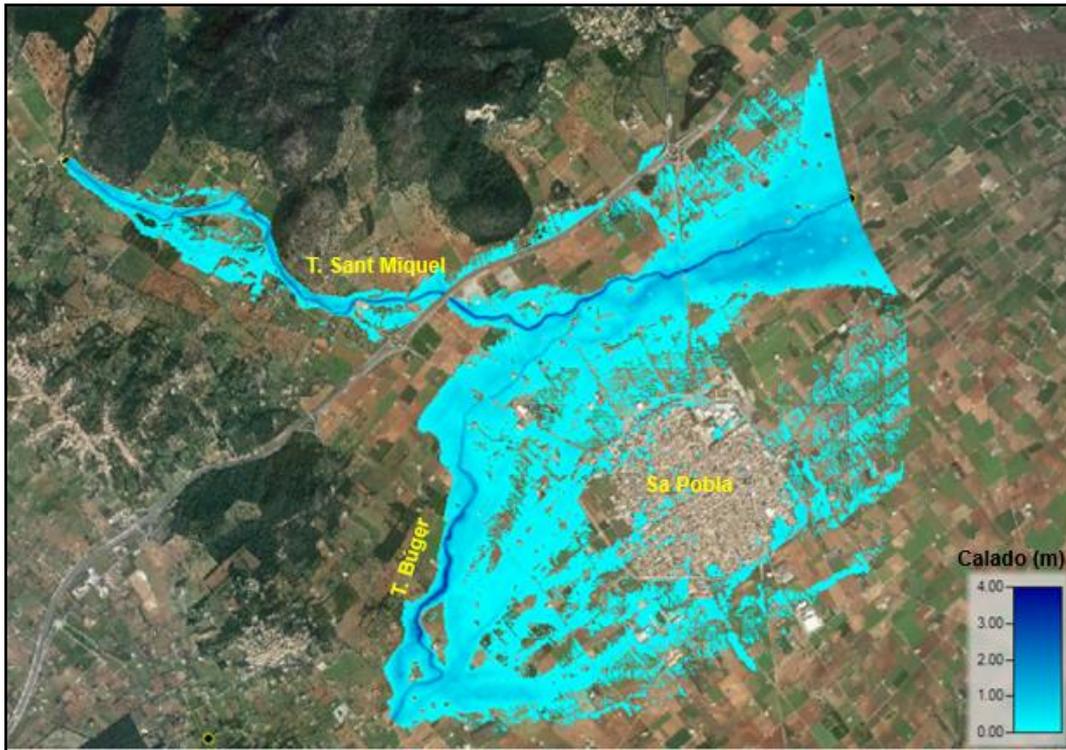


Figura 29: Altura del nivel de agua (calado) simulada para periodo de retorno de 100 años.

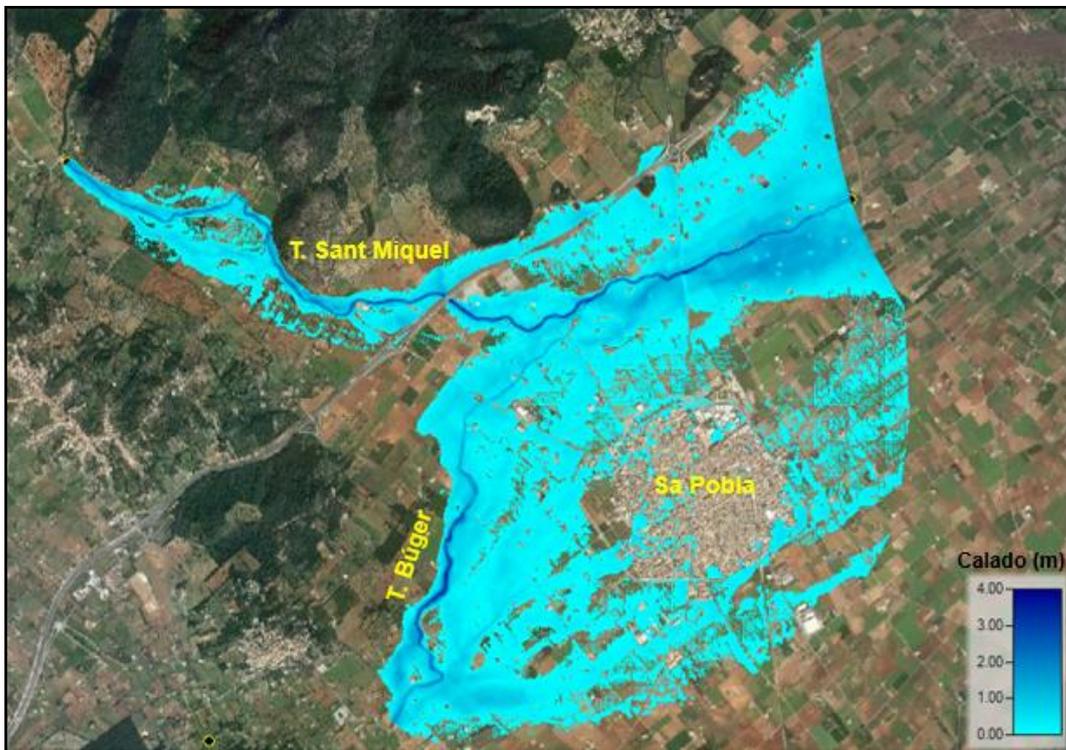


Figura 30: Altura del nivel de agua (calado) simulada para periodo de retorno de 500 años.

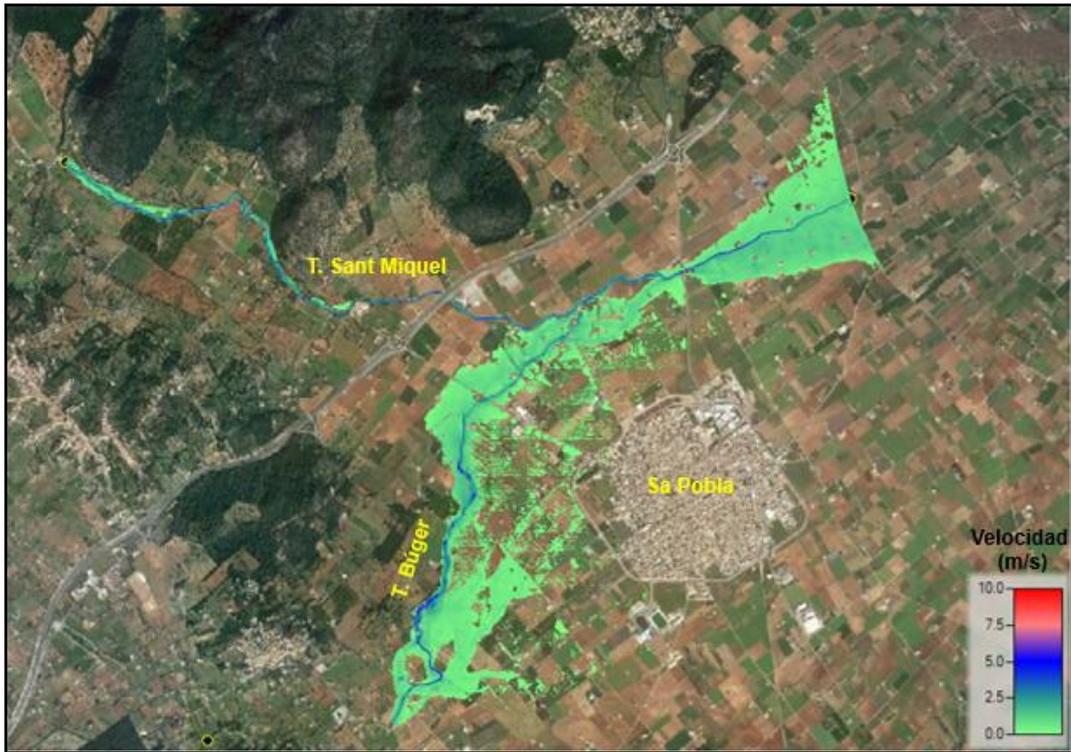


Figura 31: Velocidad de agua simulada para periodos de retorno de 10 años.

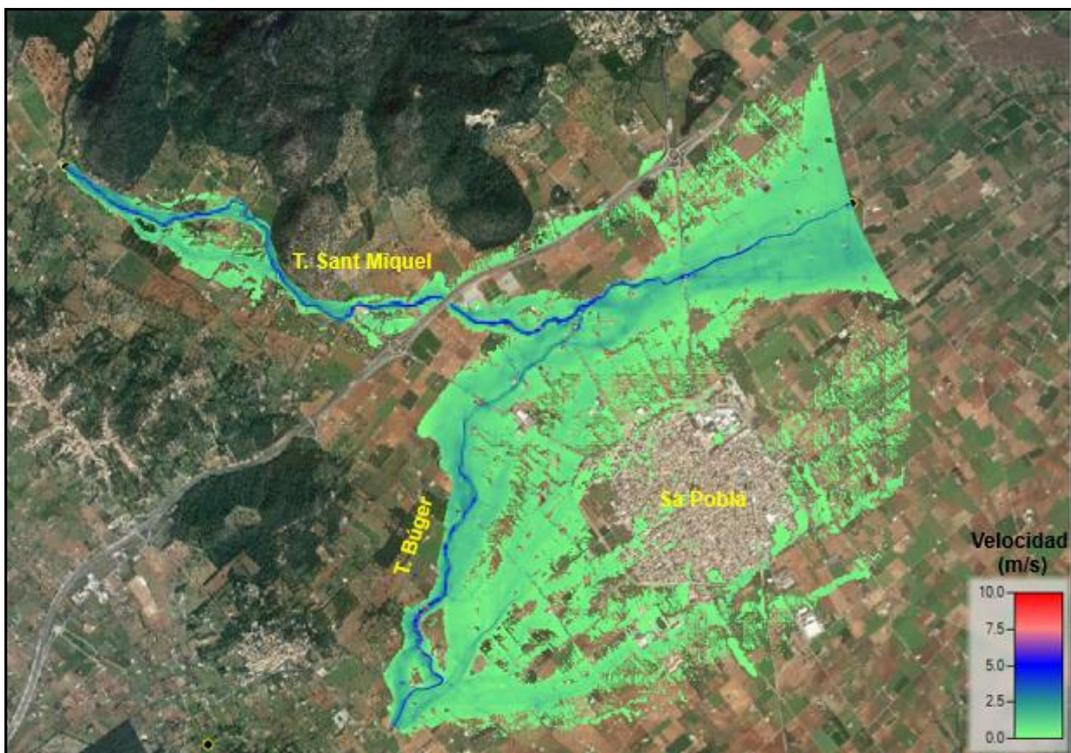
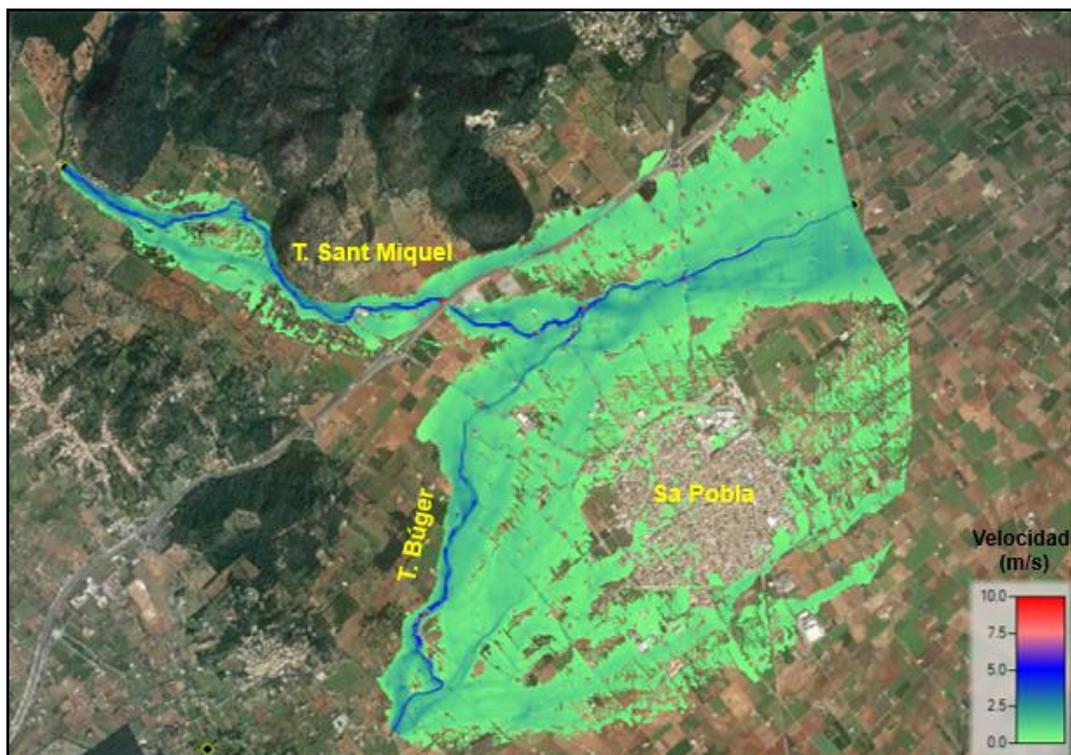


Figura 32: Velocidad de agua simulada para periodos de retorno de 100 años.



**Figura 33: Velocidad de agua simulada para periodos de retorno de 500 años.**

Dado que no existe para las Islas Baleares una normativa o una caracterización más precisa para analizar la peligrosidad de inundación (en los mapas oficiales “MAPES DE PERILLOSITAT I DE RISC D'INUNDACIÓ D'acord AMB EL REAL DECRET 903/2010 PER A LA DEMARCACIÓ HIDROGRÀFICA DELS ILLES BALEARS I PLA DE GESTIÓ DEL RISC D'INUNDACIÓ” solo se indica la extensión de la lámina libre para los periodos de retorno considerado, y la Zona de Flujo Preferente) se ha considerado oportuno proponer una clasificación en base a los periodos de retorno que considera la normativa de las Islas Baleares, y criterios en función del valor del calado máximo, tomando como referencia de calado umbral, la utilizada en el PATRICOVA (Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana) (Ver Tabla 7).

En el ámbito de la Comunidad Valenciana, la normativa del PATRICOVA determina la peligrosidad de inundación mediante la evaluación de frecuencia o probabilidad de ocurrencia de eventos de precipitación y la magnitud del calado hidráulico mediante 6 condiciones. Dentro de este criterio no se considera inundación para calados menores o igual a 15 centímetros (GENERALITAT VALENCIANA, 2015).

Unificando estos criterios con el afán de analizar la peligrosidad de inundación dentro de la municipalidad de Sa Pobra se propone como resultado la clasificación que se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7: Clasificación en base a criterios de la Demarcación Hidrológica Balear y PATRICOVA. para determinar la peligrosidad de inundación.**

<b>Nivel</b>	<b>Frecuencia (año)</b>	<b>Calado (m)</b>	<b>Peligrosidad</b>
P1	T = 10	$y > 0.8$	Alta
P2	T = 100	$y > 0.8$	
P3	T = 10	$y < 0.8$	Media
P4	T = 100	$y < 0.8$	
P5	T = 500	$y > 0.8$	Baja
P6	T = 500	$y < 0.8$	

La frecuencia de ocurrencia del evento y la peligrosidad se consideró de acuerdo con el criterio de la Demarcación Hidrográfica Balear, mientras que el nivel y la condición de calado por parte del PATRICOVA. Mediante este análisis se determina la peligrosidad de inundación, presentando los resultados en el apartado de Anexos.

Estas representaciones de peligrosidad de inundación a más de los criterios considerados contienen variables como: superficie inundada y la distribución de velocidades dentro del área anegada por el desbordamiento de los torrentes Sant Miguel y Búger sobre la municipalidad de Sa Pobra.

## 8. CONCLUSIONES

Para los estudios y análisis de inundación, el manejo y empleo del software HEC-RAS, en su versión 5.0.5, resulta muy práctico y versátil por la interfaz que maneja, lo que permite trabajar de una manera clara y precisa dentro de los aspectos topográficos, hidráulicos y estructurales a simularse en una cuenca hidrográfica.

La utilización de los sistemas SIG, hoy en día son importantes y adecuados para ser empleados en diferentes estudios, en este caso de análisis de inundación se optó por un modelo digital de terreno de 2x2 metros de resolución resultando apropiado para este análisis a mayor detalle para la construcción de la topografía.

Para los estudios de inundación, donde se emplea grandes superficies de terreno, es importante considerar el coste de tiempo computacional para su proceso, por ello conocer a priori el alcance de la superficie de agua sobre la cuenca de drenaje, ayuda a optimizar el trazado del área geométrica, siendo apropiado para los análisis de modelos hidráulicos.

De acuerdo con el tamaño del MDT seleccionado en este estudio, discretizar el área de trabajo mediante un mallado pequeño (10x10 o 5x5 metros), implica mayor tiempo computacional y una buena forma de representar el comportamiento del flujo en la superficie. Por su parte para mallas de mayor tamaño (20x20, 50x50, 100x100 metros) el flujo no se visualiza dentro de su comportamiento natural, pero los tiempos de cálculo son más cortos. De esta manera, la versatilidad de modificar la malla dentro del modelo en la versión utilizada de HEC-RAS, permite crear mallas de cálculo de tipo híbridas para optimizar el tiempo de modelación del fenómeno de inundación y lograr una mejor precisión en la simulación del flujo.

Conocer la cuenca hidrográfica, los torrentes y demás aspectos que caracterizan el sitio de estudio, facilitan a la hora de tomar criterios técnicos y computacionales en base a la simulación hidráulica bidimensional, permitiendo construir, calibrar y validar el modelo matemático desde un punto de vista técnico y objetivo.

Contar con información de los eventos históricos de inundaciones es sin duda un antecedente muy importante para conocer la evolución y el periodo de retorno de estos fenómenos, con

el objetivo de mitigar los daños que producen las inundaciones causadas en cada evento de precipitación torrencial en la cuenca de Sant Miquel.

La existencia y registros de estaciones de aforo en cauces o torrentes fluviales ayuda a disminuir la extensión de estudio y a su vez implementar zonas de control para el análisis de los resultados del modelo, comparado con los observados en el medio natural. Sant Miquel y Búger cuentan con datos de estaciones que se han analizado y que ha permitido calibrar el modelo hidráulico para conocer más a fondo los procesos de inundación efectuados en el municipio de Sa Pobla.

Homogenizar criterios para determinar la peligrosidad de inundación de una zona poblada es importante ya que permite considerar diversos puntos de vista y análisis para un territorio donde se producen fenómenos de inundación.

La representación de la peligrosidad de inundación mediante mapas es útil para el ordenamiento y desarrollo de una población o en general para una cuenca hidrográfica, con la finalidad de evitar afecciones económicas, ambientales y sociales.

En fenómenos de inundación, considerar el nivel al que llega el agua, la velocidad y su alcance en superficie para los diferentes periodos de retorno permite establecer con mayor facilidad criterios técnicos para determinar asentamientos de zonas urbanas, industriales, agrícolas, o a su vez vías de evacuación dentro de los planes de emergencia para estos fenómenos.

El modelo obtenido en el estudio permite analizar diferentes escenarios con respecto a los cambios que se puedan producir dentro de la cuenca hidrográfica como es el uso del suelo, la incorporación de estructuras dentro de los cauces fluviales o estructuras de protección frente a las inundaciones.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Ayuntamiento de Sa Pobra. (Noviembre de 2003). SA POBLA. LA GENT, EL MEDI, LA HISTÒRIA. (M. Canyelles, M. Pujals, S. Ripoll, & A. Seguí, Edits.) Sa Pobra, Islas Baleares, España.
- Bladé, E., & Gomez, M. (2006). *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones*. Barcelona.
- Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient i Territori Direcció General de Recursos Hídrics. (2018). *Evaluación preliminar del riesgo de inundación en la demarcación de Baleares*. Memoria, EBAP (Escola Balear d'Administració Pública, Mallorca).
- Díez Herrero, A. (2002). Condicionantes geomorfológicos de las avenidas y cálculo de caudales y calados. En *Riesgos Naturales* (págs. 921-952). Barcelona: Ariel, Ariel Ciencia.
- Díez Herrero, A., Laín Huerta, L., & Llorente Isidro, M. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Madrid, España.
- Díez Herrero, A., Llorente Isidro, M., Ballesteros, J. A., & Ruiz, V. (2009). Riesgos por avenidas e inundaciones fluviales. En A. Díez Herrero, M. Llorente Isidro, J. A. Ballesteros, & V. Ruiz, *Enseñanza De Las Ciencias De La Tierra* (págs. 254-263). Madrid: Enseñanza De Las Ciencias De La Tierra.
- Gelabert Grimalt, M., Rodriguez Perea, A., & Rodríguez Gomila, R. (1991). *ANÀLISI DE LES INUNDACIONES DE 1990 AL VESSANT D'ALCÚDIA*. GOVERN BALEAR CONSELLERIA d'O.P. i O.T. DIR. GRAL.d'OBRES PUBLIQUES, DEPARTAMENT HIDRÀULIC ; Universitat de les Illes Balears Dept. Ciències de la Terra.
- GENERALITAT VALENCIANA. (Octubre de 2015). PLAN DE ACCIÓN TERRITORIAL SOBRE PREVENCIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN EN LA COMUNIDAD VALENCIANA. 36.
- Getinsa-Payma. (2016). *MAPAS DE PELIGROSIDAD Y RIESGO DE INUNDACIÓN EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE BALEARES*. Memoria.
- Gómez Valentín, M., Sánchez-Juny, M., Bladé, E., Niñerola, D., & Sánchez, H. (2009). *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable: Una visión a partir del modelo HEC-RAS*. Barcelona.
- Govern de les Illes Balears. (15 de abril de 2016). [www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es). Obtenido de Plan de gestión del riesgo de inundación de la Demarcación Hidrográfica de las Islas Baleares: [http://www.caib.es/sites/aigua/es/plan\\_de\\_gestion\\_del\\_riesgo\\_de\\_inundacion\\_de\\_la\\_demarcacion\\_hidrografica\\_de\\_las\\_islas\\_baleares/](http://www.caib.es/sites/aigua/es/plan_de_gestion_del_riesgo_de_inundacion_de_la_demarcacion_hidrografica_de_las_islas_baleares/)

- Illes Balears. (2018). *La Flora y la Fauna en las islas Baleares*. Obtenido de Illes Balears: <https://www.illesbalears.travel/articulo/es/illesbalears/la-flora-y-la-fauna-en-las-islas-baleares>
- Instituto geográfico nacional. (2018). Sistema de monitoreo. Obtenido de <http://signa.ign.es/signa/Pege.aspx?>
- Instituto Nacional de Estadística. (2018). *Cifras oficiales de población resultantes de la revisión del Padrón municipal a 1 de enero*. Obtenido de INE: <http://www.ine.es/dynt3/inebase/index.htm?padre=525>
- López Sardá, L. (2018). Concepto de Restauración Hidrológico Forestal. Valencia, Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- López Sardá, L. (2018). Ordenación y Restauración de Cuencas Torrenciales. *Hidrotecnias de corrección en cauces*. Valencia, Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Martín Vide, J. (2006). *Ingeniería de ríos* (Vol. 9). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- MEDhyCON. (2018). RESPUESTA GEOMORFOLÓGICA DE LA CUENCA DE SANT MIQUEL: APLICACIÓN DE MODELOS HIDRÁULICOS 2D (IBER). *PROPUESTA DE COLABORACIÓN DE MEDhyCON Y EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA Y OBRAS HIDRÁULICAS*. (L. d. MEDhyCON (Universitat de les Illes Balears), Ed.) Palma, Islas Baleares, España.
- Ministerio del Interior, Gobierno de España. (20 de 11 de 2013). *Inundaciones*. Obtenido de Dirección General de Protección Civil y Emergencias: <http://www.proteccioncivil.es>
- MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA. (sin fecha). MITECO, Gobierno de España . Obtenido de Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI): <https://sig.mapama.gob.es/snczi/>
- Moya Quiroga, V., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Aplicación de simulación numérica 2D para analizar la inundación de febrero de 2014 en la Amazonia Boliviana: aplicación del nuevo HEC-RAS versión 5. *RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua*, 3(1), 25-33.
- Moya Quiroga, V., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the february 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *RIBAGUA*, 3(1), 25-33.
- Nácher Rodríguez, B., & Vallés Morán, F. (2018). Tipos de modelos matemáticos. Valencia, Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

- Nácher Rodríguez, B., & Vallés Morán, F. (2018). Conceptos de modelación en régimen transitorio. Valencia, Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Riera Femenies, P., Roselló Geli, J., & Troya López, J. (2010). Fenómenos meteorológicos en Mallorca en las primeras décadas del S.XX a partir de publicaciones periódicas locales.
- Rocha Felices, A. (Febrero de 2003). Los modelos como herramienta valiosa para el diseño hidráulico. 18.
- Rodríguez, M. (2012). El modelado fluvial. Procesos de erosión, transporte y sedimentación fluvial. Formas resultantes. Riesgos de avenidas e inundación: medición, predicción y prevención. Los fenómenos de ladera. Riesgos asociados a estos fenómenos. En M. García Rodríguez, *El modelado fluvial. Procesos de erosión, transporte y sedimentación fluvial. Formas resultantes. Riesgos de avenidas e inundación: medición, predicción y prevención. Los fenómenos de ladera. Riesgos asociados a estos fenómenos* (pág. 23). doi:isbn: 978-84-92767-65-6
- Témez, J. (1987). Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. En D. G. MOPU.
- UNESCO. (2008). *Estrategias para el Control de los Fenómenos Torrenciales y la Ordenación Sustentable de las Aguas, Suelos y Bosques de las Cuencas de Montaña. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 13.*
- US Army Corps of Engineers. (2018). Hydrologic Engineering Center. USA. Obtenido de <http://www.hec.usace.army.mil>: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation.aspx>
- Ven Te Chow. (1994). *Hidráulica de canales abiertos.* (J. Saldarriaga, Trad.) McGraw-Hill.