

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería Civil

Análisis mediante métodos numéricos del flujo de escorrentía en situaciones de avenida por calles de elevadas pendientes en Alcalá de Guadaira

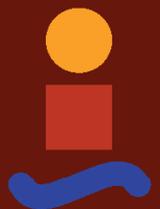
Autora: Maria Jesús Cabrera García

Tutores: Nicolás Gutiérrez Carmona

Antonio Ruiz Reina

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Análisis mediante métodos numéricos del flujo de escorrentía en situaciones de avenida por calles de elevadas pendientes en Alcalá de Guadaira

Autor:

Maria Jesús Cabrera García

Tutores:

Nicolás Gutiérrez Carmona

Antonio Ruiz Reina

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Carrera: Análisis mediante métodos numéricos del flujo de escorrentía en situaciones de avenida por calles de elevadas pendientes en Alcalá de Guadaira

Autor: Maria Jesús Cabrera García
Tutores: Nicolás Gutiérrez Carmona
Antonio Ruiz Reina

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mis padres

Agradecimientos

Agradecer en especial a Nicolás Gutiérrez Carmona por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto y por su confianza y apoyo durante todo el recorrido. A Antonio Ruiz Reina por descubrirme Iber y por su continua paciencia ante mis dudas con el software. A la Catedra del Agua de EMASESA por la acogida en su programa de prácticas y por darme la posibilidad de continuar desarrollando las líneas de investigación que abre este trabajo. Al Ayuntamiento de Alcalá de Guadaíra por toda la información facilitada. A mis padres, sin los que no habría llegado hasta aquí. Y no olvido a todas aquellas personas que me han acompañado durante estos años haciendo del paso por la escuela algo inolvidable.

Maria Jesús Cabrera García

Sevilla, 2018

Resumen

En el presente Trabajo de Fin de Grado se desarrolla un estudio del flujo superficial de escorrentía en calles de elevada pendiente en Alcalá de Guadaíra. En concreto el estudio se centra en la calle Nuestra Señora del Águila de la que se realiza un modelo bidimensional mediante el software Iber. Se llevan a cabo diversas simulaciones donde se analizan calados y velocidades ante distintas precipitaciones a fin de optimizar el sistema de captación mediante imbornales.

El documento está compuesto de seis apartados bien diferenciados. Comienza con una introducción donde se exponen el origen de este proyecto y los objetivos que se desarrollan. Continúa con una descripción de la problemática de la zona en estudio, definición de la cuenca urbana y caracterización de la calle que nos ocupa, Ntra. Sra. Del Águila y las calles que confluyen en ésta y que también serán consideradas en el modelo.

En el tercer apartado se desarrolla todo lo relacionado con el software Iber, su definición y todos los pasos y consideraciones realizadas para generar el modelo bidimensional y hacer posible su funcionamiento. Cuarto apartado, comienzan las simulaciones, se representará la respuesta de la calle con el sistema de imbornales actual ante una lluvia de un periodo de retorno de 25 años. Se explica su modelización en Iber y se realiza un análisis de los resultados obtenidos.

Quinto apartado, se lleva a cabo la verificación del modelo representando la avenida del 2 de Octubre de 2007. Precipitación histórica en Alcalá de Guadaíra, 60 l/m² en tan solo 20 minutos. El municipio se inundó causando innumerables daños materiales y cobrándose dos vidas humanas. Se realizan a su vez variantes de esta situación a fin de localizar la causa del problema y se simula que ocurría si tras las obras de mejoras de captación realizadas a posteriori del incidente, la construcción de un tanque de tormenta y aumento de las conducciones de saneamiento en diversas zonas, se volviera a producir el mismo evento de precipitación.

Se finaliza el proyecto con un apartado de conclusiones en el que se resumen todos los aspectos de relevancia analizados y observados durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado. A su vez se plantean soluciones y alternativas a fin de mejorar la captación, soluciones extrapolables a otras calles de alta pendiente. Cabe recordar que este trabajo es solo una parte de un amplio proyecto de estudio por lo que con él se abren diversas líneas en las continuar investigando en este mundo del drenaje superficial.

Abstract

The present End of Degree Project develops a study of the superficial flow in streets of high slope in Alcalá de Guadaíra. The study focuses on the street Nuestra Señora del Águila, of which a two-dimensional model is made using the Iber software. Several simulations with different precipitations are carried out and water depths and velocities are analyzed in order to optimize the gutter system.

This document is composed of six well-differentiated sections. It begins with an introduction that develops the origin of this project and the objectives of it. It continues with a description of the problem of the area under study, a definition of the urban basin and characterization of the street that occupies us, Ntra. Sra. Del Águila and the streets that converge in it, that will also be considered in the model.

The third section occupies everything related to the Iber software, its definition and all the steps and considerations carried out to generate the bidimensional model. In the fourth section it is developed the first simulation, it is represented the response of the street to a precipitation of a return period of 25 years. It is explained its modeling in the software and the analysis of the obtained results.

Fifth section, the verification of the model, representing the rain of the 2th October 2007. An historic rainfall, 60 l/m² in just 20 minutes, which flooded the municipality causing countless material damages and taking two human lives. Several variations of this situation are also run in order to discover the cause of the problem. Also is carried out a simulation taking into account the improvements works carried out after the flood, such as the construction of a storm tank.

The project is closed with a section of conclusions in which all the aspects of relevance analyzed and observed during the completion of this project are summarized. At the same time, solutions and alternatives are proposed in order to improve a better caption by the gutter system. It has to be highlighted that this work is only part of a bigger study project so that it opens several lines to continue to investigate and get deeper in this world of surface drainage.

Índice

Agradecimientos	v
Resumen	vi
Abstract	vii
Índice	viii
Índice de Tablas	x
Indice de Figuras	xi
1 Introducción	1
2 Problemática de la zona de estudio	2
2.1 <i>Caracterización de la cuenca urbana</i>	2
2.2 <i>Caracterización de la red de saneamiento</i>	6
3 Modelo numérico	7
3.1 <i>Descripción del modelo numérico (Iber)</i>	7
3.2 <i>Set-Up del modelo</i>	8
3.2.1 Geometría del modelo	8
3.2.2 Rugosidad	11
3.2.3 Condiciones de contorno	11
3.2.4 Generación de la malla de cálculo	11
3.2.5 Sumideros	13
3.2.6 Datos del problema	13
3.2.7 Lanzamiento del cálculo	14
4 Estudio de la situación actual	15
4.1 <i>Caudal de escorrentía</i>	15
4.2 <i>Caracterización de los imbornales</i>	17
4.3 <i>Caudal interceptado por los imbornales</i>	18
4.3.1 Método Prescripción de carreteras	18
4.3.2 Método Urban drainage design manual	18
4.3.3 Método Guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano	20
4.4 <i>Modelización en Iber</i>	23
4.4.1 Condiciones de contorno	23
4.4.2 Imbornales	24
4.4.3 Datos del cálculo	24
4.5 <i>Análisis de resultados</i>	25

4.5.1	Calados	25
4.5.2	Velocidades	25
4.5.3	Perfiles	29
5	Simulación avenida Octubre 2007	34
5.1	<i>Caudal de escorrentía</i>	35
5.2	<i>Descripción de las simulaciones realizadas</i>	37
5.3	<i>Modelización en Iber</i>	37
5.3.1	Condiciones de contorno	37
5.3.2	Barrera de vehículos	39
5.3.3	Sumideros	41
5.3.4	Datos del cálculo	41
5.4	<i>Análisis de resultados</i>	41
5.4.1	Simulación 1. Avenida de Octubre de 2007	41
5.4.2	Simulación 2. Variante sin barrera de coches	42
5.4.3	Simulación 3. Variante con imbornales en funcionamiento	42
5.5	<i>Situación tras actuaciones de mejora frente inundaciones</i>	50
5.5.1	Modelización en Iber	51
5.5.2	Análisis de los resultados	52
6	Conclusiones	55
6.1	<i>Iber como software de modelización bidimensional de calles de alta pendiente</i>	55
6.2	<i>Análisis de las variantes realizadas en la avenida de 2007</i>	55
6.3	<i>Mejoras de captación en la situación actual</i>	56
6.4	<i>Futuras líneas de estudio</i>	60
	Bibliografía	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1	Caudales de escorrentía T=25 años	16
Tabla 4-2	Caudal sumidero método HEC	19
Tabla 4-3	Parámetros 1 caudal método CEDEX	20
Tabla 4-4	Parámetros 2 caudal método CEDEX	20
Tabla 4-5	Caudal sumidero método CEDEX. Iteración 1	21
Tabla 4-6	Caudal sumidero método CEDEX. Iteración2	22
Tabla 4-7	Modelación de los caudales de entrada	23
Tabla 5-1	Calculo de los tiempos de concentración	35
Tabla 5-2	Caudales punta	36
Tabla 5-3	Caudales de entrada	37
Tabla 5-4	Parámetros de tiempo	41
Tabla 6-1	Comparación de resultados de cada variante del 2 de Octubre de 2007	56
Tabla 6-2	Análisis de seguridad de resultados obtenidos según el criterio del CEDEX	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1	Plano de situación de Alcalá de Guadaira	2
Figura 2-2	Plano de situación de la C/ Nuestra Señora del Águila	3
Figura 2-3	Tramo inicial C/ Ntra. Sra. Del Águila	3
Figura 2-4	Tramo final C/ Ntra. Sra. del Águila	3
Figura 2-5	Bifurcación de la C/ Ntra. Sra. Del Águila	4
Figura 2-6	C/ Mario Méndez Bejarano	5
Figura 2-7	Sección galería saneamiento en calle Nuestra señora del Águila	6
Figura 3-1	Geometría del modelo	9
Figura 3-2	Superficies del modelo	10
Figura 3-3	Malla del modelo	12
Figura 3-4	Detalles de la malla de cálculo	13
Figura 4-1	Hietogramas sintéticos. Estudio pluviométrico de Sevilla.	15
Figura 4-2	Entradas de caudal en la C/ Nuestra Señora del Águila	16
Figura 4-3	Imbornal de la C/ Nuestra Señora del Águila	17
Figura 4-4	Ubicación de los imbornales en la C/ Nuestra Señora del Águila	17
Figura 4-5	Hidrogramas de entrada de caudal	24
Figura 4-6	Hidrograma caudal sumidero	24
Figura 4-7	Mapa áreas coloreadas de calados en m	26
Figura 4-8	Mapa áreas coloreadas de velocidades en m/s	27
Figura 4-9	Mapa vectores de velocidad en m/s	28
Figura 4-10	Plano con ubicación de los perfiles trasversales realizados	29
Figura 4-11	Perfil Longitudinal	30
Figura 4-12	Perfil Trasversal 1 (T1)	31
Figura 4-13	Perfil Trasversal 2 (T2)	31
Figura 4-14	Perfil Trasversal 3 (T3)	32
Figura 4-15	Perfil Trasversal 4 (T4)	32
Figura 4-16	Perfil Trasversal 5 (T5)	33
Figura 5-1	Situación pasada la tormenta	34

Figura 5-2	Velocidad debido a pendiente	34
Figura 5-3	Granizo en suspensión	34
Figura 5-4	Barrera de coches	34
Figura 5-5	Hidrograma triángulos de Temez	36
Figura 5-6	Hidrogramas caudal entrada	38
Figura 5-7	Barrera de coches tras Avenida 2007	39
Figura 5-8	Croquis en alzado modelación barrera de coches. Medidas en m.	39
Figura 5-9	Croquis en planta modelación barrera de coches. Medidas en m.	40
Figura 5-10	Modelación de la barrera en Iber	40
Figura 5-11	Resultados simulación 1. Calados en m.	43
Figura 5-12	Resultados simulación 1. Velocidades en m/s.	44
Figura 5-13	Detalle de calados en barrera de coches	45
Figura 5-14	Detalle de velocidades en barrera de coches	45
Figura 5-15	Resultados simulación 2. Calados en m.	46
Figura 5-16	Resultados simulación 2. Velocidades en m/s.	47
Figura 5-17	Resultados simulación 3. Calados en m.	48
Figura 5-18	Resultados simulación 3. Velocidades en m/s.	49
Figura 5-19	Ubicación del tanque de tormenta de Alcalá de Guadaira	50
Figura 5-20	Detalle plano del tanque de tormenta	51
Figura 5-21	Resultados de calados en m.	53
Figura 5-22	Resultados de velocidades en m/s.	54
Figura 6-1	Ubicación de las rejillas transversales añadidas	57
Figura 6-2	Rejillas transversales en la entrada de la Plaza del Paraíso	57
Figura 6-3	Detalle rejilla transversal	58
Figura 6-4	Resultados de calados tras añadir las rejillas transversales	59

1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto surge ante la propuesta de EMASESA, empresa metropolitana de aguas de Sevilla, S.A. de solucionar las inundaciones que tienen lugar en el centro urbano de Alcalá de Guadaíra ante episodios de lluvias intensas.

Este municipio, situado al suroeste de la provincia de Sevilla, está caracterizado por calles de elevada pendiente, lo que conlleva a que el agua de escorrentía producida por las precipitaciones circule a una mayor velocidad y sea difícil interceptarlas por los imbornales. La cuenca de Alcalá drena en la calle Nuestra señora del Águila, dónde se acumula todo el caudal que no ha sido captado por la red de saneamiento.

En los últimos años se han producido diversos episodios de inundaciones ante lluvias de moderada intensidad. Destaca el evento meteorológico acaecido el 2 de octubre de 2007 con cuantiosos daños materiales e incluso pérdidas de vidas humanas. Como medida ante este incidente, se construyó un tanque de tormenta y se realizaron importantes obras de mejora en las redes y sistemas de captación.

Sin embargo, siguen produciéndose inundaciones. Ya que si el agua no es interceptada por los imbornales no llegará a ser almacenada o evacuada. Este será el objeto de estudio del presente proyecto.

Abordamos el problema centrándonos en la captación del agua de escorrentía en la calle Nuestra señora del Águila. Se realizará un modelo hidráulico 2D mediante el software Iber, en el que se plasmarán las características geométricas de la calle e imbornales con sus caudales, para realizar un análisis y diagnóstico del flujo de escorrentía en la actualidad. Todo ello con la finalidad de realizar una propuesta y estudio de alternativas que permitan garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

Este proyecto es solo el comienzo. Con él se abre una línea de investigación que se continuará desarrollando por la Catedra del Agua de EMASESA junto con la Escuela de Ingenieros. Uno de estos trabajos será profundizar en el estudio de los imbornales, realizando un modelo para ver como captan el agua según su geometría.

2 PROBLEMÁTICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 Caracterización de la cuenca urbana

Como hemos mencionado anteriormente el estudio se realiza en de Alcalá de Guadaira, municipio de 75.000 habitantes situado al Suroeste de la provincia de Sevilla.

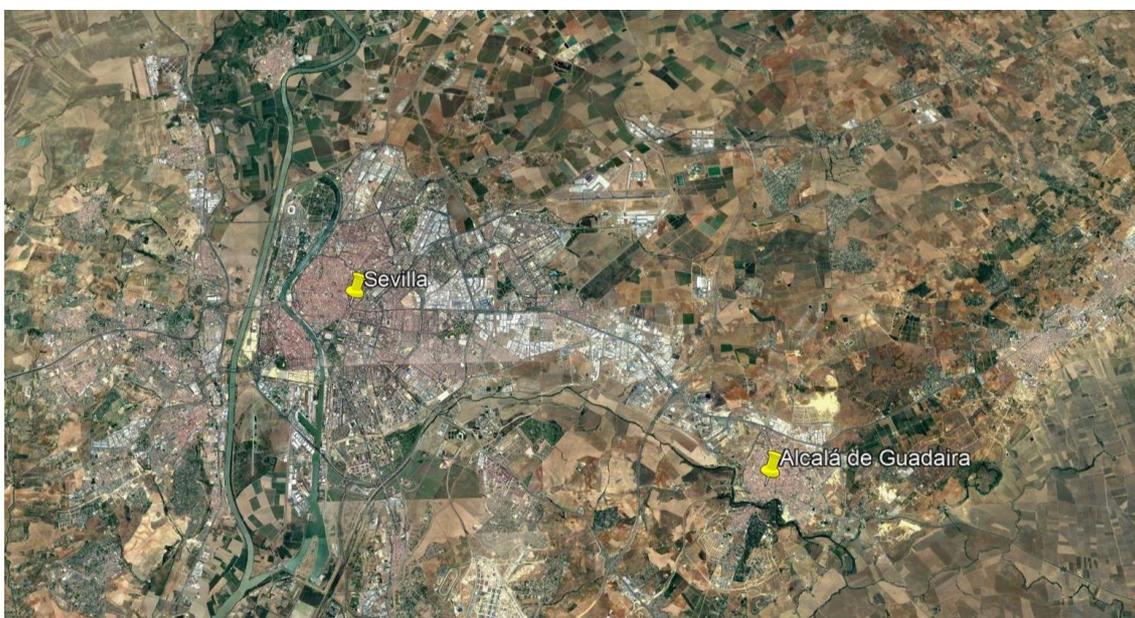


Figura 2-1 Plano de situación de Alcalá de Guadaira

Alcalá de Guadaira se asienta sobre una topografía accidentada denominada desde el tiempo de los almohades, alcor: collado o colina. La ciudad va surgiendo junto a una vaguada donde concluían las aguas de lluvia, una serie de manantiales y una galería construida en los siglos I y II por Roma para abastecimiento de Sevilla.

Aun en la actualidad la complejidad del crecimiento urbano hace que la totalidad del agua que precipita en la cuenca siga pasando por esta cañada natural. Lo accidentado de su topografía y la deficiente urbanización de determinados sectores ejecutados en las décadas de los años 60 y 70 provocan que los valores que alcanzan las precipitaciones y velocidades imposibilite técnica y económicamente la construcción de redes con un correcto dimensionamiento.

Por ello surge la propuesta de EMASESA de hacer un estudio en detalle del flujo en superficie de la precipitación en las particulares calles de Alcalá. Así se relizará un modelo dónde se analizarán calados y velocidades ante distintas precipitaciones a fin de optimizar la captación de los imbornales.

Este Trabajo de Fin de Grado comienza a abordar esta línea de estudio con una modelización de la calle Nuestra Señora del Águila.



Figura 2-2 Plano de situación de la C/ Nuestra Señora del Águila

La calle Nuestra Señora del Águila, localmente conocida como La Mina. Es una calle de dos plataformas con aparcamientos a un lateral de esta, de 500m de longitud y 9.5m de ancho. Posee acerado elevado a 20 cm de la calzada y una pendiente de un 2%.



Figura 2-3 Tramo inicial C/ Ntra. Sra. Del Águila



Figura 2-4 Tramo final C/ Ntra. Sra. del Águila



Figura 2-5 Bifurcación de la C/ Ntra. Sra. Del Águila

El principal problema de esta calle no es en sí su elevada pendiente, sino ser la vaguada de recogida de la mayor parte de las aguas de la cuenca urbana. La cuenca posee una extensión de 265.81 Ha, constituyendo aproximadamente un 66.5% del área total del núcleo principal de la ciudad de Alcalá.



Figura 2-6 Delimitación de la cuenca urbana

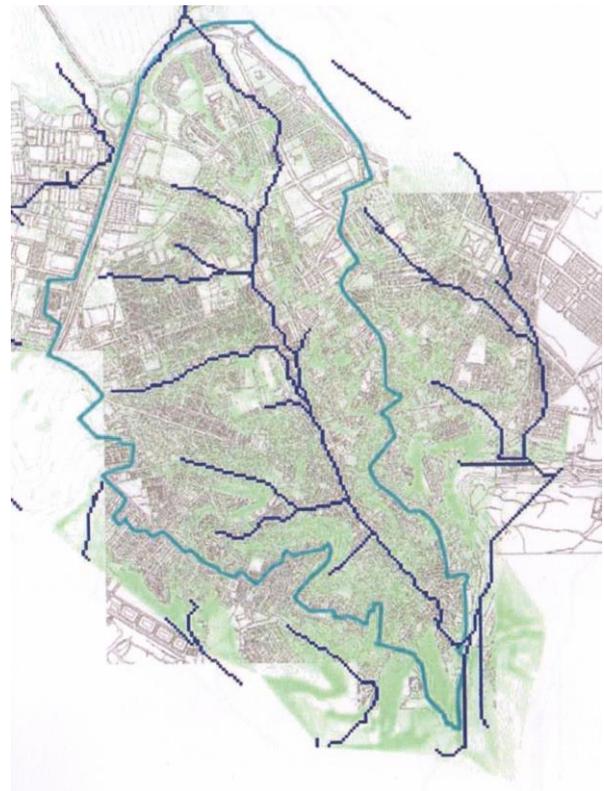


Figura 2-7 Drenaje de la cuenca urbana

En la calle Nuestra señora del Águila desembocan cuatro calles de importancia que son consideradas en nuestro estudio; Blanca de los ríos, Sta. Clara, Mario Méndez Bejarano y Monroy. Estas, están caracterizadas por una pendiente muy elevada, del 10%, y sin imbornales por lo que funcionan como cauces portadores de agua a altas velocidades.



Figura 2-8 C/ Santa Clara



Figura 2-9 C/ Blanca de los Ríos



Figura 2-6 C/ Mario Méndez Bejarano



Figura 2-11 C/ Monroy

2.2 Caracterización de la red de saneamiento

La red de saneamiento del municipio es única y funciona por gravedad sin necesidad de ningún tipo de bombeo a causa de las pendientes que se dan en el terreno. De los caudales circulantes parte son aliviados al río Guadaíra y el resto al Colector General Alcalá de Guadaíra-EDAR Ranilla, que discurre paralelo al río por su margen derecha, gracias a tres aliviaderos localizados en puntos finales del sistema de saneamiento. La geometría de la conducción de saneamiento de la calle Nuestra señora del Águila está caracterizada por una galería cuya sección queda reflejada en la imagen inferior.

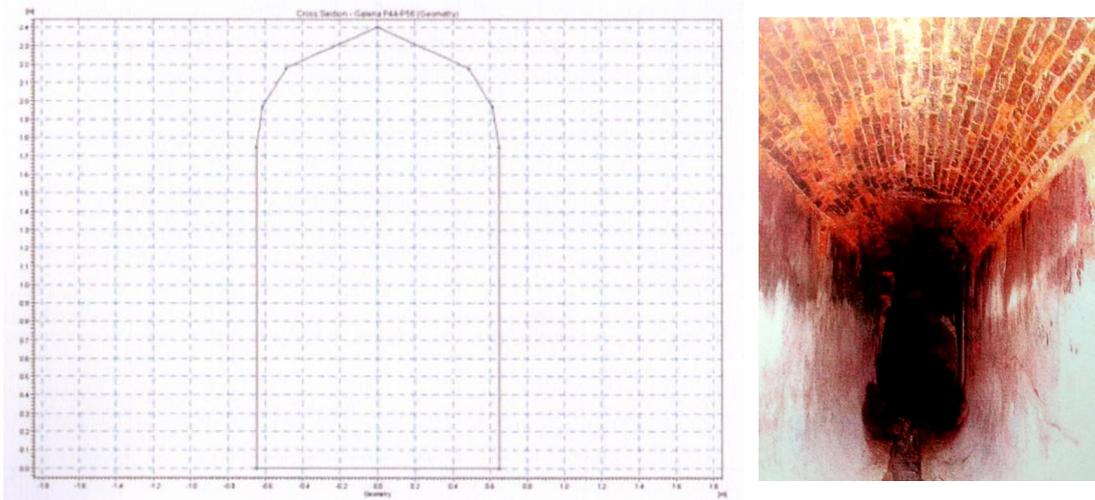


Figura 2-7 Sección galería saneamiento en calle Nuestra señora del Águila

3 MODELO NUMÉRICO

Con la finalidad de analizar el flujo en lámina libre se realiza un modelo numérico bidimensional empleando el software Iber.

3.1 Descripción del modelo numérico (Iber)

Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente en aguas poco profundas, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial.

El programa consta de tres módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos ellos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares y/o cuadriláteros.

En este estudio se empleará el módulo hidrodinámico para el análisis del flujo de escorrentía. Este módulo constituye la base de Iber. En él se resuelven las ecuaciones de Saint Venant, ecuaciones de conservación de la masa y de momento de aguas someras en las dos direcciones horizontales.

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta h U_x}{\delta x} + \frac{\delta h U_y}{\delta y} = M_s \quad (3.1.1)$$

$$\frac{\delta h U_x}{\delta t} + \frac{\delta h U_x^2}{\delta x} + \frac{\delta h U_x U_y}{\delta y} = -gh \frac{\delta Z_s}{\delta x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2 \delta \rho}{\rho 2 \delta x} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\delta h \tau_{xx}^e}{\delta x} + \frac{\delta h \tau_{xy}^e}{\delta y} + M_x \quad (3.1.2)$$

$$\frac{\delta h U_y}{\delta t} + \frac{\delta h U_x U_y}{\delta x} + \frac{\delta h U_y^2}{\delta y} = -gh \frac{\delta Z_s}{\delta y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2 \delta \rho}{\rho 2 \delta y} - 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\delta h \tau_{xy}^e}{\delta x} + \frac{\delta h \tau_{yy}^e}{\delta y} + M_y \quad (3.1.3)$$

Siendo h el calado, U_x , U_y , las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g la aceleración de la gravedad, Z_s la elevación de la lámina libre, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b la fricción debido al rozamiento del fondo, ρ es la densidad del agua, Ω la velocidad angular de rotación de la tierra, λ la latitud del punto considerado, τ_{xx}^e , τ_{xy}^e , τ_{yy}^e las tensiones tangenciales efectivas horizontales y M_z , M_x , M_y los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

En cuanto a la estructura de Iber está formada por tres procesos.

- Preproceso: Dónde se definen las características del problema. Desde la definición geométrica a la asignación de condiciones de contorno iniciales y mado.
- Proceso: Se realiza el cálculo de la hidrodinámica del problema.
- Postproceso: Dónde se visualizan los resultados obtenidos y se extraen gráficas, mapas y videos.

3.2 Set-Up del modelo

Se describe a continuación como se ha realizado el modelo bidimensional de la calle en estudio. Este apartado se focalizará en el pre-proceso de Iber. El post-proceso se verá en los apartados 4 y 5 de la memoria dónde se describen las dos simulaciones realizadas. La primera representará la respuesta de la calle a una lluvia de un periodo de retorno de 25 años y la segunda imita la avenida de Octubre de 2007.

Los pasos seguidos en la realización del preproceso del modelo bidimensional son:

- Creación de la geometría
- Definición de la rugosidad
- Asignación de condiciones de contorno
- Generación de la malla de cálculo
- Determinación de datos del problema
- Lanzamiento del cálculo

3.2.1 Geometría del modelo

El primer paso para la creación del modelo bidimensional como hemos puntualizado anteriormente es generar la geometría. Iber dispone de una interfaz en la cual se puede crear una geometría desde el inicio. Por otro lado, se pueden importar distintos formatos estándar. Una vez creada o importada la geometría es posible editarla y modificarla.

Se decide realizar la geometría mediante la importación de un archivo .dxf. Para su generación partimos de la base de una cartografía de la zona centro de Alcalá de Guadaíra, proporcionada por el Ayuntamiento del municipio. Trabajamos este plano en AutoCAD, limpiando líneas innecesarias que puedan dar lugar a error al importar el archivo. Este es un trabajo de vital importancia ya que será la base de todo el modelo.

En nuestro caso de estudio, la geometría de la calle está caracterizada por 6 líneas principales: la línea linde de la acera y los edificios, la línea que define el bordillo superior y la que define el bordillo inferior. Estas dos últimas distan unos 30 cm para evitar problemas en la generación de la malla de cálculo.

En la *Figura 3-1* se refleja la calle una vez importado en Iber el archivo .dxf. Se observan además de lo mencionado anteriormente unas líneas transversales. Estas son líneas 3D que añaden información topográfica a la geometría. Fueron introducidas una vez lanzado el primer cálculo ante la problemática de que al ser un estudio de detalle el Iber no calculaba debido a falta de información topográfica de la superficie de la calle.

A continuación se procede a crear las superficies. Estas se generan sobre un contorno geométrico cerrado. En la casuística de que la geometría poseyera aristas abiertas las superficies no se generarían. Afortunadamente Iber posee una opción de unir líneas directamente en su interfaz evitándonos tener que volver a modificar la geometría en AutoCAD. El resultado quede reflejado en la *Figura 3-2*.

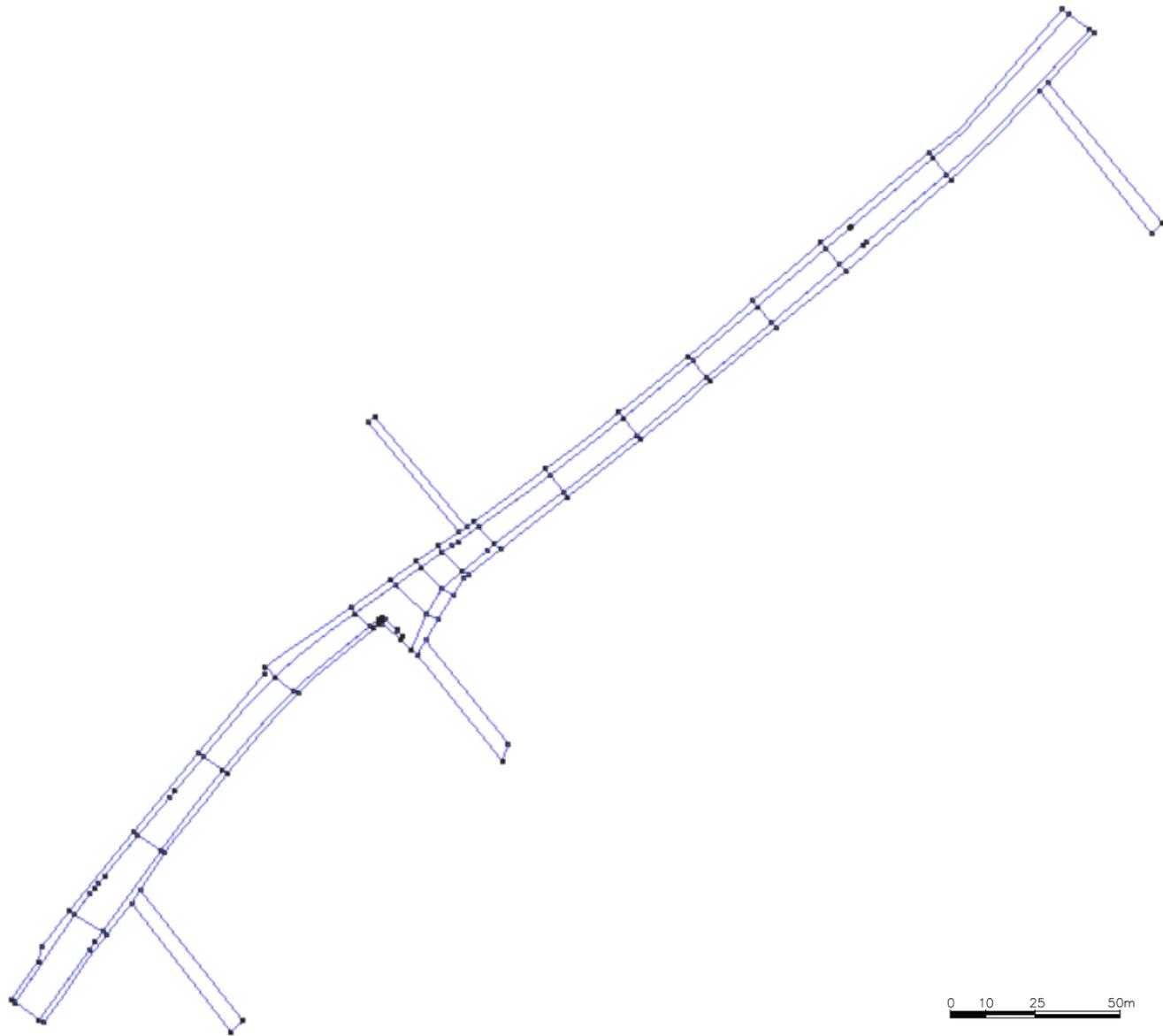


Figura 3-1 Geometría del modelo

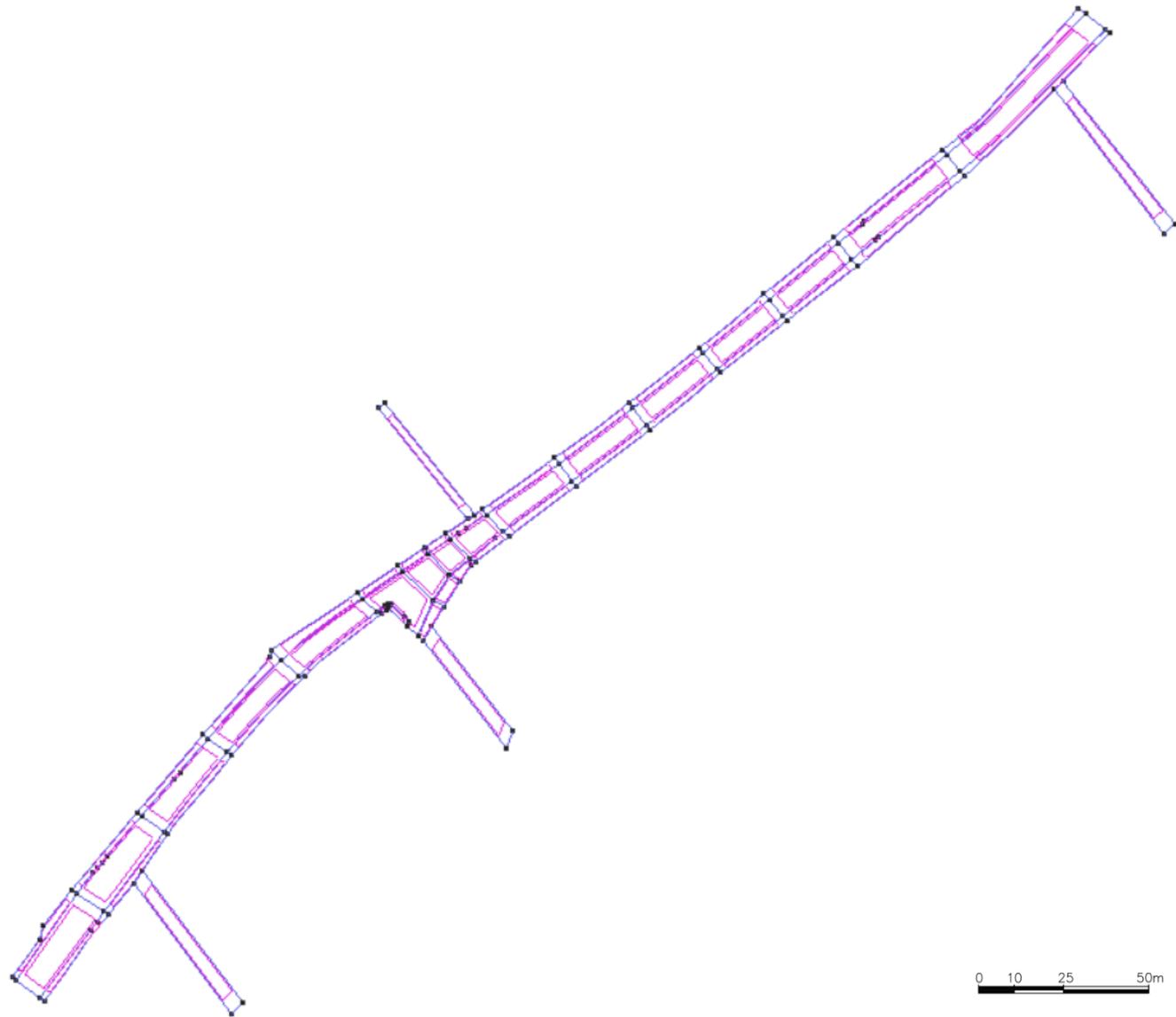


Figura 3-2 Superficies del modelo

3.2.2 Rugosidad

Para ejecutar el modelo es necesario asignar la rugosidad del fondo mediante una tabla de usos del suelo. Se debe asignar un valor a cada superficie. Dado que el estudio se realiza en un núcleo urbano se decide asignar una rugosidad coeficiente de Manning 0.015 característico de uso de suelo residencial.

3.2.3 Condiciones de contorno

Iber por defecto siempre considera a todas las líneas de borde como paredes verticales de altura indefinida por donde no puede entrar ni salir agua. Para que entre agua al modelo es necesario asignar a una o más líneas de contorno la condición de entrada. De la misma manera, para que salga el agua del modelo es necesario asignar la condición de salida.

3.2.3.1 Condición de contorno de entrada

La entrada del flujo al modelo se puede incorporar de 3 formas diferentes: como caudal total, caudal específico o cota de agua. También se debe definir el régimen del flujo: supercrítico/crítico o subcrítico.

Dado que nuestro estudio consiste en el análisis del flujo de escorrentía en caso de avenida, se introduce la entrada del flujo como caudal total en régimen supercrítico.

3.2.3.2 Condición de contorno de salida

Es necesario indicar a Iber por donde saldrá el agua del modelo, de lo contrario se almacenaría como si se tratase de un depósito. También posee dos opciones para definir el régimen del flujo: supercrítico/crítico o subcrítico.

Seleccionamos la condición de flujo supercrítico/crítico ya que las condiciones hidráulicas en la salida dependerán de lo que ocurre aguas arriba.

3.2.4 Generación de la malla de cálculo

Una vez asignadas las condiciones de contorno se procede a la generación de la malla. Cabe puntualizar que si una vez creada la malla se modifican las condiciones de contorno es necesario volver a generar dicha malla antes de lanzar el cálculo.

En Iber existen dos tipos de malla, estructurada y no estructurada. La primera posee elementos rectangulares pero solo se puede emplear cuando la geometría es a su vez rectangular. Dado que en este estudio tratamos una calle de geometría irregular, se empleará una malla no estructurada constituida por elementos triangulares.

A continuación se le asigna un tamaño a la malla a generar. Es importante subrayar la influencia del tamaño de malla en el tiempo de cálculo. Una malla fina, de mayor número de elementos, proporciona una mayor precisión pero supondrá un mayor coste computacional que una malla gruesa. Por tanto se debe buscar el equilibrio entre precisión y tiempo. Para ello se realizan diversas pruebas hasta definir la malla con un tamaño de 2 metros como se refleja en la *Figura 3-3* y en la *Figura 3-4*.

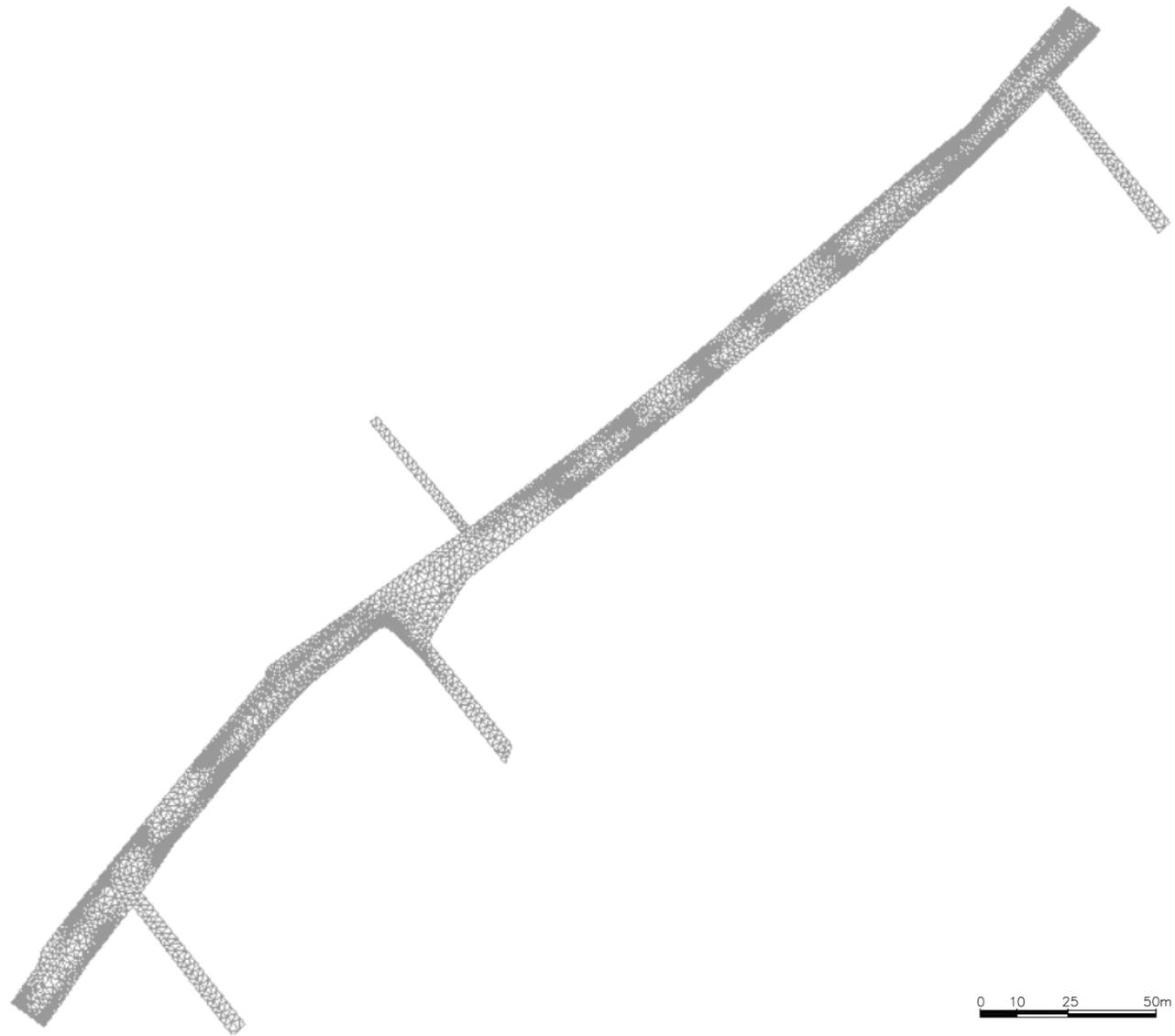


Figura 3-3 Malla del modelo

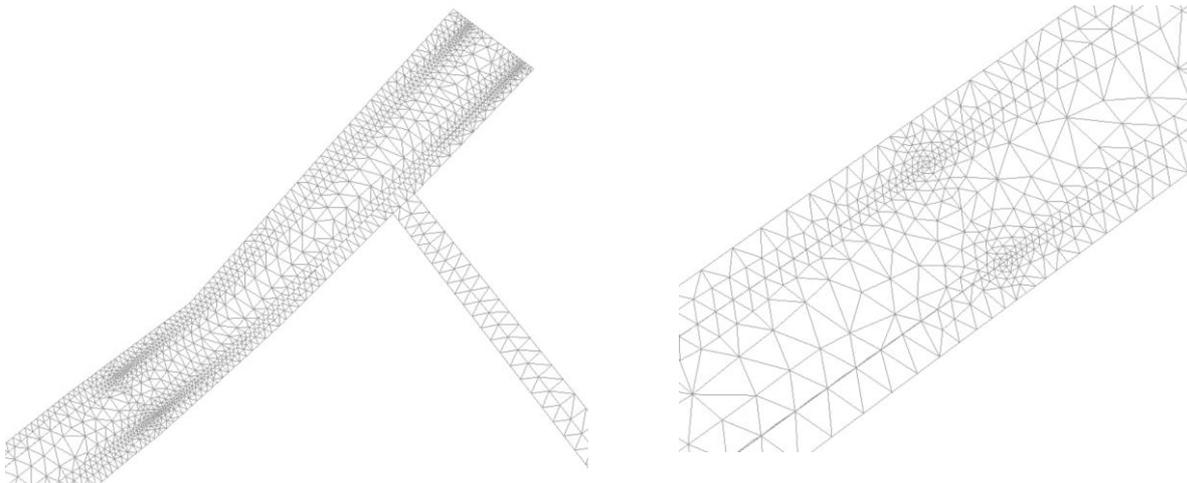


Figura 3-4 Detalles de la malla de cálculo

3.2.5 Sumideros

Dado que el estudio que nos ocupa es de una calle, los imbornales poseen un papel fundamental. Iber posee la opción de introducir fuentes o sumideros en las celdas de la malla. A estos se les asigna un hidrograma que representa el caudal captado en función del tiempo. La definición de este caudal se explica con mayor detalle en el apartado 4.2 de la memoria.

3.2.6 Datos del problema

Antes de lanzar el cálculo deben definirse los parámetros de cálculo.

3.2.6.1 Parámetros de tiempo

Los parámetros de tiempo a establecer son los siguientes.

- Instante inicial [s]: Instante de tiempo de inicio del cálculo.
- Tiempo máximo de simulación [s]: Duración de la simulación.
- Intervalo de resultados [s]: Intervalo de tiempo en que se guardan los resultados del cálculo.

3.2.6.2 Coeficiente CFL

Es el valor del número de Courant-Friedrichs-Levy, valor asignado a fin de conseguir un esquema numérico estable. Esta condición implica que el valor máximo del paso de tiempo utilizado para la integración temporal de las ecuaciones está limitado por la siguiente relación.

$$t_{CFL} = CFL \frac{\Delta x}{U + \sqrt{g \cdot h}} \quad \text{con } CFL \leq 1 \quad (3.2.1)$$

Siendo Δx el tamaño de la malla de cálculo, U la velocidad del agua, g la aceleración de la gravedad y h el calado.

3.2.6.3 Limite seco-mojado

Umbral para considerar que un elemento está seco y no se realice ningún cálculo hidrodinámico en él. Se establece un límite de 0.01m.

3.2.6.4 Método de secado

Existen tres métodos de secado; normal, estricto e hidrológico. Se emplea el método de secado normal que considera cuando en un instante de tiempo un elemento posee calado negativo, Iber por defecto lo considera seco y guarda en la memoria el valor de dicho calado negativo. Para volver a mojarse el elemento debe llenar antes ese calado negativo.

3.2.7 Lanzamiento del cálculo

Ya una vez creada la geometría, generada la malla y fijados todas las condiciones y parámetros se procede a lanzar el cálculo. Durante el cálculo se puede visualizar la información del proceso para detectar posibles errores.

Se debe señalar el gran coste computacional que posee un estudio de detalle de una calle con un modelo bidimensional. A mayor caudal, mayor número de celdas mojadas y mayor número de operaciones de cálculo. Se entrará en detalle en el estudio de sensibilidad realizado en las conclusiones del presente proyecto.

4 ESTUDIO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

La primera simulación realizada consiste en una representación la calle Nuestra Señora del Águila ante una lluvia de un periodo de retorno de 25 años. Para ello se parte de la geometría y malla ya generadas en el apartado anterior y se introducen los imbornales con sus características y ubicaciones actuales. Además se modelan los caudales de escorrentía generados por esta lluvia, introduciéndolos como condiciones de entrada, y se calculan los caudales interceptados por los imbornales en función de la altura de la lámina de agua a la entrada de ellos.

4.1 Caudal de escorrentía

Los datos del caudal de escorrentía han sido tomados del proyecto “Estudio de Evacuación de Pluviales de la zona centro de Alcalá de Guadaíra” desarrollado por Inserco Ingenieros a petición de Emasesa (12/2009).

El cálculo de dichos caudales se realiza empleando una lluvia sintética definida mediante hietogramas sintéticos considerando el “Estudio Pluviométrico de Sevilla y su Area Metropolitana. Periodo 1975-2004” desarrollado por Emasesa (09/2006). Este estudio analiza las series meteorológicas de precipitaciones máximas diarias correspondientes a los años indicados y para distintos periodos de retorno.

Se obtienen hietogramas de duración una hora y periodos de retorno 25 años y mediante un modelo hidrológico con el software MOUSE se calcula el caudal de escorrentía a partir de esos datos de precipitación.

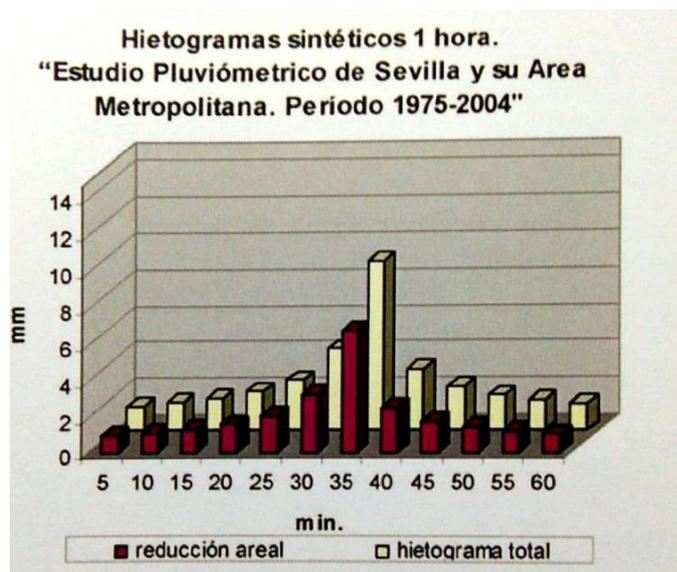


Figura 4-1 Hietogramas sintéticos. Estudio pluviométrico de Sevilla.

Se consideran cinco entradas de caudal, la entrada principal de la calle y cuatro bocacalles que drenan en esta.

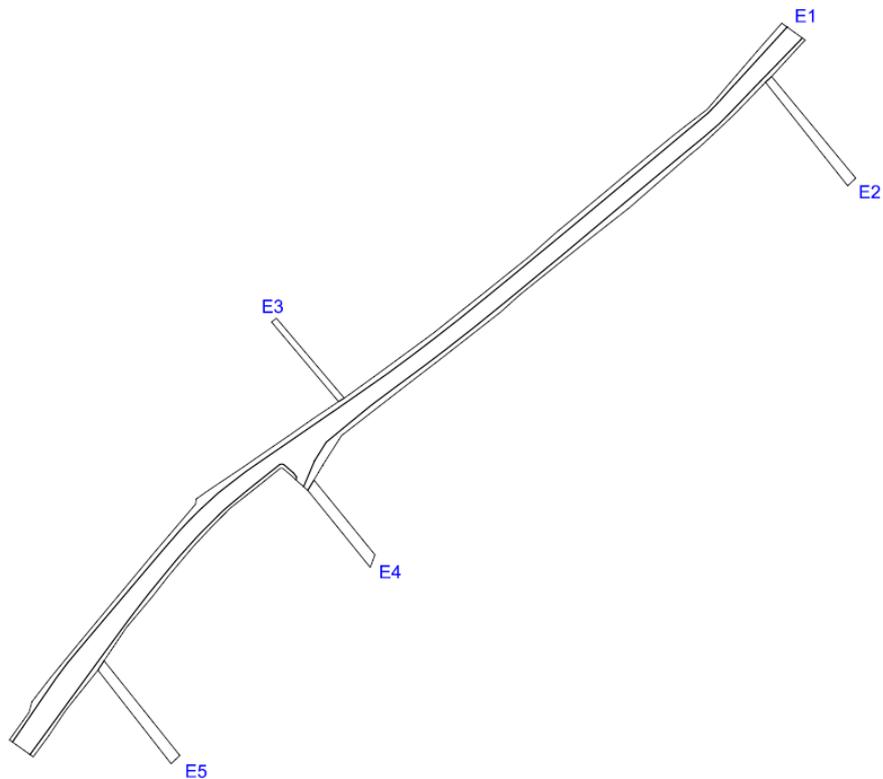


Figura 4-2 Entradas de caudal en la C/ Nuestra Señora del Águila

En la siguiente tabla quedan reflejadas las distintas entradas con sus caudales de escorrentía correspondientes.

Entrada	Calle Asociada	Pte Longitudinal [%]	Qe [L/s]
E1	Nuestra Señora del Águila	2	115.1
E2	Blanca de los Ríos	10	30.46
E3	Sta. Clara	10	101.55
E4	Mario Mendez Bejarano	6	23.78
E5	Monroy	10	67.02

Tabla 4-1 Caudales de escorrentía T=25 años

4.2 Caracterización de los imbornales

La calle Nuestra Señora del Águila está caracterizada por una única tipología de imbornal. Sumideros rectangulares de 400x600 mm con rejilla única compuesta de 9 barras transversales.



Figura 4-3 Imbornal de la C/ Nuestra Señora del Águila

Encontramos un total de 27 sumideros dispuestos a lo largo de la calle en el borde de la calzada longitudinalmente.

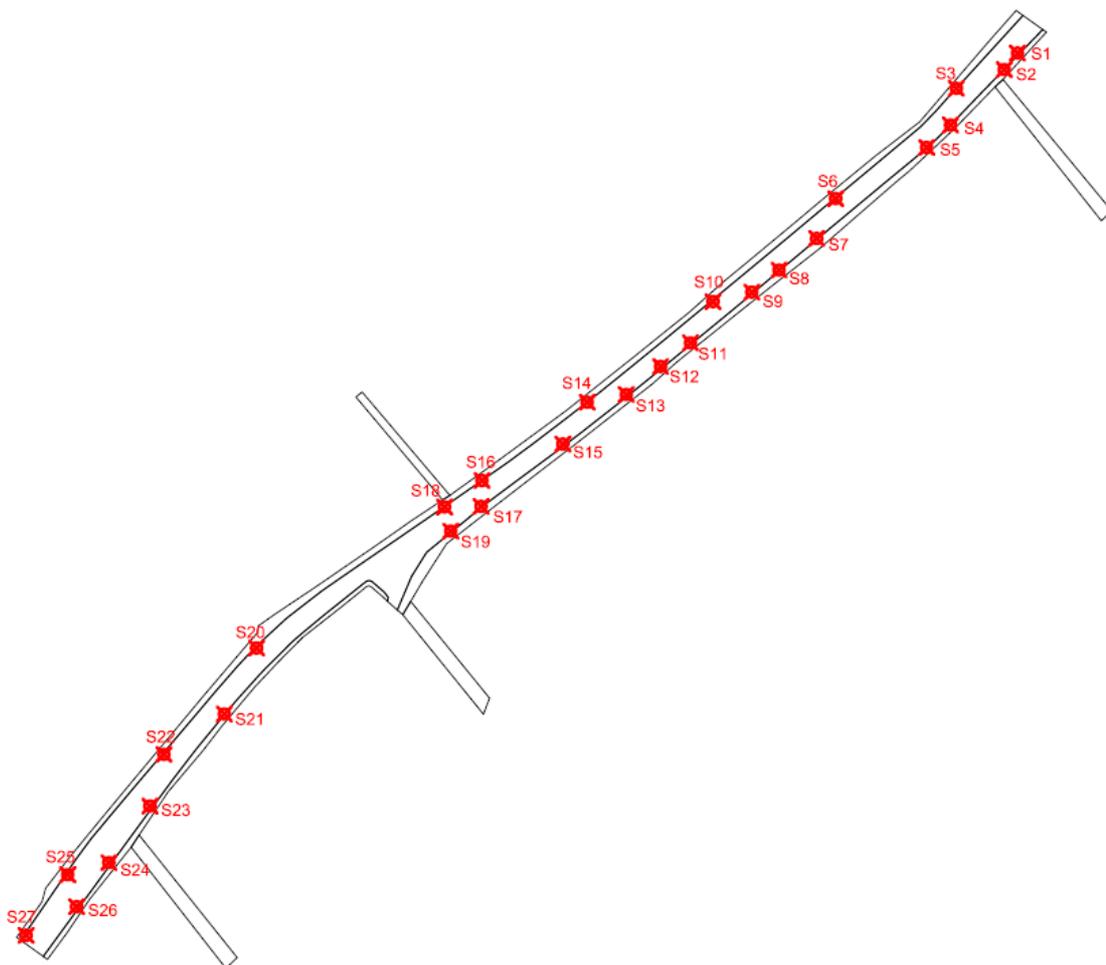


Figura 4-4 Ubicación de los imbornales en la C/ Nuestra Señora del Águila

4.3 Caudal interceptado por los imbornales

Al efecto de hacer una correcta representación de la realidad se debe introducir en el modelo un elemento fundamental, los imbornales. Para ello se realiza un cálculo estimatorio del caudal que interceptan.

Se han contrastado tres métodos de cálculo de caudal; el aconsejado por la “Prescripción de carreteras 5.2-1C de drenaje superficial”, el método americano del “Hydraulic engineering circular, 22. Urban drainage design manual” del U.S. Department of transportation y el recomendado por la “Guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano” del CEDEX.

4.3.1 Método Prescripción de carreteras

Según el método de la prescripción de carreteras el caudal interceptado por el imbornal viene calculado mediante la siguiente expresión.

$$Q \left(\frac{L}{s} \right) = L \cdot \frac{H^{1.5}}{60} \quad (4.3.1)$$

Dónde los parámetros que considera son:

L perímetro exterior de la rejilla, en cm

H altura de la lámina de agua medida desde el borde inferior de la abertura, en cm

En situaciones de calles de elevada pendiente este caudal debe ser multiplicado por un factor reductor, λ . Ya que al ser mayor la pendiente, aumenta la velocidad con la que circula el agua y por tanto entra en menor cantidad en el imbornal.

$$\lambda = \frac{1}{1 + 15 \cdot J} \quad (4.3.2)$$

Dónde J es la pendiente de la calle, en tanto por uno.

Aunque considera la pendiente longitudinal de la calle en su fórmula descartamos este método por dos razones. La primera es que solo es aplicable a calados menores de 12cm. La segunda es que solo considera en el cálculo el perímetro de la rejilla como característica del imbornal, no teniendo en cuenta el número, la disposición, ni la forma de las barras. Dado que nuestro estudio es de detalle necesitamos una fórmula más precisa.

4.3.2 Método Urban Drainage Design Manual (U.S. Department of Transportation).

Según el manual americano, “Urban drainage design manual” del HEC (Hydraulic Engineering Circular), el caudal interceptado por el imbornal, Q_i , viene calculado como el producto de la eficiencia de dicho imbornal, E, por el caudal de escorrentía, Q, que circula por la calle.

$$Q_i = E \cdot Q \quad (4.3.3)$$

La eficiencia del imbornal se calcula mediante la siguiente expresión en función de tres coeficientes:

$$E = R_f E_o + R_s (1 - E_o) \quad (4.3.4)$$

El coeficiente de flujo frontal, R_f se calcula como:

$$R_f = 1 - K_u(V - V_o) \quad (4.3.5)$$

Dónde:

K_u 0.295

V Velocidad del flujo en el imbornal, en m/s

V_o Velocidad del flujo en el imbornal, en m/s

Para el cálculo de la velocidad se emplea la siguiente fórmula:

$$V = \frac{K_u}{n} \cdot S_L^{0.5} \cdot S_x^{0.67} \cdot T^{0.67} \quad (4.3.6)$$

Dónde:

S_L Pendiente longitudinal del canal, en %

S_x Pendiente transversal del canal, en %

T Ancho del canal, en m

El coeficiente de flujo lateral, R_s se calcula como:

$$R_s = \frac{1}{1 + \frac{K_u V^{1.8}}{S_x L^{2.3}}} \quad (4.3.7)$$

Dónde:

K_u 0.0828

L Longitud del imbornal, en m

Y el coeficiente E_o , que relaciona el flujo frontal con el flujo total del canal.

$$E_o = 1 - \left(1 - \frac{W}{T}\right)^{2.67} \quad (4.3.7)$$

Dónde:

W Ancho del imbornal, en m.

Calculamos el caudal interceptado por el imbornal empleando este método y obtenemos un valor de 0.18 m³/s.

Q_i [m ³ /s]	Q [m ³ /s]	E	R_f	R_s	E_o
0.180	1.000	0.180	1.000	0.029	0.156

Tabla 4-2 Caudal sumidero método HEC

Se decide no emplear este método ya que obtendríamos un caudal único captado por todos los imbornales independientemente de la altura de la lámina de agua a la entrada de este.

4.3.3 Método Guía Técnica sobre Redes de Saneamiento y Drenaje urbano

Según la Guía Técnica sobre Redes de Saneamiento y Drenaje urbano del CEDEX, el caudal interceptado por la rejilla se calculará como el producto del caudal de tránsito por la calle y la eficiencia de captación del imbornal.

$$Q_i = E_i \cdot Q_{calle} \quad (4.3.8)$$

La eficiencia viene calculada mediante la siguiente expresión:

$$E_i = A \cdot \left(\frac{Q_{calle}}{y} \right)^{-B} \quad (4.3.9)$$

Dónde:

Q_{calle} caudal de tránsito por la calle, en m³/s

y calado junto al bordillo, en m

A y B coeficientes característicos de la rejilla

$$A = \frac{0.396}{A_g^{-0.398} \cdot p^{-0.149}} \cdot (n_t + 1)^{0.01} \cdot (n_l + 1)^{0.07} \cdot (n_d + 1)^{0.017} \cdot (n_c + 1)^{-0.057} \quad (4.3.10)$$

$$B = 0.22 * \frac{long^{0.689}}{anch^{0.491}} \quad (4.3.11)$$

$$p = 100 * \frac{A_h}{A_g} \quad (4.3.12)$$

Dónde:

n_l número de barras longitudinales

n_t número de barras transversales

n_d número de barras diagonales

n_c número de barras curvas

$long$ longitud de la rejilla, en cm

A_h área de los huecos de la rejilla, en m²

$anch$ anchura de la rejilla, en cm

A_g área total de la rejilla en m²

Los parámetros según la geometría de nuestro imbornal, ya descrito en el apartado 4.2, son los siguientes.

n_l	n_d	$long$ [cm]	$anch$ [cm]	n_t	n_c	A_h [m ²]	A_g [m ²]
0	9	60	40	0	0	0.03	0.24

Tabla 4-3 Parámetros 1 caudal método CEDEX

A	B	p
0.340	0.604	12.5

Tabla 4-4 Parámetros 2 caudal método CEDEX

Se decide al final emplear este método para el cálculo de los caudales interceptados por los imbornales ya que es el que considera un mayor número de parámetros geométricos del imbornal y a su vez la altura de la lámina de agua en la entrada de este. Es cierto que este método no considera la pendiente longitudinal de la calle, y este es un parámetro fundamental en nuestro estudio, por ello se decide multiplicar este caudal Q_i obtenido mediante el método del CEDEX por el coeficiente reductor λ del método de prescripción de carreteras que considera esta pendiente J . Así se obtiene una formulación más precisa que considera las características geométricas de la rejilla, las de la calle y las de la lámina de agua.

$$Q_{ir} = \lambda Q_i \quad (4.3.13)$$

Se calcula a continuación el caudal interceptado por la rejilla. Dado que este caudal depende de la cota de la lámina de agua a la entrada de la rejilla se realizarán dos iteraciones para ajustar el modelo. La primera será tomando la altura de agua de cada sumidero del modelo sin imbornales. Calcularemos el caudal captado con esta altura y realizaremos una segunda iteración. Volvemos a calcular el caudal con la nueva altura obtenida del modelo al introducir los imbornales. Finalizamos introduciendo en el modelo este caudal final y analizando los resultados obtenidos.

ITERACIÓN 1

SUMIDERO i	y_i	E_i	Q_i	Q_{ir}
S1	0.33	0.174	0.174	0.121
S2	0.295	0.163	0.163	0.113
S3	0.3	0.164	0.164	0.114
S4	0.34	0.177	0.177	0.123
S5	0.335	0.176	0.176	0.122
S6	0.32	0.171	0.171	0.118
S7	0.32	0.171	0.171	0.118
S8	0.316	0.170	0.170	0.117
S9	0.26	0.151	0.151	0.104
S10	0.29	0.161	0.161	0.111
S11	0.309	0.167	0.167	0.116
S12	0.293	0.162	0.162	0.112
S13	0.296	0.163	0.163	0.113
S14	0.301	0.165	0.165	0.114
S15	0.294	0.162	0.162	0.112
S16	0.226	0.138	0.138	0.096
S17	0.283	0.159	0.159	0.110
S18	0.3	0.164	0.164	0.114
S19	0.22	0.136	0.136	0.094
S20	0.31	0.168	0.168	0.116
S21	0.29	0.161	0.161	0.111
S22	0.269	0.154	0.154	0.107
S23	0.259	0.150	0.150	0.104
S24	0.258	0.150	0.150	0.104
S25	0.304	0.166	0.166	0.115
S26	0.26	0.151	0.151	0.104
S27	0.29	0.161	0.161	0.111

Tabla 4-5 Caudal sumidero método CEDEX. Iteración 1.

ITERACIÓN 2				
SUMIDERO i	y_i	E_i	Q_i	Q_{ir}
S1	0.244	0.145	0.145	0.100
S2	0.232	0.141	0.141	0.097
S3	0.184	0.122	0.122	0.085
S4	0.228	0.139	0.139	0.096
S5	0.189	0.124	0.124	0.086
S6	0.186	0.123	0.123	0.085
S7	0.178	0.120	0.120	0.083
S8	0.178	0.120	0.120	0.083
S9	0.112	0.091	0.091	0.063
S10	0.097	0.083	0.083	0.058
S11	0.079	0.073	0.073	0.051
S12	0.056	0.060	0.060	0.041
S13	0.038	0.047	0.047	0.033
S14	0.037	0.046	0.046	0.032
S15	0.02	0.032	0.032	0.022
S16	0.01	0.021	0.021	0.015
S17	0.018	0.030	0.030	0.021
S18	0.054	0.058	0.058	0.040
S19	0	0.000	0.000	0.000
S20	0.015	0.027	0.027	0.019
S21	0.025	0.037	0.037	0.025
S22	0.011	0.022	0.022	0.015
S23	0.01	0.021	0.021	0.015
S24	0.03	0.041	0.041	0.028
S25	0.029	0.040	0.040	0.028
S26	0	0.000	0.000	0.000
S27	0.013	0.025	0.025	0.017

Tabla 4-6 Caudal sumidero método CEDEX. Iteración 2.

4.4 Modelización en Iber

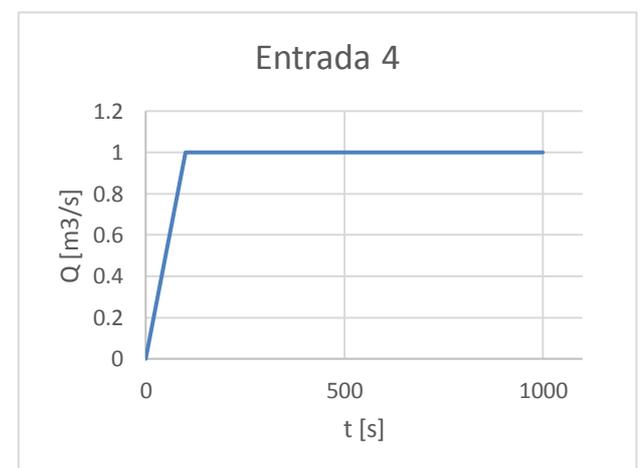
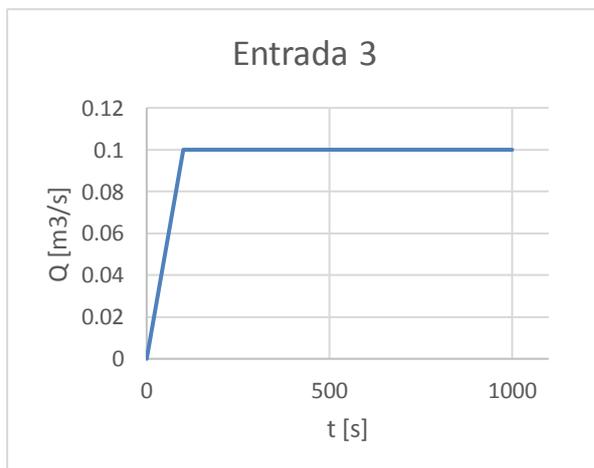
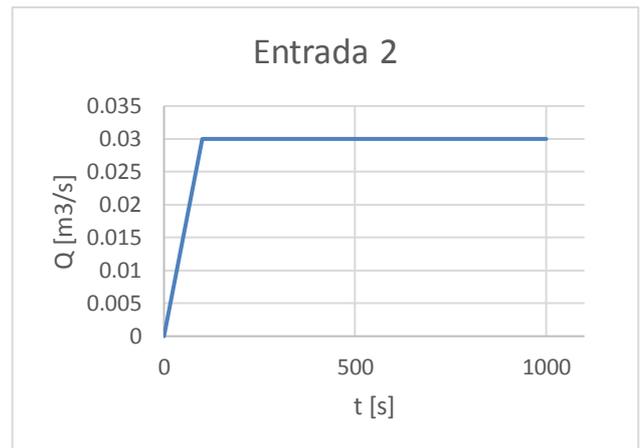
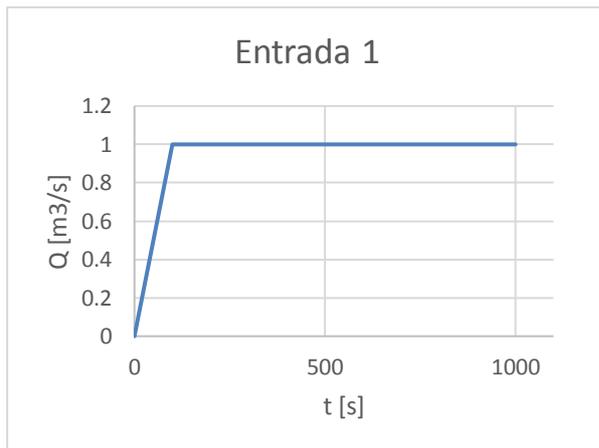
Partiendo de la geometría y la malla ya generadas y explicadas en el apartado 3, se procede a la modelización de la respuesta de la calle ante una lluvia con un periodo de retorno de 25 años. Para ello se definen las condiciones de contorno, sumideros y datos de cálculo que más se adapten a esta situación.

4.4.1 Condiciones de contorno

Se introducen en Iber los caudales de entrada modelados como un hidrograma constante.

E1		E2		E3		E4		E5	
t [s]	Q[m ³ /s]								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	1	100	0.03	100	0.1	100	0.023	100	0.067
1000	1	1000	0.03	1000	0.1	1000	0.023	1000	0.067

Tabla 4-7 Modelación de los caudales de entrada



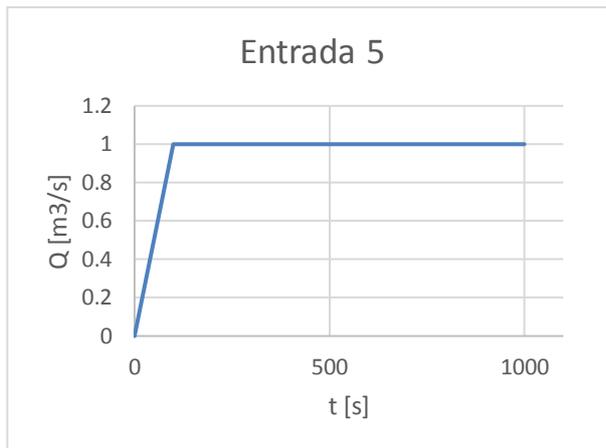


Figura 4-5 Hidrogramas de entrada de caudal

4.4.2 Imbornales

Iber posee la opción de introducir fuentes o sumideros en el modelo bidimensional. En nuestro estudio introduciremos los imbornales como sumideros ubicándolos en las celdas de la malla correspondientes a sus localizaciones reales especificadas en el apartado 4.2. Los caudales que interceptan son los calculados mediante el método del CEDEX en el apartado 4.3.3 tras la segunda iteración. Estos se deben introducir al igual que los caudales de entrada en las condiciones de contorno, como vemos en el ejemplo del sumidero 1 en la imagen inferior.

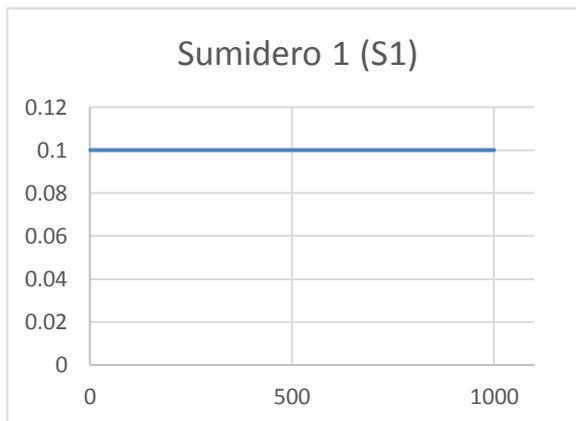


Figura 4-6 Hidrograma caudal sumidero

4.4.3 Datos del cálculo

Para esta simulación se consideran los siguientes parámetros de tiempo.

PARÁMETROS DE TIEMPO

Instante inicial [s]	0
Tiempo máximo de simulación [s]	1000
Intervalo de resultados [s]	100

El tiempo de simulación establecido es el tiempo que tarda el caudal de entrada en llegar del punto más alto de la calle al más bajo. En cuanto al coeficiente CFL se tomará como valor 0.45.

4.5 Análisis de resultados

Nos sumergimos en la parte del post-proceso de Iber para obtener los resultados. Dado que el objetivo es el estudio del flujo en superficie nos centraremos en una visualización de calados y velocidades. Iber posee la opción de visualizar los resultados en forma de áreas coloreadas y ajustar la escala de colores para un mejor análisis de los resultados. Además se realiza un perfil longitudinal del flujo y cuatro perfiles transversales de los puntos de mayor interés.

4.5.1 Calados

Como se ve en la *Figura 4-6* al inicio de la calle el calado ronda valores de 30 cm superando el bordillo de e inundando el acerado. Conforme el agua va discurriendo por la calle va siendo interceptada por los imbornales y su altura va disminuyendo. Además se observa cómo debido a la pendiente transversal de la calle el agua tiende a acumularse más en el lado izquierdo que en el derecho. Se aprecia en la zona central triangular de la calle una parte de la superficie sin agua, esto se debe a una contrapendiente existente en ese punto.

4.5.2 Velocidades

En cuanto a las velocidades obtenemos dos mapas de resultados: un mapa de áreas coloreadas, *Figura 4-7*, y un mapa de vectores de velocidad donde se refleja su dirección, *Figura 4-8*. Se observa que las velocidades en la mayor parte de los puntos toman valores de 0.1 m/s encontrándose las velocidades máximas al inicio de la calle con un valor de 0.7 m/s. Destaca como el agua en determinados puntos yace casi embalsada, zonas en azul oscuro, lo que indica que existen zonas de la topografía propensas a la generación de acumulaciones de agua.

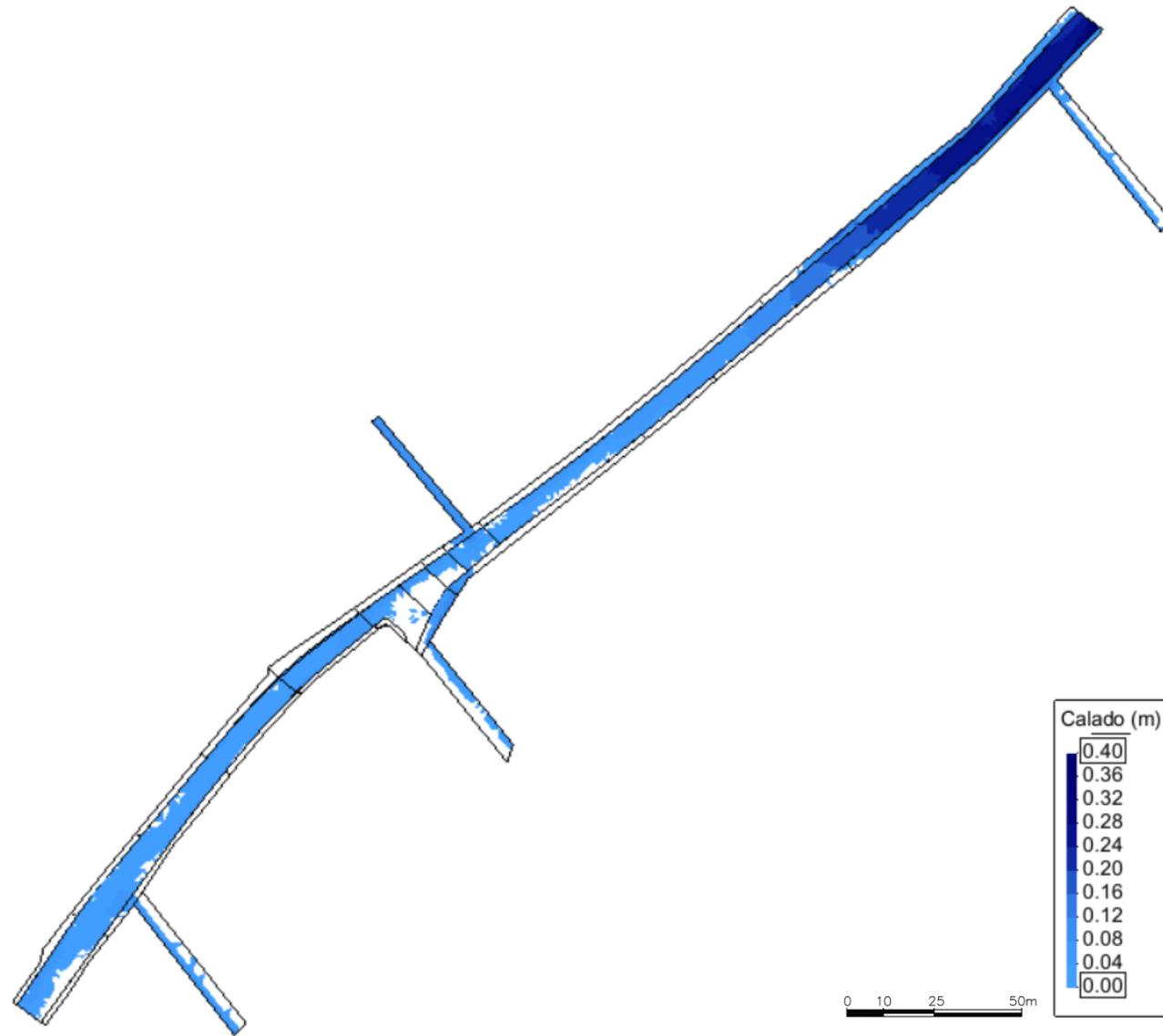


Figura 4-7 Mapa áreas coloreadas de calados en m

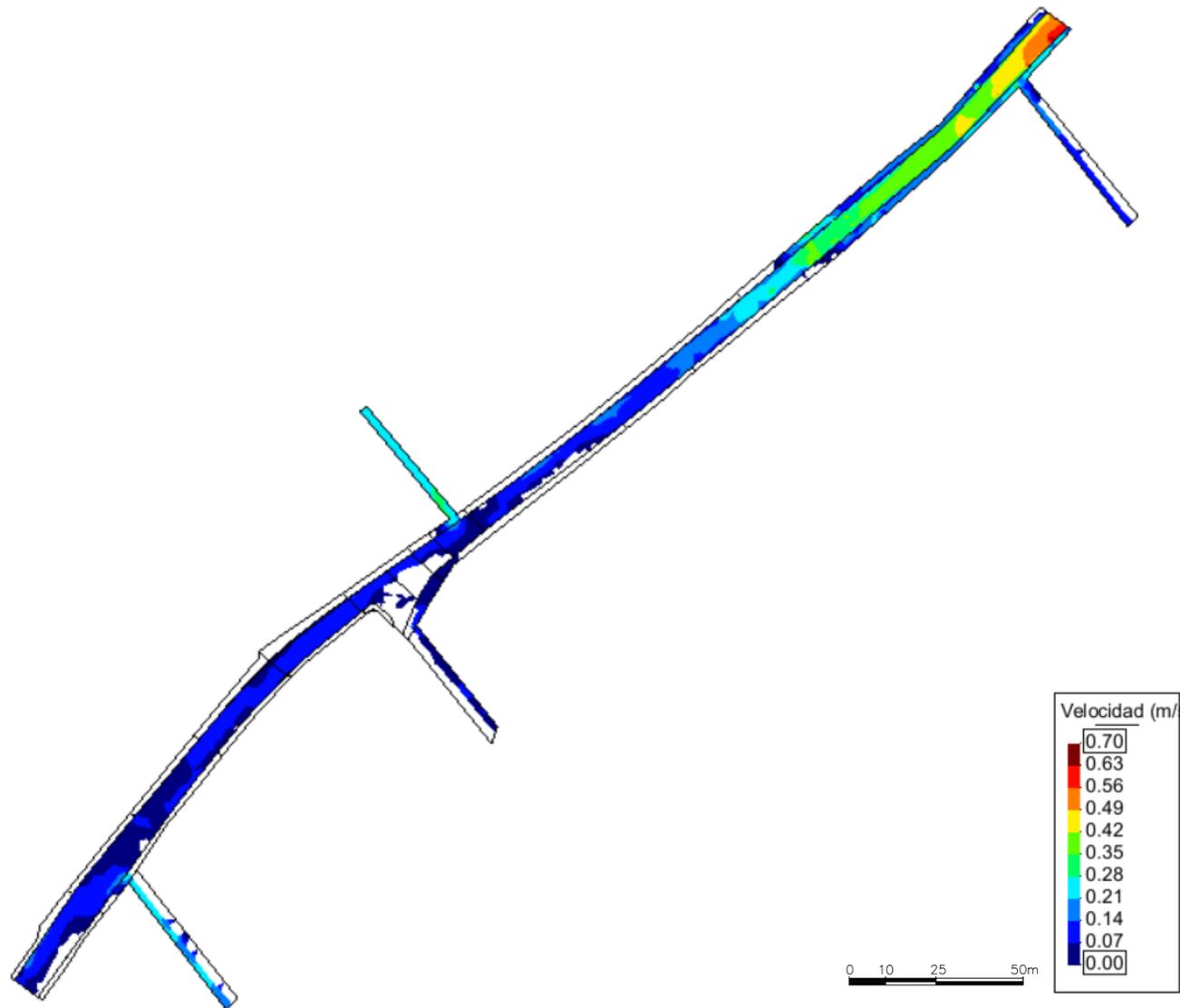


Figura 4-8 Mapa áreas coloreadas de velocidades en m/s

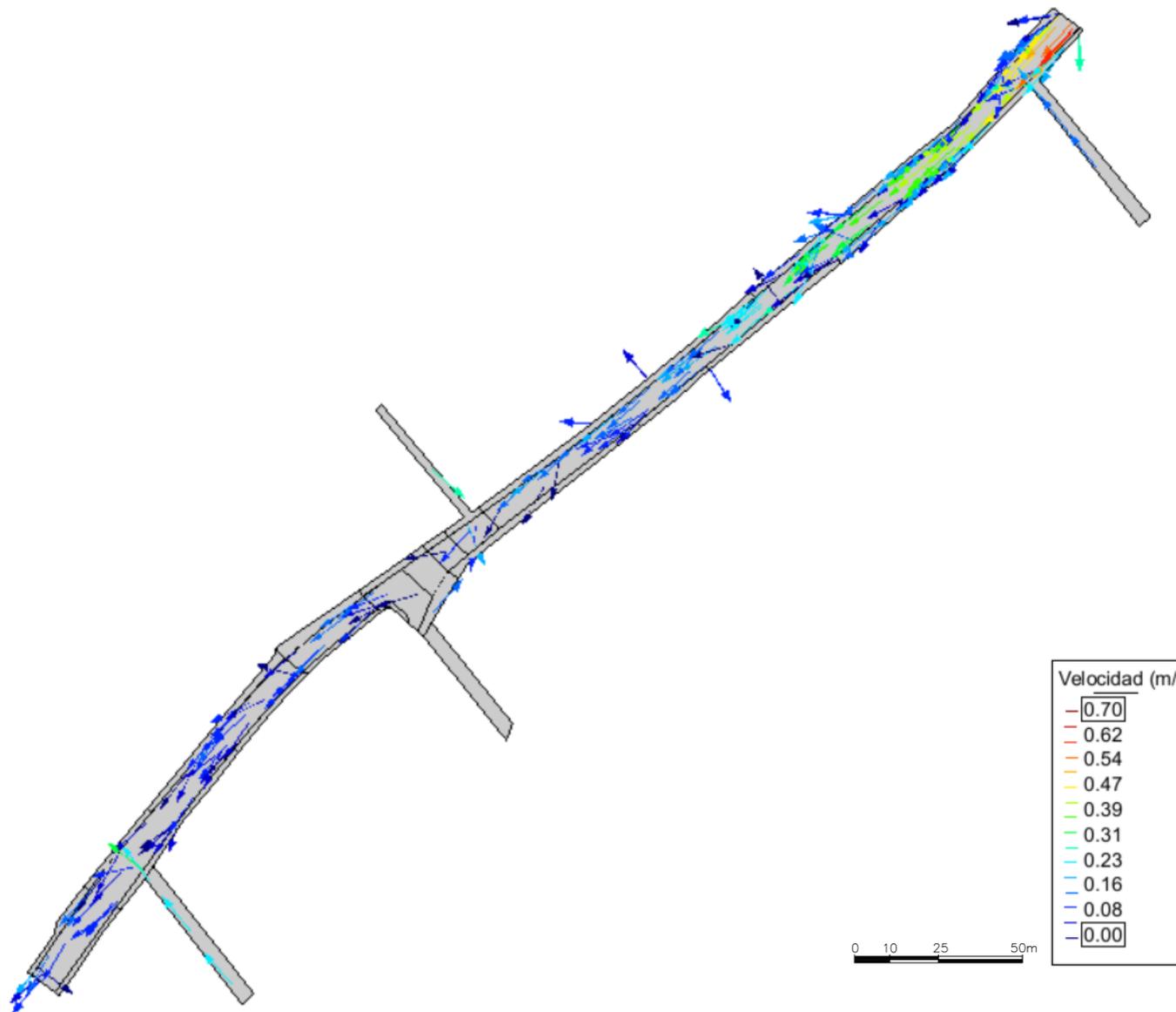


Figura 4-9 Mapa vectores de velocidad en m/s

4.5.3 Perfiles

4.5.3.1 Perfil Longitudinal

Se realiza un perfil longitudinal de la lámina de agua en la calle para analizar el flujo en superficie (Figura 4-10). En él observamos como la lámina de agua está constituida por una línea que sigue la forma de la topografía de la calle y que disminuye en altura a lo largo de esta a medida que el agua de lluvia va siendo captada por los imbornales. En la parte central destacan dos pequeñas subidas y bajadas de la lámina de agua, estas son debidas a la topografía de la calle, que en dicho punto posee dicha morfología.

4.5.3.2 Perfiles Transversales

Se analizan cinco perfiles transversales en los puntos de mayor interés. Su ubicación en la calle queda reflejada en la imagen que se adjunta a continuación. (Figuras de la 4-11 a la 4-1)

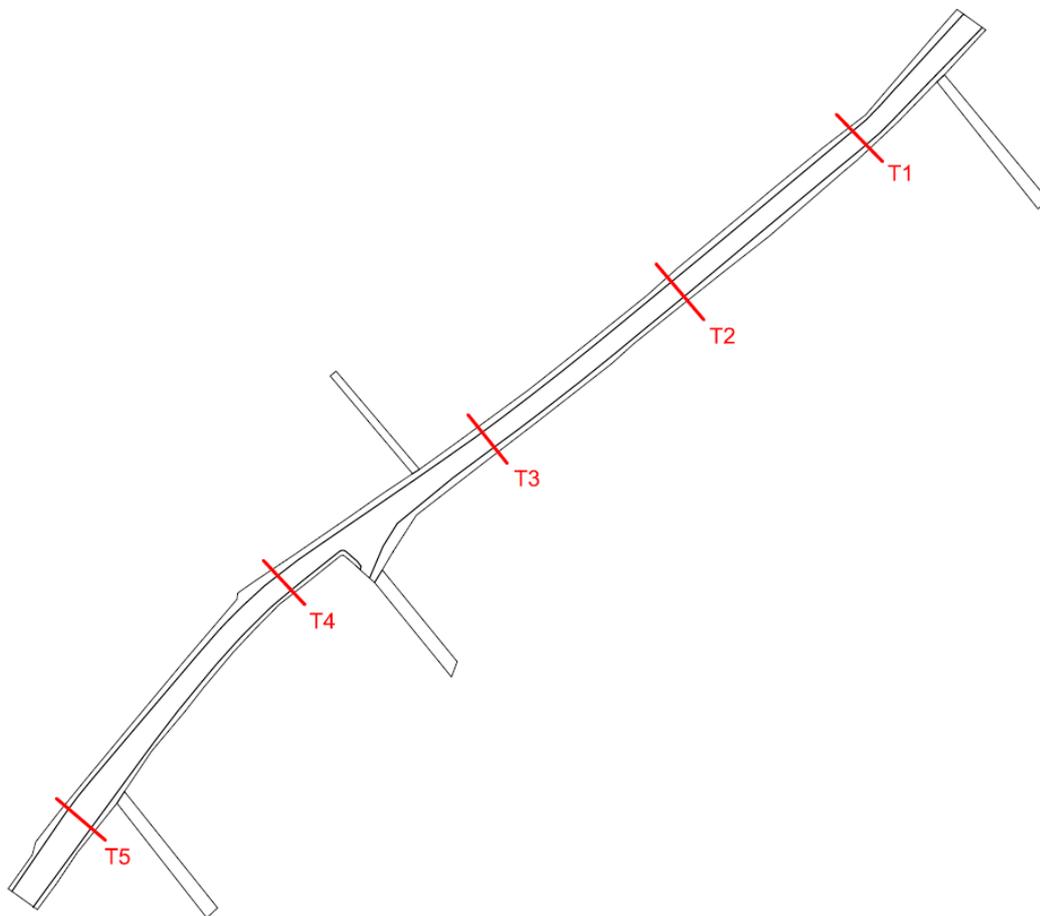


Figura 4-10 Plano con ubicación de los perfiles transversales realizados

Analizando los perfiles transversales podemos ver como el agua al inicio de la calle superaba la altura del bordillo del acerado y como conforme va bajando por la calle al ir siendo captada por los imbornales va disminuyendo en altura. También se aprecia la pendiente transversal de la calle que hace acumularse al agua en el lateral izquierdo de esta.

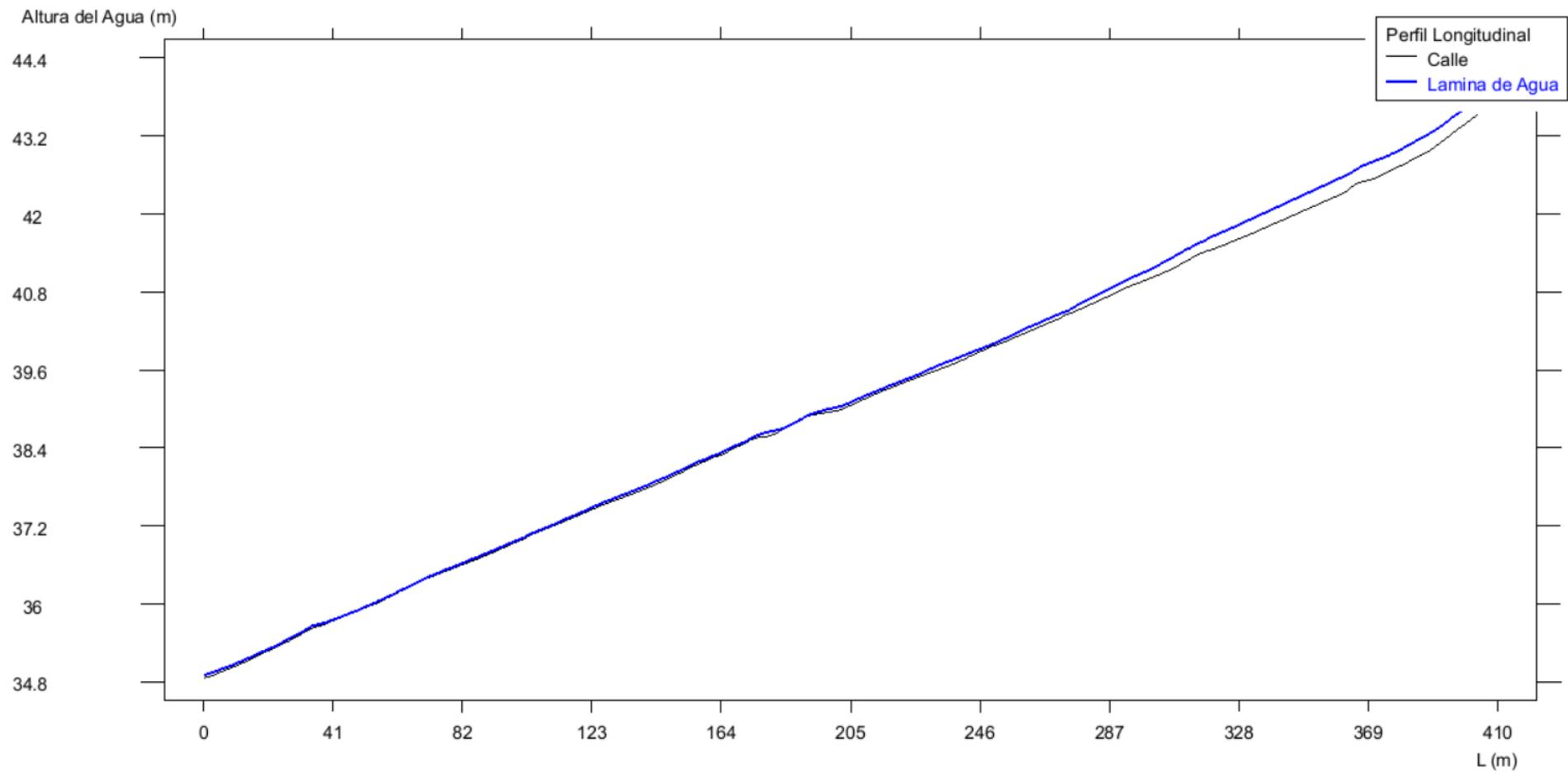


Figura 4-11 Perfil Longitudinal

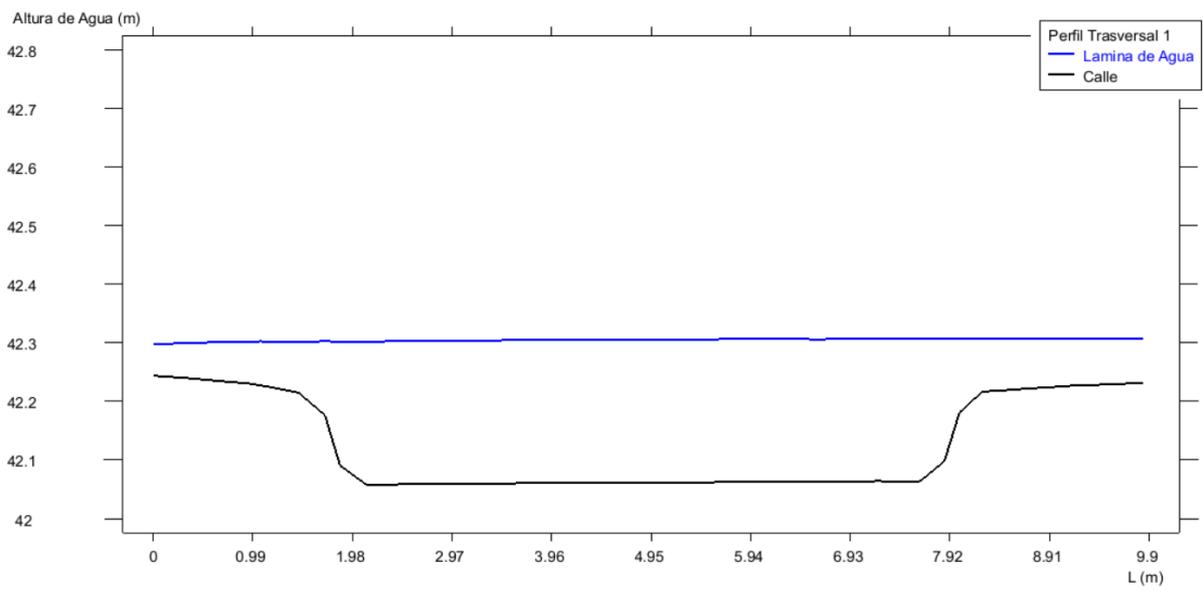


Figura 4-12 Perfil Trasversal 1 (T1)

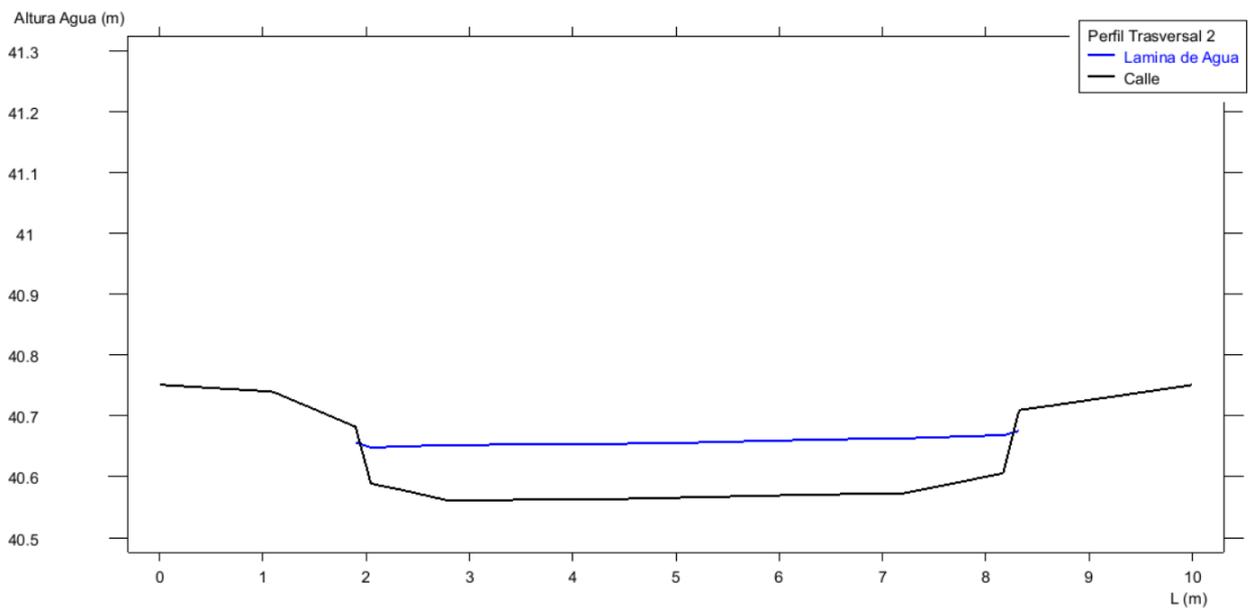


Figura 4-13 Perfil Trasversal 2 (T2)

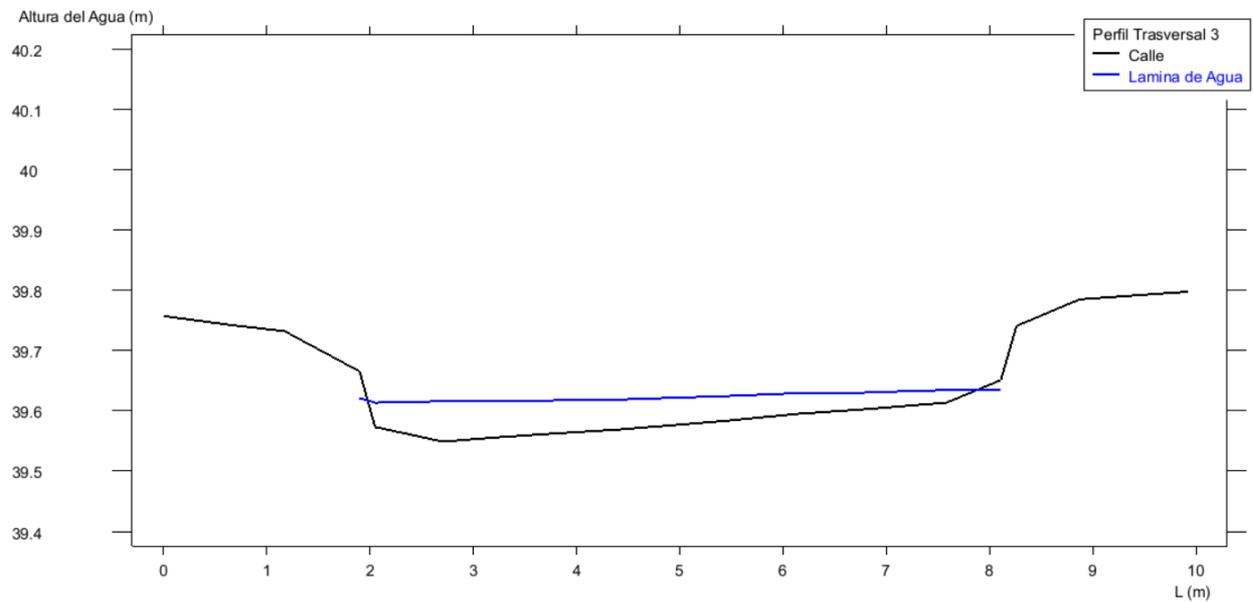


Figura 4-14 Perfil Trasversal 3 (T3)

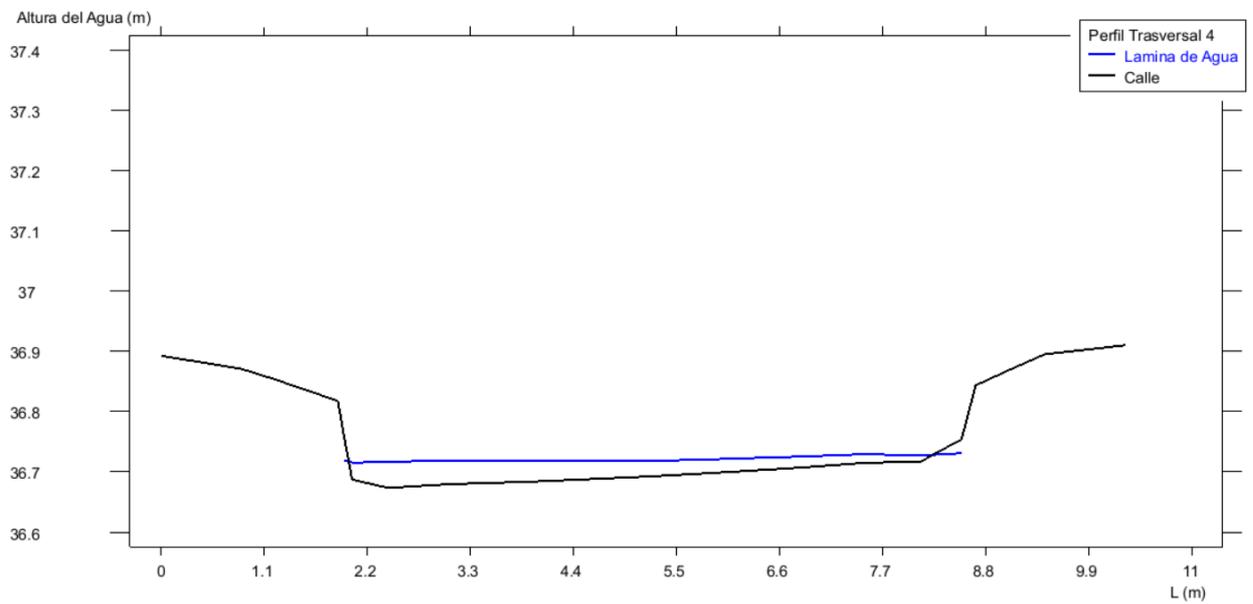


Figura 4-15 Perfil Trasversal 4 (T4)

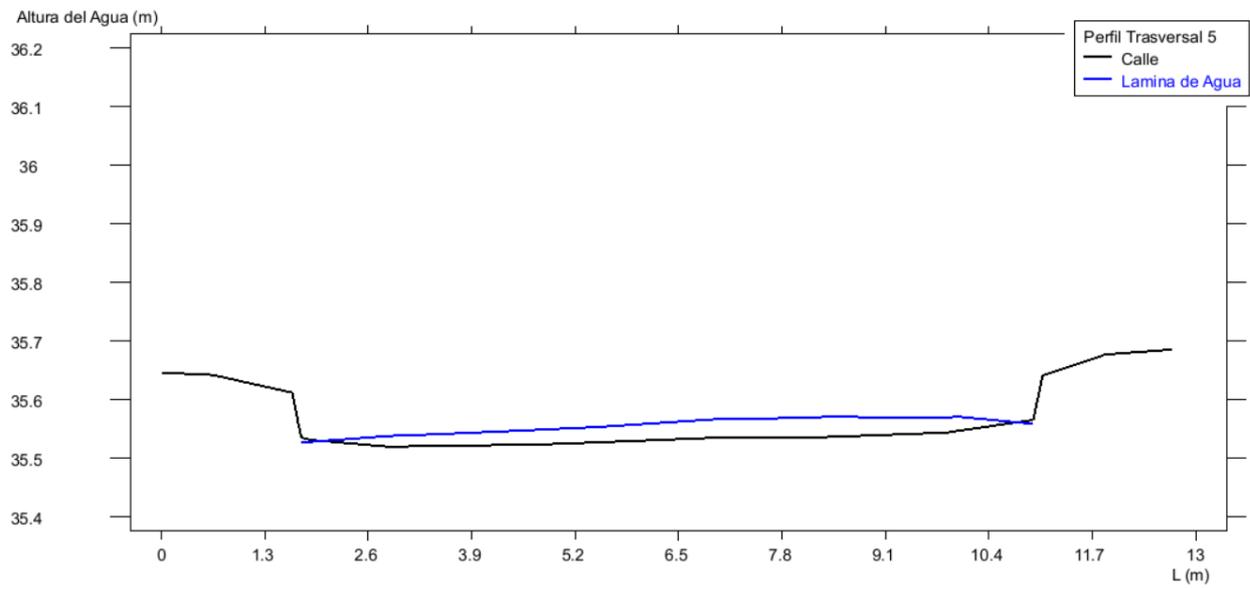


Figura 4-16 Perfil Trasversal 5 (T5)

5 SIMULACIÓN AVENIDA OCTUBRE 2007

Con la finalidad de validar el modelo se realiza una simulación del evento meteorológico acaecido el 2 de Octubre de 2007 y se analizan los resultados obtenidos para comprobar si corresponden con los que se produjeron en la realidad. Este día señalado conocido por todos los alcalaños cayeron 60l/m^2 en tan solo 20 minutos. Fue una lluvia histórica precedida por un granizo de unos 4 cm de diámetro que destruyó persianas, cristales y taponó los imbornales. Esto hizo que el agua se elevara hasta más de un metro de altura provocando el deslizamiento de los coches que formaron una barrera transversal en la calle impidiendo el paso del agua. Los bomberos y técnicos del municipio corroboran que el agua llegó hasta el metro y medio de altura en el instante punta.



Figura 5-2 Velocidad debido a pendiente



Figura 5-1 Situación pasada la tormenta



Figura 5-3 Granizo en suspensión



Figura 5-4 Barrera de coches

5.1 Caudal de escorrentía

Se calcula el caudal de escorrentía partiendo del dato de precipitación 60l/m^2 , obtenido de un documento oficial proporcionado por el Ayuntamiento de Alcalá, empleando el método del hidrograma triangular de Temez.

Para ello primero se necesita el tiempo de concentración de la cuenca, T_c , obtenido mediante la siguiente expresión.

$$T_c = T_e + T_r \quad (5.1.1)$$

El tiempo de escorrentía, T_e , se calcula como:

$$T_e = 0.0543 \cdot (1.1 - C) \cdot L^{\frac{1}{2}} \cdot S^{-\frac{1}{3}} \quad (5.1.2)$$

Dónde:

- C coeficiente de escorrentía
- L ancho de la cuenca, en m
- S pendiente longitudinal de la cuenca, en %

El tiempo de recorrido, T_r , se calcula como:

$$T_r = \frac{L_o}{v} \quad (5.1.3)$$

Dónde:

- L_o longitud de la cuenca, en m
- v velocidad del agua, en m/s

Aplicamos esto a la cuenca de cada entrada de caudal considerando un coeficiente de escorrentía de 0.85 ya que nos encontramos en un núcleo urbano y una velocidad de agua de diseño de 1 m/s.

	C1	C2	C3	C4	C5
P [mm]	60	60	60	60	60
A [m²]	301346	34255	122948	12237	50421
L[m]	1134	371	466	10	345
S [%]	3	7	8	91	6
T_e [min]	19	8	9	1	8
T_r [min]	19	6	8	0.2	6
T_c [min]	38	15	17	1.2	14

Tabla 5-1 Cálculo de los tiempos de concentración

Una vez obtenidos los tiempos de concentración se calculan los caudales punta mediante el método de los triángulos de Temez.

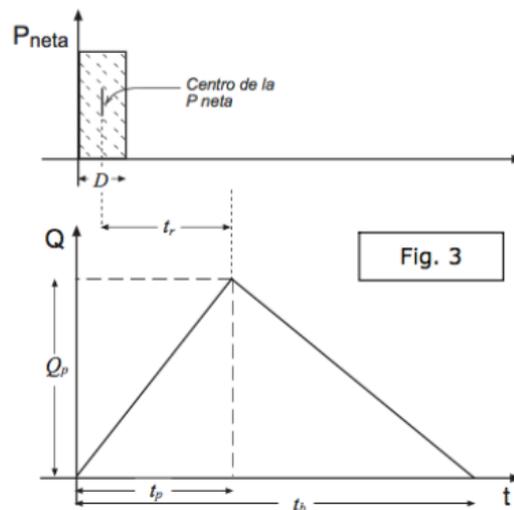


Figura 5-5 Hidrograma triángulos de Temez

$$Q_p = \frac{P \cdot A}{1.8 \cdot t_b} \tag{5.1.4}$$

Dónde el tiempo de base, t_b , y el tiempo de pico, t_p , se calculan mediante las siguientes expresiones.

$$t_p = 0.5 \cdot D + t_r \tag{5.1.5}$$

$$t_r = \frac{3}{8} t_c - \frac{1}{8} D \tag{5.1.6}$$

$$t_b = D + t_c \tag{5.1.7}$$

Siendo D la duración de la lluvia que fueron 20 minutos y t_c el tiempo de concentración obtenido anteriormente obtenemos los caudales punta para cada subcuenca.

	C1	C2	C3	C4	C5
P [mm]	60	60	60	60	60
A [m²]	301346	34255	122948	12237	50421
t_c [min]	38	15	17	1	14
t_p [min]	22	13	14	8	13
t_b [min]	58	35	37	21	34
Q_p [m³/s]	10.4	2.0	6.7	1.2	3.0

Tabla 5-2 Caudales punta

5.2 Descripción de las simulaciones realizadas

A la hora de realizar la modelización en Iber dado que los imbornales estaban obstruidos por el granizo, no los introduciremos en el modelo. Además a fin de simular la barrera generada por los coches elevaremos una determinada zona de la calle a una altura constante.

Pero, ¿qué hubiera pasado si los vehículos no se hubieran amontonado?, ¿hubiera subido el agua a la misma altura? ¿Y si los imbornales no se hubiesen obstruido con el granizo? Para responder estas cuestiones realizaremos dos simulaciones y contrastaremos los resultados obtenidos.

- Simulación 1. Avenida de Octubre de 2007.
- Simulación 2. Variante sin barrera de coches.
- Simulación 3. Variante con imbornales en funcionamiento.

5.3 Modelización en Iber

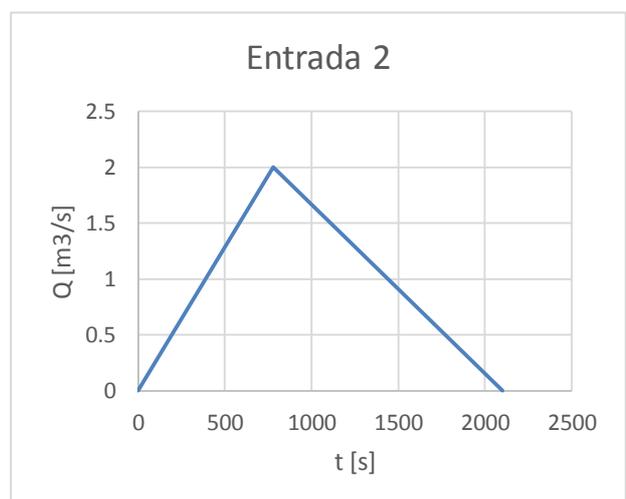
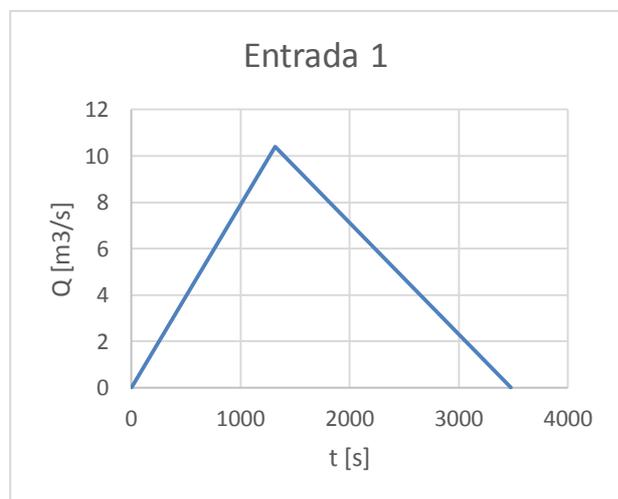
Partiendo de la geometría y la malla ya generadas y explicadas en el apartado 3, se procede a la modelización de la respuesta de la calle ante la lluvia acaecida el 2 de Octubre de 2007.

5.3.1 Condiciones de contorno

Se introducen en Iber los caudales de entrada modelados como los hidrogramas triangulares obtenidos por el método de los triángulos de Temez.

E1		E2		E3		E4		E5	
t [s]	Q[m ³ /s]								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1320	10.4	780	2	840	6.4	480	1.2	780	3
3480	0	2100	0	2220	0	1260	0	2040	0

Tabla 5-3 Caudales de entrada



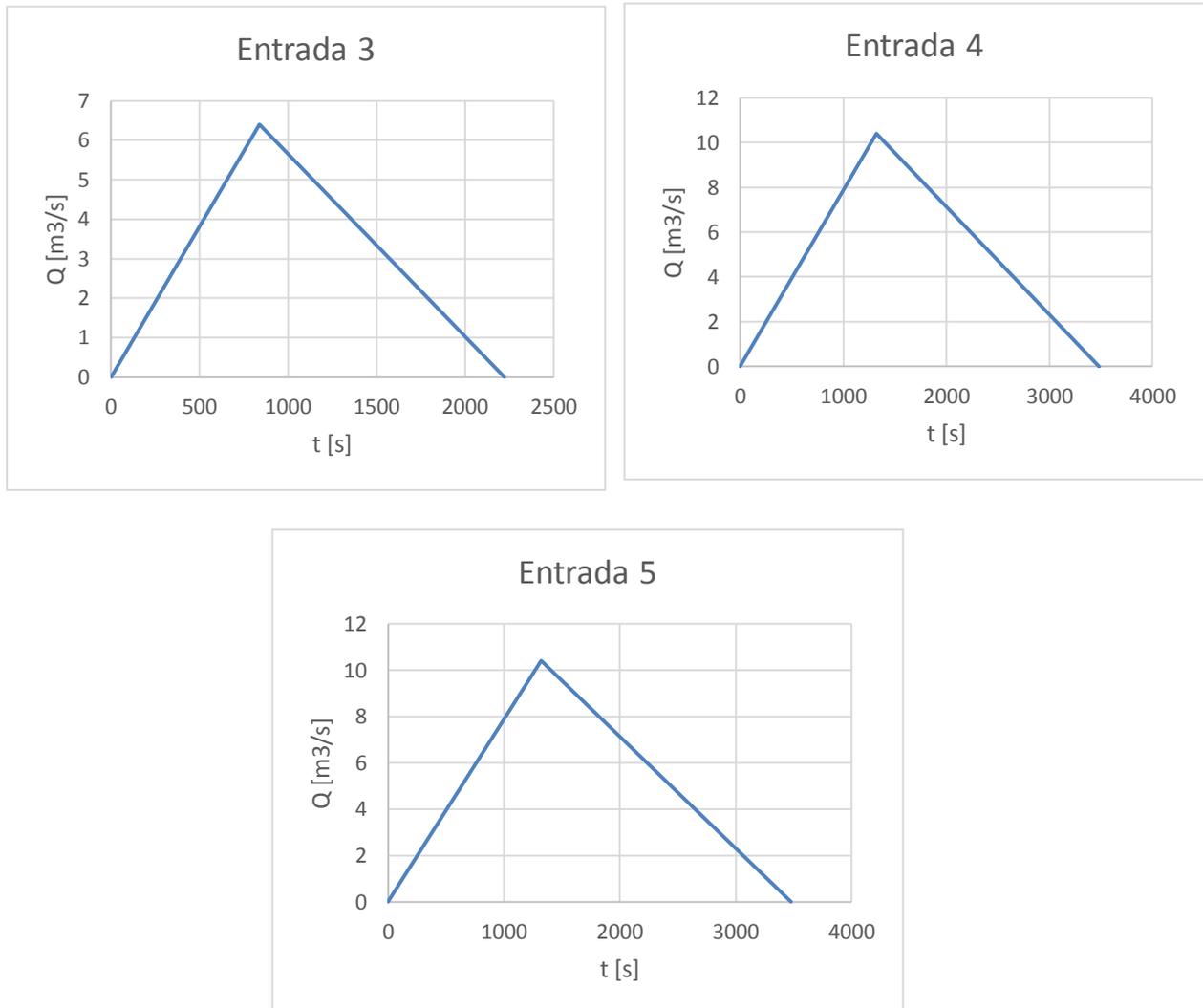


Figura 5-6 Hidrogramas caudal entrada

5.3.2 Barrera de vehículos

La barrera generada por el deslizamiento de vehículos se realiza de forma aproximada tomando como base las fotos obtenidas del día de la inundación.



Figura 5-7 Barrera de coches tras Avenida 2007

Se modela la presa de coches como una reducción de la sección de la calle. A pesar de que la barrera abarque toda la longitud transversal de la calle, a través de los huecos entre los coches circula el agua. Por este motivo se deciden crear dos bloques separados una distancia de 1m que permita el paso del agua. Las dimensiones de dichos bloques están reflejadas en los croquis inferiores.

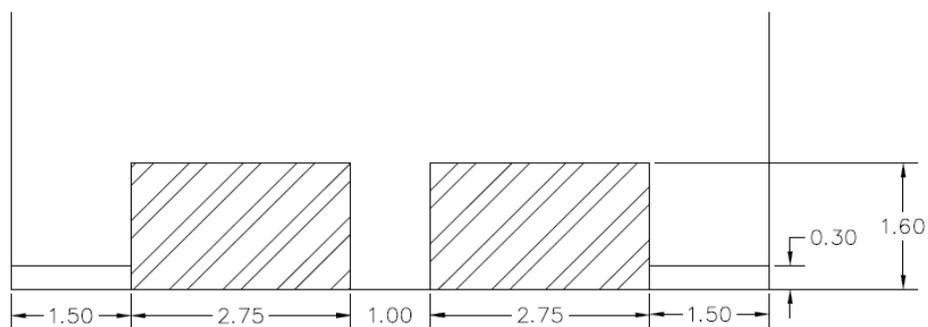


Figura 5-8 Croquis en alzado modelación barrera de coches. Medidas en m.

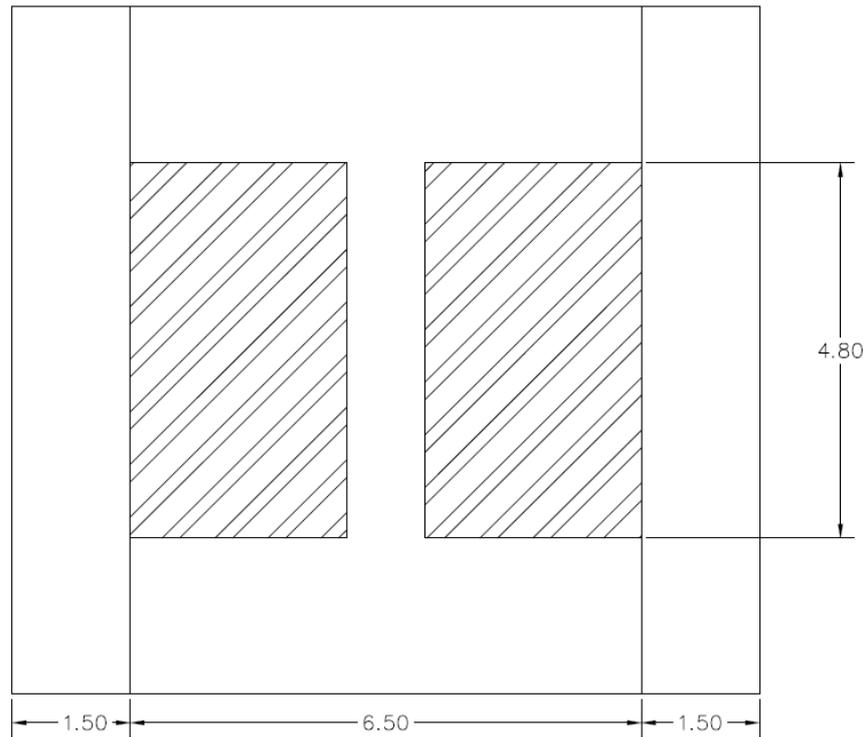


Figura 5-9 Croquis en planta modelación barrera de coches. Medidas en m.

Iber posee una opción que eleva los puntos de la malla ya creada a una altura constante. Se emplea dicha opción para generar los bloques obteniendo el resultado que se muestra en la imagen inferior.

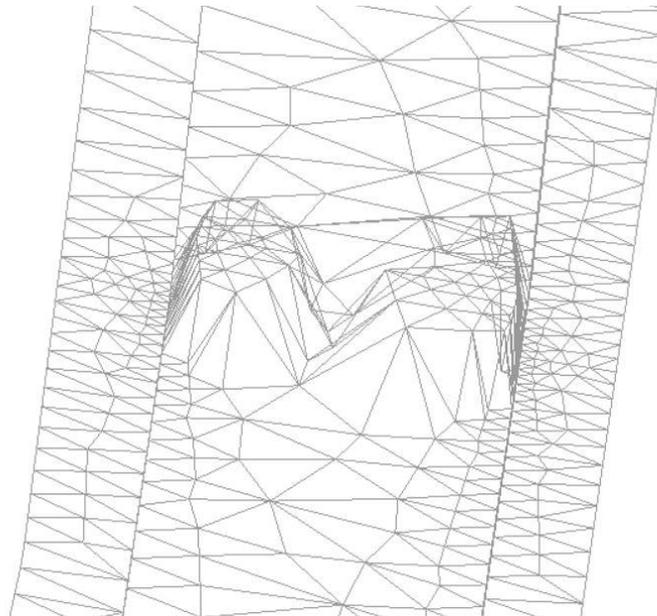


Figura 5-10 Modelación de la barrera en Iber

Como se observa el resultado obtenido es irregular ya que la malla generada es no estructurada y las celdas son de geometría triangular. Se puede decir que el resultado obtenido imita con mayor precisión la realidad que dos bloques rectangulares.

5.3.3 Sumideros

Para simular la casuística de que los sumideros no se hubieran taponado, variante 3, consideramos que estos captan un caudal máximo de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Serán introducidos de la misma forma que hicimos en el apartado 4.4.2.

5.3.4 Datos del cálculo

Para esta simulación se consideran los siguientes parámetros de tiempo.

PARÁMETROS DE TIEMPO	
Instante inicial [s]	0
Tiempo máximo de simulación [s]	1500
Intervalo de resultados [s]	100

Tabla 5-4 Parámetros de tiempo

El tiempo de simulación establecido es el tiempo que tarda la tormenta en alcanzar su caudal punta. En cuanto al coeficiente CFL se tomará como valor 0.9. Se observa un incremento de este valor con respecto la simulación realizada en el apartado 4. Esto es debido a que el caudal es 10 veces mayor al de la primera simulación y por ello el coste computacional será a su vez 10 veces mayor. Si con un caudal de $1 \text{ m}^2/\text{s}$ el software tardaba en finalizar el cálculo 7 horas, de no aumentar el coeficiente CFL, en esta simulación con un caudal de más de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ tardaría 3 o 4 días en finalizar.

5.4 Análisis de resultados

5.4.1 Simulación 1. Avenida de Octubre de 2007

5.4.1.1 Calados

En la *Figura 5-10* se observan unos calados reamente altos pero acordes con los presenciados aquel 2 de Octubre de 2007. Destaca el calado máximo en el punto precedente a la presa de coches con un valor de 1.52m.

5.4.1.2 Velocidades

Las velocidades como refleja la *Figura 5-11* rondan valores de 1 m/s en la mayoría de los puntos, destacando dos zonas de altas velocidades, la entrada 3, calle Monroy, y los laterales de la barrera de coches donde alcanzan los 2.17 m/s .

5.4.2 Simulación 2. Variante sin barrera de coches

5.4.2.1 Calados

Como se observa en la *Figura 5-14*. La inexistencia de la barrera de coches genera una disminución de calados, de 1.52m a 1.37m, tan solo 20cm. El calado continua siendo demasiado elevado por tanto la barrera de coches no fue la causa de la alta elevación de la lámina de agua.

5.4.2.2 Velocidades

En cuanto a las velocidades, reflejadas en la *Figura 5-15*, se elimina la zona de altas velocidades generada a los laterales de la barrera pero a lo largo de la calle siguen teniendo el mismo valor.

5.4.3 Simulación 3. Variante con imbornales en funcionamiento

5.4.3.1 Calados

En la *Figura 5-16* se observa como el calado no varía en cuanto a la variante sin barrera de coches. Esto se debe a la gran altura de la lámina de agua y velocidad que hace que los imbornales no capten el agua sino que esta discorra por encima de ellos al pasar.

5.4.3.2 Velocidades

Analizando las velocidades en la *Figura 5-17* si se aprecia una disminución en su valor a lo largo de la calle.

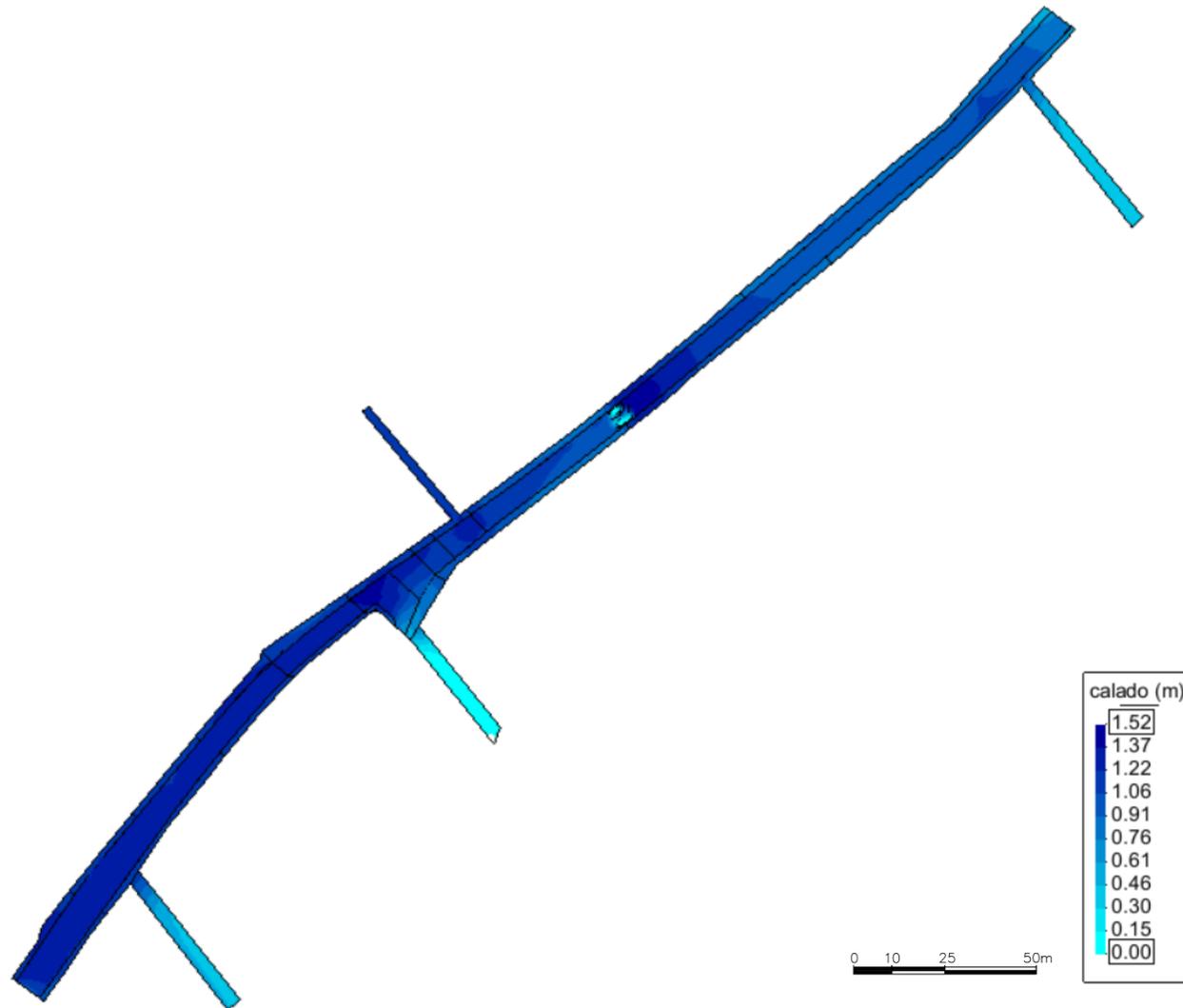


Figura 5-11 Resultados simulación 1. Calados en m.

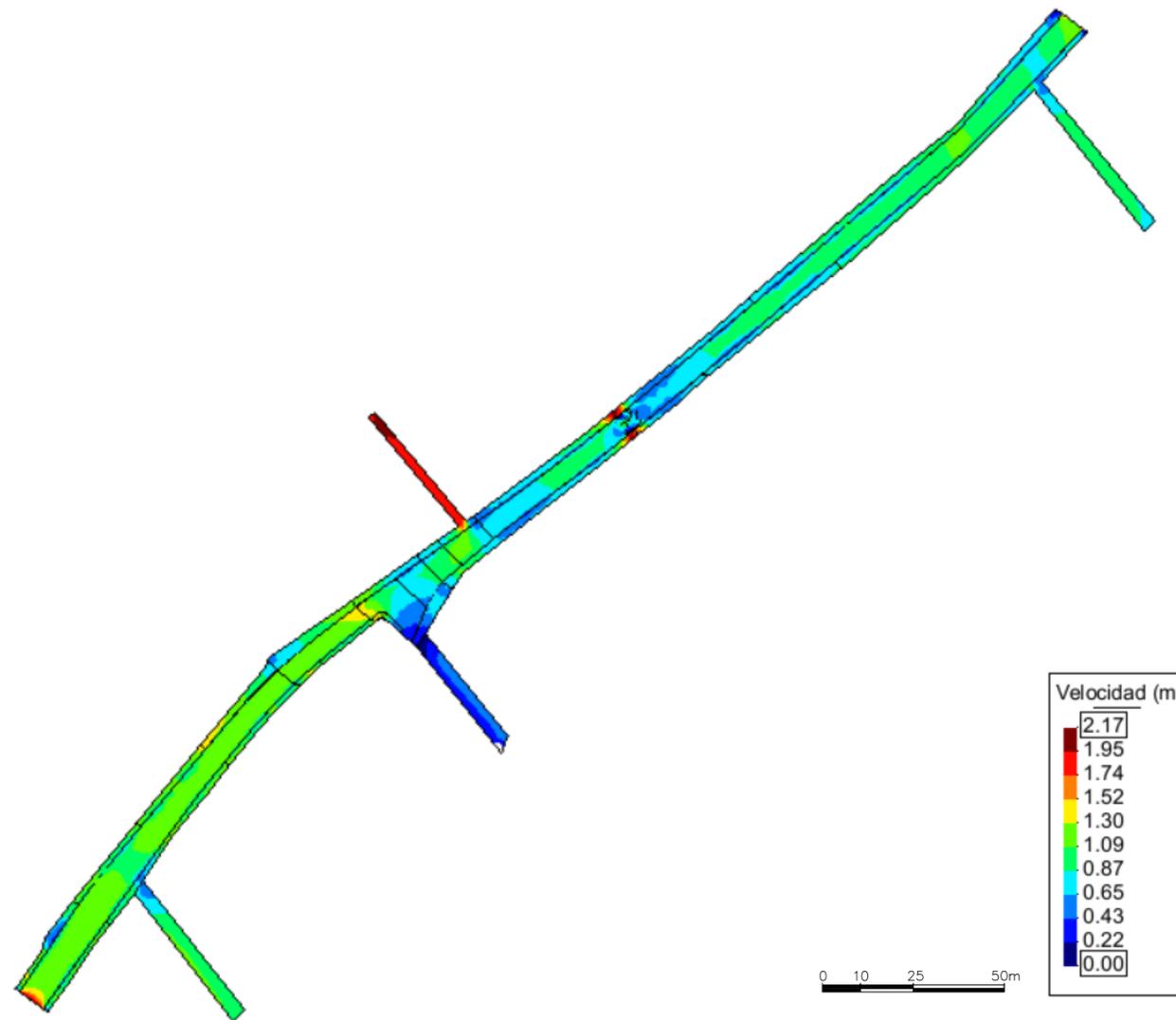


Figura 5-12 Resultados simulación 1. Velocidades en m/s.

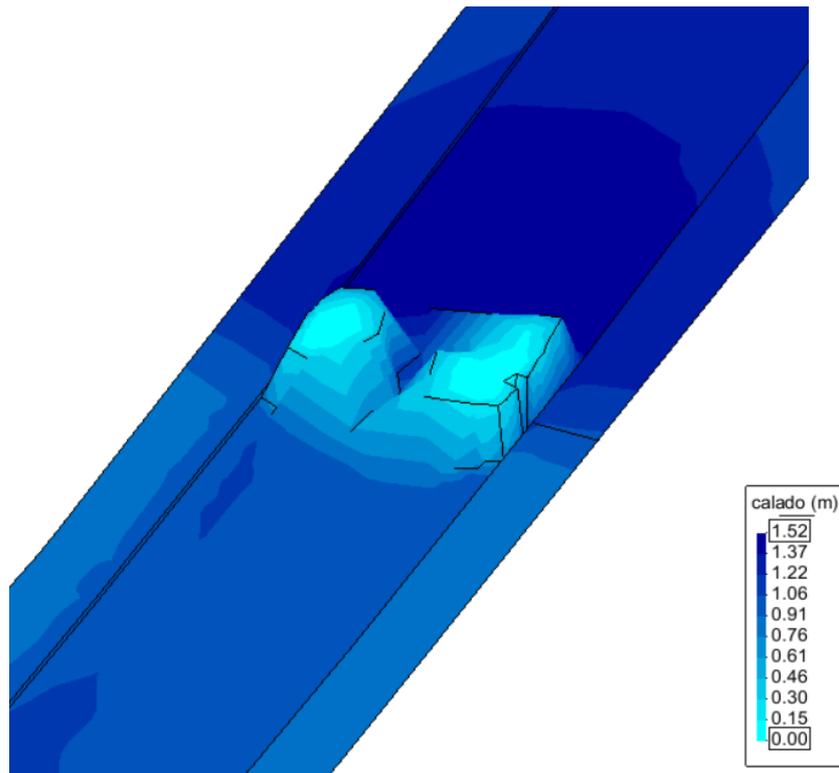


Figura 5-13 Detalle de calados en barrera de coches

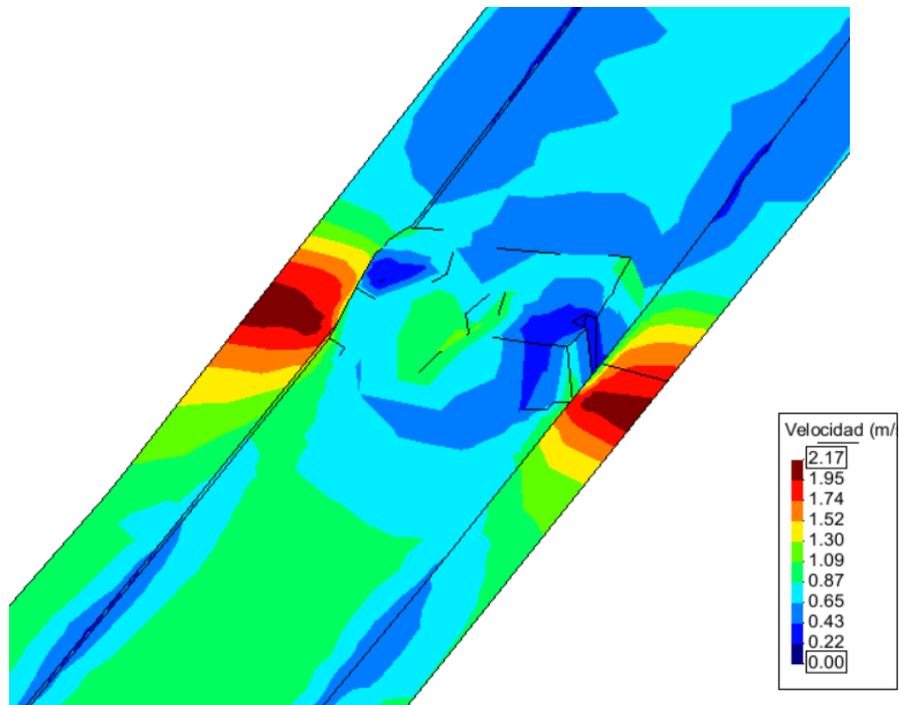


Figura 5-14 Detalle de velocidades en barrera de coches

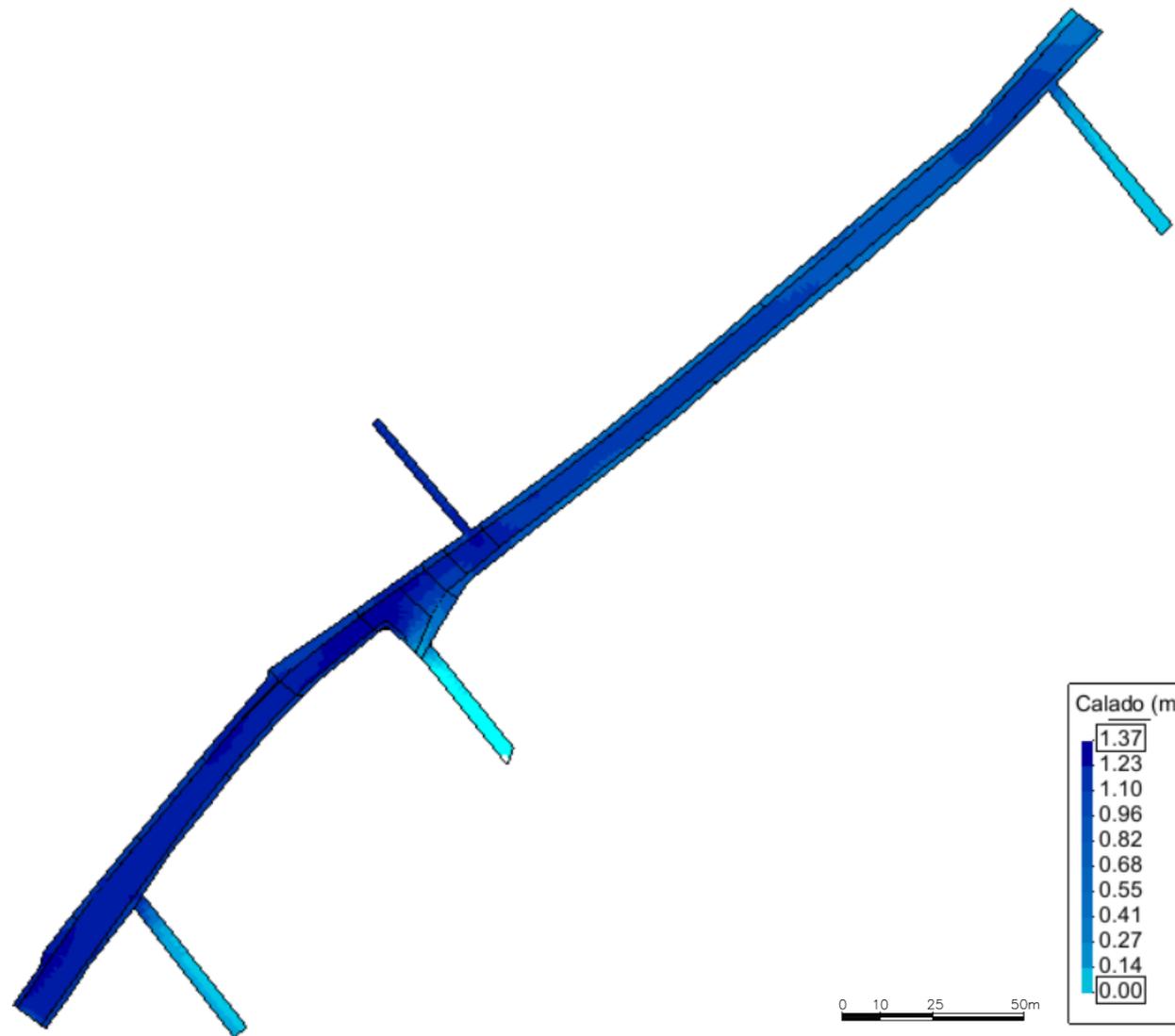


Figura 5-15 Resultados simulación 2. Calados en m.

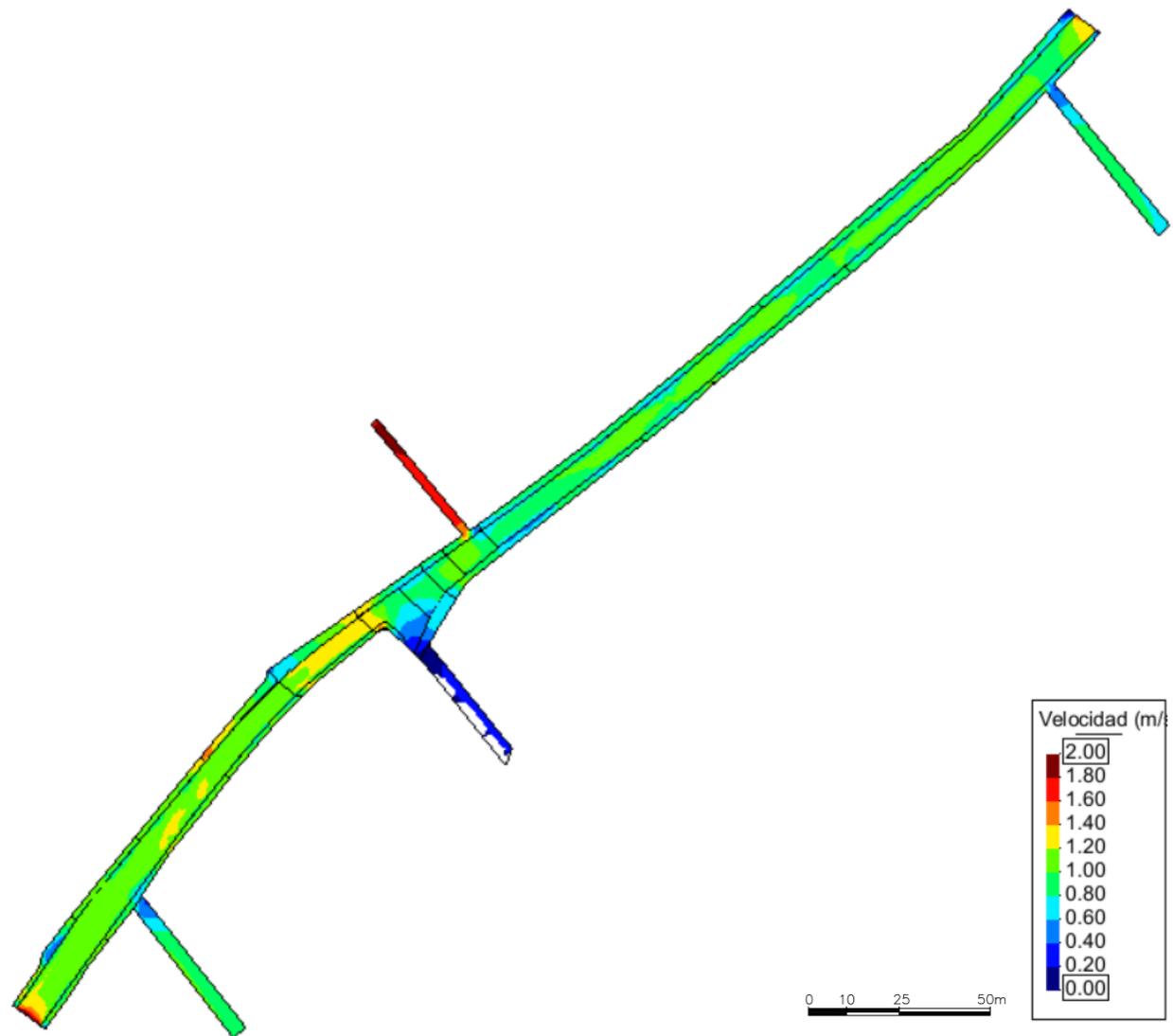


Figura 5-16 Resultados simulación 2. Velocidades en m/s.

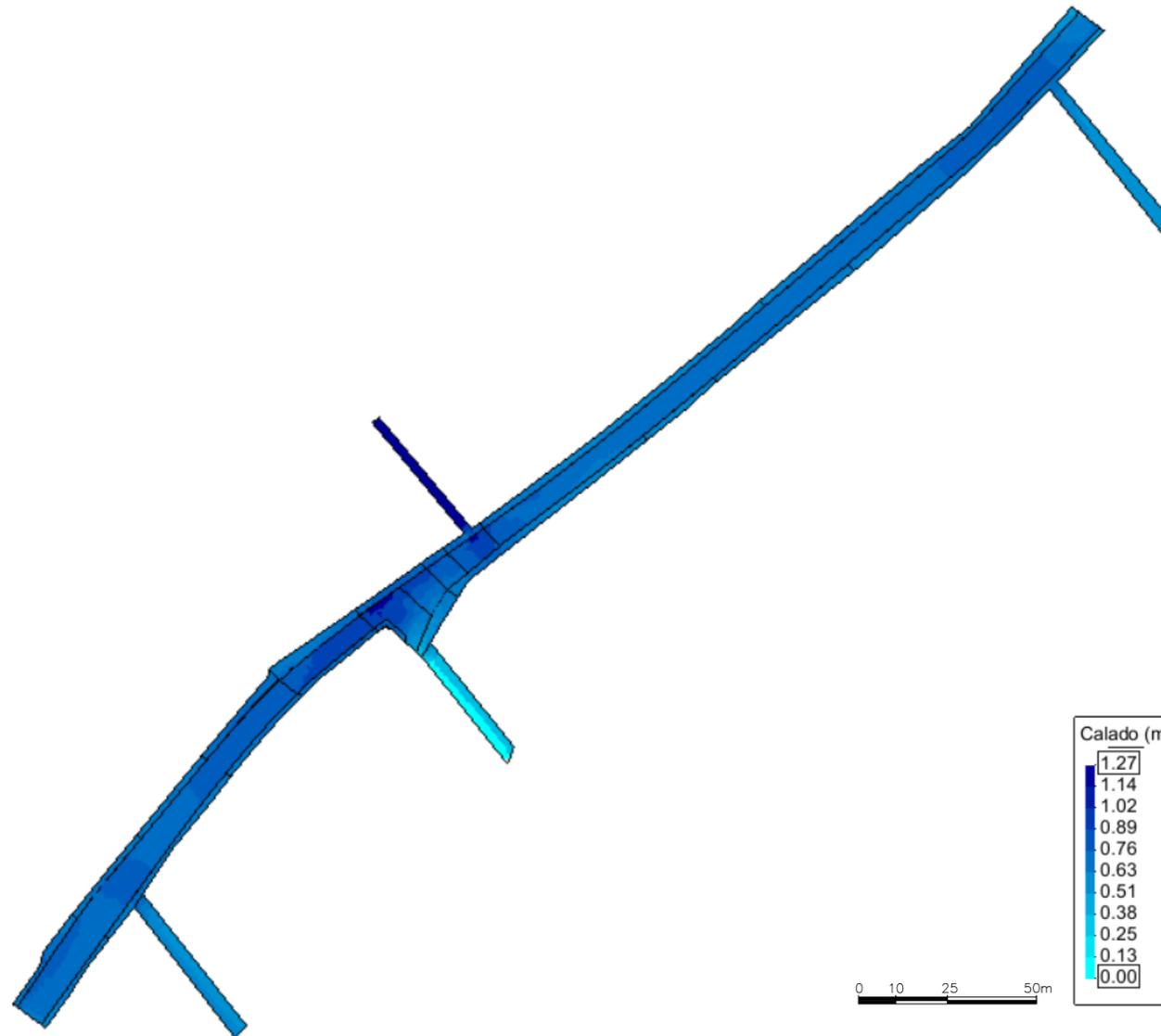


Figura 5-17 Resultados simulación 3. Calados en m.

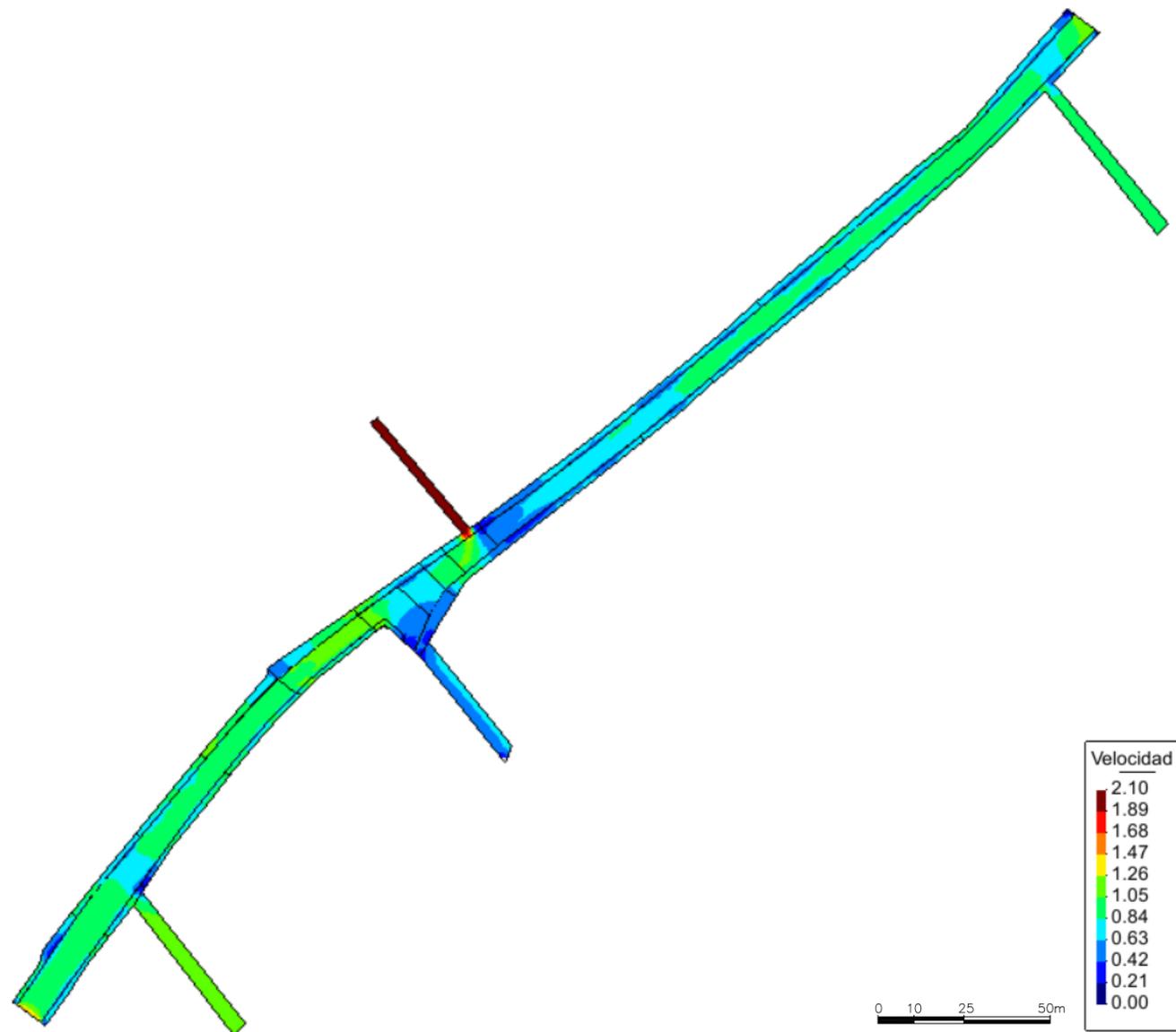


Figura 5-18 Resultados simulación 3. Velocidades en m/s.

5.5 Situación tras actuaciones de mejora frente inundaciones

Tras estas fuertes lluvias se realizaron una serie de actuaciones a fin de evitar que unas consecuencias similares ante un evento meteorológico similar. Se construyó el tanque de tormenta de Alcalá de Guadaira y se aumentaron los diámetros de las conducciones en determinadas zonas estratégicas de la cuenca urbana pertenecientes al “Plan Centro”, inversiones de saneamiento de la ciudad por cuestiones de seguridad.

El tanque de tormenta se encuentra ubicado bajo el Parque Centro del municipio, es una infraestructura subterránea de retención de aguas pluviales con capacidad de 8.000 m³, con volumen máximo de 11.500 m³. Su función es que el excedente de aguas del norte de la ciudad, ante un episodio importante de tormenta, sea retenido para devolverlo a la red de la calle Mairena (red de galería que continua bajo la calle Ntra. Sra. Del Águila) posteriormente.

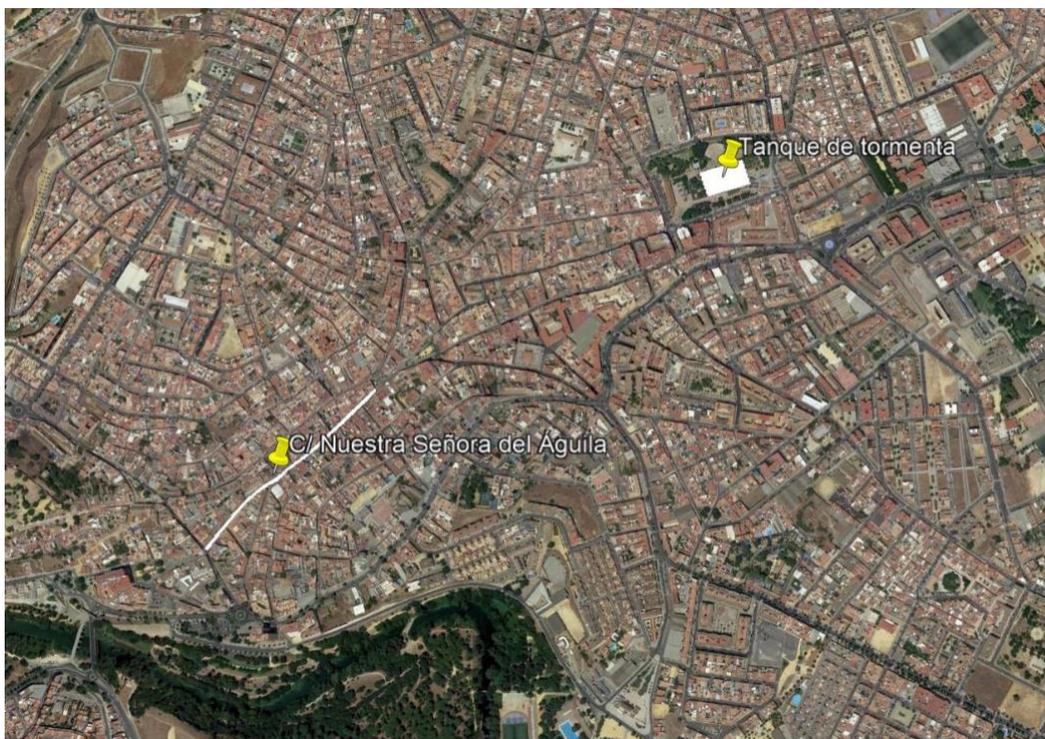


Figura 5-19 Ubicación del tanque de tormenta de Alcalá de Guadaira

En este apartado del proyecto se pretende responder a la pregunta, ¿qué ocurriría si tras estas mejoras y aumento de la capacidad de saneamiento se reprodujera la lluvia del 2 de Octubre de 2007? Se modelizará en Iber esa casuística teniendo en consideración el agua de precipitación retenida por el tanque de tormenta y considerando un buen funcionamiento de los imbornales existentes en la calle.

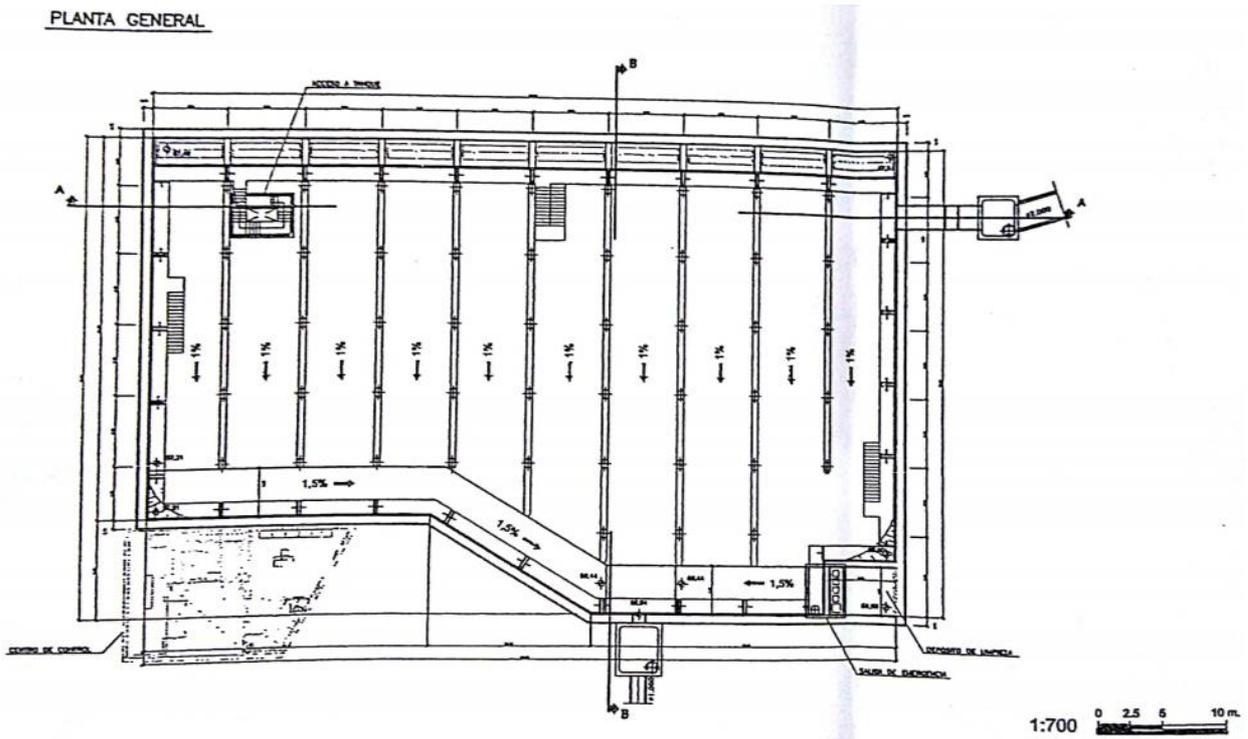


Figura 5-20 Detalle plano del tanque de tormenta

5.5.1 Modelización en Iber

La modelización en Iber de esta situación se realizará de la misma forma que en el apartado 5.3 considerando que los imbornales captan un caudal constante de 0.1 m³/s y dado que el caudal es mucho menor no se contempla la posibilidad de la formación de la barrera de coches.

Los caudales punta se han calculado siguiendo el mismo procedimiento que en el apartado 5.1 considerando que el tanque de tormenta retiene un 70% de las aguas que precipitan en la cuenca, dato proporcionado por EMASESA.

ENTRADA	CALLE ASOCIADA	Q _p [m ³ /s]
E1	Nuestra Señora del Águila	3.1
E2	Blanca de los Ríos	0.6
E3	Sta. Clara	2
E4	Mario Mendez Bejarano	0.4
E5	Monroy	0.9

Los tiempos de cálculo de la simulación son a su vez los mismos que los indicados en el apartado 5.3.4.

5.5.2 Análisis de los resultados

5.5.2.1 Calados

En la *Figura 5-20* vemos como el agua sube por encima del bordillo pero solamente hasta una altura de 0.5m altura con respecto los 1.2 metros que se generaban antes de la ejecución del tanque de tormenta.

5.5.2.2 Velocidades

En cuanto a las velocidades vemos en la *Figura 5-21* como se reducen considerablemente de una máxima de 2.1 m/s que teníamos sin el tanque a 1.15 m/s tras la ejecución de este.

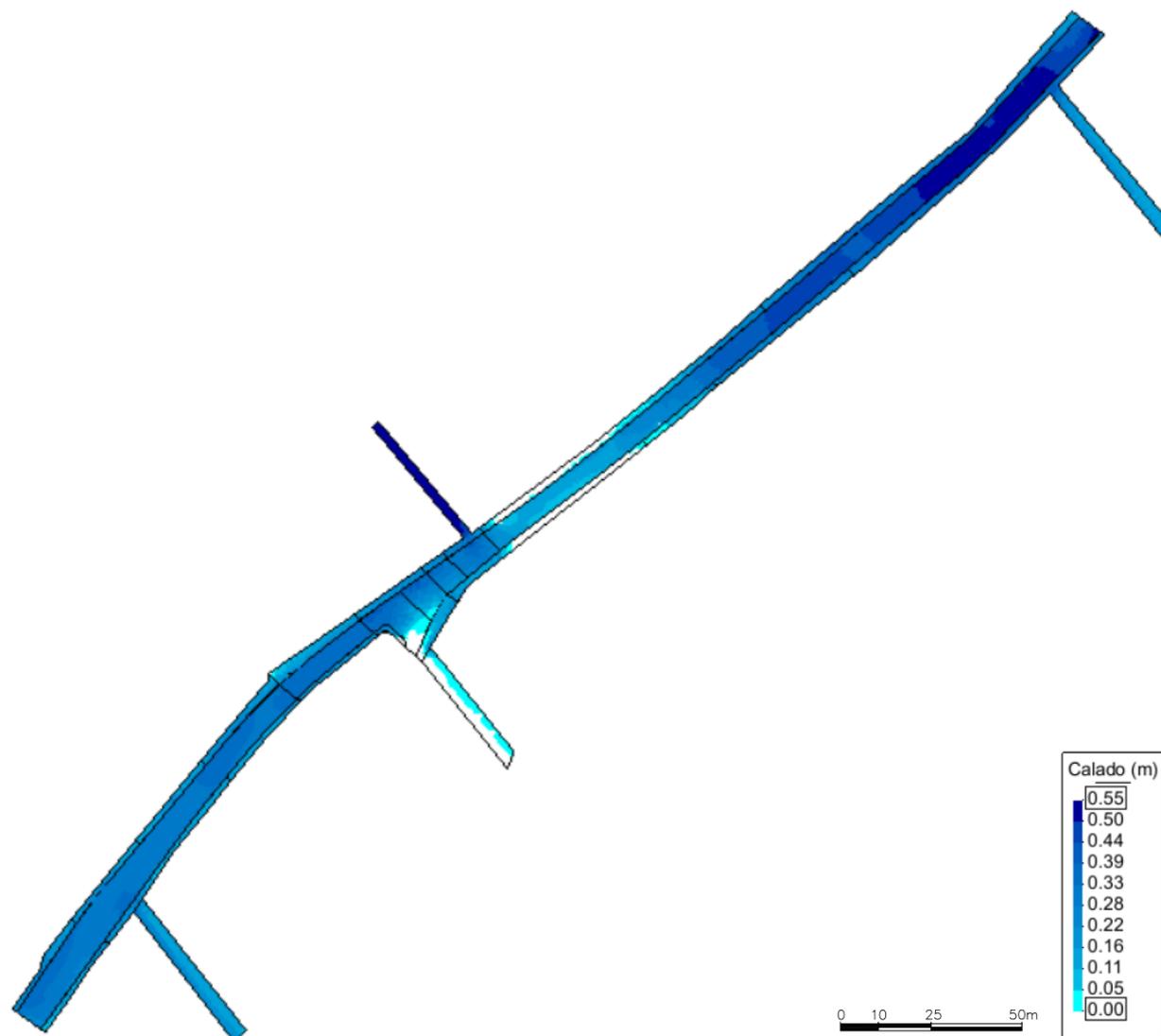


Figura 5-21 Resultados de calados en m.

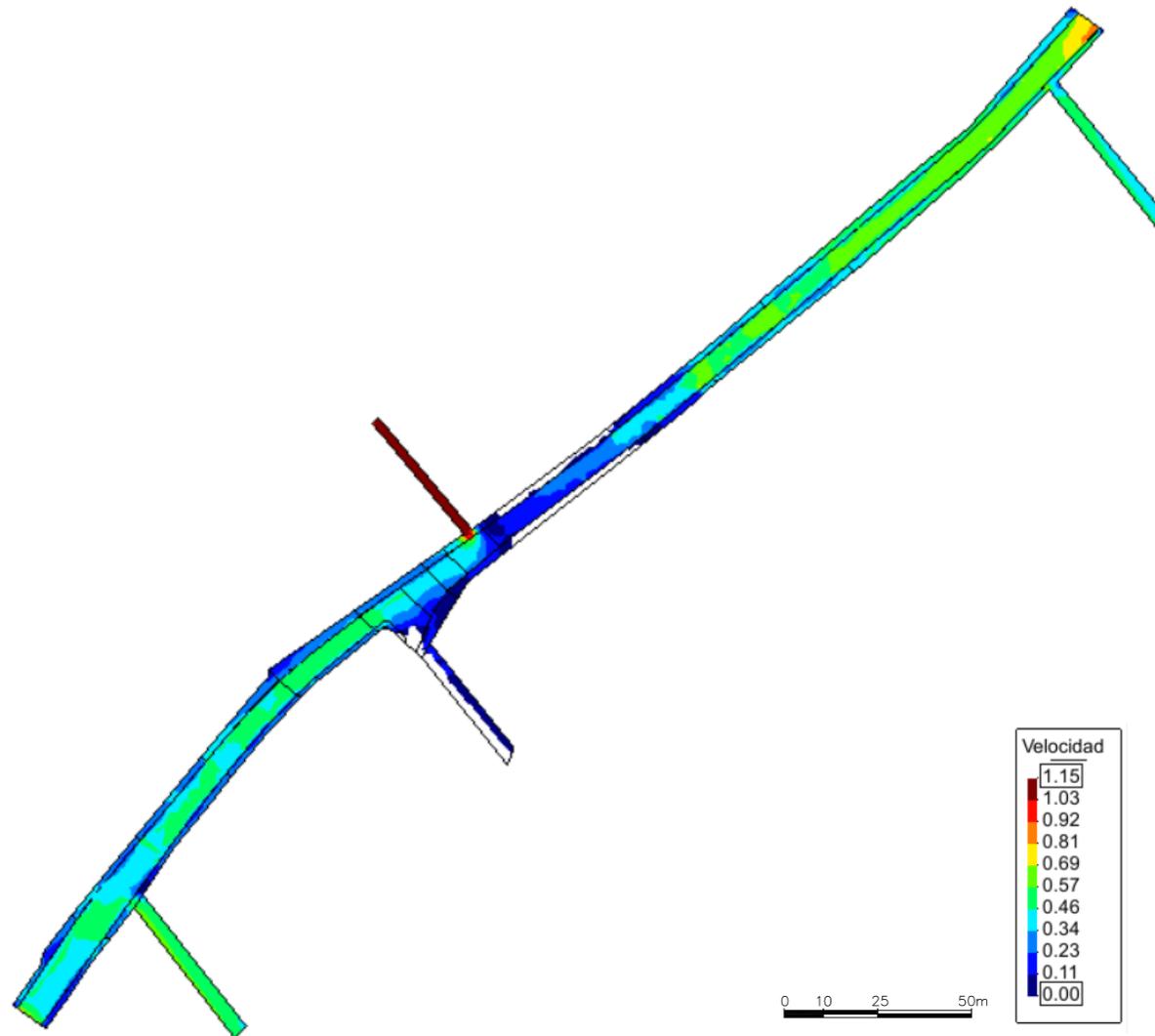


Figura 5-22 Resultados de velocidades en m/s.

6 CONCLUSIONES

6.1 Iber como software de modelización bidimensional de calles de alta pendiente

Una vez finalizado este proyecto surge la pregunta, ¿es Iber el software más adecuado para realizar modelos del flujo en superficie en una calle?

En primer lugar hay que destacar el coste computacional. Para realizar cada simulación el tiempo de cálculo empleado por el software ha sido de 8 horas. Y este es el tiempo optimizado una vez calibrado el modelo realizando numerosas pruebas variando el coeficiente CFL según el caudal de entrada en la calle.

Además Iber es un software muy intuitivo pero sus opciones de trazado y edición geométrica son limitadas y muy básicas. Por tanto es muy importante partir de un completo levantamiento topográfica de la calle y limpiar y adecuar el plano antes de introducirlo en Iber.

Sin embargo a pesar de estas consideraciones, los resultados obtenidos con Iber son gráficos, precisos y prácticos. El software posee una gran variedad de herramientas de análisis de resultados que permiten estudiar el flujo en superficie en detalle, desde mapas de áreas coloreadas a perfiles como ya hemos visto durante este estudio.

Sí, es cierto que HEC-RAS ha desarrollado un nuevo módulo 2D que sin duda en un futuro proyecto sería muy interesante estudiar, pero si se siguen las pautas indicadas en este proyecto, con Iber se puede realizar un modelo bidimensional obteniendo los datos y resultados necesarios para un correcto análisis del flujo en superficie de una calle de alta pendiente.

6.2 Análisis de las variantes realizadas en la avenida de Octubre de 2007

Recordamos que en primer lugar se ha simulado la avenida acaecida el 2 de octubre de 2007 con objeto de calibrar el modelo y comprobar que los resultados obtenidos con el modelo son similares a los que se produjeron. A continuación se han estudiado tres variantes: la primera considerando que no se hubiera generado la barrera de coches, la segunda considerando que los imbornales no se hubieran taponado por el granizo y la tercera considerando en el modelo el agua retenida por el tanque de tormenta y el alivio de producido por las obras ejecutadas en los años posteriores a la inundación.

Se comparan en la siguiente tabla los resultados de calados y velocidades máximos y medios obtenidos en cada simulación.

	CASO REAL	VARIANTE 1	VARIANTE 2	DESPUÉS DEL TANQUE
Calado máximo [m]	1.5	1.3	1.2	0.5
Calado medio [m]	1	1	0.8	0.35
Velocidad máxima [m/s]	2.1	2	2	1.1
Velocidad media [m/s]	1.1	1	0.8	0.5

Tabla 6-1 Comparación de resultados de cada variante del 2 de Octubre de 2007

A fin de analizar estos resultados se realiza un estudio de la seguridad en relación con el peligro de pérdidas de vidas humanas basado en los criterios de la Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano del CEDEX. Considerando conjuntamente calados (y) y velocidades del flujo (v) establece:

- $v^2 \cdot y \leq 1 \text{ m}^3/\text{s}$ Criterio de la estabilidad al deslizamiento (Narnía, 1999)
- $v \cdot y \leq 0.45 \text{ m}^3/\text{s}$ Criterio de la estabilidad al vuelco (SIHH-UPC 2001)

	CASO REAL	VARIANTE 1	VARIANTE 2	DESPUÉS DEL TANQUE
$v^2 \cdot y$	1.8	1.3	0.8	0.1
$v \cdot y$	1.7	1.3	1.0	0.3
¿Seguro?	NO	NO	NO	SI

Tabla 6-2 Análisis de seguridad de resultados obtenidos según el criterio del CEDEX

Estos resultados clarifican que a pesar de que el 2 de Octubre de 2007 no se hubiera formado la barrera de coches o los imbornales no se hubieran taponado el incidente se hubiera producido igualmente. Sin embargo comprobamos como tras la construcción del tanque de tormenta según los criterios del CEDEX ante un evento meteorológico similar estaríamos del lado de la seguridad.

Sin embargo es cierto que aun así, la lámina de agua llega a medio metro de altura, lo que dificulta el servicio de la calle. Por ello en el siguiente apartado se propone aumentar el número de imbornales en la calle para mejorar la captación y hacer que el agua no supere el bordillo de la acera mejorando el sistema de drenaje y el servicio de la calle a los ciudadanos.

6.3 Mejoras de captación en la situación actual

Tras el análisis realizado de los resultados obtenidos destaca como ante una lluvia de un periodo de retorno de 25 años la lámina de agua llega a una altura de hasta 40 cm sobrepasando el bordillo de la acera. Los imbornales instalados no son suficientes y algunos de ellos se encuentran en ubicaciones a las que no llega el flujo del agua (Sumideros 19 y 26).

Ante estos resultados se propone aumentar la capacidad de captación añadiendo cuatro rejillas transversales. Considerando la velocidad a la que circula el agua, se plantea ubicar dichas rejillas delante de los pasos de peatones ya existentes en la calle dotando a estos de una pequeña elevación para así conseguir una mejor captación de la rejilla.

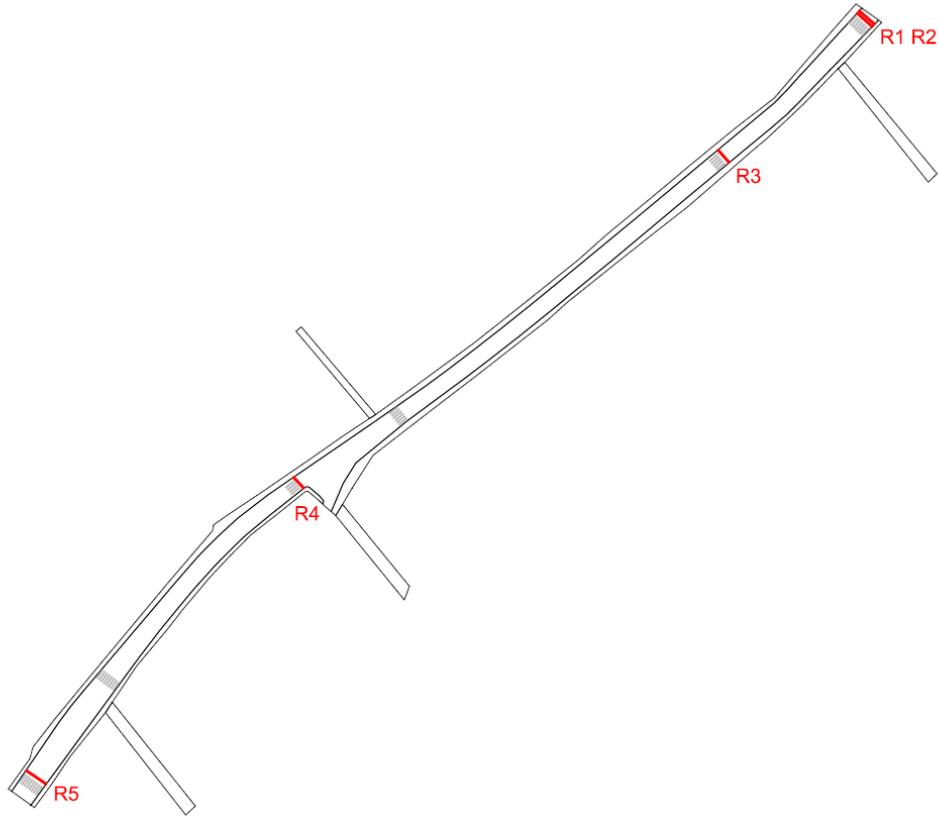


Figura 6-1 Ubicación de las rejillas transversales añadidas

Esta solución ya se ha empleado con anterioridad en otros puntos conflictivos del municipio como a la entrada de la Plaza del Paraíso, *Figura 6.2*. Es cierto que estas rejillas en calles con tráfico rodado como es el caso de la calle Ntra. Sra. Del Águila tienden a deteriorarse con el paso de los coches. Por esto se dota a dichas rejillas de una resistencia neumática que amortigua el paso de los vehículos.



Figura 6-2 Rejillas transversales en la entrada de la Plaza del Paraíso

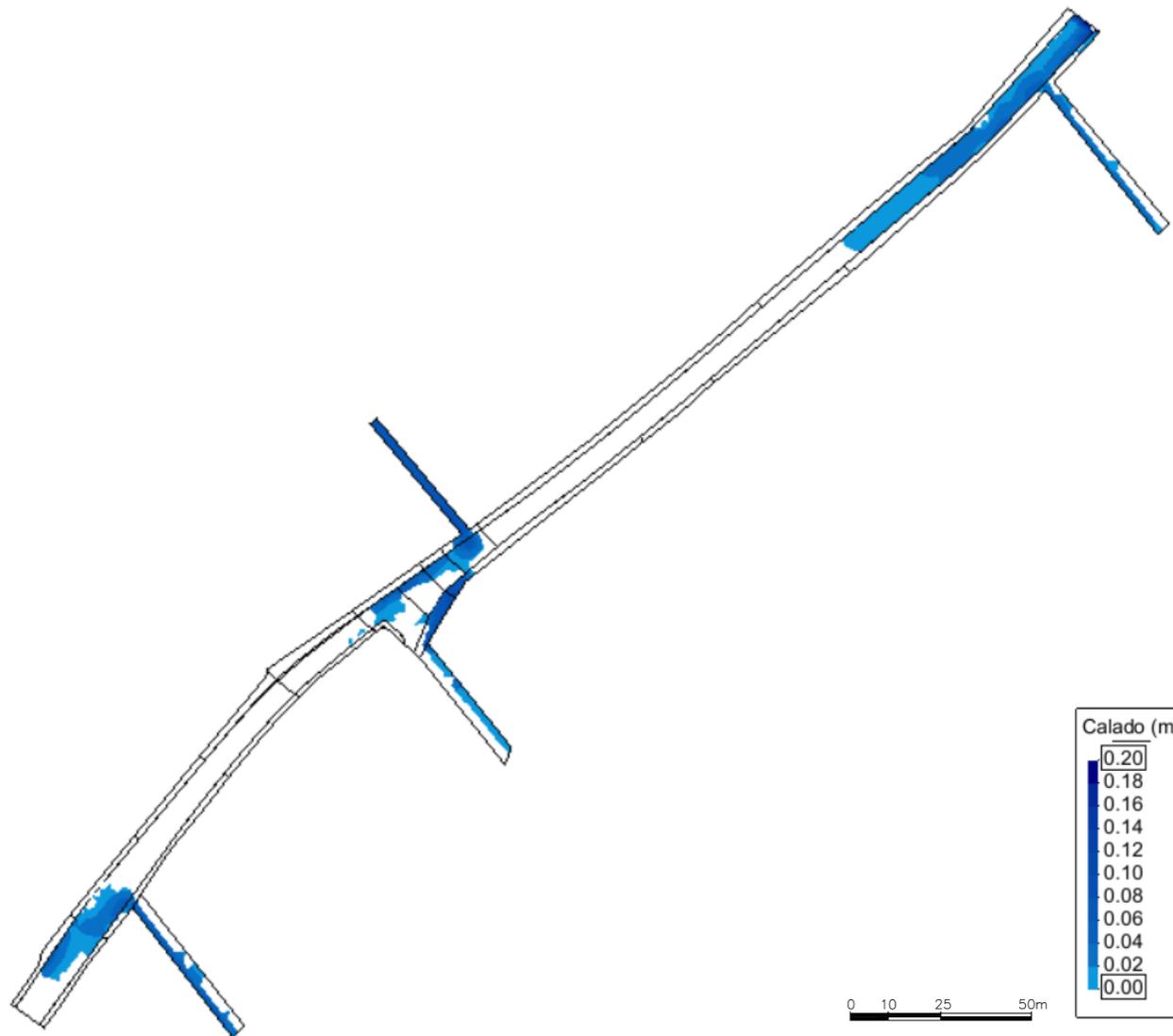


Figura 6-4 Resultados de calados tras añadir las rejillas transversales

6.4 Futuras líneas de estudio

Como ya se puntualizó en la introducción de este Trabajo de Fin de Grado, este estudio es solo el inicio de un amplio proyecto que desarrolla la Cátedra del Agua de EMASESA junto con la Universidad de Sevilla a fin de mejorar y optimizar el sistema de saneamiento de zonas urbanas con morfologías complejas como es el caso de Alcalá de Guadaíra.

En este proyecto se ha estudiado el flujo de escorrentía en calles de alta pendiente, pero ¿cómo influye la tipología de la rejilla del imbornal en la captación? ¿Captaría mejor las aguas un imbornal de doble rejilla tradicional o uno con rejilla única de orientación inclinada? ¿Y la geometría de la calle? ¿Mejoraría la captación una calle de plataforma única? ¿Y si colocásemos maceteros detrás de los imbornales?

A todas estas preguntas se les irá dando respuesta más allá de este trabajo en la continuación de los estudios de la Cátedra del Agua.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CEDEX, *Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano*, 2ª Edición (2008).
- [2] Federal Highway Administration, *Urban Drainage Design Manual*, Hydraulic Engineering Circular (2009).
- [3] EMASESA, *Instrucciones técnicas para redes de saneamiento*, Normativa y Procedimientos Técnicos (2013).
- [4] Inserco Ingenieros, *Renovación del sistema de redes en el eje la mina*, Proyecto de construcción (2009).
- [5] Ayuntamiento de Alcalá de Guadaira, *Actuaciones contra inundaciones en el centro urbano*, Documento (2008).
- [6] Tsang-Jung Chang, Chia-Ho Wang, Albert S. Chen y Slobodan Djordjevic, *The effect of inclusion of inlets in dual drainage modelling*, Journal of Hydrology (2018).