

# Trabajo Fin de Máster

## *ANÁLISIS DE LOS RIESGOS DE INUNDACIÓN PRÓXIMOS A LA PLAZA DE LA CONSTITUCIÓN, EN EL MUNICIPIO MADRILEÑO DE ARGANDA DEL REY*

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

**Autor:**

*CARMEN MERINO ZAMORA*

**Tutor:**

*DR. IGNACIO ESCUDER BUENO*

**Cotutor/es:-**

**Director Experimental: -**

**MAYO, 2021**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

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

*Agradezco toda la ayuda y tiempo que me han dado de manera altruista mis compañeros de TAUW Holanda, Floris Harten y Len Gesiler con el manejo del software Tygron. Así mismo, a los creadores de Tygron por invitarme a presentar parte de mi trabajo en un evento internacional.*

*Dar las gracias a todas las personas que me han ayudado en este proceso: a mi hermana por estar siempre atenta de mis progresos y ayudarme en la búsqueda de información, a mis amigas (y en especial a Claudia por animarme a utilizar Tygron, a Alicia por echarme una mano en todo momento sin dudar y a Paula por aconsejarme), a Alfonso por apoyarme, a mi familia y a Nicolás, por hacer un seguimiento con interés del TFM.*

*Ahora se abre una nueva etapa...*

## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Análisis de los riesgos de inundación próximos a la plaza de la Constitución, en el municipio madrileño de Arganda del Rey

**Título del TFM en inglés:** Analysis of flood risks near the Plaza de la Constitución, in the Madrid municipality of Arganda del Rey.

**Título del TFM en Valenciano:** Anàlisi dels riscos d'inundació pròxims a la plaça de la Constitució, en el municipi madrileny d'Arganda del Rey

**Alumno:** Carmen Merino Zamora

**Tutor:** Dr. Ignacio Escuder Bueno

**Cotutor/es:** -

**Director experimental:** -

**Fecha de Lectura:** MAYO, 2021

### Resumen

#### En español (máximo 5000 caracteres)

En el presente trabajo de fin de master se pretende realizar el análisis de los riesgos de inundación próximos a la plaza de la Constitución, en el municipio madrileño de Arganda del Rey, dónde se conoce que tras episodios de lluvias intensas las consecuencias son devastadoras. Destacar que la legislación vigente tanto en la Comunidad de Madrid como en el resto de España, está avanzada en el análisis de riesgo de inundación de origen fluvial; pero en cambio, que existe un vacío legislativo respecto a los riesgos de inundación de origen pluvial.

Los objetivos principales que se persiguen consisten en entender el funcionamiento del sistema hidrológico e hidráulico de la cuenca de estudio, conocer las deficiencias a nivel normativo existentes en el municipio de Arganda del Rey respecto al análisis y gestión de los riesgos de inundación y, por último, proponer una serie de actuaciones de reducción del riesgo de inundación. Se hace hincapié en que los análisis de inundaciones no pretenden realizar una representación fiel de la realidad, sino conducir a unos resultados de los que se puedan extraer unas conclusiones debidamente justificadas y que puedan ayudar al gestor a la hora de la toma de decisiones en lo que respecta la gestión de los riesgos de inundación.

La metodología seguida se inspira en la metodología para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Medio Marino, 2011), la metodología empleada para la caracterización del riesgo de las ARPSIs en la Demarcación Hidrográfica del Tajo (Confederación Hidrográfica del Tajo, 2015), y la metodología Completa y Cuantitativa de análisis de riesgo

de inundación en zonas urbanas (Escuder-Bueno et al., 2013). La herramienta informática empleada para el estudio de inundaciones es “Tygron” y la herramienta empleada para el análisis del riesgo es “iPresas”.

Del estudio de la cuenca se extrae que los factores limitantes para la posterior modelización hidrológica e hidráulica son el clima, la vegetación y uso del suelo, las características físicas del suelo (velocidad de infiltración y porosidad), el sistema de alcantarillado y el relieve. También, se identifican las deficiencias existentes en la legislación española y concretamente en el municipio de Arganda del Rey, donde actualmente no existe ni un Plan de Actuación Municipal frente al riesgo de inundación ni un Plan de Emergencia contra las inundaciones.

Tras la simulación bajo cinco (5) escenarios distintos, se obtiene la máxima superficie inundada para varias zonas afectadas (calado y velocidad), así como las zonas de acumulación de agua capaces de almacenar un volumen importante de agua y retrasar el pico de la avenida. Las principales áreas afectadas son la plaza de la Constitución, la calle Real y su entorno; la carretera N-III y supermercado MAXI DIA; y la avenida de Valencia. Además, mediante un análisis de sensibilidad se contrastan los resultados obtenidos tras la simulación en el escenario 0 (T=10 años) con la información disponible públicamente tras el evento de precipitación intensa ocurrida el 26 de agosto de 2019 (de periodo de retorno de 10 años), en el que se comprueba el correcto funcionamiento del modelo. Después, se analizan los resultados desde el punto de vista del riesgo social y económico, obteniendo un valor de riesgo social de 31 habitantes potencialmente afectados al año y unas pérdidas económicas de 228.016 € por año.

Finalmente, se proponen de manera teórica medidas tanto estructurales como no estructurales capaces de reducir el riesgo de inundación en las principales áreas afectadas por la inundación así como en otras zonas de la cuenca.

### **En valenciano (máximo 5000 caracteres)**

En el present treball de fi de màster es pretén realitzar l'anàlisi dels riscos d'inundació pròxims a la plaça de la Constitució, en el municipi madrileny d'Arganda del Rey, on es coneix que després d'episodis de pluges intenses les conseqüències són devastadores. Destacar que la legislació vigent tant en la Comunitat de Madrid com en la resta d'Espanya, està avançada en l'anàlisi de risc d'inundació d'origen fluvial; però en canvi, que existeix un buit legislatiu respecte als riscos d'inundació d'origen pluvial.

Els objectius principals que es persegueixen consisteixen a entendre el funcionament del sistema hidrològic i hidràulic de la conca d'estudi, conèixer les deficiències a nivell normatiu existents en el municipi d'Arganda del Rey respecte a l'anàlisi i gestió dels riscos d'inundació i, finalment, proposar una sèrie d'actuacions de reducció del risc d'inundació. Es posa l'accent que les anàlisis d'inundacions no pretenen realitzar una representació fidel de la realitat, sinó conduir a uns resultats dels quals es puguen extraure unes conclusions degudament justificades i que puguen ajudar al gestor a l'hora de la presa de decisions pel que fa la gestió dels riscos d'inundació.

La metodologia seguida s'inspira en la metodologia per al desenvolupament del Sistema Nacional

de Cartografia de Zones Inundables (Ministeri de Medi Ambient, Medi rural i Medi marí, 2011), la metodologia emprada per a la caracterització del risc de les ARPSIs en la Demarcació Hidrogràfica del Tajo (Confederació Hidrogràfica del Tajo, 2015), i la metodologia Completa i Quantitativa d'anàlisi de risc d'inundació en zones urbanes (Escuder-Bueno et al., 2013). L'eina informàtica emprada per a l'estudi d'inundacions és "Tygron" i l'eina emprada per a l'anàlisi del risc és "iPresas".

De l'estudi de la conca s'extrau que els factors limitants per a la posterior modelització hidrològica i hidràulica són el clima, la vegetació i ús del sòl, les característiques físiques del sòl (velocitat d'infiltració i porositat), el sistema de clavegueram i el relleu. També, s'identifiquen les deficiències existents en la legislació espanyola i concretament en el municipi d'Arganda del Rey, on actualment no existeix ni un Pla d'Actuació Municipal enfront del risc d'inundació ni un Pla d'Emergència contra les inundacions.

Després de la simulació sota cinc (5) escenaris diferents, s'obté la màxima superfície inundada per a diverses zones afectades (calat i velocitat), així com les zones d'acumulació d'aigua capaces d'emmagatzemar un volum important d'aigua i retardar el pic de l'avinguda. Les principals àrees afectades són la plaça de la Constitució, el carrer Real i el seu entorn; la carretera N-III i supermercat MAXI DIA; i l'avinguda de València. A més, mitjançant una anàlisi de sensibilitat es contrasten els resultats obtinguts després de la simulació en l'escenari 0 (T=10 anys) amb la informació disponible públicament després de l'esdeveniment de precipitació intensa ocorreguda el 26 d'agost de 2019 (de període de retorn de 10 anys), en el qual es comprova el correcte funcionament del model. Després, s'analitzen els resultats des del punt de vista del risc social i econòmic, obtenint un valor de risc social de 31 habitants potencialment afectats a l'any i unes pèrdues econòmiques de 228.016 € per any.

Finalment, es proposen de manera teòrica mesures tant estructurals com no estructurals capaces de reduir el risc d'inundació en les principals àrees afectades per la inundació així com en altres zones de la conca.

### **En inglés (máximo 5000 caracteres)**

This master's thesis aims to analyze the flood risks near the Plaza de la Constitución, in the Madrid municipality of Arganda del Rey, where it is known that after episodes of heavy rains the consequences are devastating. It should be noted that, on the one hand, the legislation in force both in the Community of Madrid and in the rest of Spain is advanced in the analysis of flood risk of fluvial origin; but on the other hand, there is a legislative gap regarding the risks of flooding of pluvial origin.

The main objectives pursued are to understand the functioning of the hydrological and hydraulic system of the study basin, to know the deficiencies at the regulatory level existing in the

municipality of Arganda del Rey with respect to the analysis and management of flood risks and, finally, to propose a series of actions to reduce flood risk. It is emphasized that flood analyses are not intended to provide a faithful representation of reality, but to lead to results from which duly justified conclusions can be drawn and which can help the manager when making decisions regarding flood risk management.

The methodology followed is inspired by the methodology for the development of the National Floodplain Mapping System (Ministry of the Environment, Rural and Marine Affairs, 2011), the methodology used for the risk characterization of the ARPSIs in the Tajo Hydrographic Demarcation (Tajo Hydrographic Confederation, 2015), and the Complete and Quantitative methodology for flood risk analysis in urban areas (Escuder-Bueno et al., 2013). The computer tool used for the flood study is "Tygron" and the tool used for the risk analysis is "iPresas".

From the study of the basin, it was found that the limiting factors for subsequent hydrological and hydraulic modeling are the climate, vegetation and land use, the physical characteristics of the soil (infiltration rate and porosity), the sewerage system and the relief. Also, the existing deficiencies in the Spanish legislation are identified and specifically in the municipality of Arganda del Rey, where there is currently neither a Municipal Action Plan against the risk of flooding nor an Emergency Plan against floods.

After the simulation under five (5) different scenarios, the maximum flooded area is obtained for several affected areas (depth and velocity), as well as the water accumulation areas capable of storing a significant volume of water and delaying the peak of the flood. The main areas affected are the Plaza de la Constitución, Calle Real and its surroundings; the N-III road and MAXI DIA supermarket; and Avenida de Valencia. In addition, a sensitivity analysis contrasts the results obtained after the simulation in scenario 0 (T=10 years) with the information publicly available after the intense precipitation event of August 26, 2019 (10-year return period), in which the correct operation of the model is verified. Then, the results are analyzed from the point of view of social and economic risk, obtaining a social risk value of 31 potentially affected inhabitants per year and economic losses of 228,016 € per year.

Finally, both structural and non-structural measures capable of reducing flood risk in the main areas affected by flooding as well as in other areas of the basin are theoretically proposed.

**Palabras clave español (máximo 5):** riesgo de inundación, lluvia, inundaciones, áreas urbanas, acciones y medidas

**Palabras clave valenciano (máximo 5):** risc d'inundació, pluja, inundacions, àrees urbanes, accions i mesures

**Palabras clave inglés (máximo 5):** flood risk, rainfall, floods, urban areas, actions and measures

# ÍNDICE

0. ACRÓNIMOS.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. LAS LLUVIAS INTENSAS Y LAS INUNDACIONES.....	5
1.2. EL RIESGO DE INUNDACIÓN Y LAS MEDIDAS DE REDUCCIÓN DEL RIESGO.....	6
1.3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	7
1.4. PRINCIPALES AFECCIONES.....	9
1.4.1. Plaza de la Constitución, calle Real y su entorno.....	9
1.4.2. Avenida de Valencia.....	10
1.4.3. Carretera NIII y supermercado MAXI DIA.....	10
2. MARCO NORMATIVO Y DE REFERENCIA.....	11
2.1. NIVEL EUROPEO.....	11
2.2. NIVEL ESTATAL.....	11
2.3. NIVEL AUTONÓMICO.....	11
2.4. NIVEL LOCAL.....	12
2.5. OTROS DOCUMENTOS DE REFERENCIA.....	12
3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	13
4. OBJETIVOS.....	14
5. METODOLOGÍA.....	15
5.1. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA TOPOGRÁFICA.....	17
5.2. ESTUDIO DE PRECIPITACIONES.....	17
5.2.1. Precipitación máxima diaria.....	17
5.2.2. Reparto en el tiempo de la precipitación.....	18
5.3. MODELO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO.....	19
5.3.1. Herramienta de cálculo: presentación y justificación.....	19
5.3.2. Viabilidad de la herramienta.....	20
5.4. CRITERIOS DE DISEÑO DEL MODELO TYGRON.....	21
5.5. CONFIGURACIÓN DEL MODELO EN TYGRON.....	22
5.6. ANÁLISIS DEL RIESGO DE INUNDACIÓN.....	23
6. RESULTADOS.....	25
6.1. MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA.....	25
6.1.1. Análisis de sensibilidad del modelo.....	28
6.2. ANÁLISIS DEL RIESGO DE INUNDACIÓN.....	28
7. DISCUSIÓN Y PROPUESTA DE ACTUACIONES.....	30
8. CONCLUSIONES.....	31
9. SIGUIENTES PASOS.....	31
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

## ANEJOS

**Anejo 1:** Descripción del área de estudio

**Anejo 2:** Estudio histórico

**Anejo 3:** Estudio de precipitaciones

**Anejo 4:** Funcionamiento de Tygron

**Anejo 5:** Estudio hidrológico e hidráulico con Tygron

**Anejo 6:** Riesgo

**Anejo 7:** Planos

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de la cuenca de estudio. Fuente: elaboración propia. ....	7
Figura 2 Localización de las principales afecciones. Observar la localización de las mismas en áreas de acumulación del flujo obtenidas en QGIS a través del MDT25. Fuente: elaboración propia. ....	9
Figura 3 Área en torno a la Plaza de la Constitución. Afección a la plaza, Calle Juan de la Cierva, Calle Real, Ayuntamiento, mercado municipal y viviendas. Fuente: elaboración propia a partir de Google Maps. 9	
Figura 4 Afección a las edificaciones situadas hacia el oeste de la avenida de Valencia / NIII. Fuente: elaboración propia a partir de Google Maps. ....	10
Figura 5 Afección al supermercado Maxi-DIA. Fuente: elaboración propia a partir de Google Maps. ....	10
Figura 6 Metodología. Fuente: elaboración propia. ....	16
Figura 7 Precipitación para distintos periodos de retorno. Fuente: elaboración propia. ....	18
Figura 8 Modelo de riesgo. Régimen natural. Fuente: elaboración propia. ....	23
Figura 9. Riesgo social. Fuente: iPresas Flood. Representación de las 84 trayectorias (ramas) del árbol de eventos tras un post-proceso realizado por el software.....	29
Figura 10. Riesgo económico. Fuente: iPresas Flood. Representación de las 84 trayectorias (ramas) del árbol de eventos tras un post-proceso realizado por el software.....	29

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de la cuenca de estudio. Fuente: elaboración propia a partir de análisis en SIG. ....	7
Tabla 2 Objetivos generales y específicos del TFM. Fuente: elaboración propia.....	14
Tabla 3 Correlación de escenarios y periodos de retorno asociados. Fuente: elaboración propia. ....	15
Tabla 4 Precipitación máxima diaria para distintos periodos de retorno. Fuente: Máximas lluvias diarias en la España peninsular (MOPU, 1999). ....	17
Tabla 5 Ventajas y desventajas del empleo del software Tygron. Fuente: elaboración propia. ....	20
Tabla 6. Nodos, componente, descripción y variable del modelo de riesgo. Fuente: elaboración propia. ....	24
Tabla 7 Caudal máximo para cada periodo de retorno. Fuente: elaboración propia a partir de la simulación. ....	25
Tabla 8 Resumen de los calados en las diferentes áreas de afección. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de la simulación. ....	27

## 0. ACRÓNIMOS

Para una lectura más ágil del presente documento y de sus Anejos, se aporta el siguiente listado de acrónimos, por orden alfabético:

- AEMET: Agencia Estatal de Meteorología.
- BOCM: Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid.
- CLC18: CORINE Land Cover del año 2018.
- DANA: Depresión Aislada en Niveles Altos: depresión o borrasca aislada en las capas más altas de la atmósfera.
- DMA: Directiva Marco del Agua.
- IGN: Instituto Geográfico Nacional.
- IIAMA: Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente
- MDT: Modelo Digital del Terreno. Representa el suelo desnudo, sin ningún tipo de obstáculo como plantas, edificios u otras infraestructuras.
- MDE: Modelo Digital de Elevaciones. Representa el suelo y cualquier obstáculo que se encuentre en él como plantas, edificios u otras infraestructuras.
- MFE50: Mapa Forestal Nacional a escala 1:50.000.
- MITECO: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- PGOU: Plan General de Ordenación Urbana.
- PLATERCAM: Plan Territorial de Protección Civil de la Comunidad de Madrid.
- PNOA: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.
- PPA: Población Potencialmente Afectada.
- SAIH: Sistema Automático de Información Hidrológica.
- SNCZI: Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.
- TFM: Trabajo de Fin de Máster.
- UPV: Universidad Politécnica de Valencia.
- WMS: *Web Map Service*.
- WFS: *Web Feature Service*.

# 1. INTRODUCCIÓN

En el presente Trabajo de Fin de Máster (en adelante, TFM) se pretende realizar el análisis de los riesgos de inundación próximos a la plaza de la Constitución, en el municipio madrileño de Arganda del Rey, dónde se conoce que tras episodios de lluvias intensas las consecuencias son devastadoras. Además de considerar esta circunstancia actual, se tiene en cuenta que, de cara al futuro se prevé un aumento de la probabilidad de inundación derivado del aumento de la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos junto a un aumento de la vulnerabilidad ligado al aumento de la población. Todo ello supone que en un futuro próximo el riesgo de inundación incremente.

Para realizar el análisis de los riesgos de inundación, primero se presenta la problemática en el área de estudio así como el marco normativo y de referencia en el que se encuadra. Después, se justifica la selección del TFM y se presentan los objetivos que se persiguen. Seguidamente, se describe la metodología empleada en la que se definen con claridad todos los pasos seguidos para llevar a cabo el análisis del riesgo de inundación, haciendo especial hincapié en los criterios de diseño establecidos para la modelización hidrológica e hidráulica. Tras la simulación bajo cinco (5) escenarios distintos, se analizan los resultados desde el punto de vista del riesgo social y económico y finalmente se proponen actuaciones capaces de reducir el riesgo de inundación en lugares específicos del área de estudio.

Se hace hincapié en que el análisis de inundación no pretenden realizar una representación fiel de la realidad, sino conducir a unos resultados de los que se puedan extraer unas conclusiones debidamente justificadas y que puedan ayudar al gestor a la hora de la toma de decisiones en lo que respecta la gestión de los riesgos de inundación.

A continuación, se explica la génesis de las lluvias intensas y de las inundaciones, y qué se entiende por riesgo de inundación. También se describen los factores limitantes para la posterior modelización hidrológica e hidráulica, así como las principales afecciones en el área de estudio.

## 1.1. LAS LLUVIAS INTENSAS Y LAS INUNDACIONES

La génesis de las lluvias intensas en España obedece, generalmente, a la Depresión aislada en niveles altos (DANA), más conocida, aunque denominada inadecuadamente, como Gota Fría en altura (Olcina Cantos, 2006). Esta situación ocurre cuando la corriente en chorro polar que se mueve de oeste a este sufre ondulaciones que aíslan una parte de esta circulación, creando una masa de aire frío que se mueve de manera independiente. Cuando esta masa de aire llega a España se encuentra con temperaturas más cálidas en superficie, creándose una gran diferencia de temperaturas en las diferentes capas de la atmósfera. Como consecuencia, las masas de aire ascienden con gran facilidad (potenciado por la presencia de cordilleras), se saturan de vapor de agua rápidamente y dan lugar a tormentas de corta duración y alta intensidad.

Este fenómeno meteorológico extremo es muy frecuente en las zonas costeras del Mediterráneo, sobre todo entre los meses de septiembre a noviembre, ya que el calor y la humedad (influenciada por la presencia marina) acumulados en las capas bajas, chocan con el aire frío de las capas altas, produciéndose fuertes tormentas. Sin embargo, las DANAs pueden desarrollarse también en otros marcos espaciales y temporales, como es el caso del municipio que atañe al presente TFM, Arganda del Rey, conocido como el municipio de la Comunidad de Madrid al que más le afecta la DANA (ABC, 2019).

Dependiendo de la intensidad de la tormenta, de las características de la cuenca y del sistema de drenaje de un área urbana, se pueden llegar a producir inundaciones. La Directiva 2007/60/EC de la Comisión Europea (European Parliament, 2007) define inundación como el “*cubrimiento temporal por agua de una tierra que normalmente no se encuentra cubierta, incluyendo las inundaciones producidas por ríos, torrentes, corrientes de agua efímeras mediterráneas e inundaciones marítimas en zonas costeras*”, dejando de lado las inundaciones de origen pluvial.

En general, las inundaciones pueden ser tanto de origen fluvial (en la mayoría de los casos) como de origen pluvial. Las inundaciones de origen fluvial son producidas por las aguas de escorrentía superficial a través de ríos, arroyos, barrancos y ramblas; y las inundaciones de origen pluvial, son producidas al existir áreas de escaso drenaje. En el presente TFM se tratarán ambas.

## 1.2. EL RIESGO DE INUNDACIÓN Y LAS MEDIDAS DE REDUCCIÓN DEL RIESGO

El riesgo de inundación se define como la combinación de una probabilidad de presentación de un determinado evento de inundación (también denominado amenaza), y las posibles consecuencias adversas que tendría este evento para las actividades económicas, la salud humana y el medio ambiente (Parlamento Europeo, 2007) (también denominado vulnerabilidad). El riesgo será mayor en la medida en que la peligrosidad y la vulnerabilidad también lo sean.

La amenaza o peligrosidad presenta unidades de tiempo, puesto que se consideran eventos extremos de precipitación asociados a un determinado periodo de retorno.

Se define como vulnerabilidad, a los daños que potencialmente se pueden producir en un punto del territorio y en una determinada época del año. En este sentido, la vulnerabilidad depende del uso del suelo y varía con la magnitud de la inundación. Para el cálculo del riesgo de inundación se suele tener en cuenta la población afectada (número de víctimas o población potencialmente afectada) y las actividades económicas afectadas (unidades monetarias); obteniendo un valor de riesgo social y otro de riesgo económico, respectivamente.

Si se pretende reducir a un único número, el riesgo quedaría bajo la Ecuación 1:

$$R=p*c \quad (1)$$

Donde:

R: Riesgo de inundación

p: probabilidad de ocurrencia de un rango completo de sucesos (también denominado amenaza o peligrosidad)

c: consecuencias asociadas a dichos sucesos (también denominado vulnerabilidad)

De cara al futuro, por un lado se espera un aumento de la población; y por otro lado y en un contexto de cambio climático, se espera un aumento de temperaturas y un descenso de las precipitaciones junto a un aumento de la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos. Las implicaciones sobre el riesgo de inundación son claras, pues un aumento de la probabilidad de inundación derivado del aumento de la frecuencia e intensidad de eventos extremos junto a un aumento de la vulnerabilidad ligado al aumento de la población, suponen que el riesgo de inundación sea mayor que el actual.

Para reducir el riesgo de inundación, se aplican medidas de reducción del riesgo, que, en general, pueden dividirse en dos grupos: medidas estructurales y medidas no estructurales (Escuder-Bueno, 2013). Ambas tienen como misión reducir el posible impacto de la inundación, es decir, las consecuencias. Por otra parte, destacar que el riesgo no puede ser completamente eliminado.

- **Medidas estructurales:** son las medidas que consisten en la realización de obras de infraestructura que actúan sobre la avenida en sí, es decir, sobre la peligrosidad. A modo de ejemplo, citar las obras de ingeniería civil como la construcción de diques, presas (en el caso de inundaciones fluviales) o sistemas de drenaje (en el caso de inundaciones pluviales).

Se tiene que tener en cuenta que estas infraestructuras de protección (diques, encauzamientos, medidas de protección en edificios e infraestructuras, modificación de las características de la cuenca como la reforestación), de retención (presas, estanques de retención, estanques de detención, estructuras subterráneas de retención) o sistemas de drenaje (convencionales o sostenibles), pueden romperse o fallar, incrementando de este modo las consecuencias de la inundación.

- **Medidas no estructurales:** son aquellas medidas que disminuyen el riesgo por disminución de la vulnerabilidad. Es decir, no suponen ninguna modificación de la peligrosidad. Dos de las características más relevantes de este tipo de medidas son, que se pueden llevar a cabo antes, durante y después de la inundación y; que pueden reducir las consecuencias especialmente la pérdida potencial de vidas humanas. A modo de ejemplo citar políticas de actuación y coordinación, gestión de emergencias, formación a la población (instruir en el establecimiento de barreras de autoprotección en viviendas), sistemas de predicción meteorológica, sistemas de aviso, etc. De manera análoga a lo establecido para las medidas estructurales, estas medidas no estructurales también pueden fallar.

### 1.3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Arganda del Rey es un municipio y localidad española de la Comunidad de Madrid enclavado en la zona suroriental de la provincia, entre las vegas de los ríos Jarama y Tajuña. Dista unos 27 km de la capital y enlaza con Madrid por la línea 9 de metro, por la autovía A-3 y por la autopista de peaje R-3 (Ver Plano 1 del Anejo 7). Este municipio limita con los términos municipales de Velilla de San Antonio y Loeches al norte, Rivas-Vaciamadrid al noroeste, Morata de Tajuña al sur, Perales de Tajuña al sureste y Campo Real al noreste. Actualmente, el municipio está configurado en cuatro núcleos de población, siendo el principal Arganda del Rey, y existiendo otros núcleos de menor categoría: Los Villares, La Poveda y Puente de Arganda.

El área de estudio es la cuenca que tiene como punto de cierre la plaza de la Constitución (en rojo en la Figura 1). Las coordenadas UTM que enmarcan la cuenca de estudio (ETRS89 Huso 30) son X: 462.687-465.262 e Y: 4.458.762-4.461.662. Esta cuenca es una subcuenca del arroyo de Vilches, que a su vez es un afluente del río Jarama, perteneciente a la cuenca del río Tajo (Confederación Hidrográfica del Tajo).

A continuación, en la Tabla 1 se presentan datos representativos de la cuenca, necesarios para su descripción y la posterior modelización hidrológica e hidráulica.

Tabla 1. Características de la cuenca de estudio. Fuente: elaboración propia a partir de análisis en SIG.

Punto de cierre	Plaza de la Constitución
Superficie de la cuenca:	4,17 km <sup>2</sup>
Perímetro de la cuenca:	11.526 m
Longitud del cauce principal:	3.666 m
Cota máxima del cauce principal	722,8 msnm
Cota mínima del cauce principal	613,7 msnm
Pendiente del cauce	0.03 m/m

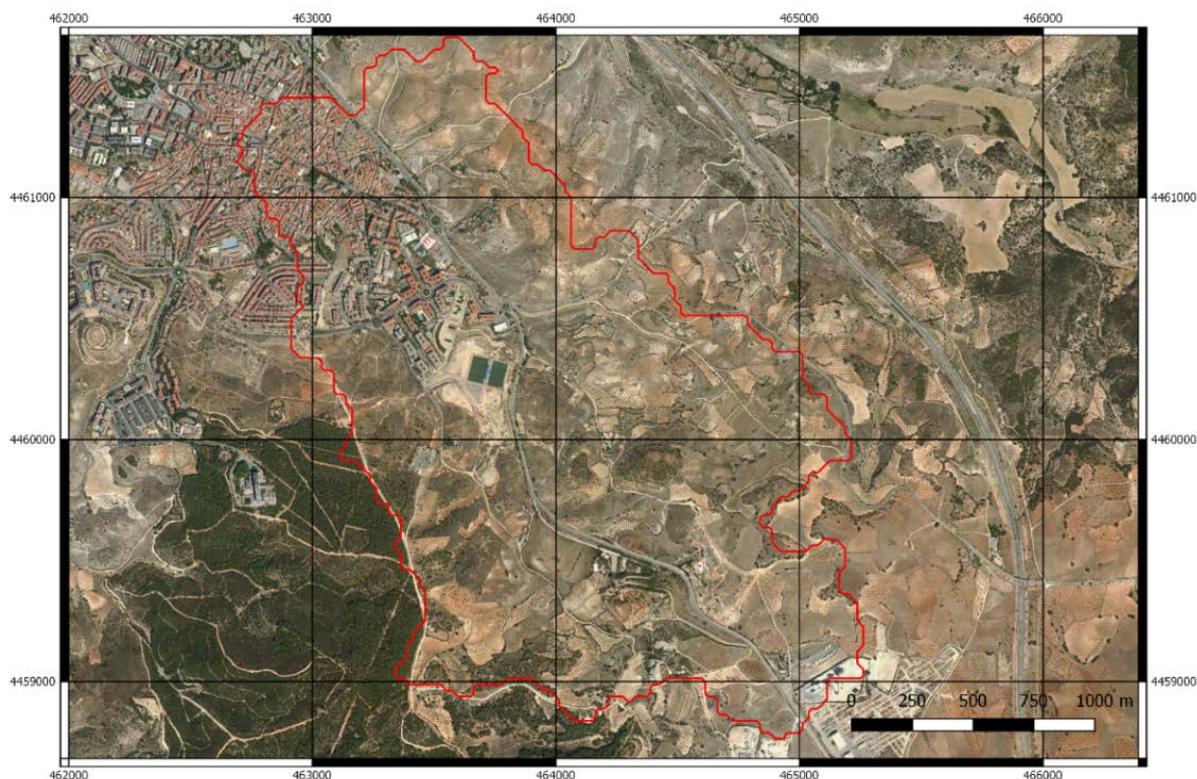


Figura 1 Mapa de la cuenca de estudio. Fuente: elaboración propia.

Para la descripción del área de estudio se ha realizado una exhaustiva búsqueda de información pública disponible sobre el clima, las características físicas de la cuenca, la vegetación y el uso del suelo y el sistema de alcantarillado ya que, estos factores desempeñan un papel muy importante en cuanto al comportamiento hidrológico de la cuenca. Además, se incluye información relativa a la demografía y actividad económica del área de estudio, que será relevante a la hora del posterior análisis del riesgo (Apartado 5.6). Todo ello se encuentra recogido en el Anejo 1. En el Anejo 2 aparece un estudio histórico del municipio de Arganda del Rey.

Para el análisis de inundación, se deben considerar los procesos físicos más importantes en este tipo de eventos, que son la precipitación y la producción y propagación de escorrentía. Respecto a la escorrentía, la producción incluye las abstracciones iniciales, la infiltración, la percolación y la escorrentía superficial (que es la suma de la escorrentía directa y el interflujo); mientras que la propagación incluye el traslado de la misma por las laderas y la red de drenaje. Por ello, en el área de estudio, se ha considerado que los factores limitantes que se deben tener en cuenta para la posterior modelización son:

- **El clima**, ya que determina el régimen de precipitaciones en una zona. La precipitación es el proceso físico que, dependiendo de su magnitud y duración, detona la inundación. En el caso de estudio, los registros de precipitación diaria de la estación automática más cercana a la cuenca (Código 3182Y) son escasos, por lo que para la posterior modelización se creará una tormenta de diseño.
- **La vegetación y uso del suelo**, ya que intervienen en la producción y propagación de la escorrentía. Por un lado, la superficie de la cuenca ocupada por vegetación forestal de talla arbórea es reducida, siendo la mayoría cultivos agrícolas y vegetación de tipo matorral esclerófilo y herbáceas. La escasez de vegetación, provoca una disminución de varios procesos del ciclo hidrológico como son: la intercepción, el almacenamiento de agua en el suelo, la evapotranspiración, la capacidad de infiltración del suelo y la protección del suelo. Como consecuencia, se produce un aumento de la escorrentía.

Por otro lado, el uso principal en la cuenca es agrícola, encontrándose cultivos en la parte alta y media de la cuenca (un 55% de la superficie total de la cuenca). Destacar los cultivos de olivar, que por su disposición en el terreno y la falta de cobertura del suelo entre pies, hace que la escorrentía en estas zonas sea elevada. En la parte baja de la cuenca el uso pasa a ser urbano, existiendo una gran extensión de superficie pavimentada, lo que provoca que la infiltración sea prácticamente nula y que la escorrentía aumente.

Para la posterior modelización se tendrá en cuenta la rugosidad del terreno ( $n^o$  de Manning).

- **El suelo**, ya que sus características físicas determinan la capacidad de infiltración, que está relacionada con la producción de escorrentía. En la cuenca de estudio, existen zonas desnudas en las que, o bien no existe cobertura vegetal o bien no ha habido una transformación del suelo por acción humana (superficies pavimentadas). Los suelos que se encuentran en la cuenca (leptosol, regosol y fluvisol) tienen su génesis condicionada por las características topográficas. Para la posterior modelización se tendrá en cuenta la velocidad de infiltración del suelo y su porosidad.
- **El sistema de alcantarillado**, ya que contribuye a una reducción de caudal en episodios de lluvias intensas. La red de alcantarillado se sitúa en la parte baja de la cuenca, en el casco urbano. Esta es unitaria y funciona por gravedad. Para la posterior modelización se tomará esta área y la capacidad de almacenamiento del alcantarillado siguiendo el criterio de diseño para pluviales de un periodo de retorno de 10 años (Canal de Isabel II, 2020).
- **El relieve**, ya que las formas del terreno determinan la velocidad de circulación de la escorrentía, que está relacionada con la propagación de escorrentía. En las proximidades del casco urbano, dominan las laderas y vertientes-glacis (pendientes inferiores al 10%), que confieren una alta velocidad de circulación a la escorrentía. Para la posterior modelización habrá que tener en cuenta que las altas velocidades pueden generar errores de cálculo.

## 1.4. PRINCIPALES AFECCIONES

Las principales afecciones que se producen en episodios de lluvias intensas se resumen a continuación. La información sobre las afecciones se ha extraído del Acta del Pleno Municipal del 2 de octubre de 2019, de varias noticias recogidas por internet y del estudio histórico del Anejo 2. También destacar la afección a tierras agrícolas (representación en el 55% de la superficie de la cuenca), vías pecuarias (atravesan la cuenca).

Muchas de las afecciones registradas tras los eventos del 26 de agosto y 15 de septiembre de 2019 se encuentran en zonas de acumulación de flujo de la cuenca de estudio, como es el caso de la plaza de la Constitución, la calle Real y su entorno; la avenida de Valencia y varias edificaciones en su entorno, y la N-III y el supermercado Maxi Día. Estas zonas se considerarán como “áreas críticas” para la posterior modelación.



Figura 2 Localización de las principales afecciones. Observar la localización de las mismas en áreas de acumulación del flujo obtenidas en QGIS a través del MDT25. Fuente: elaboración propia.

### 1.4.1. Plaza de la Constitución, calle Real y su entorno

Desde tiempos inmemorables se conocen destrozos en la plaza del ayuntamiento (Plaza de la Constitución), la Calle Real y su entorno. No solamente las edificaciones permanentes (ayuntamiento, parroquia de San Juan Bautista, viviendas, mercado municipal) en esta área resultan afectadas, sino también las instalaciones temporales, ej.: plaza de toros, que se instalan durante las fiestas del municipio (principios de septiembre), con el consiguiente riesgo para las personas que acuden a la celebración.

En la Figura 3 se presenta el área en torno a la plaza de la Constitución:



Figura 3 Área en torno a la Plaza de la Constitución. Afección a la plaza, Calle Juan de la Cierva, Calle Real, Ayuntamiento, mercado municipal y viviendas. Fuente: elaboración propia a partir de Google Maps.

#### 1.4.2. Avenida de Valencia

Las afecciones situadas al oeste de esta carretera se deben a que esta obra fue construida sobre una zona de acumulación de aguas, tal y como se observa en la Figura 2, que aparecen dos vaguadas.

También, el cruce de las glorietas donde interceptan la Avenida de Valencia y Calle Real así como la Carretera de Valdilecha y la NIII (señaladas ambas en rojo en la Figura 4), se ha diseñado con 4 tubos de escaso diámetro que actualmente se encuentran totalmente colmatados de arenas, lo que genera una retención de las aguas de escorrentía en vez de un paso de la misma (Acta del Pleno Municipal del 2 de octubre de 2019).



Figura 4 Afección a las edificaciones situadas hacia el oeste de la avenida de Valencia / NIII. Fuente: elaboración propia a partir de Google Maps.

#### 1.4.3. Carretera NIII y supermercado MAXI DIA

Durante la visita realizada por el ayuntamiento y el Ingeniero, pudieron observar que las inundaciones producidas junto al Maxi-DIA (en rojo en la Figura 5) de la N-III, principalmente en el garaje subterráneo anexo al supermercado, se debió a la cantidad de agua que se acumulaba en la glorieta de la intersección de la carretera de Valdilecha, Paseo de los Navegantes y la propia N-III (en el centro de la Figura 5). Esta acumulación de agua se debía principalmente a que se encuentra en una zona de remanso hidráulico y a que el peralte de la N-III obliga a las aguas a dirigirse hacia el Maxi Día y el propio garaje (indicado con flechas en la Figura 5).

Además de que la glorieta cuente con un peralte que provoca que las aguas se concentren en la entrada a las instalaciones del supermercado (parquin y nave), se observa cómo debido a la topografía, la dirección del flujo apunta hacia esta área.



Figura 5 Afección al supermercado Maxi-DIA. Fuente: elaboración propia a partir de Google Maps.

## 2. MARCO NORMATIVO Y DE REFERENCIA

En este apartado se identifica la principal normativa que condiciona este trabajo y se incluyen la guías técnicas que atañen a las inundaciones o elementos relacionados con estas. Destacar que la legislación vigente tanto en la Comunidad de Madrid como en el resto de España, está avanzada en el análisis de riesgo de inundación de origen fluvial; pero en cambio, que existe un vacío legislativo respecto a los riesgos de inundación de origen pluvial. Esto hace que el tratamiento de ambos tipos de inundación en conjunto sea, en este aspecto, más complicado.

### 2.1. NIVEL EUROPEO

- *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*, conocida como Directiva Marco del Agua (en adelante, DMA).
- *Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación*, conocida como Directiva de Inundaciones.

### 2.2. NIVEL ESTATAL

- *Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas*. Se trata de la trasposición de la DMA a la legislación española.
- *Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación*. Es la trasposición de la Directiva de Inundaciones a la legislación española. Tal y como se recoge en su artículo 10, los mapas de peligrosidad y de riesgo de inundación constituirán la información fundamental en que se basarán los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación.
- *Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril*, mediante el cual se crea el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (en adelante, SNCZI). Más adelante, y en relación al SNCZI, se publicó la Guía Metodológica para el desarrollo del SNCZI (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Medio Marino, 2011). El cauce principal de la cuenca de estudio no se ha estudiado en el marco del SNCZI ya que no está recogido en la red hidrográfica definida en la Base Cartográfica Numérica a escala 1:25.000 (BCN25), que es la base del SNCZI.
- *Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil, que modifica la Ley 2/1985, sobre Protección Civil*, establece que la Protección Civil es el servicio público que protege a las personas y bienes garantizando una respuesta adecuada ante las emergencias y catástrofes, mediante el Sistema Nacional de Protección Civil, el cual desarrollará sus acciones de planificación mediante Planes Territoriales y Planes Especiales.
- *El Real decreto 407/1992, por el que se aprueba la Norma Básica de Protección Civil*, determina el contenido mínimo de los planes de protección civil, y que las emergencias por inundación requieren la elaboración de Planes Especiales de acuerdo con la Directriz Básica correspondiente. La competencia de la elaboración de estos planes recae sobre el ayuntamiento.

### 2.3. NIVEL AUTONÓMICO

- El Plan Territorial de Protección Civil de la Comunidad de Madrid (en adelante, PLATERCAM), aprobado por el *Decreto 85/1992, de 17 de diciembre, del Consejo de Gobierno*, tiene como objetivos la identificación de los riesgos que afectan al territorio de forma que se pueda crear una estructura organizativa de respuesta común frente a los mismos. Este Plan se sometió a revisión y es mediante el *Acuerdo de 30 de abril de 2019, del Consejo de Gobierno*, por el que se aprueba el nuevo PLATERCAM. Este indica que la Comunidad de Madrid está afectada por riesgos que, según la Norma Básica, dan lugar a Planes Especiales, entre ellos el de inundaciones.

- El *Plan de Actuación en caso de Inundaciones en la Comunidad de Madrid* fue aprobado el día 25 de abril de 1997 por la Comisión de Protección Civil de la Comunidad de Madrid, cuyo contenido no llegó a ser homologado por la entonces Comisión Nacional de Protección Civil. No ha sido hasta el 9 de diciembre de 2020 cuando se aprueba el *Plan Especial de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones en la Comunidad de Madrid (INUNCAM)*, que identifica y clasifica las zonas potencialmente inundables, en función del grado de riesgo. De hecho, en el visor cartográfico de la comunidad de Madrid (Comunidad Autónoma de Madrid, 2019) se comprueba que el área de estudio no se identifica ninguna zona de riesgo de acuerdo con el INUNCAM (Ver Plano 2 del Anejo 7).
- *Ley 17/1984, de 20 de diciembre, reguladora del abastecimiento y saneamiento de agua en la Comunidad de Madrid*, en donde se indica que la competencia del servicio de alcantarillado recae sobre el ayuntamiento.

#### 2.4. NIVEL LOCAL

- Actualmente, en el municipio de Arganda del Rey no hay un Plan de Actuación Municipal frente al riesgo de inundación. La necesidad de crear estos planes fue impuesta por la trasposición de la Directiva de Inundaciones, que está más orientada al análisis de las inundaciones de origen fluvial que de origen pluvial.
- Actualmente, en el municipio de Arganda del Rey no hay un Plan de Emergencia contra las inundaciones, donde se prevea la forma de actuar en caso de fuertes lluvias o lluvias torrenciales. De hecho, la creación de un Plan de Emergencia específico para el municipio fue una de las propuestas realizadas en el Pleno municipal del 2 de octubre de 2019.
- *Convenio para la prestación del servicio de alcantarillado en el municipio de Arganda del Rey entre la Comunidad de Madrid, Canal de Isabel II y el Ayuntamiento de Arganda del Rey* (BOCM, 2012), del que se extrae que la gestión del sistema de alcantarillado la realiza el Canal de Isabel II.

#### 2.5. OTROS DOCUMENTOS DE REFERENCIA

- Normas para redes de saneamiento. Canal de Isabel II. Versión 3.2020, a partir de la cual se conoce la capacidad de almacenamiento para pluviales en la red de alcantarillado.

### 3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El presente TFM nace del interés de la autora de dar solución mediante una herramienta novedosa a un problema de la gestión del riesgo de inundación de origen fluvial y pluvial tras su vivencia experimentada en la inundación ocurrida el 26 de agosto de 2019 en Arganda del Rey. Este TFM se ha desarrollado en colaboración con la empresa donde actualmente trabaja la autora (TAUW) mediante el empleo de un software novedoso en el mercado y que se emplea en TAUW Holanda, lo que ha supuesto una mejora en la cooperación internacional con Holanda, creando así un vínculo más fuerte entre países de la misma empresa.

La justificación de este trabajo se apoya sobre varios aspectos que se detallan a continuación, relacionados con el conocimiento actual sobre el riesgo de inundación en España y la vulnerabilidad en áreas urbanas, así como en el conocimiento histórico y actual sobre las inundaciones en el municipio de Arganda del Rey.

El conocimiento actual sobre el riesgo de inundación en España es amplio, siendo las inundaciones la catástrofe natural que mayores daños genera en España. Según el Consorcio de Compensación de Seguros y el Instituto Geológico y Minero de España, en nuestro país, los daños por inundaciones se estiman en total en una media de 800 millones de euros anuales. A modo de ejemplo, cabe destacar que sólo en bienes asegurados, en el período 1971-2016, según las estadísticas del Consorcio, el 44,6 % de los expedientes tramitados han sido debidos a daños por inundaciones, que han supuesto el 62 % del total de las indemnizaciones, las cuales, de media, suponen cerca de 130 millones de euros cada año (Ministerio para la Transición Ecológica, 2019).

Concretamente, en las áreas urbanas el riesgo de inundación es mayor que en áreas despobladas debido a la concentración de humanos, que está considerada como una primera fuente de aumento de la vulnerabilidad (Dauphiné, 2003). Junto a este factor, se observan otros que unidos a él agravan los daños ocasionados por las inundaciones en áreas urbanas, como la situación económica o social de determinados sectores (barrios, distritos, etc). Además, la urbanización multiplica los daños que pueden causar las aguas de lluvias intensas debido a la considerable extensión de superficie de suelo urbano (pavimentado), la modificación que la población impone a las salidas de agua tanto naturales como artificiales, la ubicación errónea de urbanizaciones y la deforestación excesiva en las laderas de la cuenca (Arranz Lozano, 2008).

Las inundaciones en el casco histórico de Arganda del Rey son conocidas desde tiempos inmemorables (Ver Anejo 2) y vienen motivadas en gran parte a la situación geográfica donde se ubica el primitivo casco urbano de Arganda del Rey en una zona de acumulación de flujo, a que el importante proceso de urbanización que ha experimentado el núcleo de población no ha sido respetuoso con la hidrología natural de la cuenca, a que no se ha adaptado el sistema de alcantarillado al tamaño de la población y a su mantenimiento.

Muchas de las afecciones registradas tras los últimos eventos de precipitación intensa (días 26 de agosto y 15 de septiembre de 2019) se encuentran en zonas de acumulación de flujo de la cuenca de estudio, como es el caso de la plaza de la Constitución, la calle Real y su entorno; la avenida de Valencia; y la N-III y el supermercado Maxi Día. Tras este suceso, en 2020 el ayuntamiento de Arganda del Rey realizó un convenio con El Canal de Isabel II para realizar diversas estructuras que defiendan a la población ante las inundaciones a través del “Plan Sanea 2018-2030” (Ayuntamiento de Arganda del Rey, 2020; Ojea, 2020).

Se ha comprobado que no existen de estudios de inundación en la cuenca de estudio. De hecho, el municipio de Arganda del Rey, solo cuenta con los mapas de peligrosidad e inundación del tramo 6 (Arroyo de Vilches) del área de riesgo potencial significativo de inundación (ARPSI) con código ES030-11-04.1 (Confederación Hidrográfica del Tajo, 2019). Además, se ha realizado una consulta al ayuntamiento (23 de octubre de 2020), donde se corrobora que este es el único estudio que se ha realizado en todo el municipio.

Además, como se ha comentado en el Apartado 2, en el municipio de Arganda del Rey no dispone ni de un Plan de Actuación Municipal frente al riesgo de inundación ni de un Plan de Emergencia contra las inundaciones.

## 4. OBJETIVOS

Tras la exposición de los antecedentes y la justificación de la realización del estudio de análisis de los riesgos de inundación próximos a la plaza de la Constitución, en el municipio madrileño de Arganda del Rey, en este apartado se presentan los objetivos generales y específicos que persigue el presente TFM (ver Tabla 2).

Tabla 2 *Objetivos generales y específicos del TFM. Fuente: elaboración propia.*

Generales	Específicos
<p>Entender el funcionamiento del sistema hidrológico e hidráulico de la cuenca de estudio.</p> <p>Conocer las deficiencias a nivel normativo existentes en el municipio de Arganda del Rey respecto al análisis y gestión de los riesgos de inundación.</p>	<p>Realizar una exhaustiva búsqueda de información pública disponible para definir el sistema hidrológico e hidráulico del caso de estudio y para conocer la normativa actual y aplicable.</p> <p>Realizar una caracterización de la cuenca de estudio que permita analizar cuáles son los factores limitantes para llevar a cabo la posterior modelización hidrológica e hidráulica.</p> <p>Crear una tormenta de diseño que esté debidamente justificada.</p>
<p>Entender que los análisis de inundaciones no pretenden realizar una representación fiel de la realidad, sino conducir a unos resultados de los que se puedan extraer unas conclusiones debidamente justificadas y que puedan ayudar al gestor a la hora de la toma de decisiones en lo que respecta la gestión de los riesgos de inundación.</p>	<p>Establecer unos criterios de diseño definidos por la autora para el empleo del modelo hidrológico e hidráulico en el caso de estudio.</p>
<p>Mostrar como aspectos clave en la gestión del riesgo de inundación, la importancia de la delimitación de las zonas inundables para varios periodos de retorno y del análisis del riesgo de inundación.</p>	<p>Configurar un modelo hidrológico e hidráulico para 5 escenarios compuestos por 5 precipitaciones para distintos periodos de retorno (10, 25, 50, 100 y 500 años).</p> <p>Delimitar las zonas inundables para dichos periodos de retorno.</p> <p>Realizar un análisis del riesgo de inundación en el que se considere tanto el riesgo social como el riesgo económico.</p>
<p>Proponer una serie de actuaciones para así prevenir los daños causados por las inundaciones y consecuentemente reducir el riesgo de inundación.</p>	

## 5. METODOLOGÍA

En este apartado se describe la metodología empleada para realizar el análisis del riesgo de inundaciones en la cuenca de estudio, que tiene como fin la delimitación de las zonas inundables para varios periodos de retorno y el análisis el riesgo de inundación, que son aspectos clave en la gestión del riesgo de inundación.

Concretamente, se realizan cinco simulaciones, correspondientes a precipitaciones de cinco periodos de retorno distintos. Cada una de estas simulaciones es un escenario diferente (ver Tabla 3). La justificación de la selección de varios escenarios radica que se pretende comprobar qué es lo que ocurre bajo escenarios en un rango amplio de magnitudes de precipitación: desde una precipitación de pequeña magnitud asociada a una probabilidad de ocurrencia muy alta (T=10 años) empleada para el dimensionamiento del sistema de alcantarillado (Canal de Isabel II, 2020), hasta una precipitación de gran magnitud que tiene asociado una probabilidad de ocurrencia muy baja (T=500 años).

Tabla 3 Correlación de escenarios y periodos de retorno asociados. Fuente: elaboración propia.

Escenario	Periodo de retorno (años)
Escenario 0	10
Escenario 1	25
Escenario 2	50
Escenario 3	100
Escenario 4	500

Para realizar el análisis del riesgo de inundación se ha definido una metodología propia, inspirada en la metodología para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Medio Marino, 2011), la metodología empleada para la caracterización del riesgo de las ARPSIs en la Demarcación Hidrográfica del Tajo (Confederación Hidrográfica del Tajo, 2015), y la metodología Completa y Cuantitativa de análisis de riesgo de inundación en zonas urbanas (Escuder-Bueno et al., 2013). La herramienta informática empleada para el estudio de inundaciones es "Tygron" y la herramienta empleada para el análisis del riesgo es "iPresas", las cuales de presentan más adelante.

Los pasos a seguir se presentan a continuación:

1. Delimitación de la cuenca topográfica
2. Estudio de precipitaciones
3. Modelo hidrológico e hidráulico
4. Criterios de diseño del modelo Tygron
5. Análisis del riesgo de inundación

En lo que respecta a la modelización hidrológica e hidráulica, como la cuenca de estudio no se encuentra monitorizada (no hay pluviómetros ni estaciones de aforo), no será necesario realizar un ajuste. Es decir, la calibración (estimación de parámetros por comparación entre variables de estado observadas y simuladas) y validación (análisis de bondad del modelo en escenarios distintos a calibración) no serán posibles. Sin embargo, tras la obtención de resultados, se realiza un breve análisis de sensibilidad mediante la comparación de los resultados del modelo con la información disponible públicamente de lo ocurrido realmente en el evento del día 26 de agosto.

Tras el análisis del riesgo de inundación en la cuenca de estudio resultados, en la discusión de resultados, se realizará (si procede) una propuesta de actuaciones encaminadas a la reducción del riesgo de inundación.

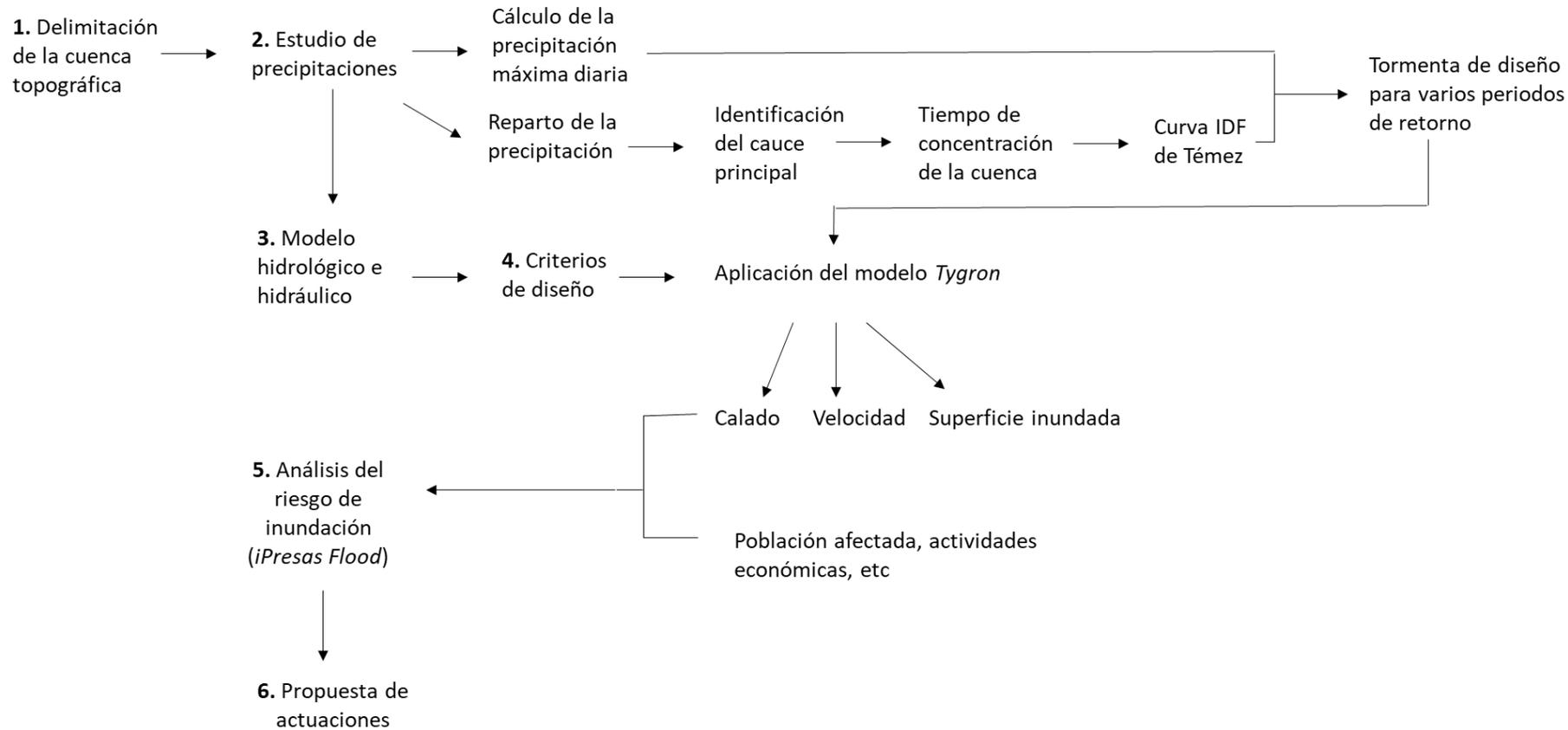


Figura 6 Metodología. Fuente: elaboración propia.

## 5.1. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA TOPOGRÁFICA

Para la delimitación de la cuenca vertiente con punto de cierre en la plaza de la Constitución, se tienen en cuenta los límites naturales del terreno, es decir, las divisorias. Mediante el empleo del conjunto de herramientas de hidrología pertenecientes a la caja de herramientas de GRASS, un plugin del Sistema de Información Geográfica QGIS, se delimita la cuenca de estudio. El proceso seguido se resume a continuación:

1. El primer paso consiste en, a partir del MDT con paso de malla 25 m disponible en el Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (en adelante, IGN), rellenar los sumideros. Este paso es esencial para eliminar las depresiones y para que la dirección del flujo sea única para cada celda.
2. Seguidamente, calcular la acumulación de flujo, o lo que es lo mismo, el número de celdas que drenan por cada una de las celdas.
3. Después, determinar la red de drenaje dando un valor umbral (número de celdas mínimo para considerar que una celda que tenga dicha acumulación es considerada "cauce"). El valor umbral depende de la resolución del MDT empleado. En este caso, al tener un MDT con paso de malla 25 m, se establecerá en 25 celdas como mínimo.
4. Por último, delimitar la cuenca vertiente a un punto dado que se elige viendo por dónde va la red de drenaje. En el caso de estudio, el punto de cierre de la cuenca es el punto más bajo de la plaza de la Constitución.

La cuenca topográfica delimitada aparece en el Plano 1 del Anejo 7.

## 5.2. ESTUDIO DE PRECIPITACIONES

La finalidad del estudio de precipitaciones es la determinación del régimen de precipitaciones extremas, que incluye la cantidad máxima de precipitación en función de la probabilidad de ocurrencia y estima cual va a ser la distribución temporal de la precipitación a lo largo de la duración del evento. En resumen, el estudio de precipitaciones responde a cuánta precipitación cae y cómo se reparte en el tiempo.

### 5.2.1. Precipitación máxima diaria

La estimación de la magnitud de la lluvia que puede caer sobre la cuenca se suele realizar mediante el análisis estadístico de las series de precipitación registradas en las estaciones pluviométricas situadas en la cuenca o su entorno. La información registrada en los pluviómetros suele consistir en datos de precipitaciones diarias, a partir de los cuales se confeccionarán series de precipitaciones diarias máximas anuales. Como se explica en el Anejo 1, se comprueba que en la cuenca de estudio no se localiza ninguna estación pluviométrica, y la más cercana a la cuenca es la estación automática de la AEMET (Código 3182Y) situada en Arganda del Rey, que tiene escasos registros de precipitación diaria.

Ante la inexistencia de suficientes series de precipitación diarias, para el cálculo de la lluvia, se emplean los mapas de precipitaciones máximas diarias de la publicación "Máximas lluvias diarias en la España peninsular" (Ministerio de Fomento, 1999) ya que se trata de una herramienta y guía de la propia administración (Jiménez Álvarez et al., 2011).

En la Tabla 4 se presenta la precipitación diaria máxima para distintos periodos de retorno, correspondientes a cada escenario propuesto. En el Anejo 3 se detalla el procedimiento seguido para el cálculo de la precipitación máxima diaria.

Tabla 4 Precipitación máxima diaria para distintos periodos de retorno. Fuente: Máximas lluvias diarias en la España peninsular (MOPU, 1999).

Periodo de retorno T(años)	Escenario	Precipitación diaria máxima Pd (mm)
T=10 años	Escenario 0	56,92
T=25 años	Escenario 1	68,68
T= 50 años	Escenario 2	77,2
T=100 años	Escenario 3	86,96
T=500 años	Escenario 4	111,4

### 5.2.2. Reparto en el tiempo de la precipitación

Establecer la duración de una tormenta y el reparto de precipitación en el tiempo no es una tarea sencilla. En el caso de estudio, se han sopesado tres opciones, de entre las cuales, la opción escogida es la Opción 2, pues se justifica en que:

- En España, la forma habitual de obtener la distribución temporal de la precipitación es mediante la utilización de hietogramas sintéticos teóricos contruidos a partir de las curvas IDF (Jiménez Álvarez *et al.*, 2011).
- La forma de la tormenta, de bloques alternos (Chow, Maidment, & Mays, 1994) simétricos (Ferrer Polo, 1993), es adecuada en cuanto a la generación de caudales al situarse las intensidades máximas en los intervalos de tiempo centrales de la tormenta.
- La duración de la tormenta está basada criterios relacionados con el tiempo de concentración de la cuenca.

Las otras opciones se han desechado por las razones que se listan a continuación:

- Opción 1: mientras que la forma escogida (bloques alternos simétricos) es adecuada en cuanto a la generación de caudales al situarse las intensidades máximas en los intervalos de tiempo centrales de la tormenta; se ha desechado esta opción ya que raramente ocurren tormentas de duración 24 horas en las que no exista ningún periodo seco. Una posible alternativa consistiría en escoger las tres horas centrales (en las que la intensidad es mayor) y asumir que el resto de precipitación se ha infiltrado en el suelo antes del inicio de la escorrentía.
- Opción 3: pese a que existen datos reales de la precipitación y distribución horaria de la tormenta del día 26 de agosto de 2019, se ha desechado esta opción ya que no existe un registro de series de precipitación lo suficientemente largo para realizar un análisis estadístico, y que las intensidades mayores tienen lugar al principio de la tormenta, lo que implica que las cantidades de agua que escurren libremente por la superficie, encauzándose hacia la red de drenaje, sean pequeñas y, por consiguiente, los caudales generados sean relativamente bajos, lo que puede llevar a una infravaloración de los resultados.

En el Anejo 3 se presentan de manera detallada las 3 opciones para establecer la duración de la tormenta de diseño y su distribución en el tiempo.

La tormenta de diseño que se emplea para la simulación tiene una duración de 100 minutos (1 h 40 min), una forma en bloques alternos simétricos y una discretización temporal 20 minutal. En la Figura 7 se presenta la tormenta de diseño para varios periodos de retorno.

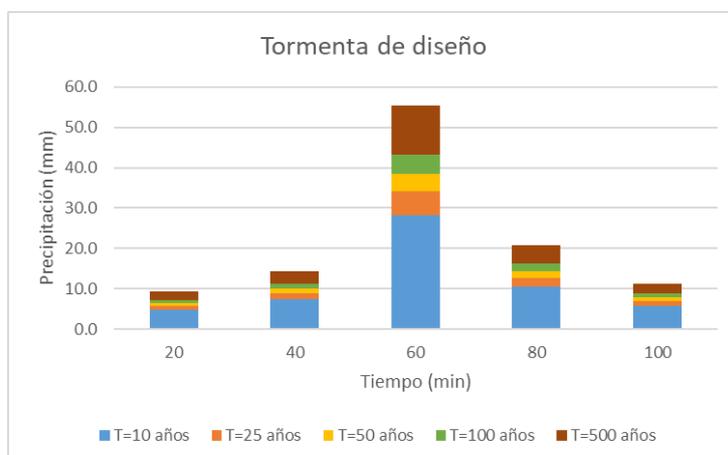


Figura 7 Precipitación para distintos periodos de retorno. Fuente: elaboración propia.

### 5.3. MODELO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

La tormenta de diseño creada tras el estudio de precipitaciones va a ser el dato de entrada más importante del modelo hidrológico e hidráulico que se desee emplear. En el caso de estudio la modelización hidrológica e hidráulica se realiza a través de la misma herramienta de cálculo: Tygron. En este apartado se presenta y justifica la elección de dicha herramienta así como se muestra la viabilidad de la misma en estudios de análisis de inundaciones.

#### 5.3.1. Herramienta de cálculo: presentación y justificación

Para simular la inundación se ha empleado la plataforma de Geodiseño "Tygron" (en adelante, Tygron). La plataforma fue desarrollada en 2005 por Tygron y desde 2014 se ha incorporado en su totalidad a la nube. Actualmente hay más de 10.000 proyectos en 15 países, entre los que se incluye España (Tygron, 2020). Su aplicación es incipiente ya que compite en el mercado con otros softwares empleados a escala mundial, muchos de ellos de difusión gratuita y de fiabilidad de sus resultados aceptada. A modo de ejemplo, citar HEC-HMS (modelación hidrológica) y HEC-RAS (modelación hidráulica), entre muchos otros.

Entre las razones que justifican la elección de esta herramienta, se encuentra que Tygron está basado en la informática de alto rendimiento, en inglés *High Performance Computing* (en adelante, HPC), al contrario que muchos otros softwares. La HPC es un campo de la computación actual que da solución a problem Para lograr una potencia de cálculo extremadamente alta, la HPC se apoya en superordenadores, que son un gran número de servidores conectados entre sí en paralelo para completar una o varias tareas.as tecnológicos muy complejos y que involucran un gran volumen de cálculos o de coste computacional.

La HPC se apoya en la tecnología de unidad de procesamiento gráfico, en inglés *Graphics Processing Units* (en adelante, GPU), que es capaz de acelerar las operaciones mediante un hardware. Originalmente, entre los 70 y 80, las GPU se desarrollaron como sencillas tarjetas gráficas diseñadas para acelerar los gráficos, como el renderizado de imágenes. Más tarde, a principios del siglo XXI, evolucionaron a plataformas para la HPC. Las GPU modernas aportan una velocidad computacional significativa comparada con las CPU estándares empleadas en ordenadores de mesa o portátiles.

Además, la selección de esta herramienta frente a otras se basa en que presenta un modelo adecuado para el posterior análisis del riesgo: un modelo bidimensional distribuido. Este tipo de modelo es adecuado para dicho fin ya que por un lado, un modelo bidimensional contempla todo el territorio afectado por la lámina de agua desbordada. Por el contrario, un modelo unidimensional solamente es capaz de representar unos varios metros a ambos lados del eje del cauce. En el caso de estudio, como la cuenca cuenta con varios cauces estrechos, la geometría de cada uno de estos cauces debería medirse en campo; tarea que se aleja del alcance del presente TFM. Por otro lado, un modelo distribuido tiene en cuenta la variabilidad espacial de las variables y parámetros empleados en la modelización (precipitación, infiltración, etc.) a lo largo de la cuenca, mientras que el un modelo agregado no.

También, otra justificación radica en que esta herramienta cuenta con varios modelos de cálculo adicionales al modelo de flujo superficial, como son los modelos relativos a la evaporación, la infiltración, el flujo subterráneo y las estructuras hidráulicas (e.g.: la red de alcantarillado).En el caso de que se desee ampliar el conocimiento sobre el funcionamiento del software, consultar el Anejo 4.

A continuación, en la Tabla 5 se listan las ventajas y desventajas del empleo del software Tygron que se han ido encontrando antes y a medida que se empleaba el software:

Tabla 5 Ventajas y desventajas del empleo del software Tygron. Fuente: elaboración propia.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Software basado en la HPC.</li> <li>✓ Los cálculos se realizan desde la nube.</li> <li>✓ Interfaz con archivos GIS para evaluar, gestionar y producir datos tanto de entrada como de salida.</li> <li>✓ Visualización 3D de la información espacial y de los resultados.</li> <li>✓ Adaptado a usuarios que no dispongan de licencia ya que los resultados se pueden exportar como GeoTiff o archivo ASCII.</li> <li>✓ Emplea un modelo bidimensional distribuido.</li> <li>✓ Cuenta con varios modelos de cálculo (flujo superficial, evaporación, infiltración, etc)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Necesidad de obtener una licencia de pago para su utilización.</li> <li>❖ Necesidad de un hardware específico (una tarjeta gráfica NVIDIA).</li> <li>❖ Aplicación incipiente en el mercado.</li> <li>❖ No hay ejemplos en España.</li> <li>❖ Aumento de la complejidad del modelo al ir añadiendo modelos adicionales (evaporación, la infiltración, el flujo subterráneo y las estructuras hidráulicas (e.g.: la red de alcantarillado).</li> <li>❖ Restricción del tiempo de computación (mayor a 1 hora) durante el horario de trabajo para reducir la sobrecarga del sistema.</li> </ul>

### 5.3.2. Viabilidad de la herramienta

A raíz de la existencia de una amplia gama de instrumentos de modelización hidráulica disponibles en el mercado que van incorporando nuevos algoritmos y herramientas para su mejora, la Agencia de Medio Ambiente de Reino Unido (*Environmental Agency*) junto a la Universidad de Heriot Watt (Edimburgo) ha desarrollado un conjunto de pruebas estándar (en inglés, *benchmarks*) que ilustran el comportamiento de diferentes modelos hidráulicos 2D de última generación. Estas pruebas permiten evaluar la capacidad de los paquetes de modelación en 2D disponibles para simular inundaciones bajo diferentes condiciones y para una variedad de propósitos de manejo de riesgos de inundación.

En esta línea y con el objetivo de comprobar la fiabilidad del modelo empleado por el módulo de agua de Tygron para diversas circunstancias, se ha realizado comparaciones entre el modelo empleado en Tygron y los modelos de otros softwares ampliamente conocidos. Para ello, se ha empleado la publicación de Néelz, S. & Pender, G (2013) en la que se comparan 18 paquetes de modelación de inundaciones (sin incluir Tygron). La mayoría de los paquetes de modelación resuelven las ecuaciones de aguas someras en 2D de manera completa (ANUGA, Flowroute-iTM, InfoWorks ICM, ISIS 2D, ISIS 2D GPU, JFLOW+, MIKE FLOOD, SOBEK, TUFLOW, TUFLOW GPU, TUFLOW FV, XPSTORM y Ceasg); mientras que el resto de paquetes realizan simplificaciones. Respecto a la forma de procesar, algunos de estos paquetes (Ceasg, InfoWorks ICM, ISIS 2D GPU, JFLOW+, TUFLOW GPU) emplean la tecnología de GPU.

Al realizar varias pruebas estándar en Tygron (disponibles en su Wiki), se comprueba que el comportamiento de Tygron frente a otros modelos que resuelven las ecuaciones de aguas someras en 2D de manera completa y emplean la tecnología GPU, es muy similar. Las diferencias que existen entre estos modelos son muy pequeñas y están dentro del rango de precisión deseada para aplicaciones prácticas. La consistencia en los resultados obtenidos, obtenida empleando algoritmos numéricos de una amplia variedad de clases fundamentan un alto nivel de confianza en la exactitud de estos resultados (Néelz & Pender, 2013).

Esto lleva a la conclusión que el modelo Tygron es capaz de predecir adecuadamente las variables (calado y velocidad) sobre las que se basarán las decisiones de gestión de riesgos de inundación tomadas en el presente TFM. Además, la experiencia en el empleo del modelo, pese a ser incipiente, también es otra forma de reconocer la viabilidad de la herramienta.

#### 5.4. CRITERIOS DE DISEÑO DEL MODELO TYGRON

Para la resolución de la problemática de las inundaciones se definen unos criterios de diseño del modelo basados en los factores limitantes expuestos en el Apartado 1.3. Además, pese a no ser uno de los procesos físicos más importantes en este tipo de eventos, se ha decidido tener en cuenta la evaporación para explotar las funcionalidades del software.

En ningún caso se pretende reflejar con absoluta fidelidad y realismo la situación existente en la cuenca, sino considerar, de una forma razonable y con criterios técnicos que dejen del lado de la seguridad, aquellos elementos que contribuyan a reducir el riesgo de inundación.

- La inundación ocurrida se entiende como una combinación de origen pluvial y fluvial a pesar de que, en ocasiones, se tiende a separar la inundación de origen pluvial de la de origen fluvial, ya que la de origen pluvial ocurre antes (va ligada a la máxima intensidad de la lluvia) y la de origen fluvial es más retardada en el tiempo (va ligada al tiempo de concentración de la cuenca).
- Se simulan 5 escenarios, ligados a la precipitación para distintos periodos de retorno (en años): 10 (escenario 0), 25 (escenario 1), 50 (escenario 2), 100 (escenario 3) y 500 años (escenario 4).
- El periodo de simulación se corresponde con la duración de la tormenta de diseño (1 hora y 20 minutos).
- Se asume que no hay aportes externos a la cuenca.
- Se asume que los resultados se obtienen con cotas obtenidas en agua clara sin considerar esponjamiento por transporte sólido.
- Se desprecia la capacidad erosiva y el transporte de sedimentos.
- Se desprecian los obstáculos en cauces (infraestructuras) debido a las reducidas dimensiones de los cauces que integran la red de drenaje.
- El cálculo se realiza en todo el área de proyecto y se tendrán en cuenta los resultados en las zonas ocupadas por la cuenca.
- Las ecuaciones de flujo superficial 2D son completas, es decir, se establece la condición de dinámica de fluidos en la que las condiciones del fluido cambian con el tiempo debido a cambios en el estado del sistema (estado transitorio).
- Los modelos de cálculo adicionales son el modelo de evaporación, de infiltración y de la red de alcantarillado. Se desactiva el modelo de flujo subterráneo puesto que las aguas subterráneas no son un factor limitante.
  - Se asume que la evaporación ocurre únicamente desde la zona superficial del suelo desnudo y desde la superficie del agua (conocida como evaporación superficial) y ocurre en un único periodo de evaporación, estableciéndose una tasa de evaporación constante. Se desprecia la evapotranspiración (pues va ligada a la activación del modelo de flujo subterráneo).
  - Se asume que la infiltración es únicamente superficial, es decir, el agua de la superficie puede infiltrar a la zona no saturada, que se supone de capacidad infinita.
  - Se asume que la rugosidad del terreno de las capas más superficiales son factores limitantes.
  - Se asume que la porosidad y la velocidad de infiltración del suelo son factores limitantes.
  - Se asume que existe un área de alcantarillado, que tiene una capacidad de almacenamiento para una lluvia de periodo de retorno de 10 años, que puede almacenar toda esa cantidad de precipitación y que no permite su salida del sistema de alcantarillado. Además, se asume que el agua va en una dirección determinada debida a la topografía y que los colectores no redireccionan el agua.

## 5.5. CONFIGURACIÓN DEL MODELO EN TYGRON.

Tras establecer los criterios del modelo Tygron, se procede a la configuración del mismo en seis pasos en los que se el usuario define el sistema. En el Anejo 5 se muestra la configuración del sistema hidrológico e hidráulico junto a los problemas encontrados durante la utilización del software y las soluciones tomadas para su correcto funcionamiento. Así mismo, se realizan comprobaciones del modelo y se interpretan los resultados obtenidos.

A continuación, se presentan los pasos a seguir para la configuración del modelo hidrológico e hidráulico:

- **Paso 1:** establecer las condiciones de contorno. Para ello, se introduce la tormenta de diseño que se presenta en el Apartado 5.2., la evaporación del agua en la superficie (2,1 mm/día) y el comportamiento del agua subterránea (“solo hay infiltración”, es decir, el agua se infiltra hasta la zona no saturada, que se supone de capacidad infinita).
- **Paso 2:** definir del sistema de agua. Para ello, se crea una zona de alcantarillado en la zona ocupada por el uso urbano. Esta zona es capaz de retener la precipitación para un periodo de retorno de 10 años.
- **Paso 3:** configurar los coeficientes hidrológicos. Estos coeficientes están asociados a la superficie, al subsuelo y a las construcciones.
  - Para la superficie del suelo se mantendrán los tres coeficientes hidrológicos por defecto (la velocidad de infiltración superficial,  $n^o$  de Manning y el factor de evaporación de la superficie del agua).
  - Para el subsuelo, se introducen la velocidad media de infiltración y la porosidad para las asociaciones del suelo presentes en la cuenca.
  - Para las construcciones, se dejan por defecto los valores de las edificaciones. También, se introducen los usos del suelo presentes en la cuenca correlacionándolos con las construcciones disponibles en Tygron (ej: el uso del suelo “viñedos” se corresponde con “vineyard”, que presenta unos valores de las funciones del sistema de agua concretas). A cada uso del suelo se le asigna su valor el  $n^o$  de Manning correspondiente (ver Anejo 1).
- **Paso 4:** elección de superposiciones de salida. Las superposiciones de salida más relevantes son la de máximo valor en la superficie, dirección media del flujo, velocidad, flujo superficial, almacenamiento de agua en las alcantarillas. Todas estas podrán compararse con la superposición de salida denominada elevación de la superficie.
- **Paso 5:** configuración de los periodo de tiempo (*timeframes*). Para ello se deja la configuración que aparece por defecto, pues es la que mejor se adapta al caso de estudio. En este caso, hay 10 pasos de tiempo, situándose el pico del hietograma a entre los intervalos 3 a 5.
- **Paso 6:** ajustes avanzados. Respecto al modo de calcular el paso de tiempo, el modo que aparece por defecto es el de “velocidad”, que incluye pasos de tiempo más grandes.

Para cada uno de los 5 escenarios propuestos, la simulación incluye todos los criterios de diseño:

- ✓ Periodo de simulación: duración de la tormenta de diseño (1 hora y 40 minutos).
- ✓ Cálculo realizado en todo el área de proyecto
- ✓ Único periodo de evaporación superficial
- ✓ Infiltración superficial
- ✓ Rugosidad del terreno
- ✓ Porosidad y velocidad de infiltración del suelo
- ✓ Área de alcantarillado con capacidad de almacenamiento para una lluvia de periodo de retorno de 10 años.

```
Debug Info:
Rain: 56,9 mm (Entire Map)
Time: 1,7 hours (10 frames)
Map: 6.000 m x 6.000 m
Quad Cells: 144.000.000 @ 239.324 steps
Identified areas: 6
Constructions: 3
Object flow: 0 m3
Sewer Overflow: 0 m3
Calc Time: 15 minutes on 8 gpus
Finished: 08 Mar 2021 15:25
Volume: 2.047.035 m3
```

Paso de malla de 0,5x0,5m (ejemplo para T=10 años)

## 5.6. ANÁLISIS DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

En este apartado se describe la estimación cuantitativa del riesgo de inundación en la cuenca de estudio para un rango de avenidas definidos por los eventos de precipitación en la cuenca con periodos de retorno entre 10 y 500 años (5 escenarios). Esta estimación cuantitativa del riesgo se corresponde con la situación actual.

Como se explicó en el Apartado 1.2, para el cálculo del riesgo de inundación se suele tener en cuenta la población afectada y las actividades económicas afectadas; obteniendo un valor de riesgo social y otro de riesgo económico, respectivamente.

Por un lado, el riesgo social se cuantifica en términos de población potencialmente afectada (PPA), (puesto que la pérdida de vidas no es habitual en el municipio de estudio), expresado en nº de habitantes potencialmente afectados/año. El riesgo social resulta de la multiplicación de la probabilidad de inundación por la PPA que produce. Para la estimación de la PPA se recurre a los datos de población total en la cuenca de estudio (Ayuntamiento de Arganda del Rey, 2019). Además, pese a que desde finales de junio a mediados de septiembre se espere un ligero aumento de la población con motivo de la celebración de festividades (Ayuntamiento de Arganda del Rey, 2020), este aumento no se tendrá en cuenta como un factor modificador de la PPA.

Por otro lado, el riesgo económico se cuantifica en términos de pérdidas económicas (D), expresado en unidades monetarias/año. El riesgo económico resulta de la multiplicación de la probabilidad de inundación por las consecuencias económicas que produce. Para la estimación de las pérdidas económicas se recurre a los datos de usos del suelo en la cuenca de estudio (ver ver Anejo 1) y al Anejo 2 Costes unitarios para valoración del daño en función de los usos del suelo de la “Propuesta de mínimos para la metodología de realización de mapas de riesgo de inundación” (MAGRAMA, 2013) con el objeto de definir el coste de referencia (€/m<sup>2</sup>) de cada uso del suelo.

Para analizar el riesgo de inundación se emplea la Metodología SUFRI-iPPRESARA, desarrollada en el proyecto SUFRI, con incorporación de aspectos de modelación desarrollados posteriormente en el marco del proyecto iRESARA (CRUE, 2011). Para aplicar esa metodología se emplea el software *iPresas Flood*, desarrollado por el IIAMA (Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente) de la UPV (Universidad Politécnica de Valencia). Esta herramienta total y cuantitativa cuantifica el riesgo tras obtener un valor numérico para cada una de sus componentes (probabilidad y consecuencia), permite la resolución de árboles de eventos mediante diagramas de influencia.

Para el caso de estudio, se construye un diagrama que represente el modelo de riesgo del régimen natural de un río (empleado en el caso de inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces). El modelo de riesgo tiene una arquitectura, definida por las tres componentes del diagrama de influencia: las cargas, la respuesta del sistema y las consecuencias, que se presenta en la Figura 8. La descripción de cada una de ellas se muestra en la Tabla 6.

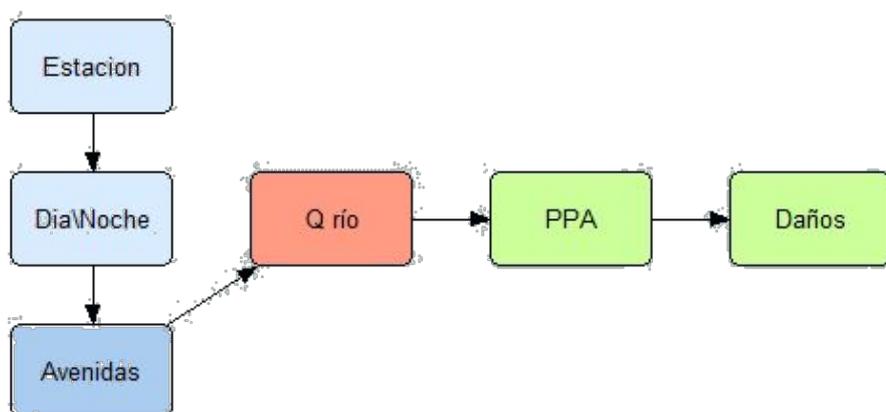


Figura 8 Modelo de riesgo. Régimen natural. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Nodos, componente, descripción y variable del modelo de riesgo. Fuente: elaboración propia.

<b>Nodo</b>	<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>	<b>Variable</b>
Estación	Cargas	Probabilidades asociadas a las estaciones del año definidas como invierno y verano. En el caso de estudio no se hace esta diferenciación.	Estación= verano, invierno
Día/Noche	Cargas	Probabilidades asociadas a los momentos del día definidos como día y noche. Empleados para la definición de dos categorías de tiempo que permitan capturar la variabilidad diaria de la población. Probabilidad de 0,5 para el día y 0,5 para la noche.	Momento=día, noche
Avenida	Cargas	Define el rango de periodos de retorno de las avenidas a considerar (5 escenarios) definidos por los eventos de precipitación en la cuenca. En el caso de estudio es T <sub>min</sub> 10 años y T <sub>max</sub> 500 años.	T <sub>min</sub> y T <sub>max</sub>
Qrio	Respuesta del sistema	Incluye periodos de retorno (T), probabilidades anuales de excedencia (AEP) y caudales máximos de los hidrogramas (Q <sub>max</sub> ).	T, Probabilidad anual de excedencia (AEP), Q <sub>max</sub>
Población potencialmente afectada (PPA)	Consecuencias	Incluye consecuencias en población potencialmente afectada de cada evento de inundación (identificados por caudales Q <sub>max</sub> ) para la situación actual y categoría de tiempo.	Q <sub>max</sub> , nº de población potencialmente afectada
Daños (D)	Consecuencias	Incluye consecuencias en pérdidas económicas de cada evento de inundación (identificados por caudales Q <sub>max</sub> ) para la situación actual.	Q <sub>max</sub> , euros

Combinando los nodos pertenecientes a los tres bloques anteriores, el modelo de riesgo permite obtener los resultados de riesgo social y económico. Los resultados del cálculo se representan en curvas tipo F-PPA y F-D, donde F es la probabilidad anual acumulada de excedencia de un determinado nivel de consecuencias de inundación, bien expresadas en población potencialmente afectada (PPA) o en costes económicos (D). El área total situada bajo esta curva es el riesgo social/económico obtenido.

En el Anejo 6 se presenta el análisis del riesgo de inundación siguiendo la metodología indicada.

## 6. RESULTADOS

Tras la modelización hidrológica e hidráulica con el software Tygron y el posterior análisis de riesgos de inundación con el software iPresas, se extraen una serie de resultados que, bajo criterio técnico deberán ser interpretados para la posterior gestión del riesgo de inundación. En este apartado se presentan dos tipos de resultados, los obtenidos tras la modelización hidrológica e hidráulica, y aquellos obtenidos tras el análisis de riesgos de inundación.

### 6.1. MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRAÚLICA

De las cinco simulaciones llevadas a cabo en el modelo (una para cada escenario) se han extraído valores de caudal, área inundada, calado y velocidad, que se interpretarán para la posterior discusión de resultados y propuesta de actuaciones encaminadas a la reducción del riesgo de inundación. Así mismo, al final de este apartado se presenta en breve análisis de sensibilidad del modelo hidrológico e hidráulico, realizado para contrastar los resultados obtenidos tras la simulación en el escenario 0 (T=10 años) con la información disponible públicamente tras el evento de precipitación intensa ocurrida el 26 de agosto de 2019 (de periodo de retorno de 10 años).

De carácter general, se comprueba la importancia del funcionamiento del sistema de alcantarillado, pues consigue una reducción de caudal significativa en el área urbana frente a un escenario sin sistema de alcantarillado. Al existir sistema de alcantarillado, la máxima afección ocurre más tarde, existiendo un desfase de 20 minutos con el escenario sin sistema de alcantarillado (para el escenario 0 -T=10 años-). También se comprueba que el sistema de alcantarillado resulta tanto más efectivo cuanto menor es la magnitud de la precipitación. Así pues en los escenarios 0, 1 y 2 (T=10, 25 y 50 años, respectivamente) la afección máxima consigue retrasarse entre 10 y 20 minutos frente a los escenarios 3 y 4 (T=100 y 500 años, respectivamente), donde el sistema de alcantarillado parece no funcionar correctamente.

Teniendo en cuenta el sistema de alcantarillado, se comprueba que cuanto menor es el periodo de retorno, la máxima afección en el punto de cierre de la cuenca ocurre más tarde. Así pues, para el periodo de retorno de 10 años (escenario 0) la máxima afección ocurre casi al final de la tormenta, mientras que para el periodo de retorno de 500 años (escenario 4), ocurre 20 minutos antes.

En las zonas situadas en las partes altas de la cuenca, la máxima afección ocurre antes. Así pues, para el escenario 1 (T=25 años) y 2 (T=50 años), en la carretera N-III y supermercado MAXI DIA y avenida de Valencia, la máxima afección ocurre en el *timeframe* 6; mientras que en la plaza de la constitución (punto de cierre de la cuenca) la máxima afección ocurre en el *timeframe* 7, es decir, 10 minutos más tarde. Esto ocurre ya que el pico del hidrograma (el caudal máximo) tarda más en llegar.

También se identifica la existencia de dos zonas de acumulación de agua capaces de almacenar un volumen importante y retrasar el pico de la avenida. La primera zona se encuentra en las proximidades de la carretera N-III frente al supermercado MAXI DIA y se trata de una mediana ocupada por vegetación esclerófila capaz de retener el agua y evitar que esta continúe fluyendo aguas abajo y llegue a área urbana. La segunda zona se encuentra hacia el este de la avenida de Valencia y se trata de una depresión capaz de retener el agua que circula por una vaguada y evitar que inunde la avenida de Valencia.

El caudal máximo (Qmax) asociado a cada periodo de retorno se presenta en la Tabla 7:

*Tabla 7 Caudal máximo para cada periodo de retorno. Fuente: elaboración propia a partir de la simulación.*

Escenario	Periodo de retorno (T) [años]	Caudal de identificación de la avenida (Qmax) [m3/s]
0	10	39,6
1	25	47,7
2	50	53,7
3	100	60,4
4	500	77,4

Además, se identifican varias zonas afectadas en mayor o menor medida por la inundación (plaza de la Constitución, la calle Real y su entorno; la avenida de Valencia y varias edificaciones en su entorno; y la N-III y el supermercado MAXI DIA). Todas estas zonas tienen en común que se encuentran en zonas de acumulación de flujo, por donde antiguamente discurrían arroyos. A continuación se describen con mayor detalle:

*En la plaza de la Constitución, calle Real y su entorno:*

- La plaza de la Constitución solamente resulta afectada por la inundación en la totalidad de su superficie en el escenario 4 (T=500 años). Para el resto de escenarios, la esquina noroeste de la plaza resulta intacta, pues se trata de un punto elevado en esa zona.
- El ayuntamiento resulta afectado por la inundación para todos los periodos de retorno, siendo la esquina oeste la más afectada, por el hecho de encontrarse en un estrechamiento. A excepción del escenario 0 (T=10 años), el agua llega al interior del edificio.
- La intersección de la plaza de la Constitución con la calle Juan de la Cierva es la zona de la plaza que presenta mayores calados máximos
- La parroquia de San Juan Bautista solamente resulta afectada por la inundación (tanto en su perímetro exterior y en el interior) en el escenario 4 (T=500 años).
- En la calle Real se encuentran calados máximos superiores a 1 m para todos los escenarios excepto el escenario 0 (T=10 años). El calado máximo es de 1,1 m, para el escenario 4 (T=500 años).

*En la carretera N-III y supermercado MAXI DIA:*

- El supermercado MAXI DIA resulta afectado por la inundación, acumulándose agua en la parte trasera de la nave, llegando agua al interior y el parking, para todos los escenarios.
- En la carretera N-III, el calado máximo es de 40 cm para el escenario 4 (T=500 años).
- El edificio de viviendas cercano al supermercado resulta afectado por la inundación para todos los escenarios.
- La mediana ocupada por vegetación acumula el agua, alcanzando un calado máximo de 2,2 m para el escenario 4 (T=500 años).

*En la avenida de Valencia:*

- La avenida de Valencia presenta calados máximos de 30-50 cm para los escenarios 2 (T=50 años) a 4 (T=500 años).
- Los edificios de viviendas situados al oeste de la avenida de Valencia resultan afectados por la inundación en su interior solamente para los escenarios 2 (T=50 años) a 4 (T=500 años), pese a ubicarse en una zona de acumulación del flujo de agua.
- La empresa de autobuses y bodega situadas en la avenida de Valencia resultan afectadas por la inundación solamente en el exterior y para los escenarios 2 (T=50 años) a 4 (T=500 años).

*Otras afecciones:*

- Varios campos de cultivo situados aguas arriba del casco urbano (el uso agrícola ocupa un 55% de la superficie total de la cuenca).
- Varios tramos de varias vías pecuarias que atraviesan la cuenca de estudio.

El resumen de los valores de calado para las diferentes zonas de afección se encuentra en la Tabla 8. Las descripciones detalladas para cada escenario se encuentran en el Anejo 5 (Tablas A5.7 a A5.21).

Tabla 8 Resumen de los calados en las diferentes áreas de afección. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de la simulación.

Afección		Calado [timeframe]				
		Escenario 0 [8] T= 10 años	Escenario 1 [7] T= 25 años	Escenario 2 [7] T=50 años	Escenario 3 [6] T=100 años	Escenario 4 [6] T=500 años
Plaza de la Constitución, Calle Real y su entorno	Plaza de la Constitución	15-30 cm.	25-40 cm	40-50 cm.	50-65 cm	90 cm. Superior a 1 m en la mayoría de la superficie.
	Ayuntamiento	10-25 cm. Máximo 1 m en esquina oeste (no afección al interior)	30-40 cm. Máximo 1 m en esquina oeste. (afección al interior)	30-45 cm Máximo 1 m en esquina oeste. (afección al interior)	30-60 cm Máximo 1,5 m en esquina oeste.	85 cm- 1m. Máximo: 2,1 en esquina oeste.
	Parroquia de San Juan Bautista	-	-	-	-	Máximo: 1,3 m (perímetro) y 20-30 cm (interior)
	Intersección de la plaza de la Constitución con la Calle Juan de la Cierva	Máximo: 1,3 m. (Posible) afección al interior de los edificios	Máximo: 1,3 m Afección al interior de los edificios	Máximo: 1,7 m Afección al interior de los edificios	Máximo: 2 m Afección al interior de los edificios	Máximo 2,6 m. Afección al interior de los edificios
	Calle Real	20-40 cm	40-70 cm (máximo 1 m puntualmente)	70-80 cm (máximo 1 m puntualmente)	70-90 cm (máximo 1 m en varias zonas)	90 cm- 1m (máximo 1,1 m en varias zonas)
Carretera N-III y supermercado MAXI DIA	Supermercado MAXI DIA	Máximo: 1,6 (nave), 40 cm (interior de la nave) y 18 cm (parking)	Máximo: 1,7 (nave), 50 cm (interior de la nave) y 20 cm (parking) [6]	Máximo: 1,8 m (nave), 60 cm (interior de la nave) y 35 cm (parking) [6]	Máximo: 1,9 (nave), 77 cm (interior de la nave) y 40 cm (parking)	Máximo: 2,1 m (nave), 78 cm (interior de la nave) y 70 cm (parking).
	Carretera N-III	20-30 cm	20-30 cm	30-40 cm [6]	40 cm	40 cm.
	Edificio de viviendas cercano al supermercado	Máximo 1 m.	Máximo: 1 m [6]	Máximo: 1,3 m [6]	Máximo: 1,4 m.	Máximos: 2,1 m
	Mediana	Máximo: 1,6 m	Máximo: 1,8 m [6]	Máximo: 1,8 m [6]	Máximo: 1,9 m	Máximo: 2,2 m.
Avenida de Valencia	Avenida de Valencia	10-20 cm	20-30 cm [6]	30-50 cm [6]	30-50 cm	30-50 cm.
	Edificios de viviendas al oeste de la avenida de Valencia	-	-	Máximo: 5 cm (interior) [6]	Máximo: 5-10 cm (interior)	Máximo: 10-25 cm (interior)
	Empresa de autobuses y bodega	-	-	Máximo: 1,3 m (no afecta al interior) [6]	Máximo 1,4 (no afecta al interior)	Máximo: 1,7 m (no afecta al interior)

### 6.1.1. Análisis de sensibilidad del modelo

Tras la obtención de los resultados, se realiza un breve análisis de sensibilidad. Este análisis se lleva a cabo en el escenario 0, puesto que el evento de precipitación ocurrido el 26 de agosto se asimila a una tormenta de periodo de retorno de 10 años, y basándose en la información aportada por el acta del Pleno realizada el 2 de octubre de 2019 y fotografías disponibles en internet.

En el acta se refleja la importancia del eje central formado por la calle Real, y calle Juan de la Cierva, que conducen las aguas de lluvia y de escorrentía, afectando a varias zonas del municipio. En la simulación se comprueba que las aguas de escorrentía se dirigen por la calle Real hasta la plaza de la Constitución y que en la calle Juan de la Cierva se encuentran los calados máximos más elevados (Tabla A5.7).

También, en el acta se expone la afección al supermercado MAXI DIA y al edificio de viviendas (concretamente al garaje subterráneo) situado en las cercanías. Estas afecciones están a la cantidad de agua acumulada en la rotonda, debida principalmente a que se encuentra en una zona en la que el peralte de la N-III obliga a las aguas a dirigirse hacia el supermercado y garaje. En la simulación se comprueba que, la afección al edificio de viviendas y al parking del supermercado puede ser debida a la acumulación de agua en la rotonda. Sin embargo, en la simulación se observa una acumulación de agua en la parte trasera de la nave del supermercado (Tabla A5.8), la cual no aparece reseñada en el acta.

Además, en el acta se deja de manifiesto que las aguas cruzan la avenida de Valencia por arriba (en vez de por los pasos subterráneos) y se van directas a la calle Real. En la simulación se corrobora este hecho, pues se observa cómo una de las vaguadas que atraviesa la avenida, inunda la avenida y atraviesa una zona en la que se ubican varios edificios de viviendas, hasta llegar a la calle Real (ver Tabla A5.9).

Por último, en el acta se destaca la afección a los cultivos de olivar y viñedos, corroborada en la simulación.

De las fotografías revisadas en internet, se corrobora también la afección a varias de las zonas mencionadas anteriormente.

## 6.2. ANÁLISIS DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

Los resultados extraídos del análisis del riesgo para los escenarios de inundación más favorable (escenario 0, T=10 años) y más desfavorable (escenario 4, T=500 años) son los siguientes. Los resultados de los escenarios intermedios se encuentran entre estos dos extremos.

*Respecto a la PPA:*

- Para el escenario más favorable, la PPA durante el día y la noche se estima en 454 y 105 personas, lo que se corresponde con un 4,7% y un 1,1% de la población total de la cuenca, respectivamente.
- Para el escenario más desfavorable, la PPA durante el día y la noche se estima en 772 y 178 personas, lo que se corresponde con un 8,0% y un 1,9% de la población total de la cuenca, respectivamente.
- El riesgo social en la situación actual es de 31 habitantes potencialmente afectados/año.
- Para periodos de retorno inferiores a 10 años, no se espera riesgo social alguno.

*Respecto a los daños:*

- Para el escenario más favorable, el área total afectada es de 135.731 m<sup>2</sup>, lo que se corresponde con un 3,3% del área total de la cuenca. El coste total estimado de esta afección asciende a 1.755.418 €
- Para el escenario más desfavorable, el área total afectada es de 310.179 m<sup>2</sup>, lo que se corresponde con un 7,4% del área total de la cuenca. El coste total estimado de esta afección asciende a 7.524.269 €
- Tanto para el escenario más favorable como para el más desfavorable, el uso del suelo que presenta unos mayores costes directos es el uso urbano disperso; y en ningún caso resulta afectado el uso industrial disperso.
- El riesgo económico es de 338.016 €/año.
- Para periodos de retorno inferiores a 10 años, no se espera riesgo económico alguno.

La Figura 9 muestra la curva F-PPA (consecuencias expresadas en población potencialmente afectada) y F-D (consecuencias expresadas en pérdidas económicas), respectivamente, resultantes del cálculo del riesgo de inundación, para un rango de avenidas con periodos de retorno entre 10 y 500 años.

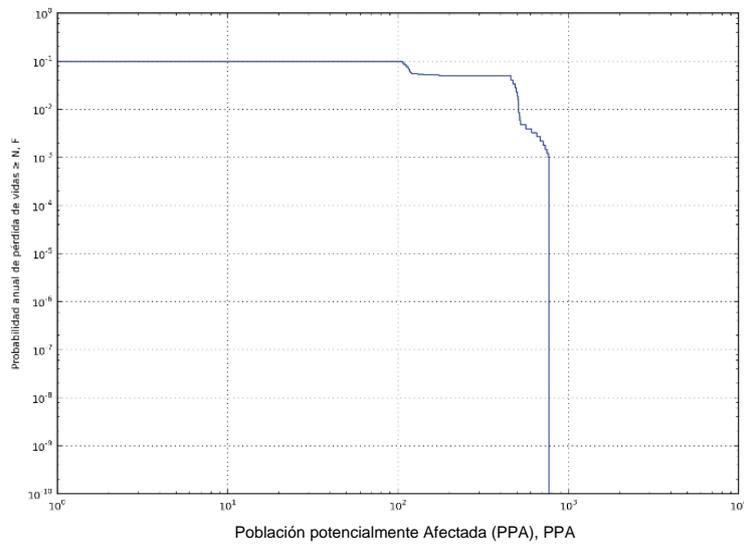


Figura 9. Riesgo social. Fuente: iPresas Flood. Representación de las 84 trayectorias (ramas) del árbol de eventos tras un post-proceso realizado por el software.

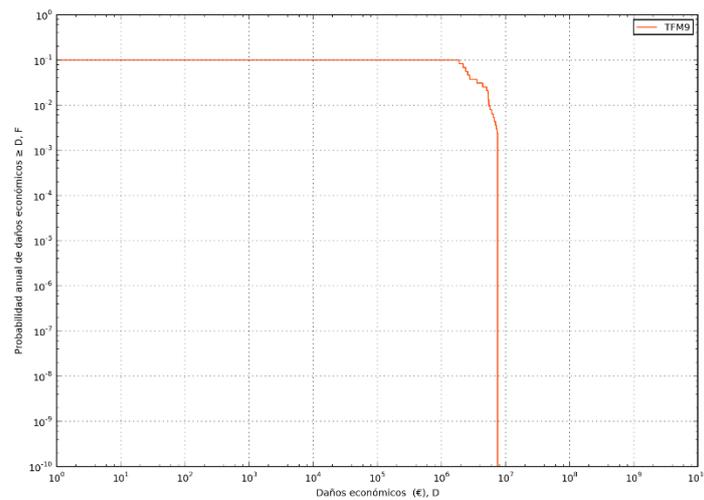


Figura 10. Riesgo económico. Fuente: iPresas Flood. Representación de las 84 trayectorias (ramas) del árbol de eventos tras un post-proceso realizado por el software

En un contexto de cambio climático y de cambio socioeconómico (que implica un mayor número de población y de viviendas), de cara a futuro se espera un aumento del número de PPA (eje abscisas) y un aumento de la probabilidad anual de PPA (eje ordenadas); produciéndose un traslado de la curva hacia la derecha y hacia arriba.

## 7. DISCUSIÓN Y PROPUESTA DE ACTUACIONES

En vista de los resultados obtenidos tras la simulación hidrológica e hidráulica, se proponen una serie de medidas de reducción del riesgo de inundación tanto estructurales como no estructurales. Estas medidas estarán no solamente enfocadas en las principales áreas afectadas por la inundación, sino también en otras zonas de la cuenca.

En primer lugar, se destaca la imperiosa necesidad de proteger los edificios de viviendas situados en el estrechamiento causado por la intersección de la plaza de la Constitución y la calle Juan de la Cierva. Así mismo, es necesaria la protección de la esquina oeste del edificio del ayuntamiento, así como todos los comercios situados en la plaza de la Constitución que puedan resultar afectados por un evento de lluvia intensa. Por lo tanto, se propone la instalación barreras de autoprotección (medida no estructural) en las puertas de los edificios mencionados.

En segundo lugar, se considera urgente la necesidad de evacuar correctamente las aguas que discurren por la avenida de Valencia, desde el cruce de las glorietas donde interceptan la avenida de Valencia y la calle Real así como la carretera de Valdilecha y la carretera N-III, pues se observa que la inundación afecta al perímetro, parking e interior del supermercado MAXI DIA próximo a la glorieta de la carretera de la N-III, al tramo de carretera entre ambas glorietas y al perímetro de la empresa de autobuses y la bodega situadas en sus márgenes. Por lo tanto, se propone llevar a cabo un mantenimiento y disponer de un proceso de limpieza (medida no estructural) de todas las obras de drenaje trasversal en este área cuya periodicidad esté íntimamente relacionada con los periodos de lluvias intensas.

En tercer lugar, es importante la actuación en la parte alta y media de la cuenca para la reducción del riesgo de inundación en el núcleo urbano. Por ello, se propone la instalación de estanques de retención de agua con el fin de aumentar la capacidad de retención de agua, la creación de depósitos de infiltración con el fin de reducir el caudal, la velocidad del agua y los arrastres antes de la llegada al casco urbano; y la restauración hidrológico-forestal. Esta última actuación se puede ver limitada debido a la ocupación del 55% de la superficie de la cuenca por uso agrícola, quedando restringida principalmente a las zonas ocupadas por vegetación esclerófila.

En cuarto lugar, y ante la inexistencia de normativas específicas, se propone la elaboración de un Plan de Actuación Municipal frente al riesgo de inundación, así como la elaboración de un Plan de Emergencia frente a inundaciones en el municipio de Arganda del Rey (ambas, medidas no estructurales) que incluyan la mejora de la conciencia pública en la preparación para las inundaciones, para incrementar la percepción del riesgo de inundación y de la necesidad de las estrategias de autoprotección en la población.

Finalmente, no hay que olvidar que el proceso urbanizador del núcleo urbano de Arganda del Rey ha supuesto un impacto sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca provocando una disminución del tiempo de concentración de la cuenca y un aumento del caudal circulante. Esto conlleva, por un lado, un menor tiempo de actuación en caso de emergencia por inundación y, por otro lado, una reducción de la capacidad hidráulica del sistema de alcantarillado o las obras de defensa diseñadas históricamente.

De hecho, actualmente el diseño del sistema de alcantarillado no se adecúa al tamaño de la población y el mantenimiento del mismo es deficiente. Por ello, se propone llevar a cabo un mantenimiento y disponer de un proceso de limpieza (medida no estructural) de todos los imbornales. De manera adicional, se propone la instalación de sistemas de drenaje urbano sostenible (medida estructural) para reducir la impermeabilización del suelo y aumentar la capacidad de retención de agua.

De cara pasado, hay que tener en cuenta que el conocimiento que se tiene hoy en día sobre el análisis y gestión de los riesgos de inundación no estaba presente, no habiendo sido posible evitar la afección a construcciones situadas en la plaza de la Constitución como la Parroquia de San Juan Bautista (fecha de construcción 1900, según Catastro), el ayuntamiento (1975) o los edificios de viviendas situados al oeste de la avenida de Valencia (1952). Sin embargo, la afección a construcciones más recientes como el supermercado MAXI DIA (2003) y el edificio de viviendas cercano a este (2007) podrían haberse evitado si se hubieran realizado estudios de inundación en la zona.

Por lo tanto, y respecto a la planificación urbanística futura, se apela a la reflexión basada en estudios de inundación (medida no estructural) a la hora de decidir la ubicación de inmuebles sobre zonas de acumulación del flujo o sobre zonas que puedan resultar impactadas por una inundación, con el fin de evitar daños.

## 8. CONCLUSIONES

Tras la discusión de los resultados obtenidos de la simulación hidrológica e hidráulica así como los resultados obtenidos del análisis del riesgo de inundación, se extraen una serie de conclusiones que dan cumplimiento a todos los objetivos que se persiguen en el presente TFM y que aparecen reseñados en el Apartado 4:

- Se entiende el funcionamiento del sistema hidrológico e hidráulico de la cuenca de estudio, identificando el clima, la vegetación y uso del suelo, las características físicas del suelo (velocidad de infiltración y porosidad), el sistema de alcantarillado y el relieve como factores limitantes para la posterior modelización hidrológica e hidráulica.
- Se crea una tormenta de diseño a partir de la información pública disponible, la metodología empleada en España con este fin, la adecuación de la forma de la tormenta en cuanto a la generación de caudales y la duración de la misma basada en criterios relacionados con el tiempo de concentración de la cuenca.
- Se identifican las deficiencias existentes en la legislación española en todos sus niveles (estatal, provincial y municipal) en lo que se refiere al análisis de los riesgos de inundación de origen pluvial. Concretamente en el municipio de Arganda del Rey, actualmente no existe ni un Plan de Actuación Municipal frente al riesgo de inundación ni un Plan de Emergencia contra las inundaciones, donde se prevea la forma de actuar en caso de fuertes lluvias o lluvias torrenciales.
- Se logra entender que los análisis de inundaciones no pretenden realizar una representación fiel de la realidad, sino conducir a unos resultados de los que se puedan extraer unas conclusiones debidamente justificadas y que puedan ayudar al gestor a la hora de la toma de decisiones en lo que respecta la gestión de los riesgos de inundación, mediante la definición de unos criterios de diseño del modelo hidrológico e hidráulico claros.
- Se muestra como aspecto clave en la gestión del riesgo de inundación la importancia de la delimitación de las zonas inundables para varios periodos de retorno. Esta delimitación de zonas inundables se consigue tras la simulación de 5 escenarios compuestos por 5 precipitaciones para distintos periodos de retorno.
- Se muestra como aspecto clave en la gestión del riesgo de inundación la importancia de realizar un análisis del riesgo de inundación considerando tanto el riesgo social (expresado en población potencialmente afectada) como el riesgo económico (daños en unidades monetarias).
- De manera teórica, se proponen una serie de medidas , tanto estructurales como no estructurales, encaminadas a reducir el riesgo de inundación que se localizan tanto en las áreas de la cuenca de estudio que resultan más afectadas y como en las áreas situadas en la parte alta y media de la cuneca.

## 9. SIGUIENTES PASOS

En este apartado se proponen los siguientes pasos a tomar en este estudio, que por encontrarse fuera del alcance del presente TFM no se han desarrollado en el texto. Todos los pasos propuestos están orientados o bien a adquirir un mayor conocimiento del efecto de las medidas de reducción del riesgo de inundación en el área de estudio o bien a ayudar al gestor en la toma de decisiones a la hora de la jerarquización de las medidas de reducción del riesgo de inundación.

Por un lado, se propone simular mediante el software Tygron las medidas de reducción del riesgo de inundación (tanto estructurales como no estructurales) en el área de estudio con el objeto de adquirir un mayor conocimiento del efecto de las mismas. Una vez introducidas las medidas en el programa, se pueden comparar los resultados (la superficie inundada, los calados y las velocidades) obtenidos (situación futura) con los resultados obtenidos previos a la implantación de medidas (situación actual).

Por otro lado, se propone comparar mediante el software iPresas el riesgo de inundación en la situación actual con el riesgo en la situación futura y analizar la reducción del riesgo que se produce por cada medida. Además, en lo que se refiere a la toma de decisiones, se propone la valoración de las actuaciones de reducción del riesgo propuestas mediante un análisis coste-beneficio, a partir de indicadores socioeconómicos.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABC. (16 de septiembre de 2019). *Por qué Arganda del Rey es el municipio madrileño al que más le afecta la gota fría*. Obtenido de ABC Madrid: [https://www.abc.es/espana/madrid/abci-arganda-municipio-madrileno-mas-afecta-gota-fria-201909161058\\_noticia.html](https://www.abc.es/espana/madrid/abci-arganda-municipio-madrileno-mas-afecta-gota-fria-201909161058_noticia.html)
- Arranz Lozano, M. (2008). El riesgo de inundaciones y la vulnerabilidad en áreas urbanas. Análisis de casos en España. *Estudios Geográficos*. Vol. 69, Nº 265, 385-416.
- Ayuntamiento de Arganda del Rey. (2019). *Gobierno Abierto*. Obtenido de Datos Abiertos: <http://gestionaria.madrid.org/desvan/Inicio.icm?enlace=desvan>
- Ayuntamiento de Arganda del Rey. (23 de julio de 2020). *El Pleno Municipal aprueba un convenio con el Canal de Isabel II para realizar diversas infraestructuras que defiendan Arganda contra las inundaciones*. Obtenido de Ayuntamiento de Arganda del Rey: <https://www.ayto-arganda.es/noticias/el-pleno-municipal-aprueba-un-convenio-con-el-canal-de-isabel-ii-para-realizar-diversas-infraestructuras-que-defiendan-arganda-contra-las-inundaciones/>
- Ayuntamiento de Arganda del Rey. (7 de marzo de 2020). *Fiestas y celebraciones 2019*. Obtenido de Ayuntamiento de Arganda: <https://www.ayto-arganda.es/servicios-cpt/noticias-cultura/fiestas/>
- BOCM. (25 de 1 de 2012). *CONVENIO para la prestación del servicio de alcantarillado en el municipio de Arganda del Rey entre la Comunidad de Madrid, Canal de Isabel II y el Ayuntamiento de Arganda del Rey*. Madrid: BOCM Núm. 61.
- Canal de Isabel II. (2020). *Normas para redes de Saneamiento. Versión 3*. Madrid: Canal de Isabel II.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santa Fé de Bogotá: McGraw-Hill.
- Comunidad Autónoma de Madrid. (2019). *Mapas de Protección Civil*. Obtenido de <https://idem.madrid.org/visor/?v=pcivil&ZONE=430000,4485000,9>
- Confederación Hidrográfica del Tajo. (2015). Anejo 1. Caracterización de las ARPSIs. En C. H. Tajo, *Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo* (págs. 23-34). Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Confederación Hidrográfica del Tajo. (2019). *Descarga de ficheros en formato GeoPDF - 2º Ciclo*. Obtenido de Confederación Hidrográfica del Tajo: [http://www.chtajo.es/LaCuenca/Planes/Riesgo\\_inundacion/Paginas/DescargaGeopdf\\_Ciclo\\_2.aspx](http://www.chtajo.es/LaCuenca/Planes/Riesgo_inundacion/Paginas/DescargaGeopdf_Ciclo_2.aspx)
- CRUE. (2011). *SUFRI Methodology for pluvial and river flooding risk assessment in urban areas to inform decision making*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia, Graz University of Technology and Università di Ingegneria e Idraulica e Ambientale.
- Dauphiné, A. (2003). *Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Paris: Armand Colin.
- Escuder-Bueno, I. (2013). Capítulo 2. Medidas de reducción del riesgo de inundación. En I. Escuder-Bueno, *Metodología completa y cuantitativa de análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas* (págs. 21-43). Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Escuder-Bueno, I. (2013). *Metodología Completa y Cuantitativa de análisis de riesgo de inundación en zonas urbanas*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- European Parliament. (2007). Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks. *Official Journal of the European Union*.
- Ferrer Polo, F. (1993). *Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas*. Madrid: CEDEX. Ministerio de Obras Públicas.
- Jiménez Álvarez, A., Marcuello Olona, C., García Montañés, C., Incio Caballero, L., & Cuesta Algora, S. (2011). Capítulo 3. Estudios hidrológicos. En M. R. Ministerio de Medio Ambiente, *Guía*

*Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables* (pág. 85). Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.

MAGRAMA. (2013). *Propuesta de mínimos para la metodología de realización de mapas de riesgo de inundación*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Ministerio de Fomento. (1999). *Máximas lluvias diarias en la España peninsular*. Madrid: Secretaría del Estado de Infraestructuras y Transportes. Dirección General de Carreteras.

Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Medio Marino. (2011). *Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Medio Marino.

Ministerio para la Transición Ecológica. (2019). *Gestión de los Riesgos de Inundación*. Obtenido de Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/>

Néelz, S., & Pender, G. (2013). *Benchmarking the latest generation of 2D hydraulic modelling packages*. Bristol: Environment Agency. Department of Environment, Food & Rural Affairs.

Ojea, A. (26 de 8 de 2020). *Un año después de las inundaciones, Arganda del Rey construye una nueva red de control de aguas pluviales*. Obtenido de Cadena SER: [https://cadenaser.com/emisora/2020/08/26/radio\\_madrid/1598450895\\_353558.html](https://cadenaser.com/emisora/2020/08/26/radio_madrid/1598450895_353558.html)

Olcina Cantos, J. (2006). *¿Riesgos Naturales? I: Sequías e inundaciones*. Barcelona: Davinci.

Parlamento Europeo. (2007). *Directiva 2007/60/CE para la evaluación y gestión de riesgos de inundación*. Diario Oficial de la Unión Europea.

Tygron. (2020). Obtenido de Tygron Platform: <https://www.tygron.com/en/>