ESTUDIO DE LA INUNDABILIDAD EN LA CUENCA DEL RIO BADIEL, ZONAS URBANAS INUNDABLES CON HEC-RAS Y ANALISIS DE LA INFILTRACIÓN DE LAS INUNDACIONES.

STUDY OF FLOODING IN THE BADIEL RIVER WATHERSHEED´S, FLOODPLAIN MAPPING OF URBAN AREAS USING HEC-RAS AND INFILTATION ANALISYS OF FLOODS.

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:
Marcos Martínez Ocaña

Dirigido por:
Dr./Dra. D./Dª NOMBRE Y APELLIDOS

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, que, con su fuerza, me ayuda a superarme y enfrentarme a las situaciones más difíciles con animó. A mi padre, que con su amor propio es capaz de transmitir las ganas de seguir adelante siempre. A mi hermano, que con su dedicación es capaz de aconsejarme para conseguir cosa que se proponga.
Al resto de mi familia y amigos, que me han querido desde niño para convertirme en la persona que soy hoy. Y a mi tutor del máster Francisco Carreño Conde por enseñarme el valor de ser escéptico para explicar el mundo.

A mis compañeros, porque prometo continuar profundizando en los conocimientos expuestos en este estudio con el fin de mejorar las condiciones humanas frente a las catástrofes naturales.

“Y si el Sueño finge muros
en la llanura del Tiempo,
el Tiempo le hace creer
que nace en aquel momento”.

Así pasen cinco años,
Federico García Lorca.

ÍNDICE

Resumen…… 9

1. Introducción……11

2. Objetivos……13

3. Metodología……14

3.1. Registro de episodios en la zona de estudio……14

3.2. Descripción de la cuenca del rio Badiel……15

3.3. Procedimientos para la determinación de zonas inundables….17

3.3.1. Datos pluviométricos y foronómicos……18

2.3.2. Modelo hidrometeorológico……20

2.3.3. Modelo hidráulico……25

2.3.4. Modelo de infiltración……27

4. Resultados y Discusión……28

4.1. Datos y estadísticos……29

4.2. Calibración y validación del modelo hidrometeorológico……...31

4.3. Calibración y modelado hidráulico……35

4.4. Calculo de la infiltración……37

5. Conclusiones…… 39

6. Bibliografía……40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coeficientes de Manning…….26

Tabla 2: Distribución de Gumbel para los datos pluviométricos y foronómicos……...30

Tabla 3: Validación de los caudales punta…….35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fotografía de los sedimentos arrastrados por las inundaciones…….14

Figura 2. Fotografías de los daños ocasionados por la inundación……...…...…15

Figura 3: Ortofoto de la zona de estudio……..……16

Figura 4: Cuenda drenante del rio Badiel……17

Figura 5: Metodología……..18

Figura 6: Curva de caudales clasificados……19

Figura 7: Hietograma en pico……...……..23

Figura 8: Hidrograma Unitario base……..24

Figura 9: Detalle de la malla 2D……26

Figura 10: Gráfico de peligrosidad de inundación……..…29

Figura 11: Curva IDF……...……31

Figura 12: Hietogramas en pico, entradas del modelo hidrometeorológico……...32

Figura 13: Mapa del número de curva……..33

Figura 14: Mapa de área inundables……..……...35

Figura 15: Gráfico la infiltración para 12 horas……38

TABLA DE ABREVIATURAS

HEC-RAS: Hydrologycal Engieneering Center – River Analysis System.

HEC-HMS: Hydrologycal Engieneering Center – Hydrologic Modeling System.

EPRI**:** Evalución Preliminar del Riesgo de Inundación.

ARPSI**:** Área de Riesgo Potencial Significativo de Inundación.

MDT: Modelo Digital del Terreno.

GIS: Geographic Information System.

AEMET: Agencia Estatal de Meteorología.

CEDEX: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

AMC: Antecedent Moisture Condition.

SCS: Soil Conservation Services.

CLC: CORINE Land Cover.

IDF: Intensidad Duración Frecuencia.

USDA: United States Department of Agriculture.

RESUMEN

El presente estudio trata de evaluar el riesgo de inundación en la cuenca del rio Badiel a su paso por la urbanización Arcipreste de Hita (Guadalajara). El objetivo de este documento es el establecimiento de, cómo con diferentes periodos de retorno de precipitación se puede provocar aumentos cuantitativos en el flujo del caudal, lo que puede causar riesgo de inundaciones. Se ha desarrollado un modelo hidrometereológico que permite el cálculo del caudal pico comparando los resultados con el caudal máximo instantáneo registrado en la estación de aforos.

Para ello se ha utilizado el software HEC-HMS con el método SCS, que necesita ser calibrado para la cuenca del rio Badiel, debido a la incorporación de variables empíricas como son el número de curva, el tiempo de retorno y las abstracciones iniciales que pueden modificar el comportamiento de los hidrogramas unitarios construidos por el modelo. Los resultados de la calibración fueron una sustitución del valor origina de CN a 67 para ajustar el modelo. También es necesario ajustar la duración de la lluvia de los hietogramas de entrada.

Con los datos de salida validados de caudales se procedió a la simulación de un modelo hidráulico bidimensional, con HEC-RAS, en el tramo que atraviesa la Urbanización Arcipreste de Hita. Se mapearon y se cuantificaron las áreas inundables para el periodo de retorno de 50 años.

Por último, se estimó la infiltración con las ecuaciones de Horton a partir de las abstracciones para el área afectada por la inundación, siendo ésta de 6813 m^2. La infiltración se calculó en 119.5 m^3 en un tiempo de 12 horas.

Abstract

The following study evaluates the flooding risk of Badiel's river basin on its way through the residential area Arcipreste de Hita (Guadalajara). The aim of this document is to stablish how different precipitation return rates highly increase flow rate, which could cause an increase in the risk of flooding. A hydrometeorology model has been developed that allows to calculate the peak flow, comparing the results with the maximum instantaneous flows registered at the gauging station.

The study has been done using HEC-HMS software using the SCS, that need to be calibrated for the watershed of Badiel's river, because the implementation of empirical variables as the curve number, the lag time the initial abstraction that could modify the behaviour of the unit hydrographs constructed by the model. Result of the calibrations were the substitution of the original value of CN at 67 for adjusting the model. It's also needed to adjust the duration of the rain to the input hyetographs.

A hydraulic model of the section crossing Arcipreste de Hita was simulated on HEC-RAS using the validated output data of the hydrometeorological model. Likely flooded areas were mapped and quantified for a return time of 50 years.

Lastly, infiltration was estimated with Horton's equations based on the abstractions of the area affected by the flood, this being one of 6813 m^2. Infiltrations was calculated for 119.5 m^3 in a time of 12 hours.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones se han desencadenado en mayor o en menor medida a lo largo y ancho de España, suponen cuantiosas pérdidas socioeconómicas, ambientales y humanas. El planteamiento urbanístico y territorial ha de considerar el aumento del riesgo de inundación según establece la normativa de aguas en cuanto a servidumbres de protección, abastecimiento de poblaciones y mantenimiento de calidad ambiental (Olcina, 2004).

La ordenación de las zonas inundables está sujeta a la aplicación de la legislación de aguas y la normativa de la administración estatal y autonómica sobre protección de zonas inundables. Para ello, la mejor medida preventiva es la normativa jurídica urbanística que establece qué terrenos deben sustraerse de cualquier desarrollo urbanístico con el fin de proteger a las personas y bienes del riesgo de inundación (Confederación Hidrográfica del Tajo, 2018).

Según El Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones (2011), existen diferentes tipos de eventos de inundaciones. El territorio ocupado por la cuenca del río Badiel es seguro frente a los riesgos naturales. No es una zona sísmica, ni volcánica y el subsuelo no es proclive a los deslizamientos de terreno. El régimen fluvial no es extremo, ni en magnitud ni en frecuencia, por lo que el riesgo de inundaciones tampoco presenta ningún riesgo grave, de todos modos, lo correcto es la integración de estas técnicas, ya que sí existe vulnerabilidad, que es necesario considerar para facilitar así su prevención y evitar sus consecuencias.

La legislación aplicable viene ordenada por la Ley de Aguas (RD 1/2001) donde se recogen las zonas inundables, en su artículo 11.1, también establece en los artículos 43.2 y 3 las zonas que podrían declararse de especial protección; la Directiva europea 2007/60CE que aborda la gestión de los riesgos de inundación. Las autoridades españolas estatales aseguran la aplicación de la Directiva de inundaciones mediante el RD 903/2010.

Tal como recoge el artículo 4 de la Ley de Aguas, el cauce natural o albero de una corriente continua o discontinua es el terreno cubierto por las aguas en las máximas crecidas ordinarias. Es una zona de Dominio Público Hidráulico, artículo 2.b de la Ley de Aguas.

El Reglamento del Dominio Hidráulico en su artículo 14.3 define las zonas inundables como las delimitadas por los niveles teóricos cuyo periodo estadístico de retorno sea de 500 años, a menos que el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, a propuesta del Organismo de cuenca, fije, en expediente concreto, la delimitación que en cada caso resulte más adecuada al comportamiento de la corriente.

Los Planes Hidrológicos han de recoger la clasificación de las zonas que han de declararse de especial protección y las condiciones para su protección que deben ser respetadas en los diferentes instrumentos de ordenación urbanística del territorio.

La Demarcación Hidrográfica del Tajo redactó en el 2011 la primera versión de Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) de acuerdo con el RD 903/2010. Tras las alegaciones recibidas, resultaron las áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI). Durante el segundo ciclo del Plan Hidrológico Nacional, se tienen en cuenta las recomendaciones de la Comisión Europea para la reevaluación de estas zonas.

La legislación autonómica que le es de aplicación a la cuenca del río Badiel es la Ley 2/2022, de la Comunidad Autónoma de Castilla la Mancha. Recoge ser oída en los procedimientos en materia de agua, sus competencias, establecimiento de órganos de gestión y en su artículo 105 hace referencia a los planes para situaciones de sequía e inundación.

Según el RD 1903/2010 las inundaciones pluviales son aquellas derivadas de altas intensidades de precipitación y que pueden provocar daños “in situ”, que pueden evolucionar y derivar a su vez, en inundaciones significativas cuando la escorrentía se concentra en corrientes de pequeña magnitud y producir desbordamientos.

El riesgo de inundación de estos episodios se corresponde con pérdidas materiales, económicas, ambientales, que pueden ser previstos con el análisis y diseño de medidas de mitigación del riesgo (Cañizares et al, 2021). Los factores de riesgo son: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, el resultado de su conjunto simultáneo es precisamente el riesgo (Jiménez et al, 2008).

La justificación de este documento es establecer el área afectada para las diferentes frecuencias de precipitación de eventos extremos. Los cambios de magnitud del caudal pueden producir un aumento del riesgo con el incremento de altura y velocidad del calado. Se ha acotado la zona de estudio por su susceptibilidad, no por la grave peligrosidad. Se busca analizar estrategias para implementar técnicas que permitan la transferencia de agua a masas subterráneas a la vez que prevengan el riesgo de daños.

2. OBJETIVOS

- El objetivo principal del presente trabajo es analizar la susceptibilidad de la inundación provocada por las crecidas del río Badiel a su paso por el entorno de la Urbanización Arcipreste de Hita en el término de Hita (Guadalajara).

- Crear un modelo hidrológico de eventos, a partir de la frecuencia de precipitación máxima anual, para pronosticar las condiciones de los episodios de lluvia que producen desbordamientos en el rio.

- Generar un modelo hidráulico para evaluar los efectos de los eventos sobre la superficie urbana delimitada.

- Estimar la infiltración como parámetro de implantación de medidas mitigadoras o la inclusión del análisis en estudios de planificación del territorio.

Para ello se ha utilizado un conjunto de modelos hidrológicos mediante los softwares HEC-HMS y HEC-RAS, basados en los parámetros involucrados en las inundaciones: meteorológicos, foronómicos, de usos del suelo y que, junto a los MDT, dota a los modelos de información geográfica.

Los análisis para evitar las inundaciones son evaluados mediante herramientas GIS, Qgis, llevando a cabo modelos, qué comprenden los perímetros de protección, la recuperación del recurso y el entorno afectado; y se establecen las bases de dichos modelos sobre estudios, actuaciones y técnicas para cuantificar los daños debidos a inundaciones, avenidas y otros fenómenos hidráulicos.

3. METODOS

3.1. REGISTRO DE EPISODIOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Los últimos registros de inundaciones en esta zona del río Badiel son del 2018, localidad de Valdearenas, y mayo/junio del 2020, concretamente en la Urbanización Arcipreste de Hita (Hita-Guadalajara). Una serie de profundas borrascas convectivas provocaron el desbordamiento del río superando las riberas y anegando los márgenes afectando a zonas urbanas y campos agrícolas.

Figura 1: Fotografía de los sedimentos arrastrados por las inundaciones. Fuente, El Diario.es 26.05.2020.

Figura 2: Fotografía de los daños ocasionados por la inundación, a la izquierda la una zona encharcada, a la derecha el nivel del río en el puente que cruza la urbanización con la barandilla tumbada. Fuente, Guadaqué 07.06.2020.

3.2. DESCRIPCION CUENCA DEL RIO BADIEL

El río Badiel es afluente del río Henares por su margen izquierda y forma una cuenca de 325.4 Km 2. Las alturas de la subcuenca oscilan entre los 1100 y los 700 m y en general, presenta pendientes suaves, es en el centro de la cuenca donde el río presenta un importante encajamiento.

El río Badiel tiene una longitud de 39.7 Km. y una pendiente de 0.75%., transcurre en NE-SW y presenta una red de drenaje de muy poca densidad, formada por una serie de arroyos y ramblas. La morfología de la cuenca es alargada, el tiempo de concentración de esta cuenca es muy bajo, en comparación con otras subcuencas del rio Tajo.

Su cuenca está constituida, casi en su totalidad, por materiales neógenos con una permeabilidad variable, con arcillas de alta impermeabilidad combinadas con tramos de arenas arcósicas y calizas más permeables. Aparecen también en cabecera pequeños afloramientos cretácicos. Los materiales detríticos aluviales cuaternarios, de permeabilidad moderada a alta, se extienden fundamentalmente por la mitad inferior de la cuenca.

La relación entre el porcentaje de materiales impermeables y permeables es de 0.1 lo que indica una permeabilidad alta. Una gran parte de su cuenca está ocupada por cultivos agrícolas, que se alternan con matorrales, encinas y cubierta arbórea mixta con pinos, herbáceas y césped (zonas habitadas). La cuenca del río Badiel pertenece al piso bioclimático Mesomediterráneo (de las Heras, 2004).

Su número de estación en la red de aforos corresponde con el 3255, se sitúa en Torre del Burgo. El caudal máximo diario más alto aforado en el río Badel a la salida de la cuenca, entre los años 1978 y 2000. es de 14.04 m^3/s. Consultando la meteorología de la zona y con datos de la AEMET vemos que las temperaturas medias durante el año oscilan entre la mínima del mes de enero 4,9 grados y la máxima en julio de 23,7 grados.

Respecto a las precipitaciones medias mensuales (mm) publicadas son: enero 35, febrero 32, marzo 25, abril 50, mayo 53, junio 25, julio 12, septiembre 28, octubre 68, noviembre 42 y diciembre 46.

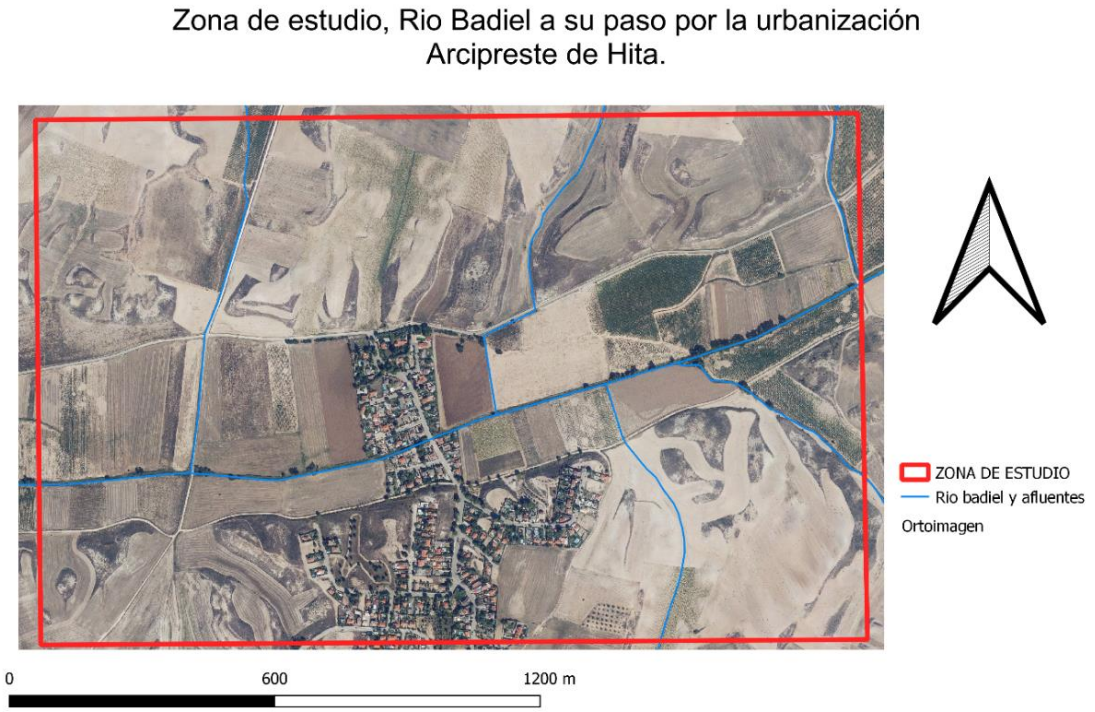

Figura 3: Ortofoto de la zona de estudio

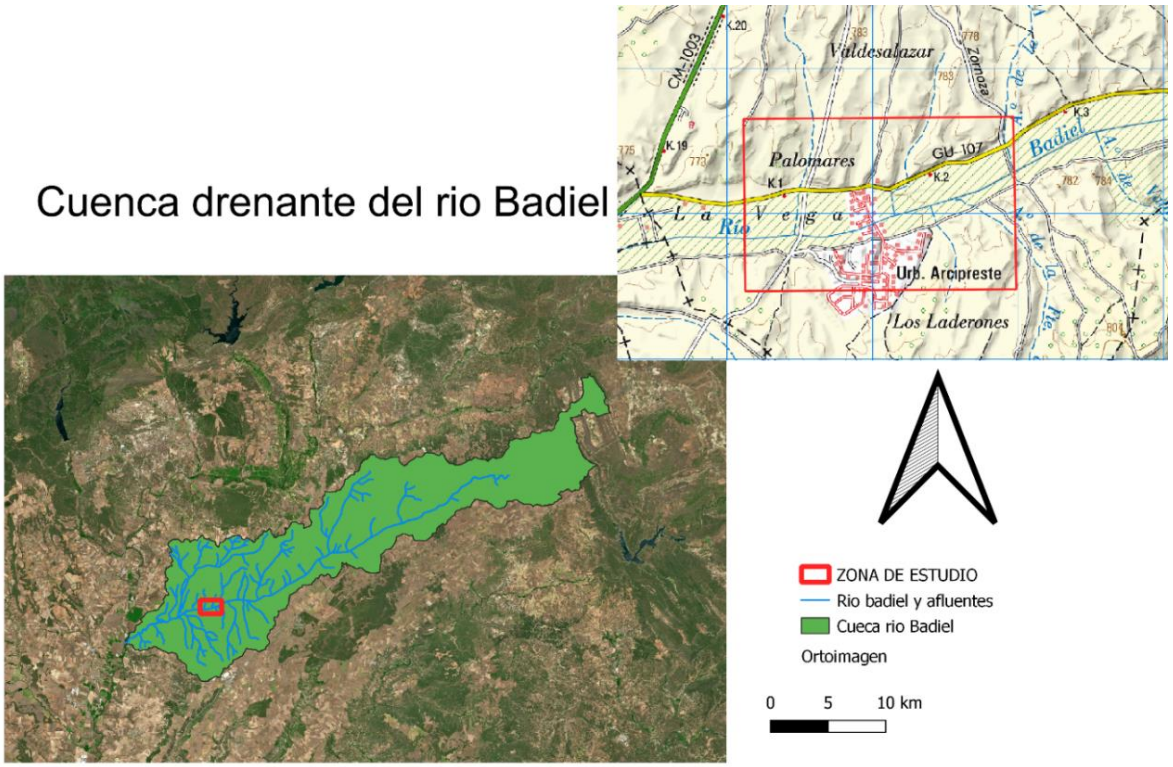

Figura 4: Cuenda hidrológica del rio Badiel.

3.3. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACION DE LAS AREAS INUNDABLES

Para la obtención del área inundable el método seguido se basa en la confección de tres modelos hidrológicos con el fin de comparar la afección en diferentes tiempos de retorno 500, 200, 100, 50, 25, 10, 5 y 2. Este tipo de modelos considera las ecuaciones de conservación de la masa, energía y movimiento para describir la movilización del agua a través de los diferentes almacenes de la hidrosfera, usando técnicas de discretización numérica. Los modelos aquí propuestos son compatibles con sistemas de información geográfica (SIG) pudiéndose ser extrapolados a cualquier subcuenca a partir de unidades representativas del terreno (ráster).

Los pasos seguidos fueron:

- Obtención y procesamiento de los datos pluviométricos y foronómicos.
- Elaboración y calibración de los modelos hidrometeorológico e hidráulico.
- Análisis de los caudales para cada tiempo de retorno.
- Cálculo de la infiltración.

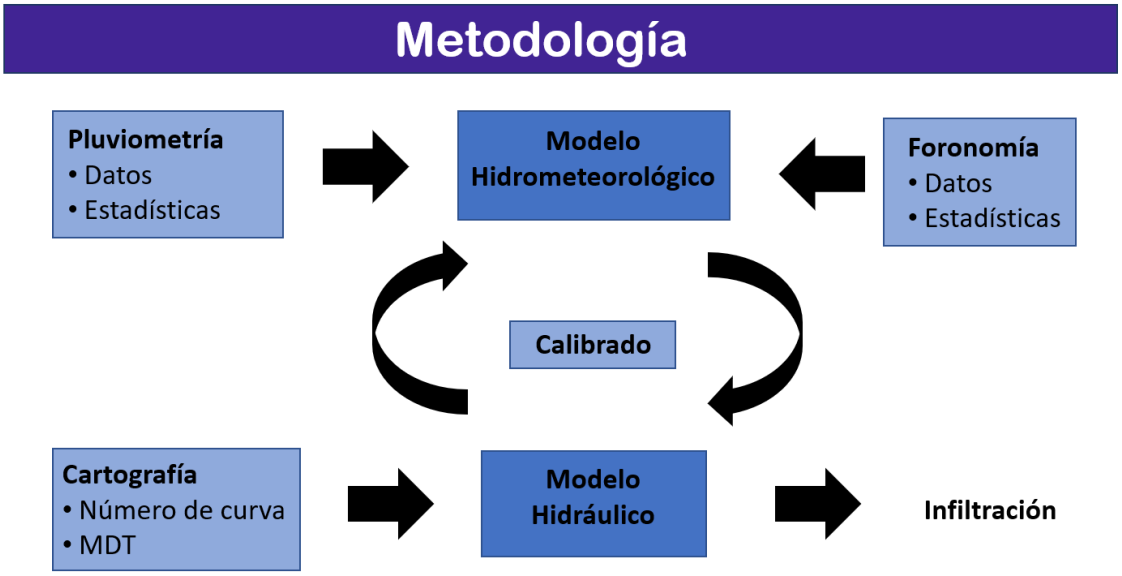

Figura 5; Metodología, modelo conceptual del desarrollo.

3.3.1. Datos pluviométricos y foronómicos

El aforo es la medición de la cantidad de agua que lleva una corriente continua en función del tiempo, proporciona los datos directos del caudal en un punto de medida.

Con el fin de elaborar un estudio hidrológico lo más fiable posible, para validar las salidas de las simulaciones con caudales máximos a los tiempos de retorno, se precisa de un tratamiento de las precipitaciones máximas de la cuenca. Las entradas del modelo hidrometereológico son variables medibles y se basan en simplificaciones estadísticas de los sistemas.

Se trataron los datos de dos estaciones meteorológicas del AEMET, Guadalajara y Sigüenza, debido a la falta de datos y de series extensas, se llevó a cabo el análisis de las dobles masas. Comparativamente la estación de Guadalajara es de calidad, pero poco extensa, en cambio la de Sigüenza tiene una falta de datos para algunos años, pero posee una serie extensa.

Se recopilaron los datos foronómicos existentes del río Badiel en la estación de aforo 3255 en Torre del Burgo del anuario de aforos 2018, 2019 del CEDEX. La estación cubre la mayor parte de la superficie de la cuenca, 333 Km2. Debido a la insuficiencia de datos de la estación se ha procedido al análisis y relleno de los datos faltantes. Para ello, se ha extraído un coeficiente para relacionar los caudales máximos anuales y los máximos instantáneos anuales; los datos faltantes de máximos instantáneos anuales se estimaron utilizando el promedio.

Por último, se ha realizado una curva de caudales clasificados para varios años, con los datos de aforo de los caudales diarios del río Badiel (2002 al 2019) que representan la probabilidad de superar el caudal medio diario a lo largo de un año. Por ejemplo, con una probabilidad del 10% se superará 36 días al año el valor del caudal 0,45m^3/s., siendo el promedio 0,38m^3/s y el máximo 1,22m^3/s y el mínimo 0.

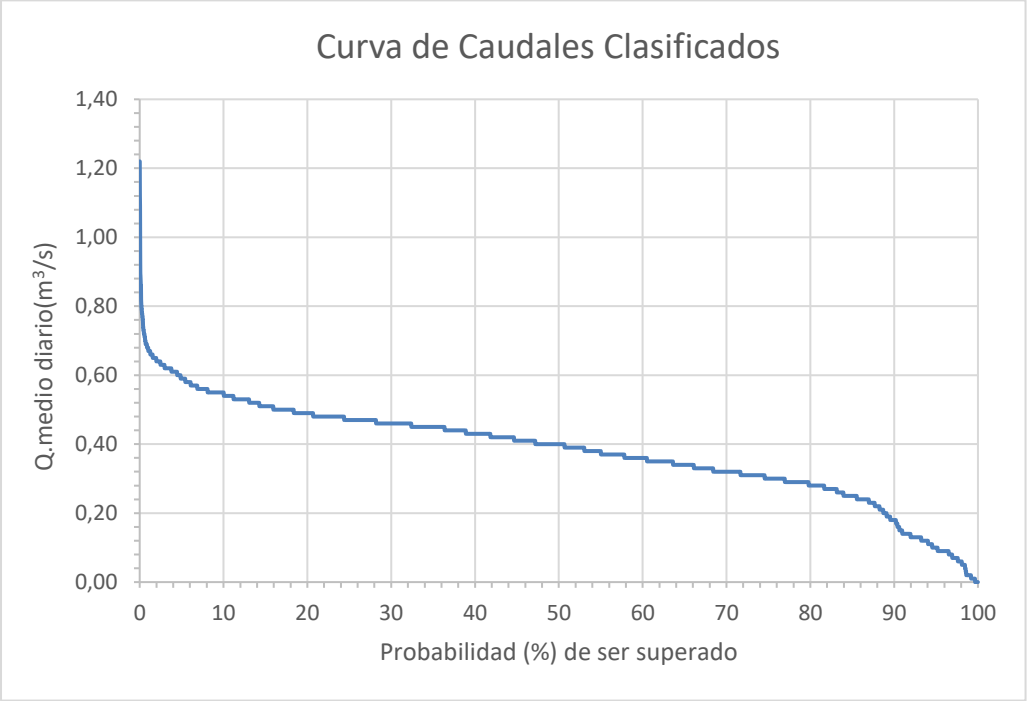

Figura 6: Curva de caudales clasificados.

La curva de caudales diarios también puede ser usada para condicionar la probabilidad de un suceso, se pueden sacar percentiles de ella que nos sirvan como *Caudal Umbral*, es decir la proporción de caudales que están por debajo o por encima suyo, pueden ser indicadores de sequía hidrológica o de avenida súbita (Diaz et al, 2018).

3.3.2. Modelo Hidrometeorológico

Se considera un balance hidrometeorológico, es decir, un modelo precipitación-escorrentía-caudal, a partir de un episodio de precipitación en una cuenca cerrada:

$$Q\ escorrentia = P\ total - Perdidas$$

Ec.1

$$\frac{Abstración\ producida}{Abstración\ Máxima} = \frac{P\ neta\ producida}{P\ neta\ máxima}$$

Ec.2

Las perdidas o abstracciones, es la precipitación que no genera escorrentía queda como retención superficial, se evapora o se infiltra. Un ejemplo de esto es que según aumenta la precipitación (P. neta máxima) en proporción al máximo de retención potencial (S), la precipitación que genera escorrentía (P. neta producida) tiende a cero. Lo que resulta:

$$Perdidas = Abstraciones(S) + Abstración\ inicial(Ia)$$

Ec.3

Al principio de una lluvia el agua se infiltra permeando el suelo, pero hasta un determinado momento. La abstracción inicial se considera en función de la abstracción máxima, siendo un 20%.

$$Ia = 0.2S$$

Ec.4

La masa de lluvia es siempre la misma:

$$Abstración\ producida = P\ neta\ maxima - P\ neta\ producida$$

Ec.5

La fórmula de la precipitación neta producida (Pn) es:

$$Pn = \frac{P^2}{P + perdidas}$$

Ec.6

Si P>Ia se cumple que:

$$Pn = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Ec.7

El modelo evalúa las abstracciones a partir del número de curva de la cuenca, considera que la escorrentía está en función de las características hidrológicas de la cuenca drenante, el tipo de suelo y los usos de terreno.

$$CN = \frac{1000}{10 + S}$$

Ec.8

Para evaluar el número de curva se realizó una estimación cartográfica Qgis, para valorar las diferentes zonas se recurrió a las tablas del manual de HMS y de U.S.D.A. Se consideró:

- Las condiciones hidrológicas locales (Pobres, Medias y Buenas).
- Grupos hidrológicos de suelos (A-D).
- Los antecedentes de las condiciones de humedad del suelo, AMC (tipo I, II, III).
- Los usos del suelo, tratamientos de suelo, área impermeable.

Si el índice de curva es 100, el valor de las abstracciones máximas es 0, en cambio, si es 1 casi toda la lluvia se infiltra o es retenida por la cuenca. Posteriormente se realizó una ponderación, se trató a la cuenca como homogénea y se asumió un único número de curva, un mismo tiempo de concentración y una precipitación uniforme en todos los periodos.

El tiempo de concentración (Tc) es uno de los parámetros de entrada en el modelo hidrometeorológico con Hec-HMS. Teóricamente se refiere al tiempo que tarda una gota caída en el punto más alejado de la cuenca a formar parte del caudal. Se puede calcular de distintas formas, en este estudio se ha calculado con la fórmula (Ministerio de fomento,2016):

$$Tc = 0.3 * (\frac{L}{S^{0.25}})^{0.76}$$

Ec.9

Donde: Tc= Tiempo de concentración (horas).

L= Longitud del cauce (km).

S= Pendiente media de la cuenca(m/m).

Como hemos dicho antes, el método de Gumbel representa una frecuencia de la probabilidad de que ocurra un suceso a partir de los datos recogidos por un pluviómetro de una sola lectura. Los datos de precipitación son los correspondientes a lluvia máxima diaria, hay autores que proponen que para calcular la lluvia máxima en 24 horas se multiplique por 1.13 para la corrección de la precipitación diaria (Martí, 2007).

$$P24h = Pmaxdiaria * 1.13$$

Ec.10

Para modelar la precipitación en HMS es necesario representar la forma de la lluvia, no tiene las mismas cualidades en distintos sitios y en distintas épocas del año, se ha utilizado la fórmula del Ministerio de Fomento, norma 5.2- IC 2016 para estimar la intensidad de la precipitación en un intervalo de tiempo, se calculó cada 5 minutos, hasta 24 horas para cada periodo de retorno. Para el cálculo se utilizó el valor de (I1/Id=10).

$$It = Id(\frac{I_1}{I_d})^{3.5287-2.587*t^{0.1}}$$

Ec.11

Donde: t= Es periodo de tiempo (h).

It= Intensidad media en el periodo t (mm/h).

Id= Intensidad media diaria= P24h/24 (mm/h).

I1= Intensidad media de la hora más lluviosa del día (mm/h).

Para la entrada de la precipitación al modelo, se necesita conocer la forma del aguacero. Se consideró que los episodios de lluvia fueran no uniformes (en pico) para que la mayor intensidad ocurriese a la mitad y las precipitaciones tomasen distintas intensidades a lo largo de la duración de esta. Para la síntesis de los Hietogramas se ha considerado el método de Bloques Alternantes (Chow, 1964), al que se le han integrado seis bloques. Se experimentó con distintos tiempos de duración de la lluvia en el modelo, ajustándolos a la representatividad de los aguaceros típicos, siendo los elegidos 12, 6 y 3 horas.

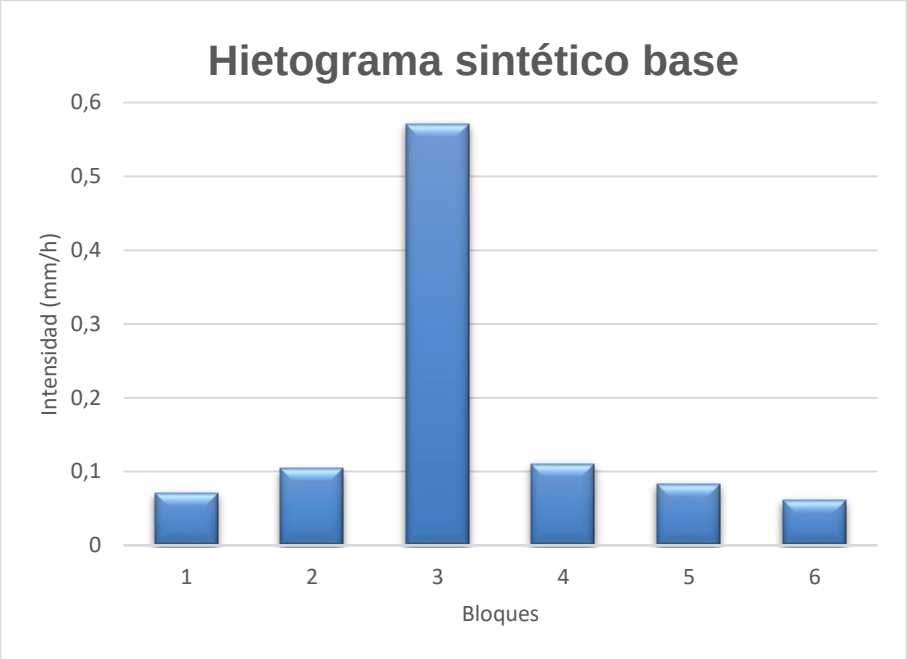

Figura 7: Hietograma en pico.

Los hidrogramas de salida del modelo se basan en el principio de lineación al proceso de escorrentía (Sherman 1932), es el hidrograma SCS. Proporciona la experiencia al modelo mediante el estudio de muchas cuencas, tanteando la duración de la lluvia y proporciona la forma al hidrograma unitario en función del tiempo punta (Tp) y caudal punta (Qp), principales salidas del modelo.

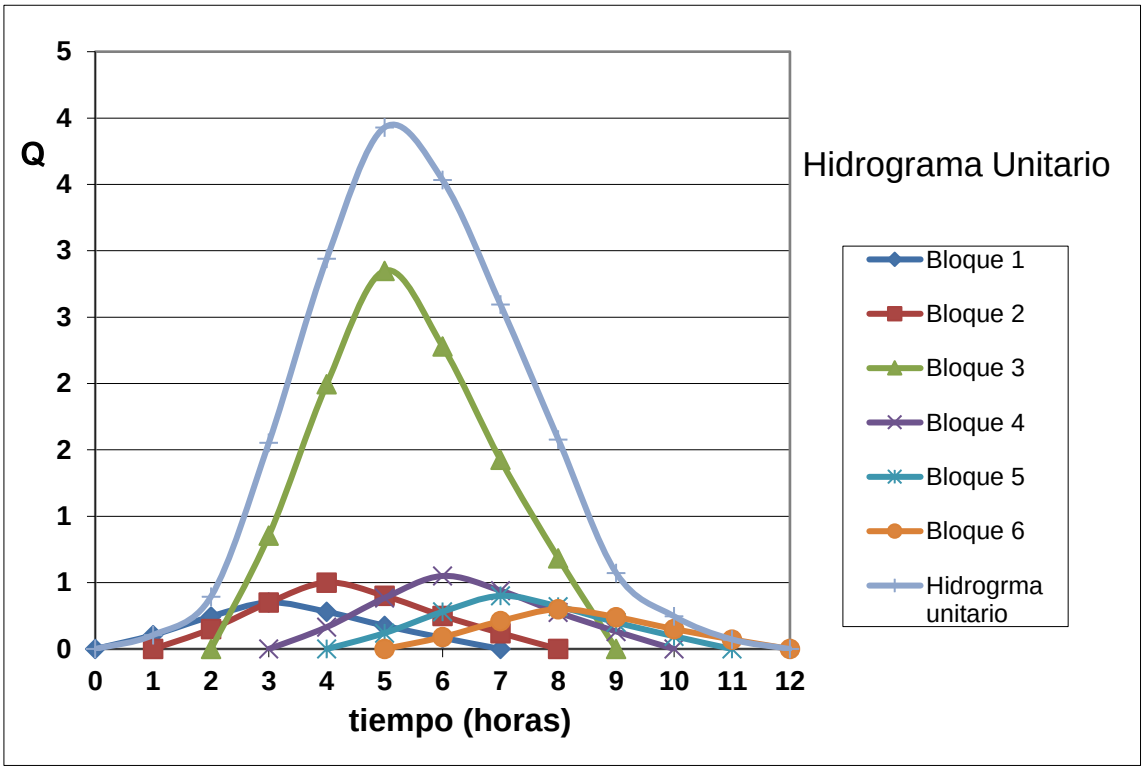

Figura 8: Hidrograma Unitario base.

Además, con este método el tiempo base (Tb), el tiempo que dura el hidrograma unitario, se fija con la integración de las abstracciones. Se permite calcular la duración de la lluvia neta (D), por lo tanto, es un hidrograma para cada incremento, cada uno atrasado con el intervalo anterior, la suma de todos se conoce como hidrograma unitario.

$$t_r = 0{,}6\,Tc$$

Ec.12

$$t_p = 0.5 * D + t_r$$

Ec.13

$$t_b = 2.67 t_p$$

Ec.14

$$Q_p = \frac{P_n * A}{1.8 * t_b}$$

Ec.15

Siendo A= Superficie de la cuenca (Km^2).

Tr= Tiempo de retardo (h).

Tb= Tiempo base (h).

Tp= Tiempo punta (h).

Qp= Caudal punta (m^3/s).

D= Duración de la lluvia neta (h).

El tiempo de retardo, también conocido como tiempo de viaje o lag, es el tiempo que transcurre entre el centro de la precipitación neta y la punta del hidrograma unitario. También define el transito del hidrograma por la cuenca, por lo que diferentes tipos de cuenca tendrán distintas proporciones dependiendo de su tiempo de concentración y manera de calcularse.

3.3.3. Modelo hidráulico

Los modelos hidráulicos necesitan contar con cuatro tipos de información:

- El modelo digital del terreno del cauce.
- La caracterización hidráulica (el caudal, la rugosidad del terreno y la evaluación de las pérdidas de energía).
- Tipo de flujo (régimen del flujo).
- Condiciones de entorno o condiciones borde (topografía).

En este estudio se ha utilizado el software HEC-RAS que permite el cálculo de una superficie de agua libre en cauces naturales, además se pueden incluir velocidades y energías y los resultados se pueden visualizar en forma numérica y visualización tridimensional. Los datos necesarios se introducen a través de pestañas interactivas.

Para la generación del terreno se ha utilizado el MDT02, delimitado para el tramo de río de la zona de estudio.

Los hidrogramas de caudales punta obtenidos para los diferentes tiempos de retorno se distribuyeron en intervalos de una hora para un día, de manera que el flujo estuviera en régimen transitorio e inicio en seco.

La rugosidad en la llanura de inundación depende fundamentalmente del uso del suelo. En estas modelizaciones se ha utilizado el mapa CLC para estimar el valor del coeficiente de rugosidad de Manning:

Tabla 1: Coeficientes de Manning.

Coeficientes de Manning			
Cauce	Ribera	Margen Agrícola	Margen Urbano
0.03	0.05	0.038	0.1

Sobre la zona de estudio es necesario identificar aquellos elementos que afectan de forma importante a la lámina de agua, en nuestro caso existen dos puentes que agravan la situación de las inundaciones, pero no tenemos datos “in situ” de su tamaño. Se supone que cuando el caudal es alto la lámina de agua pasa por encima de ellos o se taponarán.

En los modelos bidimensionales se puede trabajar con dos tipos de mallas, estructuradas o no estructuradas. En este caso se utilizó una malla no estructurada, ya que contamos con elementos de área variable y tiene la capacidad necesaria para reproducir elementos singulares. La malla base es de 10x10, se disminuyó en la zona habitada.

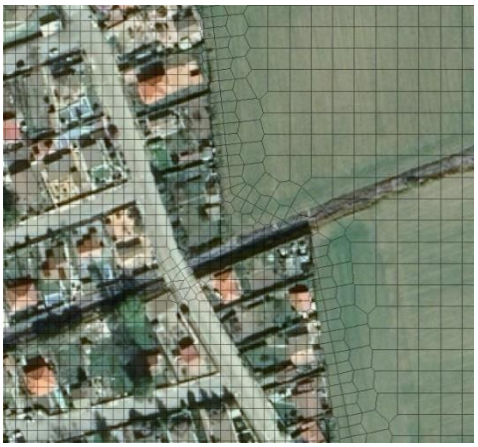

Figura 9: Detalle de la malla 2D.

3.3.4. Modelo de infiltración

En este trabajo se supone que todas las abstracciones producen infiltración y que en el caso de una gran tormenta la retención y evaporación son despreciables. La capacidad de infiltración disminuye con el tiempo, es decir, a mayor retención menor escurrimiento hasta el punto de saturación.

Se pueden utilizar las ecuaciones de Horton, Phillip, Green-Ampt para calcular la ratio de infiltración. En el trabajo se ha utilizado el principio de Horton, explica que la caudal punta es igual a la diferencia entre la precipitación neta y la infiltración. Además, asume que el suelo tiene una profundidad infinita y que se encuentra saturado, que no forma parte del cálculo. Aún así, se sabe que otros factores como el tipo de suelo, la vegetación de superficie, la humedad previa y la compactación influyen en esta ratio de infiltración.

Las ecuaciones de Horton (1940) representan la física de infiltración del agua en los suelos mediante un modelo semi-empírico:

$$I = Ic + (Io - Ic)e^{-kt}$$

Ec.16

Siguen un declive exponencial por lo que se pueden linealizar y resolver como una medida de la ratio de infiltración en un determinado tiempo.

$$I - Ic = (Io - Ic)e^{-kt}$$

Ec.17

$$\frac{(I - Ic)}{(Io - Ic)} = e^{-kt}$$

Ec.18

$$ln\frac{(I - Ic)}{(Io - Ic)} = -kt$$

Ec.19

$$y = \frac{(I - Ic)}{(Io - Ic)}$$

Ec.20

$$\ln(y) = -kt$$

Ec.21

Donde: I= Infiltración en función de tiempo t.

Io=Infiltración inicial.

Ic= Infiltración en el punto de equilibrio final.

K= constante de Horton.

En su cálculo se ha utilizado regresión lineal con Excel (Ajayi et al, 2016), siendo K la pendiente de la recta. Para calcular el volumen de recurso hídrico que se infiltra, se ha integrado la función de la infiltración en el área inundada para 12 horas, que es el tiempo que se estima durarían las afecciones por agua estancada en la zona de estudio.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Como hemos dicho anteriormente, este estudio puede servir para la consideración de criterios de admisibilidad del riesgo, si es aceptable o no para el uso de medidas (predictivas, preventivas o correctoras) y cómo de crítico es en términos probabilísticos de peligrosidad o susceptibilidad. Según Jiménez et al, 2008, no son frecuentes los estudios que abordan el análisis de situaciones de riesgo de manera integral, es decir, que incluyan apreciaciones más complejas de los efectos producidos por las inundaciones y previamente a cualquier estudio de riesgo es necesario una estimación de las perdidas esperables.

Es decir, que es mas importante en el caso del rio Badiel, la peligrosidad de las inundaciones o los beneficios de las medidas mitigadoras para el aprovechamiento de las avenidas, como recarga de aguas subterráneas y para su aprovechamiento agrícola (Azudes, técnicas MAR, mejora en los colectores urbanos, motas…).

4.1. Datos y estadísticas.

Para el tratamiento de datos para la modelación de crecidas se ha llevado un análisis estadístico de las distribuciones asimétricas de Gumbel sobre series de precipitación máximas anuales y aforos. El resultado fue descrito en unidades de frecuencia, es decir, tiempos de retorno para las cuales se ha realizado los cálculos.

Como hemos dicho al principio de esta sección, en el estudio del riesgo es imprescindible discernir y considerar la significancia de los acontecimientos, pero también de las probabilidades, para conocer el riesgo de que sucedan determinados accidentes. Si se quiere dimensionar las medidas para reducir la peligrosidad de estos sucesos, hay que tener en cuenta que la medida del caudal máximo es exponencial al tiempo de retorno, como se observa a en la gráfica.

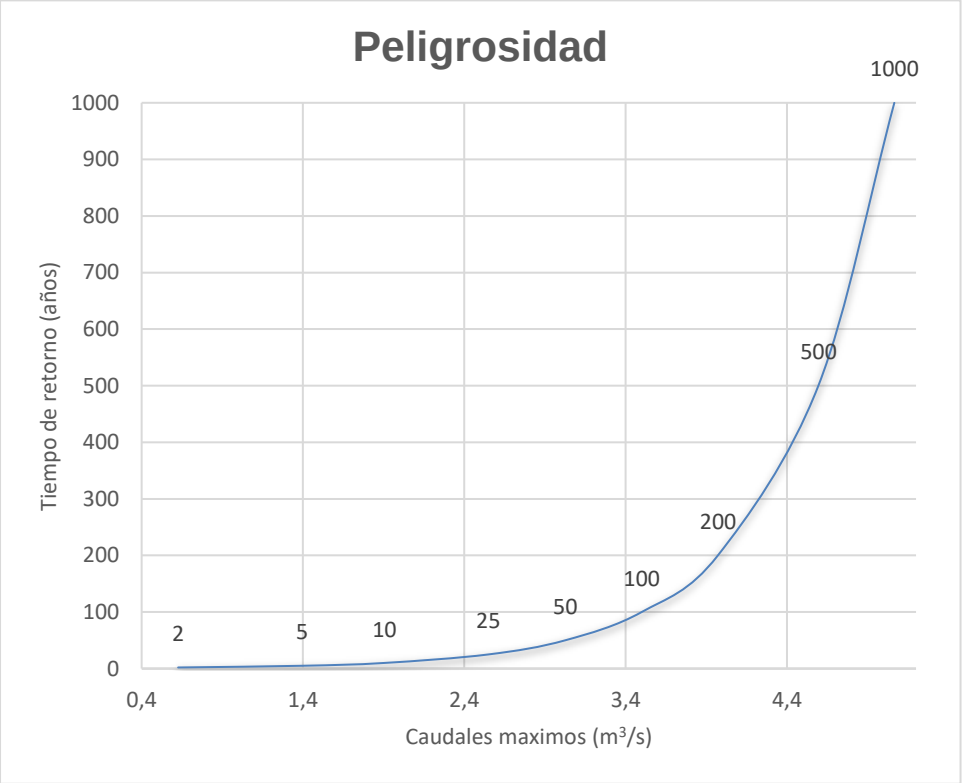

Figura 10: Gráfico de peligrosidad de inundación.

Si nuestro análisis solo se centra en unos caudales umbrales determinados con la curva de caudales acumulados (Figura 6), para un tiempo de retorno de 2 años hay un caudal máximo de 0.626m^3/s, lo que equivale a una probabilidad de ser superado del 3.7%, es decir, en un año se alcanzaría un caudal de esa magnitud o superior 13 días.

Sin embargo, este método no satisface en el caso de que el caudal fuese mayor al máximo registrado en la curva de caudales acumulados, para eso se utiliza el denominado riesgo de fallo. El riesgo de fallo se refiere a la probabilidad de que se produzca el suceso, no el próximo año cómo el tiempo de retorno, sino en los próximos años (n), lo que es adecuado para dimensionar la vida útil de un proyecto. Se escogieron los tiempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 años.

Tabla 2: Distribución de Gumbel para los datos pluviométricos y foronómicos.

T (años)	Probabilidad de superación	Probabilidad de no superación	Pt máxima anual (mm/h)	Q máximos instantáneos anuales (m^3/s)
2	50%	50%	28.007	0.626
5	20%	80%	34.296	1.395
10	10%	90%	38.459	1.905
25	4%	96%	43.720	2.548
50	2%	98%	47.623	3.026
100	1%	99%	51.497	3.500
200	0,5%	99,5%	55.357	3.972
500	0,2%	99,8%	60.449	4.595
1000	0,1%	99,9%	64.297	5.065

Para una avenida pluvial hay que considerar que la probabilidad de una crecida en el rio es dependiente de un episodio de lluvia. Sin embargo, episodios de lluvia con cantidades iguales de precipitación ocasionan diferentes efectos en los caudales. Para poder determinar las combinaciones mínimas de precipitaciones máximas que hagan que se produzca el suceso de la inundación debe hacerse una evaluación cualitativa de los sistemas naturales que componen las ecuaciones de nuestros modelos.

4.2. Calibración y validación del modelo hidrometeorológico

La curva IDF representa da distribución de la intensidad para cada se ha representado par aun intervalo de 24 horas. Las mayores intensidades se dan en frecuencias de tiempo de retorno bajas, como es el caso de los tiempos de retorno de 1000 a 500 años, y en duraciones de lluvia bajas. Con ella se calcula la ecuación de la recta y se sustituye para el tiempo de cada bloque del hietograma.

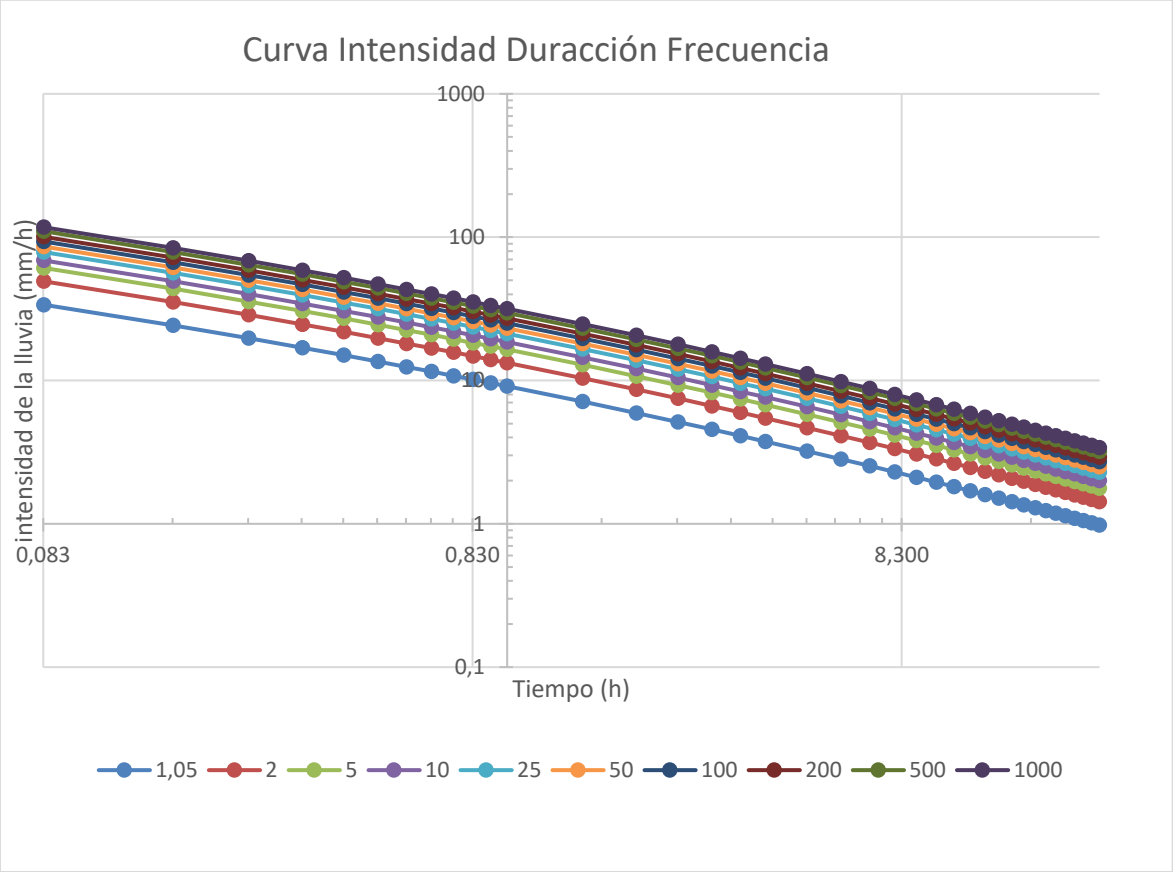

Figura 11: Curva IDF.

La duración total de la lluvia es la suma de los tiempos de cada bloque y es un parámetro fundamental para la calibración de un modelo, define la dimensionalidad temporal de las entradas, de hecho, es necesaria su incorporación como parámetro de la situación inicial de la cuenca.

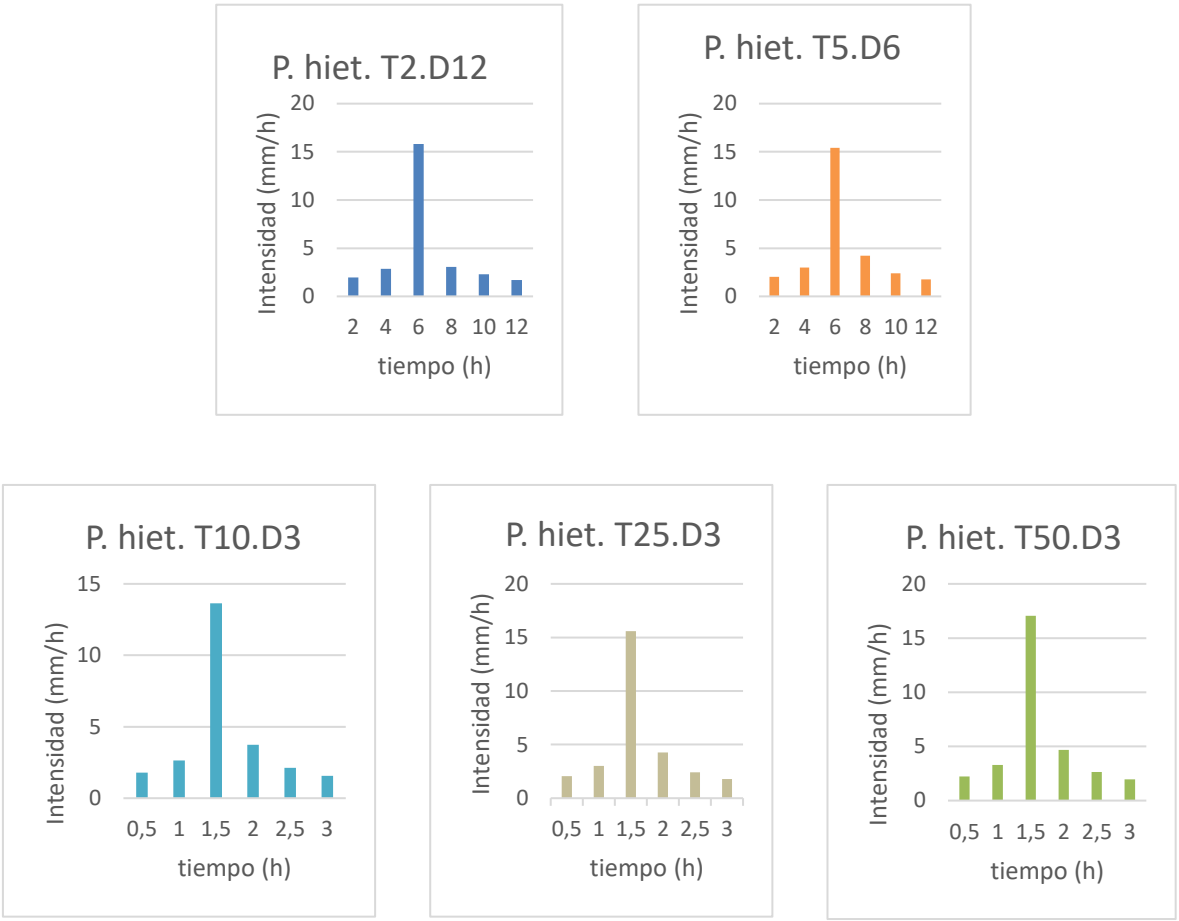

Figura 12: Hietogramas en pico, entradas del modelo hidrometeorológico.

Como se puede observar, diferentes tiempos de lluvia distribuyen la intensidad de la lluvia de manera diferente, esto añade cierta subjetividad al modelo ya que se desconoce la lluvia objetivo y se ajusta por tanteo o por experiencias previas. El autor Marti 2007, recomienda que el tiempo de lluvia sea una o dos veces el tiempo de concentración, por ejemplo, en el método racional se recomienda utilizar el tiempo de concentración para calcular la intensidad de la precipitación. Aun así, un tiempo de precipitación de 12 o 24 horas seguidas es poco frecuente en el clima mediterráneo, por lo que se ajustaron a al mínimo para los episodios de máximo caudal.

Con la cartografía de edafología, CLC, cobertura de herbáceas y forestal de alta precisión, se usaron para calcular el número de curva de la cuenca del río Badiel. El resultado de la ponderación por píxel fue de 72. Concuerda con los resultados de estudios similares con números de curva entre 68-70 para la subcuenca del rio Badiel (Martí, 2007).

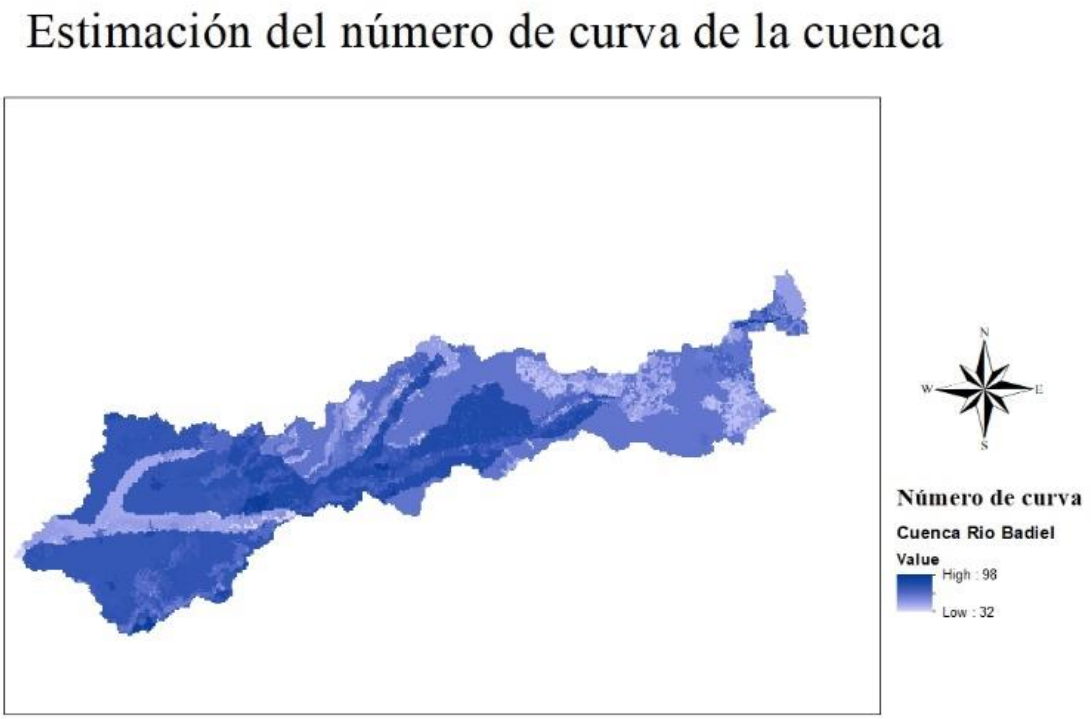

Figura 13: Mapa del número de curva

El número de curva tiene un papel fundamental para la calibración del modelo, junto a la abstracción inicial y el tiempo de retorno, debido a que es un parámetro emírico. La calibración es el proceso intermedio entre la entrada de los componentes principales y la predicción de la salida.

En el método de caracterización de las perdidas por el NC, considera almacenamiento máximo a las abstracciones iniciales para incluirla la intercepción de la cobertura vegetal, no depende de la duración ni de la forma de la lluvia, asume que formarán parte de la escorrentía (Aroca et al, 2014).

Para el calibrado del modelo se realiza mediante pruebas iterativas que realizan una búsqueda no linean adecuada al conjunto de parámetros del modelo. Se utilizaron una serie de datos para caudales medios diarios y precipitación media diaria de primavera (20 de marzo al 21 de junio del año 2018, fecha entre los que se encuentran dos de los sucesos de inundaciones).

En calibrado del modelo se realizó con un tiempo de retardo de 7.47 h, es decir de 0,6 veces el tiempo de concentración de 12.46 h (Ec.12)., aunque existen muchos métodos para su calculo todos ellos se basan en el compendio de observaciones empíricas de numerosas cuencas parecidas (Dagnenet et al,2022). Como hemos dicho anteriormente se relaciona con el tiempo de tránsito, en este modelo considera un mismo tiempo de concentración, hasta la salida de la cuenca por lo que tiene una única geomorfología. Disminuye su valor en el máximo y aumenta en el mínimo, a propósito, su aumento disminuye la caudal punta, pero se aumenta el tiempo base del hidrograma considerablemente.

En el modelo las abstracciones iniciales se calculan proporción de 20% establecida (Ec. 4). No se utilizan en la elaboración del modelo debido a que ya estaban incluidas La reducción de las abstracciones hace que se acelere el proceso de generación de escorrentía aumentando la precipitación neta, por tanto, la caudal punta (Lopez et al, 2012). La saturación de las abstracciones ha producido que los modelos aumenten demasiado la caudal punta al punto de no poder ser valorado. Su valor es de 4 mm para un CN de 72.

El número de curva fue el parámetro que más influye en el ajuste del modelo, se acopla con el método del error porcentual mínimo con un valor de 67,77. Este ajuste se corresponde con los resultados de Martí, 2007 mencionados anteriormente. Es un parámetro muy conveniente para el calibrado del modelo, su sensibilidad facilita el ajuste que además puede ser calculado de manera sencilla.

Para evaluar los resultados para los diferentes escenarios se ha calculado los errores absoluto y relativo entre el caudal máximo instantáneo anual y los caudales punta obtenidos a partir de las precipitaciones máximas. También se ha calculado el calor de la Eficiencia (E) de Nash y Schucliffe (1970) para evaluar la habilidad predictiva del modelo.

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}(Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^{T}(Q_o^t - \bar{Q}_o^t)^2}$$

Ec.22

Donde:

Q_o^t= Caudal observado en el tiempo t.

Q_m^t=Caudal modelado en el tiempo t.

$\bar{Q}_o^t$= media de los caudales observados.

Tabla 3: Validación de los caudales punta.

Caudales Rio Badiel (m^3/s)					
P. retorno	2	5	10	25	50
Observado	0.626	1.395	1.905	2.540	3.026
Simulado	0.5	1	1.8	2.9	3.1
Dif. abs	0.126	0.395	0.105	-0.36	-0.074
Dif (%)	0.201278	0.283154	0.055118	-0.14173	-0.02445
Eficiencia	0.959487	0.919824	0.996962	0.979912	0.999402
CN	67	67	71	69	67
Tr	448	448	448	448	448
d	12	6	3	3	3

Este método permite calcular la bondad de ajuste del modelo comparándolo con a varianza, aun así, hay aspectos del hidrograma unitario de salida que pueden ser no representativos, por ejemplo, que hayan aumentado su tiempo base considerablemente o que presenten abstracciones no significativas de la cuenca. Un valor de eficiencia más cercano a 1 sugiere una mayor habilidad predictiva.

4.3. Calibración y modelado hidráulico

A partir del modelo topográfico del cauce y la llanura de inundación, se obtuvo un mapa de las zonas inundables para el tiempo de retorno de 50 años. Con caudales punta de 3.1m^3/s y un tiempo punta de 10. El modelo se basa en las ecuaciones de movimiento de Saint Vernant que para flujos 2D, supone que el flujo del rio se puede mover en dos direcciones, cosa que en la naturaleza solo ocurre en algunos ríos de montaña (Jiménez, 2008).

Figura 14: Mapa de área inundables.

A primera vista, la superación del albero virtual se corresponde con las descripciones de las inundaciones recientemente producidas, durante los años 2018 y 2020, del tipo avenidas súbitas que se ven agravadas por la superación de infraestructuras hidráulicas y con arrastres de sólidos típicas de cuencas mediterráneas (Diaz-Herrero et al, 2019). Para conseguir datos más representativos sería conveniente caracterizar las secciones del cauce para obtener las líneas de inundación para cada sección, con ellas se podría crear un modelo en tres dimensiones (Maidment et al, 1999) para caracterizar la altura del puente que cruza la urbanización.

Con el SIG se calcularon el área de afección tras la inundación en el área urbana, se estimó en 6813 m^2.

4.4. Cálculo de la infiltración

Con las ecuaciones de Horton se obtuvo la siguiente función de infiltración:

$$I(t) = 0.28 + 1.69 * e^{-0.05t}$$

Ec.23

Se usaron las abstracciones producidas por la precipitación total en tiempo de retorno de 2 años y duración de la lluvia de 12 horas debido a que tiene la suficiente duración para estabilizar la infiltración al punto de equilibrio, es decir una tasa de saturación. Se puede utilizar permanece constante en el tiempo final, siendo más bajo que en tiempo inicial. La capacidad de infiltración, es decir la infiltración es rectilínea, lo que muestra cómo se está reteniendo el agua de manera constante, este aspecto concuerda con los resultados del modelo para un numero de curva bien ajustado a climas secos mediterráneos (Ouaba et all, 2021).

El método de Horton es versátil y reproduce la infiltración del agua a través de un suelo saturado, dando un ajuste más representativo del proceso de infiltración de zonas encharcadas. Se podrían utilizar otros métodos, como método de Richard tiene en cuenta la humedad volumétrica del suelo y la difusión del agua por el suelo, pero son muchos más complicados (Zhou et al, 2019).

Para conseguir el volumen total infiltrado se integraron las funciones desde el límite 0 al de 12 horas, asumiendo la relación lineal entre los tiempos de infiltración con Excel. Para un área determinada el volumen de infiltración es de:

$$F = \int_0^{12} f \ dt$$

Ec. 24

$$F = \int_0^{12} (0.28 + 1.69 * e^{-0.05t}) dt$$

Ec.25

La integración de la ecuación de Horton puede hacerse gráficamente:

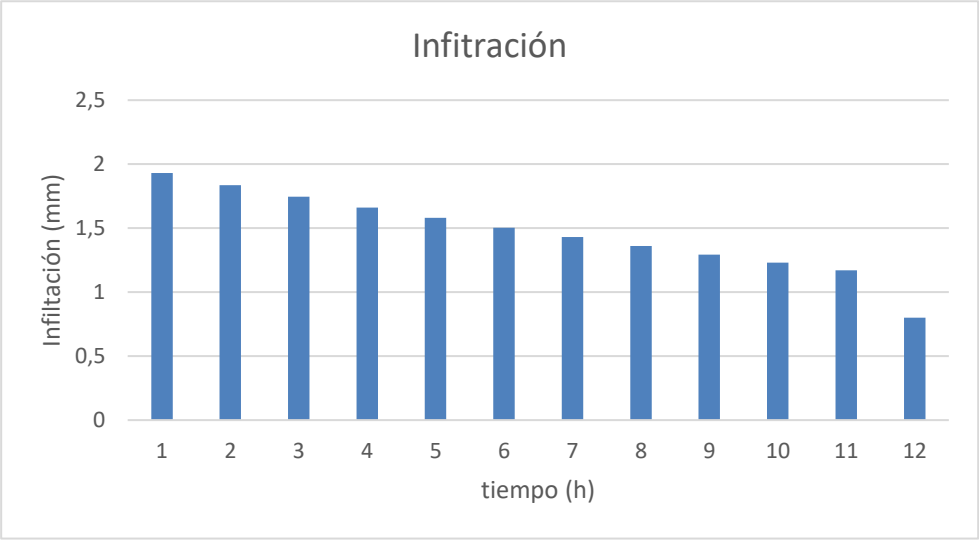

Figura 15: Curva de infiltración para 12 horas

En este caso la infiltración decrece de 1,9mm/h a 0,79mm/h, si se compara con el tipo hidrológico de suelo (A-D) de las tablas de SCS-CN se comprueba que es del tipo C-D, suelos impermeables, que se cementan, expanden o compactan con la presencia de agua. (USDA, 2007). Se observa en la figura 15 que la infiltración decrece formando escalones, que disminuyen hacia el final de las 12 horas.

La infiltración total en 12 horas es de:

I=**17.54 mm**

$$V = A_p * I$$

Ec.26

$$V = 6813\ m^2 * 0.01754\ m = \mathbf{119.5\ m^3}$$

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos nos llevan a tener las siguientes conclusiones:

- El modelo hidrometeorológico es capaz de representar hidrogramas unitarios a partir de una precipitación máxima ajustándose a los caudales instantáneos con una eficiencia satisfactoria, para ello, es fundamental el calibrado del modelo, ya que en el software HEC-HMS usa el método SCS que cuenta con parámetros empíricos que pueden dimensionar sucesos en el área de estudio. Se recomiendo ajustar los modelos de la cuenca del rio Badiel con número de curva de 67.

- La duración del aguacero y la forma del hietograma tienen un efecto significativo en la dimensión del hidrograma unitario tanto en caudal y tiempo punta, debido a que el reparto de la lluvia por la cuenca es homogéneo y aumenta la cantidad de precipitación proporcionalmente.

- Los modelos hidráulicos de dos dimensiones permiten evaluar los efectos de los sucesos para validar y evaluar posibles vulnerabilidades en las infraestructuras que se encuentran en la cuenca del rio Badiel.

- Generar un modelo de infiltración con las ecuaciones de Horton y las abstracciones recogidas con el modelo hidrometeorológico, es una forma sencilla de cuantificar el volumen de infiltración en cualquier lugar de la cuenca, frente a otros métodos más directos que pueden no ser significativos desde el punto de vista práctico.

- Se puede utilizar el análisis probabilístico para simplificar la incorporación de la situación inicial de los modelos y cuantificar las frecuencias de los posibles sucesos de inundación. Con la mayor frecuencia calculada en este estudio el riesgo de fallo para 10 años, es decir, que se supere un caudal de 3 m^3/s, es del 20 %, es decir 73 días, que podría provocar un suceso de inundación.

7. BIBLIOGRAFÍA

Ajayi, A. S., Brai, M. A., Eriakha, E. C., Ehiomogue, P. (2016). Evaluation of methods for estimating the decay constant (K) of Horton's infiltration model. International Journal of Interdisciplinary Research and Innovations, 4(2), 13-18.

Aroca, E., Bodoque, J.. (2014). Importancia de las abstracciones iniciales para la génesis de avenidas en cuencas de montaña. 10.13140/RG.2.1.2621.0169.

Cañizares, A. O., Almodóvar, E. S., Palacios, M. J. M. (2021). La adaptación a los extremos atmosféricos y al cambio climático mediante los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN): Propuesta en el término municipal de Callosa de Segura (Alicante, España). *Inundaciones y sequías: Análisis multidisciplinar para mitigar el impacto de los fenómenos climáticos extremos*, 747-762.

Chow, V.T. (1964). Handbook of applied hydrology: a compendium of water-resources technology. McGraw-Hill, New York.

Dagnenet, S., Atsushi, T., Mitsuru, T., Nigussie, H., Enyew A., Derege T. M., Ayele A. F., Kindiye E., Mulatu L. B., Tadesual A. S., (2022)Evaluation of lag time and time of concentration estimation methods in small tropical watersheds in Ethiopia, Journal of Hydrology: Regional Studies,Volume 40.

Diaz, A. M.L., Bateman, A., de Medina, V. (2008). Estudio de la sequia hidrológica y metereologica del rio Llobregat. XXIII Congreso latinoamericano de hidráulica Cartajena de Indias Colombia.

Díez-Herrero, A., Lain-Huerta, L., Llorente, M.. (2009). A Handbook on Flood Hazard Mapping Methodologies. Geological Survey of Spain

de las Heras, Á (2004). Estudio de las inundaciones históricas del río amarguillo (Toledo). Tesis doctoral, Madrid.

Jiménez, E. D. M., Herrero, A. D. (2008). Análisis del riesgo de inundación en localizaciones puntuales: el edificio Sabatini (Toledo). *El estudio y la gestión de los riesgos geológicos*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

López, J, J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro,J,V., Gimena,F,N. (2012) Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. Obras y Proyectos no.12

Maidment, D., Tate, E. (1999). Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcView GIS. Austin.

Martí, P. G (2007). Las zonas inundables de la comunidad de Madrid. Análisis y Cartografía. Libreria/M. Ambiente Ord. del Territorio y Sostenibilidad. Madrid
.

Ministerio de Fomento (2016). Norma 5.2 - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras. Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero. «BOE» núm. 60, de 10 de marzo de 2016, 18882-19023.

Olcina, J. (2004). Riesgo de inundaciones y ordenación del territorio en la escala local: el papel del planeamiento urbano municipal. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, N. 37.

Ouaba, M. Saidi, M, E,. Boughdadl, S. (2021) How to estimate the deph of cumulative infiltration and runoff using the SCS-CN Model and GPM-Final satellite rainfall in a Mediterranean Arid Region. International Journal of Scientific & Technology Research, volume 10, issue 09.

Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de Inundaciones (2011). Autor. <Accesible en URL: https://www.proteccioncivil.es/catalogo/naturales/plan-

estatal-riesgo-inundaciones/index.html>.

San Roman, F,J, S.(2017) Hidrologia superficial y subterránea. USAL. Salamanca.

Sherman, L. K. (1932). The relation of hydrographs of runoff to size and character of drainage-basins. Eos, Transactions American Geophysical Union, 13(1), 332-339.

Wanielista, M. P., Kersten, R. Eaglin, R. (1997). Hydrology: Water Quantity and Quality Control.

Zhou, T., Iannidou, K.,Masoero, E., Mirzadeh, M., Pellenq, R,J-M., Bazant, M, Z.(2019) Capillary Stress and Structural Relaxation in Moist Granular Materials. Lagmuir, 35,4397-4402