

# ESTUDIO HIDROLÓGICO DE INUNDABILIDAD DE LA CIUDAD DE TORTOSA. CONSIDERACIÓN DEL NÚMERO DE FROUDE.

**Josep Maria Franquet Bernis**  
*Dr. Ingeniero Agrónomo, EUR-ING*  
*Académico de número de la Real Academia Europea de Doctores*

## ÍNDICE

|  | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| <b>Resumen / Resum / Summary .....</b>                   | <b>2</b>    |
| <b>1. Objeto del estudio .....</b>                       | <b>3</b>    |
| <b>2. Caracterización de la cuenca aportadora.....</b>   | <b>5</b>    |
| 2.1. Caracterización morfológica.....                    | 5           |
| 2.2. Caracterización hidrológica.....                    | 7           |
| 2.2.1. Condiciones antecedentes de humedad .....         | 7           |
| 2.2.2. Condiciones de flujo preferente fluvial .....     | 7           |
| 2.2.3. Características del suelo .....                   | 8           |
| 2.2.4. Cubierta vegetal y usos del suelo .....           | 9           |
| 2.2.5. Análisis de la pendiente del terreno.....         | 9           |
| 2.2.6. Cálculo del número de curva .....                 | 9           |
| 2.3. Estudio pluviométrico .....                         | 9           |
| 2.4. Modelización hidrológica .....                      | 13          |
| 2.5. Caudales de avenida .....                           | 14          |
| <b>3. Estudio geomorfológico.....</b>                    | <b>18</b>   |
| <b>4. Infraestructuras: puentes.....</b>                 | <b>19</b>   |
| <b>5. Cálculo hidráulico .....</b>                       | <b>20</b>   |
| <b>6. El número de Froude.....</b>                       | <b>21</b>   |
| <b>7. Susceptibilidad a la dinámica torrencial .....</b> | <b>26</b>   |
| <b>8. Aspectos técnicos a tener en cuenta .....</b>      | <b>27</b>   |
| 8.1. Evaluación del riesgo de inundación .....           | 27          |
| 8.2. Medidas de mitigación de inundaciones.....          | 28          |
| 8.3. Diseño y construcción resilientes .....             | 28          |
| 8.4. Planes de emergencia y gestión del riesgo .....     | 28          |
| <b>9. Discusión y Conclusiones .....</b>                 | <b>29</b>   |
| <br>   |             |
| Relación de figuras / Relación de tablas.....            | 31          |
| Bibliografía y fondos documentales .....                 | 32          |
| Abreviaturas y siglas .....                              | 34          |

**Tortosa, julio de 2024.**

## RESUMEN

El presente trabajo trata de determinar, en primer lugar, los caudales de avenida representativos en la zona de estudio con motivo del emplazamiento del futuro hospital universitario de las *Terres de l'Ebre* en la ciudad de Tortosa (Tarragona). También se realiza el análisis de otros parámetros hidráulicos relevantes, como singularmente el número de Froude, lo que permitirá determinar la peligrosidad o idoneidad correctiva de dicho emplazamiento. Los valores obtenidos de dicho parámetro, para los períodos de retorno de 50, 100 y 500 años, teniendo en cuenta la influencia de los embalses, resultan de escasa cuantía y corresponden a un flujo lento o subcrítico, en el que prevalece claramente la energía potencial sobre la cinética. Son compatibles con un régimen hidráulico típico de llanura, como era esperable desde el punto de vista geomorfológico, lo que pone de manifiesto, en su conjunto, la escasa peligrosidad del tipo de inundabilidad analizado.

*Palabras clave:* caudal, avenida, recurrencia, inundabilidad, energía, flujo, geomorfología, infraestructura, hidrología, cuenca, hidrograma.

## RESUM

Aquest treball intenta determinar, en primer lloc, els cabals d'avinguda representatius a la zona d'estudi amb motiu de l'emplaçament del futur hospital universitari de les Terres de l'Ebre, a la ciutat de Tortosa (Tarragona). També es fa l'anàlisi d'altres paràmetres hidràulics rellevants, com ara singularment el número de Froude, cosa que permetrà determinar la perillositat o idoneïtat correctiva d'aquell emplaçament. Els valors obtinguts del paràmetre esmentat, per als períodes de retorn de 50, 100 i 500 anys, tot tenint en compte la influència dels embassaments, resulten de poca quantia i corresponen a un flux lent o subcrític, en què preval clarament l'energia potencial sobre la cinètica. Són compatibles amb un règim hidràulic típic de plana, com era esperable des del punt de vista geomorfològic, la qual cosa evidencia, en el seu conjunt, l'escassa perillositat del tipus d'inundabilitat analitzat.

*Paraules clau:* cabal, avinguda, recurrència, inundabilitat, energia, flux, geomorfologia, infraestructura, hidrologia, conca, hidrograma.

## SUMMARY / ABSTRACT

The present work attempts to determine, firstly, the representative flood flows in the study area due to the location of the future *Terres de l'Ebre (Lands of the Ebro river)* university hospital in the city of Tortosa (Tarragona). The analysis of other relevant hydraulic parameters is also carried out, such as the Froude's number, which will allow determining the danger or corrective suitability of said location. The values obtained for said parameter, for the return periods of 50, 100 and 500 years, taking into account the influence of the reservoirs, are small and correspond to a slow or subcritical flow, in which potential energy clearly prevails about kinetics. They are compatible with a typical plain hydraulic regime, as expected from the geomorphological point of view, which shows, as a whole, the low danger of the type of flood risk analyzed.

*Keywords:* flow, flood, recurrence, flooding, energy, flow, geomorphology, infrastructure, hydrology, basin, hydrograph.

## 1. OBJETO DEL ESTUDIO

Nuestro objetivo fundamental, en este estudio hidrológico de inundabilidad, consiste en determinar los caudales de avenida representativos en la zona de estudio con motivo del emplazamiento del futuro hospital universitario de las *Terres de l'Ebre*, en la comarca del *Baix Ebre* y término municipal de Tortosa (Tarragona), en el barrio denominado “Ferrerries” y próximo al vecino municipio de Roquetes. De este modo, junto con la fisiografía del terreno y mediante el análisis de otros parámetros hidráulicos relevantes, permitirá determinar la peligrosidad o idoneidad correctiva de dicho emplazamiento. En este sentido, se obtienen los caudales de avenida del río Ebro para 8 diferentes periodos de retorno o recurrencia de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 1.000 años. Para ello se ha establecido una doble metodología que permite establecer parámetros globales para la zona de estudio, con la caracterización morfológica, hidrológica y pluviométrica correspondiente. Todo lo expuesto ofrece una información complementaria que juzgamos altamente valiosa para el estudio y fijación del caudal mínimo medioambiental de este tramo inferior del río Ebro (Franquet, 2009), que culmina en el delta del mismo río, de extraordinaria importancia ecológica y paisajística. Se trata de un espacio declarado Reserva de la Biosfera<sup>1</sup> que goza de numerosas figuras de protección medioambiental.

La ciudad de Tortosa, con una población de 35.000 personas, se encuentra situada a 80 km de Tarragona y 170 km de Barcelona. Afronta, en los últimos tiempos, la construcción de un nuevo hospital con la intención de dotar al conjunto del territorio ebrense, del que es capital, de un equipamiento de alto nivel. El futuro hospital, asociado a la Universidad Rovira i Virgili (URV), se concibe como un equipamiento puntero que proyecte una imagen de centro avanzado de alta calidad. Se plantea la nueva construcción como un edificio emblemático que se sumará a otros establecimientos sanitarios ya existentes próximos del mismo municipio (Centros de Asistencia Primaria, Hospital “Verge de la Cinta”, Clínica “Terres de l'Ebre”, Hospital de la “Santa Creu” de Jesús, etc.) y con acceso directo a la carretera C-12 (Eje Occidental también denominado “Eix de l'Ebre”).

---

<sup>1</sup> Esta Reserva se halla integrada en el conjunto del ámbito funcional territorial catalán de las *Terres de l'Ebre*, con una superficie global de 367.729 ha y dispone de una población aproximada de 180.000 hab. Es una de las más extensas de España y con mayor población en su zona de transición. En este caso, la correspondiente declaración por la UNESCO, de mayo del año 2013, se hizo gracias a su riqueza paisajística, a la representatividad de sus ecosistemas mediterráneos y a su modelo de conservación de la biodiversidad. Se halla situada en el extremo meridional de Catalunya i es una Reserva marítimo-terrestre que destaca por su heterogeneidad y la gran diversidad de ambientes. El 35 % de su superficie está incorporado a la Red Natura 2000 y en su ámbito territorial hay dos parques naturales de gran importancia en el contexto europeo: el Parque Natural del Delta de l'Ebre y el Parque Natural del Massís dels Ports. Estos dos espacios, conjuntamente con la Sierra de Cardó-Boix, forman el polinúcleo de la Reserva. La actividad humana ha estado presente en ella desde la antigüedad, conformando unos paisajes agrarios de extraordinaria belleza, estrecha y armónicamente relacionados con los espacios naturales.



Fig. 1. Situación.

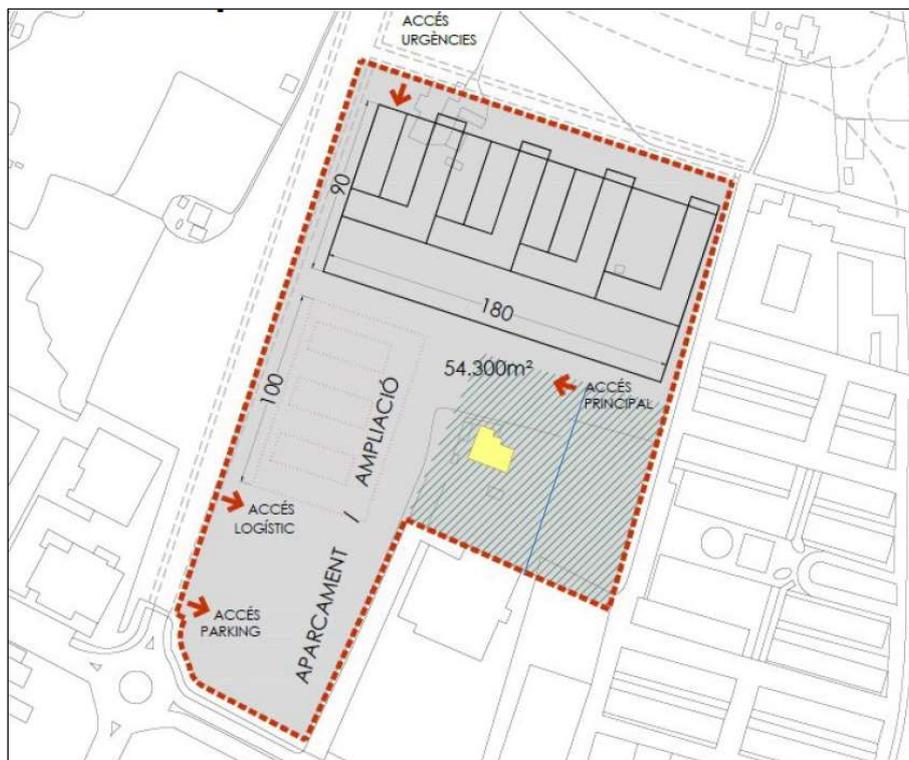


Fig. 2. Emplazamiento solar (propuesta alternativa 2023).

## 2. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA APORTADORA

Con vistas al establecimiento de los parámetros esenciales del modelo de simulación hidrológica que se presenta, se han analizado, como fase previa al desarrollo de otros trabajos comprendidos en el presente estudio, las características morfológicas e hidrológicas de la subcuenca considerada.

### 2.1. Caracterización morfológica

Las características morfológicas de la subcuenca que se ha obtenido son las que se necesitarán posteriormente en el modelo hidrológico, esto es:

- La superficie se obtiene mediante herramientas GIS (*Geographical Information System*) del mapa de cuencas creado a partir de los ortofotomapas a escala 1/5.000 del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña.
- La longitud de los tramos de transporte se ha capturado del mapa de la red hidrológica proporcionado por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) que, para la realización de este estudio particular, hemos extraído.
- Otros datos extraídos del proyecto INUNCAT elaborado por la *Agència Catalana de l'Aigua* (ACA, Generalitat de Catalunya) y la propia Confederación Hidrográfica del Ebro (ACA, 2017).
- El desnivel de los tramos se ha obtenido del mencionado estudio INUNCAT (ACA, 2017).

El tiempo de concentración de una cuenca ( $T_c$ ), se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado de la misma, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante.

El tiempo de concentración de la cuenca es un concepto muy importante porque, en los modelos lluvia-escorrentía, la duración de la lluvia se asume igual al tiempo de concentración de la cuenca, puesto que es para esta duración cuando la totalidad de la cuenca está aportando al proceso de escorrentía, por lo cual se espera que se presenten los caudales máximos. Las diversas metodologías existentes para determinar el tiempo de concentración de una cuenca a partir de sus parámetros morfométricos, se determinan a partir de ajustes empíricos de registros hidrológicos fiables.

En la literatura especializada existen múltiples expresiones empíricas para el cálculo del tiempo de concentración propuestas por diferentes autores, como: Témez (1991, 2003), Williams, Kirpich (1940), Agres, California Couverts Practice, Giandotti (1934), S.C.S., (1986) (Ecuación de retardo), Ventura-Heras (1964), Bransby-Williams (1922), Passini (1914), Izzard (1946), Federal Aviation Administration (1970), De Cormack, Ecuaciones de onda cinemática de Morgali y Linsley (1965), Dirección General de Carreteras (1990), Aron y Erborge (1973), Rziha (1876) y Pérez (1985), Carter (1961), Jonhstone y Cross (1949), Wisnovszky (1958), Chow (1962), Ribeiro (1960), Dooge (1973), Michailidi *et al.* (2018) y otros. Partiendo de estas características, se obtienen datos de la cuenca y el tiempo de concentración de la misma. Para determinar el tiempo de concentración de cada subcuenca se han considerado en nuestro trabajo dos fórmulas diferentes, la de California, recomendada, en su día, por la Instrucción de Carreteras (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1989) y la propuesta por Témez en las Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas (CEDEX, 2000), cuyas expresiones matemáticas son las siguientes:

$$T_c = (0,871 \times L^3 / H)^{0,385} \quad \text{Fórmula de California.}$$

$$T_c = 0,30 \times (L / J^{0,25})^{0,76} \quad \text{Fórmula de Témez.}$$

Donde las variables intervinientes son:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_c = \text{Tiempo de concentración (horas).} \\ L = \text{Longitud de la cuenca (km).} \\ H = \text{Desnivel existente entre la cabecera y el punto de desagüe de la cuenca (m).} \\ J = \text{Pendiente media del cauce principal (m/m).} \end{array} \right.$$

La expresada fórmula de California limitará su campo de aplicación a cuencas tributarias de extensión inferior a 5.000 ha. Dicha expresión puede, también, adoptar la siguiente configuración analítica (Franquet, 2001):

$$T_c = 0'0195 \times \left( \frac{L}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \right)^{0'77}, \text{ donde, en este caso, las variables se expresan en}$$

las siguientes unidades:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_c = \text{Tiempo de concentración, en minutos.} \\ L = \text{Longitud de la cuenca (en m).} \\ H = \text{Desnivel existente entre la cabecera y el punto de desagüe de la cuenca (en m).} \end{array} \right.$$

Por lo que se refiere a la fórmula de Témez (1991) digamos que encuentra su mejor aplicabilidad en el caso normal de cuencas aportadoras en las que predomine el tiempo de recorrido del flujo analizado por una red de cauces definidos (Franquet, 2005).

## 2.2. Caracterización hidrológica

Resulta esencial, para la caracterización de las cuencas, el conocimiento de su comportamiento hidrológico, que nos permite calcular la escorrentía superficial o precipitación eficaz en relación con la lluvia total. De entre los distintos métodos habituales para representar el comportamiento hidrológico del terreno, se ha elegido el del número de curva, propuesto por el *Soil Conservation Service* del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2024).

Los elementos esenciales del citado método del número de curva del S.C.S., que permiten cuantificar la intercepción, la retención, la infiltración y la escorrentía, son: la permeabilidad del suelo, que depende de la litología y edafología del mismo, y las características de la cubierta vegetal, esencialmente la vegetación y el uso al que se destina el terreno.

### 2.2.1. Condiciones antecedentes de humedad

También juzgamos esencial para la aplicación del método descrito, en una tormenta dada, el conocimiento del estado de la saturación del suelo al inicio de dicha tormenta, a cuyos efectos se considerarán tres condiciones características, denominadas respectivamente tipos I, II y III. De ellas, la condición I, es equivalente a suelo muy seco o seco, y para estar de lado de la seguridad, no se utiliza en estudios de avenidas, ya que reduce extraordinariamente el coef. de escorrentía. Por eso, el análisis se centra en las condiciones II y III, que se refieren a suelo medio y húmedo, respectivamente. A saber:

| <b>Condición característica</b> | <b>Estación de latencia (mm)</b> | <b>Estación de crecimiento (mm)</b> |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| I seco                          | PT<13                            | PT<36                               |
| II medio                        | 13<PT<28                         | 36<PT<53                            |
| III húmedo                      | PT>28                            | PT>53                               |

Tabla 1. Condiciones antecedentes de humedad del S.C.S.

### 2.2.2. Condiciones de flujo preferente fluvial

La cartografía que se muestra a continuación contiene las áreas delimitadas para diferentes períodos de retorno así como la zona de flujo preferente, definidas en una serie de estudios elaborados por las autoridades competentes en materia de aguas, y la correspondiente información alfanumérica asociada. De acuerdo con el artículo 9.2 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, en estas zonas de flujo preferente sólo podrán ser autorizadas por el organismo de cuenca aquellas actividades no vulnerables frente a las avenidas y que no supongan una reducción significativa de la capacidad de desagüe de dicha vía.

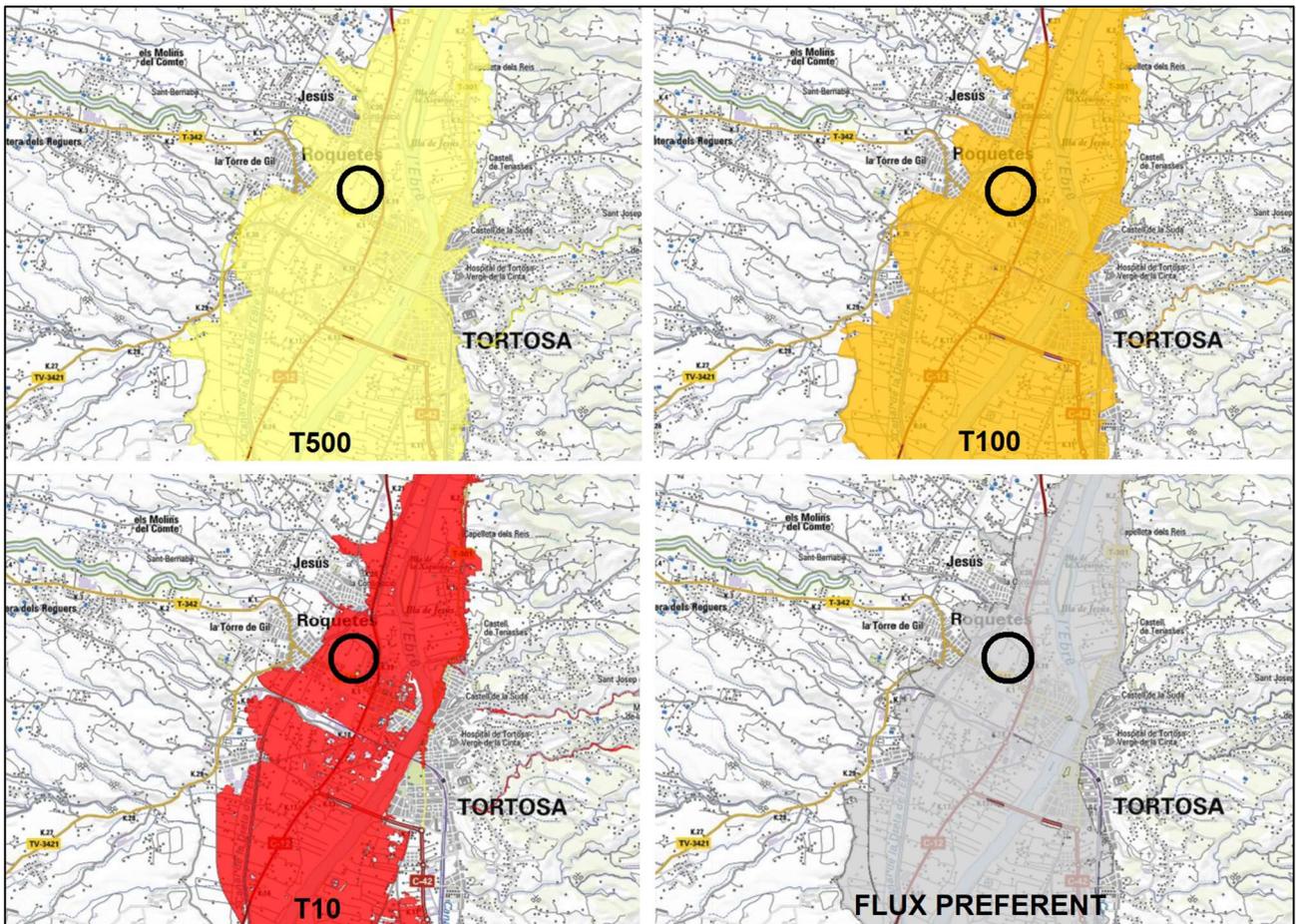


Fig. 3. Zonas de peligro de inundación fluvial (T500, T100, T10, flujo preferente).  
 Fuente: Mapa de Protección Civil de Cataluña. Generalitat de Catalunya.

### 2.2.3. Características del suelo

El método del número de curva del S.C.S. considera cuatro tipos de sustrato distintos, según su grado de permeabilidad:

**Suelos Tipo A:** Agrupa los sustratos permeables, es decir con un potencial de escorrentía mínimo.

**Suelos Tipo B:** Sustratos algo menos permeables que los del tipo anterior y, por lo tanto, con un mayor potencial de escorrentía superficial.

**Suelos Tipo C:** Sustratos que varían entre límites menos permeables a algo impermeables, con un potencial de escorrentía entre valores medio y alto.

**Suelos Tipo D:** Agrupa los sustratos con mayor impermeabilidad y, por tanto, con mayor potencial de escorrentía.

La delimitación de los distintos tipos de sustrato se ha basado en la información geológica disponible en la correspondiente página web (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2024).

#### 2.2.4. Cubierta vegetal y usos del suelo

Otro aspecto a tener en cuenta, a la hora de obtener el número de curva del S.C.S., es el tipo de cubierta del suelo y el uso al que se destina, habiéndose partido para ello de la información contenida en el Mapa de Clasificación de usos del suelo, disponible en la página *web* de la Confederación Hidrográfica del Ebro anteriormente citada.

#### 2.2.5. Análisis de la pendiente del terreno

El último factor que tiene incidencia en el número de curva de infiltración de un determinado territorio es la pendiente del terreno, considerándose al respecto dos clases diferentes: pendiente inferior o superior al 3%.

#### 2.2.6. Cálculo del número de curva

De las Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas del CEDEX, se obtienen los valores de Número de Curva del *Soil Conservation Service* (USDA, 2024) con condiciones de humedad II y III en la zona de estudio. Esto es:

|   |
|---|
| Valor CN del S.C.S. en Tortosa. Condición II = 60.<br>Valor CN del S.C.S. en Tortosa. Condición III = 79. |
|---|

### 2.3. Estudio pluviométrico

En la cuenca del Bajo Ebro, el estudio de las lluvias máximas diarias se ha llevado a cabo partiendo de los datos contenidos en el libro titulado “Máximas lluvias diarias en la España peninsular”, de la Dirección General de Carreteras (Ministerio de Fomento, 1999), que ofrece los siguientes resultados:

| <b>Precipitaciones Máximas en 24 h, según Período de Retorno (años)</b> |                          |
|---|--------------------------|
| T = 2,33 años   | PM = 91,6 mm (71'5 mm)   |
| T = 5 años  | PM = 116,8 mm (98'7 mm)  |
| T = 10 años   | PM = 142,2 mm (120'9 mm) |
| T = 25 años   | PM = 178,0 mm (149'0 mm) |
| T = 50 años   | PM = 206,4 mm (169'8 mm) |
| T = 100 años  | PM = 237,5 mm (190'5 mm) |
| T = 500 años  | PM = 314,9 mm (238'3 mm) |
| T = 1.000 años  | PM = 350,8 mm (258'8 mm) |

Tabla 2. Precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes períodos de retorno.

Las PM señaladas se refieren a la media ponderada tomada a partir de un modelo digital en malla con paso de 2'5 km, circunscrita a la zona de estudio. A



Analysis of Variance:

|            | DF | Sum of Squares | Mean Square |
|------------|----|----------------|-------------|
| Regression | 1  | 38090,499      | 38090,499   |
| Residuals  | 9  | 21,221         | 2,358       |

F = 16154,24953      Signif F = ,0000

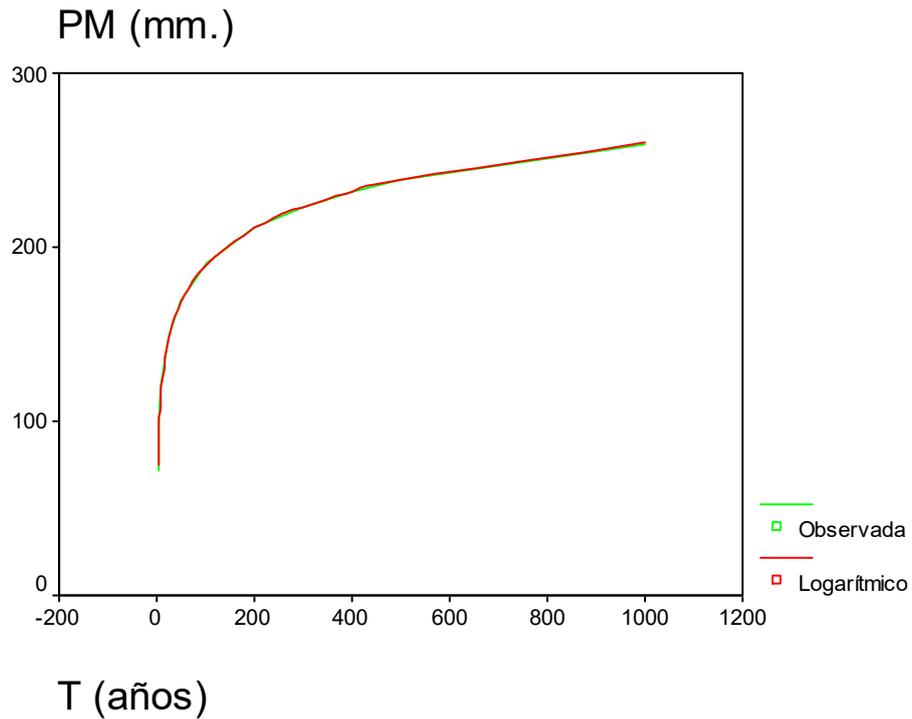
----- Variables in the Equation -----

| Variable   | B         | SE B     | Beta    | T       | Sig T |
|------------|-----------|----------|---------|---------|-------|
| T          | 30,545953 | ,240331  | ,999722 | 127,099 | ,0000 |
| (Constant) | 49,056959 | 1,118654 |         | 43,854  | ,0000 |

Así pues, se obtiene la siguiente función de ajuste semilogarítmica:

$$PM = 49'057 + 30'546 \cdot \ln T$$

Con la siguiente representación gráfica:



### Estimación curvilínea – (INUNCAT)

La tabla correspondiente de datos es la siguiente:

| T (años) | PM (mm) |
|----------|---------|
| 2,33     | 91,6    |
| 5,00     | 116,8   |
| 10,00    | 142,2   |
| 25,00    | 178     |
| 50,00    | 206,4   |
| 100,00   | 237,5   |
| 200,00   | -       |
| 300,00   | -       |
| 400,00   | -       |
| 500,00   | 314,9   |
| 1.000,00 | 350,8   |

Dependent variable.. **PM (mm)**

Method.. **SEMI-LOGARITH**

Listwise Deletion of Missing Data

Multiple R                   ,99747  
R Square                     ,99494  
Adjusted R Square         ,99410  
Standard Error             7,09534

Analysis of Variance:

|            | DF | Sum of Squares | Mean Square |
|------------|----|----------------|-------------|
| Regression | 1  | 59403,032      | 59403,032   |
| Residuals  | 6  | 302,063        | 50,344      |

F = 1179,94622                   Signif F = ,0000

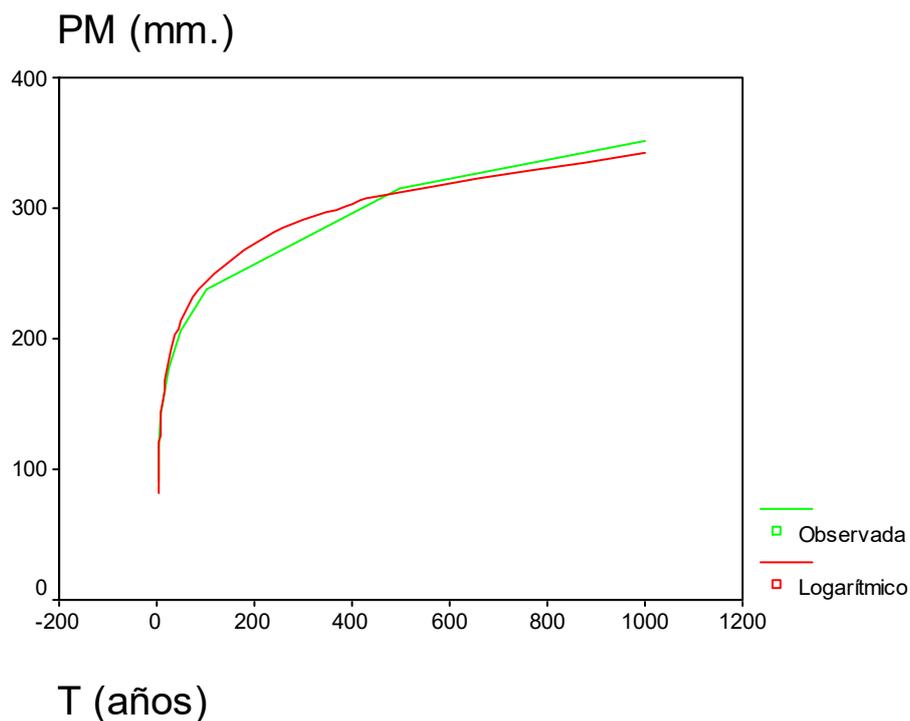
----- Variables in the Equation -----

| Variable   | B         | SE B     | Beta    | T      | Sig T |
|------------|-----------|----------|---------|--------|-------|
| T          | 42,966007 | 1,250817 | ,997467 | 34,350 | ,0000 |
| (Constant) | 45,713103 | 5,266424 |         | 8,680  | ,0001 |

Así pues, se obtiene la función de ajuste semilogarítmica:

$$PM = 45'713 + 42'966 \cdot \ln T$$

Con la siguiente representación gráfica:



## 2.4. Modelización hidrológica

Sacamos los datos del proyecto INUNCAT (ACA, 2017), donde la modelización hidrológica se ha llevado a cabo mediante la aplicación de un modelo de simulación del proceso de precipitación-escorrentía, basado en el programa HEC-1, desarrollado por el USACE, Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (Centro de Ingeniería Hidrológica, 2024).

El programa está diseñado para simular la respuesta de una cuenca a la precipitación, determinando dicha respuesta a través de una combinación de mecanismos hidráulicos e hidrológicos interconectados. Cada uno de estos mecanismos constituye uno de los componentes del programa y se refiere a un aspecto del proceso precipitación – escorrentía. Cada componente requiere la definición de un conjunto de parámetros que especifican sus características particulares, así como las relaciones matemáticas que describen los procesos físicos que tienen lugar. El resultado final consiste en la obtención del hidrograma en los puntos en que interesa su conocimiento.

La cuenca total se simula a través de un conjunto de zonas interconectadas, de tal forma que cada una de ellas puede representarse a través de parámetros que reflejan sus condiciones medias.

En síntesis, los procesos que tiene en cuenta el expresado programa son los siguientes:

- Generación de escorrentía. Para lo que resulta necesario definir el histograma de la tormenta de cálculo, que es el dato de entrada para la determinación de la escorrentía en una subcuenca parcial. La escorrentía superficial se obtiene sustrayendo del volumen total precipitado, en cada intervalo de tiempo, los volúmenes derivados de los efectos de infiltración, retención e intercepción. Esta escorrentía unitaria se convierte en el hidrograma generado por cada subcuenca a partir de la aplicación de las técnicas correspondientes al hidrograma unitario. No se han tenido en cuenta los caudales provenientes de infiltración de vuelta al cauce en la obtención del hidrograma, ni las pérdidas por evapotranspiración potencial en la obtención de la lluvia neta.
- Propagación de hidrogramas generados a través de los cauces. Los hidrogramas parciales de las diferentes subcuencas pueden sumarse para simular las confluencias, o bien modificarse para tener en cuenta los efectos de la propagación a lo largo de los cauces, para lo que pueden utilizarse diferentes técnicas, tales como el método de la onda cinemática<sup>3</sup>, el Muskingum-Cunge<sup>4</sup>, etc.

## 2.5. Caudales de avenida

El punto de estudio, en nuestro caso, corresponde al cód. 1043 del programa INUNCAT (“Ebro en Tortosa”), con una superficie de la cuenca tributaria de 4.374’3 km<sup>2</sup>. Los resultados obtenidos en la fase de simulación se resumen en las siguientes tablas, donde:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_x = \text{Caudal máximo (m}^3/\text{s) para un periodo de retorno de } x \text{ años.} \\ V_x = \text{Volumen total de avenida (hm}^3\text{) para un periodo de retorno de } x \text{ años.} \\ QE_x = \text{Caudal específico (m}^3/\text{s. km}^2\text{) para un periodo de retorno de } x \text{ años.} \end{array} \right.$$

<sup>3</sup> Desde el punto de vista físico, el supuesto de onda cinemática equivale a substituir una fórmula de flujo uniforme (tal como la de Manning o Chèzy) por la ecuación de movimiento. En esencia, dice que, en lo que respecta al momento, el flujo puede considerarse permanente. Sin embargo, la impermanencia del fenómeno se conserva mediante la tasa de aumento temporal en la ecuación de continuidad (Liggett, 1975). La implicación del supuesto de onda cinemática es que el flujo no permanente en canales abiertos se puede visualizar como una sucesión de flujos uniformes permanentes, con la pendiente de la superficie del agua manteniéndose constante en todo momento. Ello puede conciliarse con la realidad sólo si la inestabilidad del flujo es muy leve, es decir, si los cambios en el momento son realmente insignificantes en comparación con las fuerzas que impulsan el componente permanente del movimiento (gravedad y fricción).

<sup>4</sup> Es un método de enrutamiento del flujo de avenidas que mejora el método clásico de Muskingum mediante el uso de principios físicos y numéricos establecidos por Cunge (1969). A modo de comparación, se puede afirmar que, si bien el método de Muskingum clásico es de naturaleza hidrológica, el método Muskingum-Cunge tiene un claro sentido hidráulico. Resulta teóricamente más apropiado que el método Muskingum, particularmente para extensas aplicaciones de enrutamiento a escala de cuenca. Por lo tanto, se recomienda su uso en la práctica del modelado de ingeniería hidráulica e hidrológica, con alcance a nivel global. De hecho, constituye el único modelo numérico de la ecuación de la onda difusiva basado en un cálculo directo, sencillo y explícito, en el cual la solución es independiente del tamaño de la malla. Ningún otro método de enrutamiento de flujo puede reclamar este conjunto de propiedades.

|                      |                          |                      |                       |  |
|----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|--|
| Q <sub>2,33</sub> =  | 1.598 m <sup>3</sup> /s  | V <sub>2,33</sub> =  | 622 hm <sup>3</sup>   |  |
| Q <sub>5</sub> =     | 2.253 m <sup>3</sup> /s  | V <sub>5</sub> =     | 808 hm <sup>3</sup>   |  |
| Q <sub>10</sub> =    | 2.863 m <sup>3</sup> /s  | V <sub>10</sub> =    | 996 hm <sup>3</sup>   |  |
| Q <sub>25</sub> =    | 3.787 m <sup>3</sup> /s  | V <sub>25</sub> =    | 1.284 hm <sup>3</sup> |  |
| Q <sub>50</sub> =    | 4.618 m <sup>3</sup> /s  | V <sub>50</sub> =    | 1.527 hm <sup>3</sup> | QE <sub>50</sub> = 1,1 m <sup>3</sup> /s. km <sup>2</sup>  |
| Q <sub>100</sub> =   | 5.546 m <sup>3</sup> /s  | V <sub>100</sub> =   | 1.795 hm <sup>3</sup> | QE <sub>100</sub> = 1,3 m <sup>3</sup> /s. km <sup>2</sup> |
| Q <sub>500</sub> =   | 9.167 m <sup>3</sup> /s  | V <sub>500</sub> =   | 2.851 hm <sup>3</sup> | QE <sub>500</sub> = 2,1 m <sup>3</sup> /s. km <sup>2</sup> |
| Q <sub>1.000</sub> = | 11.857 m <sup>3</sup> /s | V <sub>1.000</sub> = | 3.613 hm <sup>3</sup> |  |

Tabla 3. Caudales de avenida del río Ebro en Tortosa (con influencia de los embalses).

## Estimación curvilínea – (con influencia de los embalses)

La tabla correspondiente de datos es la siguiente:

| T (años) | Q (m <sup>3</sup> /s) |
|----------|-----------------------|
| 2,33     | 1.598,00              |
| 5,00     | 2.253,00              |
| 10,00    | 2.863,00              |
| 25,00    | 3.787,00              |
| 50,00    | 4.618,00              |
| 100,00   | 5.546,00              |
| 500,00   | 9.167,00              |
| 1.000,00 | 11.857,00             |

Dependent variable.. Q (m<sup>3</sup>/s)

Method.. POWER

Listwise Deletion of Missing Data

Multiple R                   ,99825  
R Square                     ,99649  
Adjusted R Square         ,99591  
Standard Error             ,04358

Analysis of Variance:

|            | DF | Sum of Squares | Mean Square |
|------------|----|----------------|-------------|
| Regression | 1  | 3,2388121      | 3,2388121   |
| Residuals  | 6  | ,0113972       | ,0018995    |

F = 1705,05210                   Signif F = ,0000

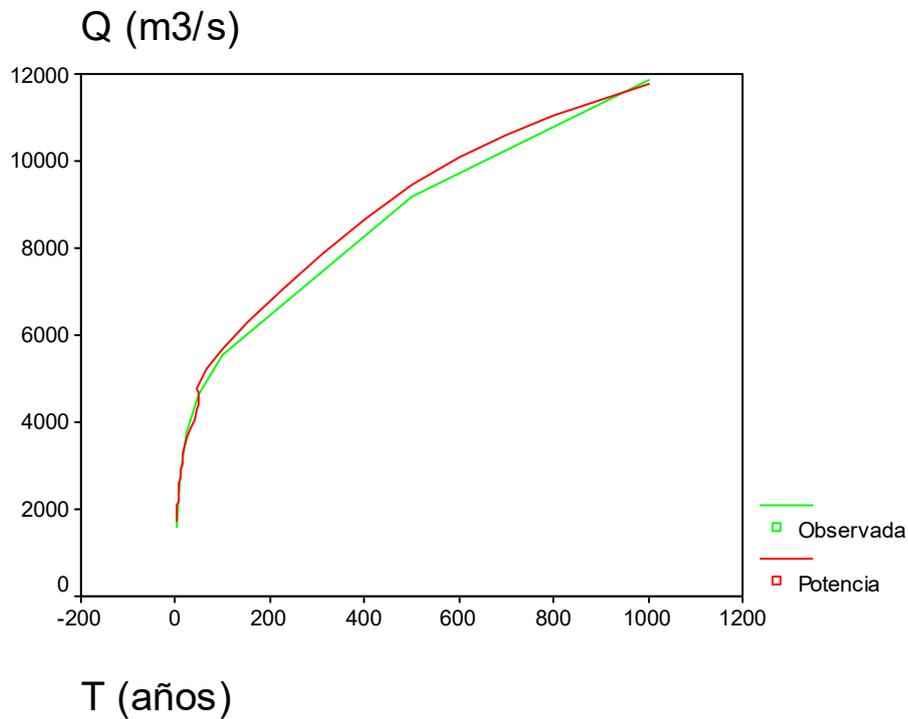
----- Variables in the Equation -----

| Variable   | B           | SE B      | Beta    | T      | Sig T |
|------------|-------------|-----------|---------|--------|-------|
| T          | ,317259     | ,007683   | ,998245 | 41,292 | ,0000 |
| (Constant) | 1316,529017 | 42,588964 |         | 30,912 | ,0000 |

Así pues, se obtiene la siguiente función de ajuste potencial:

$$Q = 1.316'529 \cdot T^{0'31726}$$

Con la siguiente representación gráfica:



Por otra parte, considerando las aportaciones en régimen natural, se tiene lo siguiente:

|               |                               |               |                      |   |
|---------------|-------------------------------|---------------|----------------------|---|
| $Q_{2'33} =$  | $2.101 \text{ m}^3/\text{s}$  | $V_{2,33} =$  | $634 \text{ hm}^3$   |   |
| $Q_5 =$       | $3.028 \text{ m}^3/\text{s}$  | $V_5 =$       | $833 \text{ hm}^3$   |   |
| $Q_{10} =$    | $3.923 \text{ m}^3/\text{s}$  | $V_{10} =$    | $1.033 \text{ hm}^3$ |   |
| $Q_{25} =$    | $5.204 \text{ m}^3/\text{s}$  | $V_{25} =$    | $1.326 \text{ hm}^3$ |   |
| $Q_{50} =$    | $6.264 \text{ m}^3/\text{s}$  | $V_{50} =$    | $1.527 \text{ hm}^3$ | $QE_{50} = 1,4 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$  |
| $Q_{100} =$   | $7.419 \text{ m}^3/\text{s}$  | $V_{100} =$   | $1.842 \text{ hm}^3$ | $QE_{100} = 1,7 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$ |
| $Q_{500} =$   | $11.735 \text{ m}^3/\text{s}$ | $V_{500} =$   | $2.904 \text{ hm}^3$ | $QE_{500} = 2,7 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$ |
| $Q_{1.000} =$ | $14.784 \text{ m}^3/\text{s}$ | $V_{1.000} =$ | $3.669 \text{ hm}^3$ |   |

Tabla 4. Caudales de avenida del río Ebro en Tortosa (régimen natural).

### Estimación curvilínea – (régimen natural)

La tabla correspondiente de datos es la siguiente:

| T (años) | Q (m <sup>3</sup> /s) |
|----------|-----------------------|
| 2,33     | 2.101,00              |
| 5,00     | 3.028,00              |
| 10,00    | 3.923,00              |
| 25,00    | 5.204,00              |
| 50,00    | 6.264,00              |
| 100,00   | 7.419,00              |
| 500,00   | 11.735,00             |
| 1.000,00 | 14.784,00             |

Dependent variable.. Q (m<sup>3</sup>/s)                      Method.. POWER

Listwise Deletion of Missing Data

Multiple R                      ,99586  
R Square                         ,99174  
Adjusted R Square             ,99037  
Standard Error                 ,06480

Analysis of Variance:

|            | DF | Sum of Squares | Mean Square |
|------------|----|----------------|-------------|
| Regression | 1  | 3,0266186      | 3,0266186   |
| Residuals  | 6  | ,0251955       | ,0041993    |

F =            720,75139                      Signif F =            ,0000

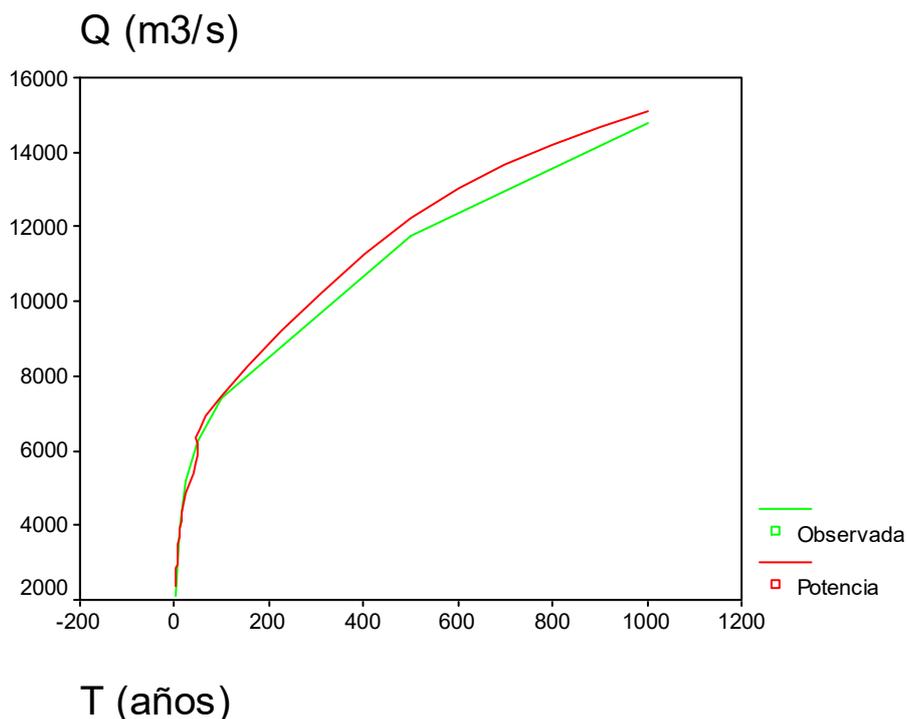
----- Variables in the Equation -----

| Variable   | B           | SE B      | Beta    | T      | Sig T |
|------------|-------------|-----------|---------|--------|-------|
| T          | ,306690     | ,011424   | ,995863 | 26,847 | ,0000 |
| (Constant) | 1817,241122 | 87,406002 |         | 20,791 | ,0000 |

Así pues, se obtiene la función de ajuste potencial:

$$Q = 1.817'241 \cdot T^{0'30669}$$

Con la siguiente representación gráfica:



De los datos de caudales de aportación del Segre y el Cinca se llega a conclusiones similares en los periodos de retorno bajos y fiables estadísticamente.

| <b>Datos</b>               | <b>19.966</b>                     |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Años equiv.                | 54,7                              |
| <b>Periodos de retorno</b> | <b>Caudales (m<sup>3</sup>/s)</b> |
| T = 55 años                | Q > 3.000                         |
| T = 11 años                | Q > 2.000                         |
| T = 2 años                 | Q = 1.212                         |
| T = 1 año                  | Q = 1.045                         |
| T = 9,7 meses              | Q > 1.000                         |
| T = 6 meses                | Q = 859                           |
| T = 3 meses                | Q = 687,1                         |
| T = 2 meses                | Q = 594,7                         |
| T = 1,2 meses              | Q > 500                           |

Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro. Q (expresados en m<sup>3</sup>/s).

Tabla 5. Resumen de datos procedentes de la C.H.E.

### 3. ESTUDIO GEOMORFOLÓGICO

Actualmente, los límites de la zona inundable se corresponden en general con la superficie ocupada por la terraza baja fluvial que va variando de extensión y altura sobre el lecho, según la situación geográfica en la cuenca, tal como puede observarse en los planos topográficos correspondientes. El límite superior está definido por el primer escalón de la terraza media.

Los conos de deyección, las zonas palustres y deltaicas poseen su morfología propia y característica. Los barrios medievales de las ciudades y pueblos, como es el caso de Tortosa, se han mantenido por encima del nivel de la terraza baja, poniendo en práctica la experiencia adquirida a lo largo de centenares de años.

El urbanismo de la época moderna y contemporánea, en algunas ocasiones, ha posibilitado la ocupación de amplios sectores de las zonas inundables. Incluso las redes viarias, en algunos casos, también ocupan, invaden y obstaculizan los cauces de las avenidas del río, pudiendo provocar serias consecuencias, por lo que procede efectuar el análisis que aquí se presenta.

La ocupación de zonas inundables puede afectar, en definitiva, al equilibrio natural del acuífero, de los recursos hídricos, de la capacidad depuradora natural del agua, de los entornos biológicos y provocar incluso la transformación del paisaje.

#### 4. INFRAESTRUCTURAS: PUENTES

No hay ningún puente situado en las proximidades de la zona de estudio que le afecte a efectos de su inundabilidad. No obstante, los situados aguas abajo hasta la desembocadura del río en el mar Mediterráneo quedan definidos en la tabla y figura siguientes, habiendo reflejado las coordenadas del centro de la infraestructura y la anchura del cauce del río bajo la misma:

| Ref. | Denominación del puente<br>(término municipal) | Coordenadas UTM<br>(m) |           | Anchura<br>cauce (m) |
|------|--|------------------------|-----------|----------------------|
|      |  | X                      | Y         |                      |
| 1    | “Pont de l’Estat” (Tortosa)                    | 290.812                | 4.520.975 | 129                  |
| 2    | Del ferrocarril (Tortosa)                      | 290.599                | 4.520.605 | 147                  |
| 3    | Del “Bimil·lenari” (Tortosa)                   | 290.197                | 4.519.952 | 116                  |
| 4    | Del “gasoducto” (Campredó-Tortosa)             | 294.583                | 4.513.728 | 205                  |
| 5    | Del “tren” (Amposta)                           | 295.087                | 4.511.685 | 172                  |
| 6    | De la “autopista AP-7” (Amposta)               | 295.120                | 4.511.424 | 195                  |
| 7    | El “puente colgante” (Amposta)                 | 295.730                | 4.509.916 | 124                  |
| 8    | De la “N-340” (Amposta)                        | 296.549                | 4.509.338 | 320                  |
| 9    | “Lo passador” (Deltebre - Sant Jaume)          | 307.194                | 4.509.399 | 215                  |

Tabla 6. Puentes sobre el río Ebro situados aguas abajo de la zona de estudio.

Debe tenerse en cuenta que la totalidad de estas infraestructuras puede considerarse incluida en la zona de Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT), siempre comprendida aguas abajo del denominado “Pont de l’Estat”.

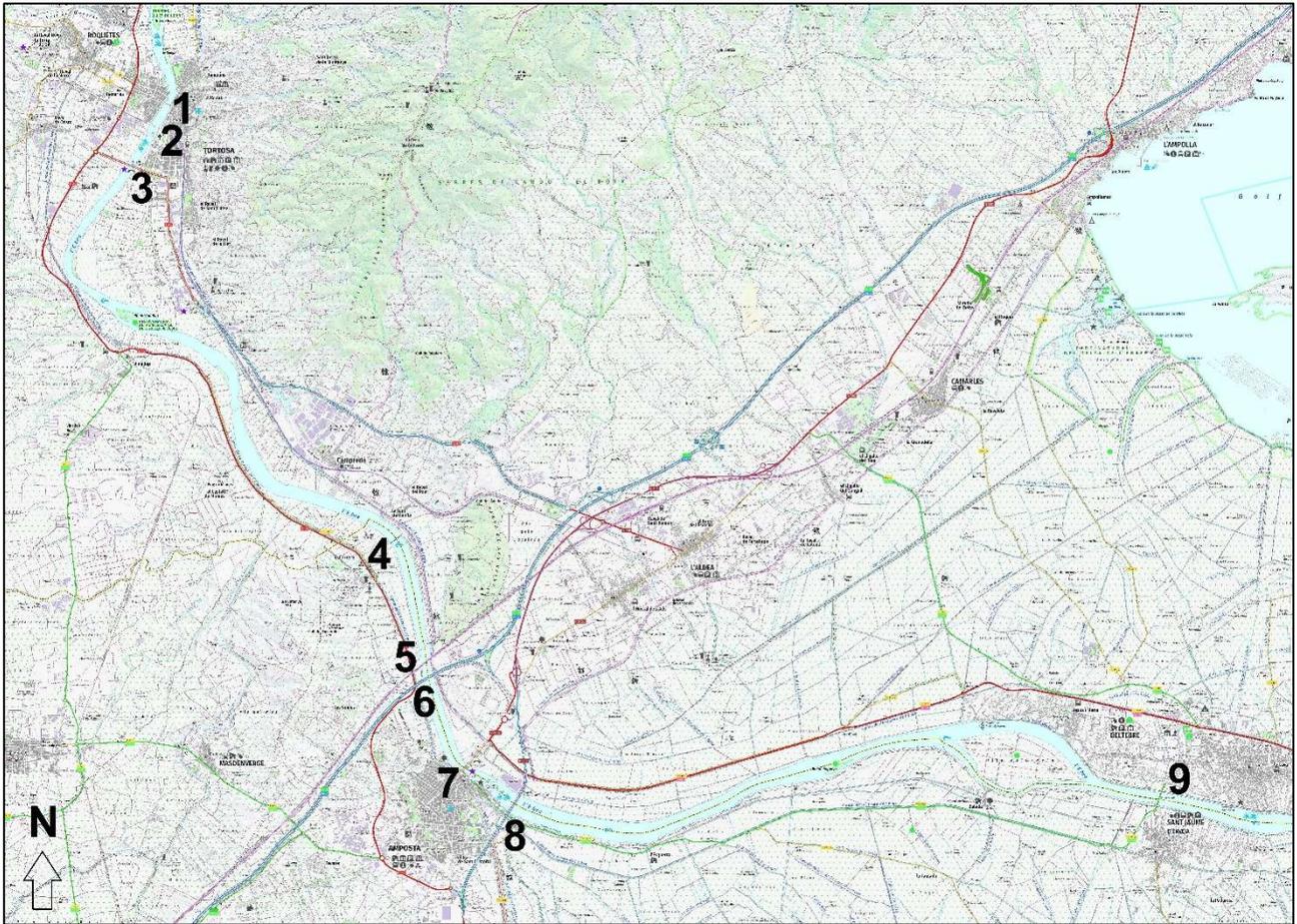


Fig. 4. Puentes sobre el río Ebro situados aguas abajo de la zona de estudio.

Prácticamente, a la altura transversal de la zona de estudio, se encuentra situado el “Pont de l’Estat” a una distancia de 900 metros de la misma.

## 5. CÁLCULO HIDRÁULICO

Se lleva a cabo mediante la modelización realizada en el programa INUNCAT con el software HEC-RAS versión 3.0.1 de enero de 2001, con las hipótesis de partida asumidas siguientes:

- Flujo estacionario.
- Flujo gradualmente variado.
- Flujo unidimensional en la dirección del río Ebro.
- Pendientes pequeñas, menores a 1/10. Así pues, el coseno de  $\varphi$  es prácticamente uno y el calado es suficientemente representativo de la altura de presión.
- Contornos rígidos. No se admite ni erosión ni sedimentación en el lecho.
- Pérdidas de fricción estimadas por la fórmula de Manning-Strickler (1923) y contrastadas con la formulación de Franquet (2003).
- No se contempla el transporte sólido o de sedimentos.

Al estudiar el movimiento de los líquidos reales en los cauces abiertos, el flujo total se considera como un gran tubo de corriente con velocidad media  $V$  en cada sección transversal. La energía cinética por unidad de peso viene dada por  $V^2/2 \cdot g$ . Ahora bien, al distribuirse irregularmente las velocidades en cada punto de la sección considerada, el valor  $V^2/2 \cdot g$  no coincide con la media de los valores de la energía cinética de cada punto. Con estas hipótesis de trabajo, veamos que la conocida ecuación básica de la conservación de la energía, entre dos secciones de flujo unidimensional, es la siguiente:

$$Z_1 + Y_1 + \alpha_1 \times (V_1^2 / (2 \times g)) = Z_2 + Y_2 + \alpha_2 \times (V_2^2 / (2 \times g)) + h_e \quad (\text{Bernouilli})$$

Siendo para cada sección:

- Z (m): Elevación del fondo de la sección transversal respecto a la cota de referencia.
- Y (m): Calado del agua de la sección transversal.
- $\alpha$ : Coeficiente de energía (Coriolis) que tiene en cuenta la no uniformidad de la distribución de velocidades en la sección.
- V (m/s): Velocidad media del flujo en la sección.
- g (m/s<sup>2</sup>): Aceleración de la gravedad = 9'81.
- h<sub>e</sub> (m): Pérdida de energía entre las secciones.

Esta pérdida de carga o energía se calcula mediante la expresión:

$$h_e = L \times S + C [\alpha_1 \times (V_1^2 / (2 \times g)) - \alpha_2 \times (V_2^2 / (2 \times g))]$$

Siendo las variables:

- L (m): Longitud del tramo.
- S (m/m): Pendiente de fricción.
- C: Coeficiente de pérdidas por expansión o contracción.

Se supone que la pérdida de altura por fricción a velocidad y radio hidráulicos dados es la misma que tendría un flujo uniforme que tuviera esta velocidad y este radio hidráulico. Por tanto la pendiente motriz se calcula mediante la formulación clásica de Manning-Strickler (1923) contrastada con la de Franquet (2003), citadas ambas en la bibliografía.

## 6. EL NÚMERO DE FROUDE

Tratando de contar la historia de la forma más veraz posible, veamos que el ingeniero inglés William Froude (1810-1879) no había desarrollado directamente el famoso número que lleva su nombre. Además de esto, el trabajo más importante de Froude, publicado en el año 1871, trató no precisamente de la hidráulica de los canales abiertos, sino de la estabilidad hidrodinámica de los barcos, cuestión ésta

de importancia fundamental en la ingeniería naval. Sin embargo, las contribuciones científicas de Froude eran de tal importancia que su autor fue muy respetado por sus contemporáneos. Con el fin de honrar su memoria, aparentemente sus seguidores le atribuyeron el concepto que ahora lleva su nombre. Por tanto, la moraleja de la historia *ad hoc* podría ser que “la gloria de un gran hombre depende no tanto de sus propios actos, sino de los actos de sus seguidores”.

La mayor parte de los flujos de agua que tienen lugar en canales abiertos, o bien como consecuencia del desbordamiento de ríos, son turbulentos. Los métodos de análisis del flujo en canales abiertos no se han desarrollado tanto como los de flujo en conductos cerrados o a presión. Las ecuaciones comúnmente usadas suponen turbulencia completa, con una carga proporcional al cuadrado de la velocidad. Como todos los datos experimentales de flujo en canales abiertos corresponden al flujo de agua, las ecuaciones deben generar valores razonables en el caso de líquidos con baja viscosidad (Franquet, 2019).

El flujo en canales abiertos se presenta de varias formas, desde el flujo de agua que tiene lugar sobre una superficie de un campo agrícola durante un aguacero o inundación, en una urbanización, infraestructura o polígono industrial, hasta el flujo con tirante constante a lo largo de un gran canal de forma prismática. Puede ser clasificado como uniforme o no uniforme y a régimen permanente o régimen no permanente. El flujo *uniforme a régimen permanente* se presenta en canales inclinados largos de sección constante en donde se ha alcanzado la velocidad terminal, es decir, donde la pérdida de carga debida al flujo turbulento es suministrada por la reducción en la energía potencial debida a la disminución uniforme en la elevación del fondo del canal. El tirante de un flujo uniforme a régimen permanente recibe el nombre de “tirante normal”. En el flujo uniforme a régimen permanente la descarga es constante y el tirante es constante en todo el canal. Existen varias ecuaciones usuales para determinar las relaciones existentes entre la velocidad promedio, la forma de la sección transversal, su tamaño, su rugosidad y su pendiente o inclinación del fondo del canal (Franquet, 2019).

El flujo *no uniforme* se caracteriza por el hecho de que la superficie libre del líquido no es paralela a la solera. Para el estudio teórico, se clasifica en flujo gradualmente no uniforme y flujo con variación rápida, no existiendo en la práctica una línea de separación bien definida entre ambos. Si el flujo varía gradualmente, el cambio de las condiciones del mismo se verifica a lo largo de una longitud considerable, siendo necesario tener en cuenta el rozamiento con las paredes del cauce. En la mayoría de los casos, el flujo en los ríos es de esta naturaleza, debido a la irregularidad de las secciones longitudinales (pendientes) y transversales (Torres, 1970), aunque una simplificación del estudio teórico conduce a la distribución uniforme de las velocidades.

El flujo *no uniforme a régimen permanente* ocurre en cualquier canal irregular en donde la descarga no varía con el tiempo; también se presenta en

canales regulares cuando el tirante, y por lo tanto la velocidad promedio, cambian de una sección transversal a otra. Para cambios graduales en el tirante o la sección, flujo que se denomina *gradualmente variado*, existen métodos numéricos (por integración o de paso) que calculan el tirante de flujo a partir del conocimiento de la descarga, las dimensiones y la rugosidad del canal y las condiciones en una sección transversal determinada. Para aquellas partes de un canal en donde se tienen cambios muy pronunciados en el tirante y la velocidad en un tramo muy corto, como los que se presentan en la transición de una sección transversal a otra, frecuentemente se estudian diferentes modelos.

El flujo *uniforme a régimen no permanente* rara vez ocurre en el flujo de los canales abiertos. Por último, el flujo *no uniforme a régimen no permanente* ocurre a menudo pero resulta difícil de analizar; el movimiento ondulatorio es un ejemplo de este tipo de flujo y su análisis es muy complejo si se consideran los efectos de la fricción.

El número de Reynolds (1903) y los términos “laminar” y “turbulento” no bastan para caracterizar todas las clases de flujo que pueden darse en los canales abiertos, como sucede contrariamente en los conductos forzados o a presión.

En los valores de la energía específica  $H$  intervienen dos sumandos:  $h$  (energía potencial, calado o profundidad hidráulica) y  $V^2/2g$  (energía cinética). Cuando los calados son pequeños, el segundo supera al primero, pero si crece este valor llega pronto a ser mayor que la altura de velocidad. Para tener una idea de la mayor o menor rapidez de una corriente, que nos permita, v. gr., evaluar su peligrosidad si afectara a zonas urbanizadas o de posible urbanización como es el caso de la que nos ocupa, comparada con su calado, podría formarse el cociente

entre ambas magnitudes lineales, a saber:  $\frac{V^2/2g}{h}$ , con lo que obtendríamos una expresión adimensional que, cuanto mayor fuera, indicaría una más acusada preponderancia de la energía cinética sobre la potencial de la corriente en estudio. La adimensionalidad de la expresada fórmula se pone de manifiesto por:

$$\frac{V^2}{2gh} = \frac{L^2/T^2}{2 \times \frac{L}{T^2} \times L} = \frac{L^2}{2 \times L^2} = \frac{1}{2}, \text{ c.s.q.d.}$$

El mecanismo principal que sostiene el flujo en un canal abierto es la fuerza de gravitación. El parámetro que representa este efecto gravitacional es el denominado Número de Froude  $F_r$  (Mott, 2006), que puede expresarse de forma adimensional y viene dado generalmente por la raíz cuadrada del doble de la expresión anterior. Resulta altamente útil en los cálculos del resalto hidráulico, en el diseño de diversas estructuras hidráulicas, en el diseño de barcos y también podría resultar adecuado para evaluar la peligrosidad a la que nos hemos referido

anteriormente en situaciones de inundabilidad. Su expresión general, como es sabido, es:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$$

siendo:

- $h$  - parámetro de longitud o dimensión lineal característica (calado) [m]
- $V$  - parámetro de velocidad media de la sección del canal abierto [m/s]
- $g$  - aceleración de la gravedad [9.807 m/s<sup>2</sup>]

Cuando el calado de la corriente es el correspondiente al *régimen crítico*, es decir, si  $h = h_c$  (calado crítico), se tendrá que ( $V = V_c =$  velocidad crítica), o sea:

$$F_r = \frac{V_c}{\sqrt{g \cdot h_c}} = 1$$

El flujo hidráulico, en definitiva y teniendo en cuenta todos los casos que pueden presentarse, se clasifica a partir del  $F_r$  como:

- $F_r < 1$ ,  $h > h_c$ ,  $V < V_c$ . Flujo *subcrítico* o tranquilo, tiene una velocidad relativa baja y la profundidad es relativamente grande, prevaleciendo la energía potencial sobre la cinética. **Corresponde a un régimen de llanura, como es el caso que nos ocupa.**
- $F_r = 1$ ,  $h = h_c$ ,  $V = V_c$ . Flujo *crítico* o intermedio, que es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición existente entre los regímenes subcrítico y supercrítico.
- $F_r > 1$ ,  $h < h_c$ ,  $V > V_c$ . Flujo *supercrítico* o rápido, tiene una velocidad relativamente alta y poca profundidad donde prevalece la energía cinética. Es propio de cauces de gran pendiente, torrentes o ríos de montaña.

Uno de los efectos importantes de las presas con sus embalses es la laminación de las avenidas. El embalse se comporta como un inmenso depósito; en la medida en que aguas arriba del embalse afluyen caudales crecientes de agua como consecuencia de la llegada de una onda de avenida, el embalse se va llenando y, salvo que se tomen decisiones erradas en la operación de las compuertas de descarga, el caudal que sale de la presa será menor que el que llega, disminuyendo, en consecuencia, los daños que la avenida provocaría si el embalse no existiera (en régimen natural). Como resultado práctico de todo ello se tiene que, los caudales altos aguas abajo de una presa, son menos frecuentes después de la construcción y entrada en funcionamiento de la presa y su embalse asociado. Pues bien, con la modelización y formulación antedichas se han obtenido los siguientes resultados en la zona de estudio, teniendo en cuenta la influencia de los embalses:

$T = 500$  años;  $Q_{500} = 9.167 \text{ m}^3/\text{s}$   
 Elevación mínima del lecho = 1,0 m.s.n.m.  
 Cota de lámina de agua = 11,21 m.s.n.m.  
 Cota de lámina de agua en régimen crítico = 8,61 m.s.n.m.  
 Altura de la línea de energía = 11,60 m.s.n.m.  
 Pendiente de la línea de energía = 0,000471 (0,471‰).  
 Velocidad media = 1,68 m/s  
 Velocidad zona canal central = 3,37 m/s  
 Sección mojada = 5.454,33 m<sup>2</sup>.  
 Ancho de la lámina de agua = 1.185,65 m.  
 Número de Froude<sup>5</sup> al canal,  $F_r = 0,34$  (flujo lento o subcrítico)

Tabla 7. Resultados para una recurrencia de 500 años.

$T = 100$  años;  $Q_{100} = 5.546 \text{ m}^3/\text{s}$   
 Elevación mínima del lecho = 1,0 m.s.n.m.  
 Cota de lámina de agua = 9,01 m.s.n.m.  
 Cota de lámina de agua en régimen crítico = 5,76 m.s.n.m.  
 Altura de la línea de energía = 9,57 m.s.n.m.  
 Pendiente de la línea de energía = 0,000715 (0,715‰).  
 Velocidad media = 2,25 m/s  
 Velocidad zona canal central = 3,52 m/s  
 Sección mojada = 2.462,40 m<sup>2</sup>.  
 Ancho de la lámina de agua = 903,10 m.  
 Número de Froude al canal,  $F_r = 0,40$  (flujo lento o subcrítico)

Tabla 8. Resultados para una recurrencia de 100 años.

$T = 50$  años;  $Q_{50} = 4.618 \text{ m}^3/\text{s}$   
 Elevación mínima del lecho = 1,0 m.s.n.m.  
 Cota de lámina de agua = 8,19 m.s.n.m.  
 Cota de lámina de agua en régimen crítico = 5,23 m.s.n.m.  
 Altura de la línea de energía = 8,78 m.s.n.m.  
 Pendiente de la línea de energía = 0,000821 (0,821‰).  
 Velocidad media = 2,59 m/s  
 Velocidad zona canal central = 3,50 m/s  
 Sección mojada = 1.784,59 m<sup>2</sup>.  
 Ancho de la lámina de agua = 740,43 m.  
 Número de Froude al canal,  $F_r = 0,42$  (flujo lento o subcrítico)

Tabla 9. Resultados para una recurrencia de 50 años.

<sup>5</sup> El número de Froude es, sin duda alguna, el principio más fundamental de la hidráulica de los canales abiertos y ofrece una idea acerca de la mayor o menor rapidez de una corriente comparada con su calado. Se trata de una magnitud numérica adimensional que expresa la relación existente entre las fuerzas de inercia y las de gravedad: se define como la razón entre la velocidad media del flujo uniforme (Manning o Chèzy) y la celeridad relativa de perturbaciones superficiales pequeñas (la celeridad de Lagrange), con lo que se obtiene un parámetro que, cuanto mayor es, indica una más acusada preponderancia de la energía cinética sobre la energía potencial de la corriente y, en su consecuencia, una mayor peligrosidad.

El número de Froude se ha calculado para la zona del canal central, mediante la expresión clásica:  $F_r = V/\sqrt{gh}$ , siendo: V = velocidad zona canal central (m/s), g = aceleración de la gravedad (9'81 m/s<sup>2</sup>) y h = diferencia de cotas taquimétricas entre la lámina de agua y la elevación mínima del lecho (m).

En cauces abiertos como el que nos ocupa, como ya se ha apuntado, el flujo es subcrítico, crítico o supercrítico si su número de Froude es respectivamente menor, igual o mayor que la unidad. En el régimen lento, como resulta para los tres periodos de retorno aquí estudiados, la velocidad relativamente baja de la corriente en el canal es inferior a la celeridad o velocidad de propagación de una pequeña onda superficial y de gravedad (de pequeña altura) que se produjese estando el líquido en reposo, por lo que las ondas producidas por cualquier perturbación (transición o fenómeno local) pueden desplazarse aguas arriba y también aguas abajo del punto de localización de dicha infraestructura sanitaria.

## 7. SUSCEPTIBILIDAD A LA DINÁMICA TORRENCIAL

Complementariamente al estudio sobre los efectos fluviales del río Ebro, se trata aquí de avanzar en el conocimiento de los flujos torrenciales asociados (flujos hiperconcentrados y corrientes de sedimentación) tanto por lo que se refiere a su posibilidad de ocurrencia como a su distribución espacial. El análisis efectuado se enmarca en la Adenda al Contrato Programa III establecido entre la ACA y el ICGC para monitorizar las afectaciones de la Emergencia Climática durante el año 2022.

La Fase 1 del proyecto ICONS recoge la revisión y actualización de la capa de Conos de Deyección incluida en el proyecto denominado “Millora de la cartografia de zones potencialment inundables segons criteris geomorfològics”, realizado por la ACA y el ICGC el año 2008 y que se halla disponible (en el momento de realización de la Fase 1) en el portal de Protección Civil (*Riscos Naturals-Risc inundacions Capes incloses al pla INUNCAT*).

También convendría contemplar, a mayor abundamiento, las zonas inundables asociadas al resto de cauces subsidiarios que completan la red hidrográfica en el municipio, si bien la mayor afección por la inundabilidad aquí estudiada es la asociada al cauce principal del río Ebro.

En este sentido, el emplazamiento previsto de la infraestructura sanitaria resulta ser un área susceptible de inundación (ASI), estando asociada a un sistema hídrico susceptible de generar inundaciones procedentes del Barranco de la “Vall Cervera”, según criterios geomorfológicos y por aplicación del índice morfométrico-torrencial de Melton<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Dicho índice (IM) expresa la relación existente entre la diferencia de altura máxima y mínima, multiplicado por el área, donde Hmax y Hmin (en km) son, respectivamente, la cota taquimétrica de altura máxima y mínima de la microcuenca y S el área de la microcuenca expresada en km<sup>2</sup>.

Para el logro de una mejor comprensión del expresado fenómeno, se adjunta la figura siguiente, con el solar del hospital parcialmente afectado:

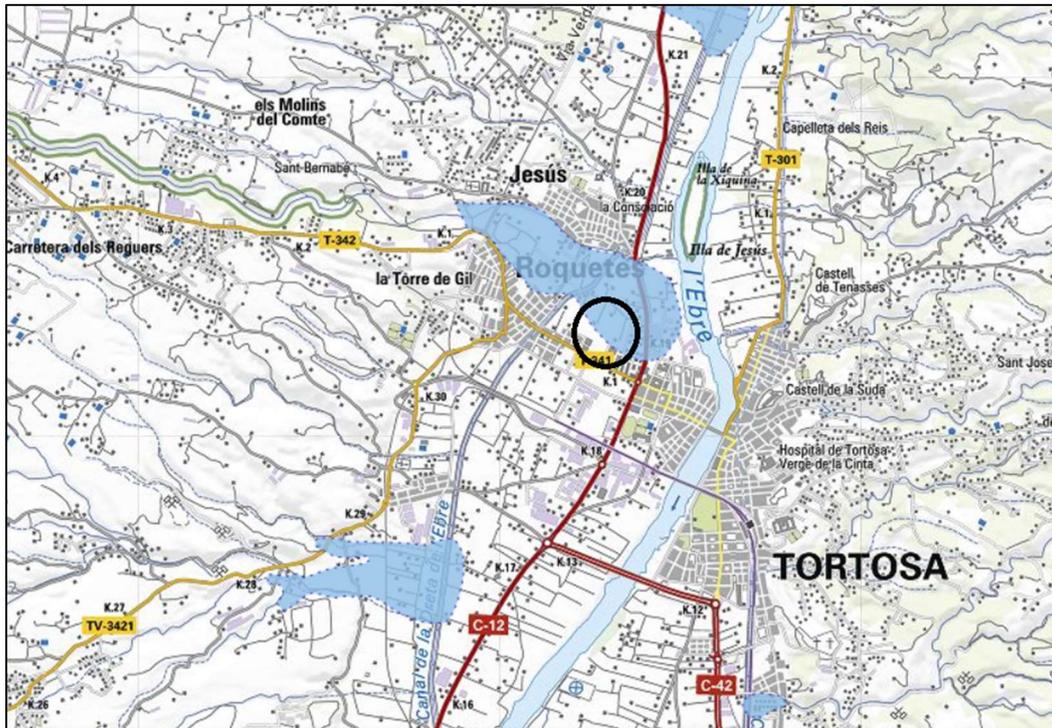


Fig. 5. Áreas susceptibles de inundación.

## 8. ASPECTOS TÉCNICOS A TENER EN CUENTA

La construcción de un hospital cerca de una zona inundable, como es el caso del aquí estudiado, presenta desafíos importantes que deben abordarse cuidadosamente para garantizar la seguridad de los pacientes y visitantes, el personal sanitario y la propia infraestructura. A continuación, se detallan algunos de los aspectos técnicos clave a considerar.

### 8.1. Evaluación del riesgo de inundación

- **Análisis histórico de inundaciones:** Es fundamental realizar un estudio exhaustivo del historial de inundaciones en el área, incluyendo la frecuencia, la severidad y la duración de los eventos pasados.
- **Mapas de inundaciones:** Consultar mapas de inundaciones oficiales y zonificaciones de riesgo, elaborados por organismos competentes, para identificar las áreas con mayor probabilidad de inundarse.
- **Estudios hidrológicos:** Realizar estudios hidrológicos detallados para determinar los niveles máximos de inundación esperados y su grado de peligrosidad (número de Froude u otros), considerando factores tales como precipitaciones extremas, crecidas fluviales y torrencialidad.

## 8.2. Medidas de mitigación de inundaciones

- **Muros de contención:** Construir, en caso de ser necesarios, muros de contención impermeables y resistentes alrededor del perímetro del hospital proyectado para evitar la entrada del agua de inundación.
- **Elevación del terreno:** Elevar el nivel del terreno del hospital si es preciso, mediante la aportación de material, creando un terraplén o pedraplén que proteja la estructura de las inundaciones.
- **Sistemas de drenaje:** Implementar sistemas de drenaje eficientes para evacuar rápidamente el agua de lluvia y las aguas pluviales del solar del hospital y sus inmediaciones.
- **Válvulas de retención:** Instalar válvulas de retención o unidireccionales en las tuberías de alcantarillado y desagüe para evitar el reflujó de aguas residuales contaminadas, durante un episodio de inundación.

## 8.3. Diseño y construcción resilientes

- **Materiales resistentes a la inundación:** Utilizar materiales de construcción más resistentes al agua y a la humedad, como hormigón armado, acero inoxidable y mampostería impermeable.
- **Protección de equipos críticos:** Ubicar los equipos eléctricos, electrónicos, mecánicos y de tecnología de la información en niveles elevados o en áreas selladas para protegerlos de daños producidos por agua.
- **Sistemas de respaldo de energía:** Implementar sistemas de respaldo de energía redundantes, como generadores diésel, para garantizar el suministro eléctrico en caso de cortes de energía durante una inundación.
- **Acceso y evacuación:** Diseñar planes de acceso y evacuación seguros y accesibles para pacientes, personal y visitantes en caso de una inundación, considerando rutas alternativas y zonas de refugio elevadas.

## 8.4. Planes de emergencia y gestión del riesgo

- **Plan de emergencia contra inundaciones:** Desarrollar un plan de emergencia integral que detalle los procedimientos a seguir antes, durante y después de una inundación, incluyendo protocolos de comunicación, alerta temprana, evacuación, respuesta a emergencias y recuperación.
- **Capacitación y simulacros:** Capacitar regularmente al personal del hospital en la implementación del plan de emergencia contra inundaciones y realizar simulacros periódicos para garantizar una respuesta efectiva en caso de producirse un evento real.

- **Monitoreo y alerta temprana:** Implementar sistemas de monitoreo hidrológico y meteorológico para detectar y alertar tempranamente sobre posibles amenazas de inundación, permitiendo la activación oportuna del plan de emergencia.
- **Gestión del riesgo a largo plazo:** Considerar el cambio climático y sus potenciales impactos en el riesgo de inundaciones para desarrollar estrategias de adaptación y mitigación a largo plazo.

## 9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

1ª) En el presente estudio se han marcado las hipótesis de cálculo hidrológico de la zona de estudio y se han obtenido los caudales de avenida representativos para los diferentes periodos de retorno o recurrencia (2'33, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 1.000 años), siempre aplicando el principio de prudencia. En este sentido, cabe resaltar que se han tomado en consideración, por ejemplo, unos valores de las precipitaciones máximas esperables diarias superiores a las que se deducen de nuestros propios trabajos (ver anterior epígrafe 2.3.). Por otra parte, si se comparan con los datos de las aportaciones del Segre-Cinca, añadiendo las aportaciones del embalse de Mequinenza, se verifican los resultados.

2ª) Con la modelización y formulación efectuadas, se han obtenido unos resultados del número de Froude, para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, teniendo en cuenta la influencia de los embalses, que se hallan comprendidos entre los valores 0,34 y 0,42, correspondientes a un flujo lento, subcrítico o tranquilo, prevaleciendo claramente la energía potencial sobre la cinética. Corresponden a un régimen de llanura, como era esperable desde el punto de vista geomorfológico, **lo que pone de manifiesto la escasa peligrosidad del tipo de inundabilidad que podría afectar, en su caso, a la zona de estudio donde se prevé la ubicación del expresado hospital universitario.**

3ª) Pese a las limitaciones contempladas por efecto de la inundabilidad de la zona de estudio, es posible contemplar ciertos desarrollos en las zonas en situación básica de urbanizadas, con arreglo a lo establecido en el artículo 9.ter del RDPH (Texto consolidado del R.D. 849/1986, de 11 de abril, publicada la última actualización en 12/09/2015), en las que con arreglo al artículo 21 (“Situaciones básicas del suelo”) del texto refundido de la ley estatal del suelo y rehabilitación urbana (Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de octubre, publicado en el BOE de 31/10/2015), a fecha de 30 de diciembre de 2016, resulta de aplicación un régimen específico, determinado en el artículo 9.ter del RDPH, que permite efectuar desarrollos en las mismas, si bien sujetos a ciertas limitaciones.

4ª) No obstante, tal como señala acertadamente la “Propuesta de Informe Urbanístico” de la CHE, de fecha 2/07/2024, dado que pueden existir circunstancias que condicionen los nuevos desarrollos urbanísticos del municipio de Tortosa, deberán ser las administraciones competentes en materias de territorio

y urbanismo (*Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya*) las que certifiquen la existencia de estos condicionantes y, en su caso, ponderen, contando con el informe de protección civil (**que, entre otras cuestiones de su competencia, debería poner de manifiesto la baja peligrosidad que se deduce del resultado obtenido, en el presente estudio hidrológico, del número de Froude**), la prevalencia de dichos condicionantes sobre el riesgo de inundabilidad que aquí se ha analizado. De este modo, deberán ser estas administraciones las que determinen, con arreglo al procedimiento establecido en el RDPH, la aplicabilidad del régimen especial establecido en el artículo 9 quater del citado Reglamento.

5ª) En el presente estudio de inundabilidad local, no se han tenido en cuenta los fenómenos de cambio climático<sup>7</sup>, disminución de la pluviometría por el denominado “efecto invernadero”, aumento de usos consuntivos en la cuenca y la posible construcción o recrecimiento de más embalses que los ya existentes a lo largo y ancho de la cuenca hidrográfica del río Ebro, quedándonos claramente, en todo momento, del lado de la seguridad. Y obteniendo, en su consecuencia, unas avenidas de mayor valor absoluto que el real para cada periodo de retorno o recurrencia estudiado.

6ª) En cualquier caso, construir un hospital cerca de una zona inundable requiere una evaluación exhaustiva del riesgo como la que aquí se lleva a cabo, la implementación de medidas de mitigación integrales, un diseño y construcción resilientes, la elaboración de planes de emergencia sólidos para garantizar la seguridad y la continuidad de la atención médica en caso de inundaciones, así como la gestión del riesgo a largo plazo.



---

<sup>7</sup> Al respecto, hay que tener en cuenta que, en 1974, dos científicos, el estadounidense Frank Rowland y el mexicano Mario Molina -ambos ganadores del premio Nobel de Química en 1995- descubrieron la disminución que se viene produciendo en la capa de ozono, principal responsable en evitar la penetración de la radiación solar en la superficie terrestre. Actualmente, la producción de los gases que provocan el llamado Efecto Invernadero (gases de invernadero, principalmente el dióxido de carbono) ha aumentado en relación a mediciones efectuadas en tiempos pasados. En nuestro caso, la Directiva de Inundaciones (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) reconoce el cambio climático como uno de los factores que están contribuyendo a aumentar la probabilidad de ocurrencia de las inundaciones, así como su impacto negativo, y exige que esta influencia se tenga en consideración tanto en la realización de la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) para la identificación de las zonas de mayor riesgo de la cuenca como en la elaboración de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRIs) y sus revisiones.

## RELACIÓN DE FIGURAS

Fig. 1. Situación.

Fig. 2. Emplazamiento solar (propuesta alternativa 2023).

Fig. 3. Zonas de peligro de inundación fluvial (T500, T100, T10, flujo preferente).

Fig. 4. Puentes sobre el río Ebro situados aguas abajo de la zona de estudio.

Fig. 5. Áreas susceptibles de inundación.

## RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones antecedentes de humedad del S.C.S.

Tabla 2. Precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes períodos de retorno.

Tabla 3. Caudales de avenida del río Ebro en Tortosa (con influencia de los embalses).

Tabla 4. Caudales de avenida del río Ebro en Tortosa (régimen natural).

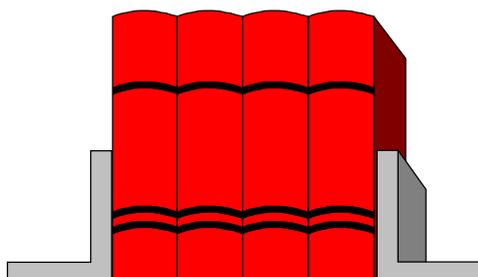
Tabla 5. Resumen de datos procedentes de la C.H.E.

Tabla 6. Puentes sobre el río Ebro situados aguas abajo de la zona de estudio.

Tabla 7. Resultados para una recurrencia de 500 años.

Tabla 8. Resultados para una recurrencia de 100 años.

Tabla 9. Resultados para una recurrencia de 50 años.



## - BIBLIOGRAFÍA Y FONDOS DOCUMENTALES -

|                                 |
|---------------------------------|
| (*) Bibliografía local.         |
| (**) Bibliografía general.      |
| (***) Bibliografía recomendada. |

- 1) AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGÜA (ACA). (2017). *Pla especial d'emergències per inundacions*. Generalitat de Catalunya. Barcelona.  
[https://interior.gencat.cat/web/.content/home/030\\_arees\\_dactuacio/proteccio\\_civil/plans\\_de\\_proteccio\\_civil/plans\\_de\\_proteccio\\_civil\\_a\\_catalunya/02-plans-especials/inuncat/document-pla-inuncat.pdf](https://interior.gencat.cat/web/.content/home/030_arees_dactuacio/proteccio_civil/plans_de_proteccio_civil/plans_de_proteccio_civil_a_catalunya/02-plans-especials/inuncat/document-pla-inuncat.pdf) (\*\*)
- 2) ALVAREZ-RODRÍGUEZ, J. y BARRANCO SANZ, M. L. (2009). “Cálculo del tiempo de concentración en hidrología con GRASS 6.2”. *Servei de sistemes d'informació geogràfica i teledetecció*. Universitat de Girona. III Jornades de SIG llibre. (\*\*)
- 3) CEDEX (Centro de Estudios Hidrográficos). (2000). *Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas*. 28005 Madrid. 76 p.  
<https://hispagua.cedex.es/node/92786> (\*\*)
- 4) CENTRO DE INGENIERÍA HIDROLÓGICA (Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU.) (2024). <https://www.wtech.es/hidrológica> (\*\*)
- 5) CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO (2024). *Mapa de Clasificación de usos del suelo*. <https://iber.chebro.es/sitebro/sitebro.aspx> (\*\*)
- 6) CUNGE, J. A. (1969). On the Subject of a Flood Propagation Computation Method (Muskingum Method), *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 205-230. (\*\*\*)
- 7) DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (1990). Instrucción de Carreteras 5.2-IC “Drenaje superficial”. Orden 14 mayo 1990. BOE núm. 123 Madrid. (\*\*\*)
- 8) FRANQUET BERNIS, J.M. (2001). *El vent i la pluja a les comarques meridionals de l'Ebre (Estudi de recurrència)*. Ed. Centro Asociado de la UNED. Cadup-Estudios. Tortosa, p. 48 y ss. (\*)
- 9) FRANQUET BERNIS, J.M. (2003). *Cinco temas de hidrología e hidráulica*. Ed. Bibliográfica Internacional, S.L. – Universitat Internacional de Catalunya (UIC). Tortosa. 594 p. (\*\*)
- 10) FRANQUET BERNIS, J.M. (2005). *Cálculo hidráulico de las conducciones libres y forzadas (Una aproximación de los métodos estadísticos)*. Ed. Bibliográfica Internacional, S.L. – Universitat Internacional de Catalunya. Tortosa. 590 p. (\*\*)

- 11) FRANQUET BERNIS, J.M. (2009). *El caudal mínimo medioambiental del tramo inferior del río Ebro*. Ed. Centro Asociado de la UNED. Cadup-Estudios. Tortosa. 344 p. (\*\*)
- 12) FRANQUET BERNIS, J.M. (2019). *Dimensionamiento y distribución de las conducciones hidráulicas*. Ed. Centro Asociado de la UNED. Cadup-Estudios. Tortosa. 970 p. (\*\*)
- 13) INSTITUT CARTOGRÀFIC I GEOLÒGIC DE CATALUNYA. (2024). *Base topogràfica y ortofotomapas de Cataluña a escala 1/5.000*. Barcelona. <https://www.icgc.cat/es/Datos-y-productos/Geoinformacio-cartografica/Base-topografica-de-Cataluna-15000> (\*\*)
- 14) IZZARD, C.F. (1946). *Hydraulics of runoff from developed surfaces from developed surfaces*. Proceedings of the 26th Annual meeting of the Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C. EEUU. (\*\*\*)
- 15) KIRPICH, Z.P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Eng.* 10 (6),362. (\*\*\*)
- 16) LIGGETT, J. A. (1975). "Basic equations of unsteady flow." *Unsteady flow in open channels*, K. Mahmood y V. Yevjevich, eds., Water Resources Publications. Fort Collins, Colo., Vol. 1. (\*\*\*)
- 17) MINISTERIO DE FOMENTO. (1999). *Máximas lluvias diarias en la España peninsular*. Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales. Serie Monografías. (\*\*)  
[https://www.transportes.gob.es/recursos\\_mfom/0610300.pdf](https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/0610300.pdf) (\*\*)
- 18) MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO. (1989). *Instrucción de carreteras*. Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales. Madrid. (\*\*)
- 19) MOTT, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos*. Sexta Edición. Ed. Pearson. México. (\*\*)
- 20) PÉREZ, O. (1985). Determinación del tiempo de concentración para estimar la avenida de diseño. *Ingeniería civil (La Habana)*, Cuba, 1985 V36 N1 ene-feb pp 40-53. (\*\*\*)
- 21) REYNOLDS, O. (1903). *Proceedings of the Royal Institution of Great-Britain. Papers*, 2. (\*\*)
- 22) SOIL CONSERVATION SERVICE, SCS. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release 55. Washington D.C. Departamento de Agricultura de EEUU. (\*\*\*)
- 23) STRICKLER, A. (1923). "Sektionschef des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft", *Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahl für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen*. Mitteilungen des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft. Bern. (\*\*\*)
- 24) TÉMEZ, J.R. (1991). Extended and improved Rational Method. Proc. XXIV Congress, Madrid, España. Vol. A. pp. 33-40. (\*\*\*)
- 25) TÉMEZ, J.R. (2003). Facetas del cálculo hidrometeorológico y estadístico de máximos caudales. *Rev. Obras Púb.* N°3.430, 47-51. 2003. (\*\*\*)
- 26) TORRES SOTELO, J.E. (1970). *Apuntes de hidráulica general y agrícola. Primera y Segunda Parte*. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Valencia. (\*\*\*)
- 27) USDA (United States Department of Agriculture). (2024). *Soil Conservation Service*. <https://www.nrcs.usda.gov/> (\*\*)

\* \* \* \* \*

## ABREVIATURAS Y SIGLAS

|                 |   |
|-----------------|---|
| %               | Porcentaje (tanto por cien)   |
| ‰               | Tanto por mil   |
| ...             | Puntos suspensivos (etcétera)   |
| $\alpha$        | Coefficiente de energía (Coriolis)  |
| $\varphi$       | Ángulo de pendiente   |
| ACA             | <i>Agència Catalana de l'Aigua</i>  |
| ASI             | Área susceptible de inundación  |
| BOE             | Boletín Oficial del Estado  |
| C               | Coefficiente de pérdidas por expansión o contracción                                  |
| °C              | Grados centígrados  |
| CEDEX           | Centro de Experimentación de Obras Públicas   |
| Cf.             | Confrontar  |
| CHE             | Confederación Hidrográfica del Ebro   |
| CN              | <i>Curve number</i>   |
| cód.            | Código  |
| Coef.           | Coefficiente  |
| c.s.q.d.        | Como se quería demostrar  |
| Dif.            | Diferencia  |
| DPMT            | Dominio Público Marítimo Terrestre  |
| D.P.T.O.P.      | <i>Departament de Política Territorial i Obres Públiques</i>                          |
| Dr.             | Doctor  |
| ed.             | Editorial   |
| EE.UU.          | Estados Unidos de América del Norte   |
| EPRI            | Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación  |
| etc.            | Etcétera  |
| EUR-ING         | <i>European Engineer</i>  |
| F               | Estadístico de Snedecor-Fisher  |
| $F_r$           | Número de Froude  |
| g               | Aceleración de la gravedad  |
| GIS = SIG       | Sistema de Información Geográfica   |
| h               | Energía potencial, calado o profundidad hidráulica                                    |
| H               | Desnivel existente entre cabecera y punto de desagüe de la cuenca, Energía específica |
| ha              | Hectárea  |
| hab.            | Habitantes  |
| $h_c$           | Calado crítico  |
| $h_e$           | Pérdida de energía entre las secciones transversales                                  |
| HEC-RAS         | <i>Hydrologic Engineering Center - River Analysis System</i>                          |
| ICGC            | <i>Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya</i>                                   |
| IM              | Índice de Melton  |
| INUNCAT         | Plan especial de emergencias por inundaciones de Cataluña                             |
| J               | Pendiente media del cauce principal   |
| km              | Kilómetros  |
| km <sup>2</sup> | Kilómetros cuadrados  |

|                |  |
|----------------|--|
| L              | Longitud de la cuenca  |
| ln             | Logaritmo neperiano o natural  |
| m              | Metros   |
| m <sup>3</sup> | Metros cúbicos   |
| mm             | Milímetros   |
| MOPTMA         | Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente             |
| MOPU           | Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo                               |
| m.s.n.m.       | Metros sobre el nivel del mar  |
| n <sup>o</sup> | Número   |
| p. = pág.      | Página   |
| PGRI           | Plan de Gestión del Riesgo de Inundación                               |
| PHN            | Plan Hidrológico Nacional  |
| PM             | Precipitación Máxima   |
| pp. = págs.    | Páginas  |
| Prof.          | Profesor   |
| Q              | Caudal   |
| QE             | Caudal específico  |
| R              | Coefficiente de correlación no lineal                                  |
| R <sup>2</sup> | Coefficiente de determinación o crítico                                |
| R.D.           | Real Decreto.  |
| RDPH           | Reglamento del Dominio Público Hidráulico                              |
| Ref.           | Referencia   |
| s              | Segundo  |
| S              | Pendiente de fricción  |
| S.C.S.         | <i>Soil Conservation Service</i>                                       |
| S.L.           | Sociedad Limitada  |
| ss.            | Siguientes   |
| T              | Período de retorno   |
| T <sub>c</sub> | Tiempo de concentración de la cuenca                                   |
| UIC            | Universidad Internacional de Cataluña                                  |
| UNED           | Universidad Nacional de Educación a Distancia                          |
| UNESCO         | <i>United Nations Educational Scientific and Cultural Organization</i> |
| URV            | Universidad Rovira i Virgili   |
| USACE          | <i>US Army Corps of Engineers</i>                                      |
| USDA           | <i>United States Department of Agriculture</i>                         |
| UTM            | <i>Universal Transverse Mercator</i>                                   |
| V              | Velocidad, Volumen total de avenida                                    |
| V <sub>c</sub> | Velocidad crítica  |
| v.gr.          | <i>Verbi gratia</i>  |
| Vol.           | Volumen  |
| Y              | Calado del agua de la sección transversal                              |
| Z              | Elevación del fondo de la sección transversal                          |

