

Proyecto Fin de Máster  
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Influencia De Las Formas De Fondo En La Rugosidad  
y la Afección Al Estudio De Inundaciones Del Río  
Tordera

Autor: M<sup>a</sup> Carmen Encinas González

Tutor: M<sup>a</sup> Carmen Molina González

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

Sevilla, 2017





Proyecto Fin de Máster  
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

# **Influencia de las formas de fondo en la rugosidad y la afección al estudio de inundaciones del río Tordera**

Autor:

M<sup>a</sup> Carmen Encinas González

Tutor:

M<sup>a</sup> Carmen Molina González

Profesor asociado

Dep. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Máster: Influencia de las formas de fondo en la rugosidad y la afección al estudio de inundaciones del río Tordera

Autor: M<sup>a</sup> Carmen Encinas González

Tutor: M<sup>a</sup> Carmen Molina González

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

En primer lugar, quisiera dar gracias a mi tutora y profesora M<sup>a</sup> Carmen Molina González, por todas las horas que ha pasado guiándome y ayudándome en la realización del presente trabajo. También a mi familia, cuyos ánimos han sido fundamentales durante todo este tiempo. A mis amigos y compañeros con los que he pasado estos últimos años y especialmente a mi pareja, cuyo apoyo y confianza han sido incondicionales.

*M<sup>a</sup> Carmen Encinas González*

*Sevilla, 2017*



## Resumen

---

En el presente Trabajo Fin de Máster, se analiza la influencia que las formas de fondo pueden tener sobre la rugosidad del río, afectando así, al estudio de inundaciones del mismo. El río escogido para ello, ha sido el Tordera, en la provincia de Cataluña, concretamente, el tramo más próximo a su desembocadura.

Para su análisis, los estudios hidráulicos y de inundación, se han llevado a cabo de dos formas distintas. La primera, consiste en calcular el valor de la rugosidad o ( $n$ ) de Manning, a través de los métodos habituales, mediante la formulación de Strickler o directamente de las tablas empleadas para ello y sin tener en cuenta el efecto derivado de las formas de fondo. Por otro lado, el segundo método, consiste en calcular y modelar el parámetro ( $n$ ), considerando, ahora sí, dicho efecto, y obteniendo una idea más real y precisa del comportamiento natural del cauce.

Para la modelación hidráulica del río y la visualización de los resultados, se han empleado los softwares ArcGIS y HEC-RAS, con los que se ha podido obtener las manchas de inundación generadas en cada uno de los casos

Como podrá observarse al final del trabajo, considerando el efecto derivado de las formas de fondo, se alcanzan unos resultados mucho más exactos que los obtenidos tomando valores clásicos de rugosidad, permitiendo así alcanzar una visión más realista de los efectos y riesgos de inundación de las zonas afectadas, y la posibilidad de actuar en consecuencia.



## Abstract

---

In the present Final Master's Project, the influence that the background forms can have on the roughness of the river is analyzed, thus affecting the flood study thereof. The river chosen for it, has been the Tordera, in the province of Cataluña, specifically, the section closest to its mouth.

For its analysis, hydraulic and flood studies have been carried out in two different ways. The first is to calculate the value of the roughness or ( $n$ ) of Manning, through the usual methods, through the formulation of Strickler or directly from the tables used for this and without taking into account the effect derived from the forms of background. On the other hand, the second method is to calculate and model the parameter ( $n$ ), considering, now, that effect, and obtaining a more real and accurate idea of the natural behavior of the channel.

For the hydraulic modeling of the river and the visualization of the results, the ArcGIS and HEC-RAS softwares have been used, with which it has been possible to obtain the flood spots generated in each of the cases.

As can be seen at the end of the work, considering the effect derived from the background forms, results are achieved much more accurate than those obtained by taking classic values of roughness, thus allowing to achieve a more realistic view of the effects and risks of flooding of the affected areas, and the possibility to act accordingly.



# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>7</b>
<b>Resumen</b>	<b>9</b>
<b>Abstract</b>	<b>11</b>
<b>Índice</b>	<b>13</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>17</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>19</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>21</b>
<b>2 Localización y Antecedentes</b>	<b>23</b>
<b>3 Legislación</b>	<b>26</b>
<b>4 Estudio Climatológico</b>	<b>29</b>
4.1 <i>Introducción</i>	29
4.1.1 Consideraciones generales respecto a datos climatológicos	30
4.2 <i>Características de la cuenca</i>	31
4.2.1 Temperatura	31
4.2.2 Humedad atmosférica	32
4.2.3 Precipitación	33
<b>5 Geología de la Cuenca</b>	<b>40</b>
5.1 <i>Introducción</i>	40
5.2 <i>Factores geológicos de la cuenca del Tordera dentro de Cataluña</i>	42
5.2.1 Estructura de las cordilleras Costeras-Catalanas	43
5.2.2 Metamorfismo y esquistosidad presentes en las cordilleras Costeras-Catalanas	43
5.3 <i>Estudio de la geología de detalle de la cuenca del Tordera</i>	43
5.4 <i>Descripción de los materiales que afloran en la cuenca del Tordera</i>	45
<b>6 Morfología de la Cuenca</b>	<b>47</b>
6.1 <i>Descripción general de la Cuenca</i>	47
6.2 <i>Características físicas de la cuenca</i>	47
6.3 <i>Geomorfología de la Cuenca</i>	48
6.3.1 Introducción	48
6.3.2 Descripción de la fisiografía de la cuenca de la Tordera	48
<b>7 Usos de Suelo</b>	<b>54</b>
7.1 <i>El uso del suelo y su empleo</i>	54
7.1.1 Tipo de uso y cambios en el empleo del espacio fluvial	55
<b>8 Estudio Pluviométrico</b>	<b>56</b>
8.1 <i>Análisis atmosférico. Precipitación</i>	56
8.2 <i>Datos de precipitación de la cuenca del Tordera</i>	57
8.2.1 Fuentes de datos	57

8.2.2	Análisis de datos	57
8.3	<i>Análisis de frecuencias. Regímenes extremos de precipitación</i>	58
8.3.1	Introducción. Funciones de distribución	58
8.3.2	Ajustes de calibración	59
8.4	<i>Obtención de las curvas IDF. Estaciones</i>	59
8.4.1	Pluviógrafo	59
8.4.2	Pluviómetros	61
8.5	<i>Definición de los hietogramas de tormenta</i>	61
8.5.1	Metodología de cálculo	61
8.6	<i>Definición de los hietogramas de diseño</i>	62
8.7	<i>Distribución espacial de la lluvia</i>	63
<b>9</b>	<b>Estudio Hidrológico</b>	<b>64</b>
9.1	<i>Introducción y objetivos</i>	64
9.2	<i>Descripción del modelo hidrológico</i>	65
9.2.1	Introducción	65
9.2.2	Datos de entrada	65
9.2.3	Componentes básicos de la modelización	65
9.2.4	Parámetros del modelo	66
9.3	<i>Calibración del modelo NAM para la cuenca del Tordera</i>	66
9.4	<i>Estimación de los parámetros para el modelo de la cuenca del Tordera</i>	67
9.5	<i>Esquema hidrológico de la cuenca del Tordera</i>	68
9.6	<i>Escenarios de cálculo hidrológico</i>	68
9.7	<i>Resultados del modelo hidrológico</i>	69
<b>10</b>	<b>Introducción a las Formas de Fondo</b>	<b>75</b>
10.1	<i>Introducción</i>	75
10.2	<i>Introducción al transporte de sedimentos</i>	75
10.2.1	Transporte de sedimentos en un río	75
10.2.2	Equilibrio del fondo en presencia del transporte de sedimentos	76
10.2.3	Inicio del movimiento de partículas	76
10.3	<i>Formas de fondo</i>	76
10.3.1	Origen de las formas de fondo	76
10.3.2	Caracterización e influencia de las formas de fondo	77
10.3.3	Evaluación del transporte de fondo	77
10.3.4	Formas de fondo en ríos	79
<b>11</b>	<b>Estudio Hidráulico 1. Modelado con (n) de Manning Clásica</b>	<b>83</b>
11.1	<i>Cauce</i>	83
11.1.1	Dinámica fluvial del río Tordera	83
11.1.2	Parámetros del modelo	83
11.1.3	Datos granulométricos del tramo bajo del río Tordera	84
11.1.4	Método de Strickler-Van Rijn	87
11.2	<i>Llanuras de inundación</i>	88
11.2.1	Introducción	88
11.2.2	Información de referencia	88
11.2.3	Resultados	88
<b>12</b>	<b>Estudio Hidráulico 2. Modelización con (n) de Manning Modificada</b>	<b>90</b>
12.1	<i>Introducción</i>	90
12.2	<i>Parámetros hidráulicos</i>	90
12.2.1	Datos hidráulicos	91
12.2.2	Condiciones de contorno	92
12.3	<i>Estudio de la rugosidad del lecho. Formas de fondo.</i>	92
12.3.1	Introducción	92
12.3.2	Formas de fondo en flujo uniforme	92

12.3.3	Clasificación y dimensiones	93
12.4	<i>Rugosidad equivalente</i>	96
12.4.1	Rugosidad asociada al grano ( $K'$ )	98
12.4.2	Rugosidad asociada a las formas del cauce ( $K''$ )	99
12.4.3	Escenarios de cálculo hidráulico	102
<b>13</b>	<b>Estudio Comparativo</b>	<b>104</b>
13.1	<i>Introducción</i>	104
13.2	<i>Resultados. Estudio hidráulico 1</i>	104
13.2.1	Calados	105
13.2.2	Velocidades	105
13.3	<i>Resultados. Estudio hidráulico 2</i>	106
13.3.1	Calados	106
13.3.2	Velocidades	106
13.4	<i>Comparación de resultados</i>	107
13.4.1	n de Manning	107
13.4.2	Calados	107
13.4.3	Velocidades	108
13.4.4	Manchas de inundación	108
<b>14</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>117</b>
	<b>Referencias y Bibliografía</b>	<b>118</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Características del clima Mediterráneo.....	29
Tabla 4-2: Características del clima de la cuenca .....	29
Tabla 4-3: Zonas climáticas .....	30
Tabla 4-4: Características climáticas de la cuenca.....	30
Tabla 4-5: Temperaturas Medias Mensuales .....	31
Tabla 4-6: Humedades Relativas Mensuales (Santa María de Palautordera) .....	32
Tabla 4-7: Humedades Relativas Mensuales (Santa Coloma de Farners).....	33
Tabla 4-8: Estaciones pluviométricas de estudio .....	33
Tabla 4-9: Precipitaciones Medias Mensuales (Sant Celoni) .....	34
Tabla 4-10: Precipitaciones Medias Mensuales (Gualba) .....	34
Tabla 4-11: Precipitaciones Medias Mensuales (Breda).....	35
Tabla 4-12: Precipitaciones Medias Mensuales (Arbúcies).....	36
Tabla 4-13: Precipitaciones Medias Mensuales (Sil).....	36
Tabla 4-14: Precipitaciones Medias Mensuales (Tordera) .....	37
Tabla 4-15: Precipitaciones Medias Mensuales (Tordera) .....	38
Tabla 4-16: Distribución mensual de precipitaciones .....	38
Tabla 6-1: Precipitaciones Medias Mensuales (Tordera) .....	48
Tabla 7-1: Evolución de la población de la cuenca. Instituto de estadística de Cataluña .....	54
Tabla 8-1: Estaciones pluviométricas de estudio .....	57
Tabla 8-2: Hietogramas de duración de lluvias (2) .....	63
Tabla 9-1: Caudales máximos Sant Celoni. T = 500 años.....	70
Tabla 9-2: Caudales máximos Sant Celoni. T = 100 años.....	71
Tabla 9-3: Caudales máximos Sant Celoni. T = 50 años.....	72
Tabla 9-4: Caudales máximos Santa Coloma. T = 50 años.....	73
Tabla 9-5: Caudales máximos Santa Coloma. T = 10 años.....	74
Tabla 11-1: Valores de Caudal (m <sup>3</sup> /s) para cada periodo de retorno. ....	84
Tabla 11-2: Valores de Caudal (m <sup>3</sup> /s) para cada sección en función del periodo de retorno.....	84
Tabla 11-3: Características granulométricas de los puntos de control. ....	86
Tabla 11-4: Valores del parámetro (n) o rugosidad del cauce para cada sección del modelo. ....	88
Tabla 11-5: Categorías para la definición de la rugosidad (n) de Manning. ....	88
Tabla 11-6: Valores de la rugosidad (n) en las llanuras de inundación para cada sección del modelo. ...	89
Tabla 12-1: Resumen de condiciones bajo distintas formas de lecho .....	96
Tabla 12-2: Parámetros auxiliares. ....	97
Tabla 12-3: Condiciones para la formación de formas de fondo.....	100
Tabla 12-4: Valores de n de Manning modificada. ....	102
Tabla 13-1: Media de calados. Estudio hidráulico 1 .....	105
Tabla 13-2: Media de velocidades. Estudio hidráulico 1 .....	105
Tabla 13-3: Media de calados. Estudio hidráulico 2 .....	106
Tabla 13-4: Media de velocidades. Estudio hidráulico 2.....	106
Tabla 13-5: Comparación de calados .....	107
Tabla 13-6: Comparación de velocidades .....	108



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Localización de la cuenca del Río Tordera .....	23
Figura 2-2: Localización de la zona de estudio .....	24
Figura 3-1: Escenarios de inundación. Directiva 60/2007 .....	28
Figura 4-1: Temperaturas Medias Mensuales .....	31
Figura 4-2: Temperaturas Medias Anuales .....	32
Figura 4-3: Precipitaciones Medias Mensuales (Sant Celoni).....	34
Figura 4-4: Precipitaciones Medias Mensuales (Gualba) .....	35
Figura 4-5: Precipitaciones Medias Mensuales (Breda) .....	35
Figura 4-6: Precipitaciones Medias Mensuales (Arbúcies) .....	36
Figura 4-7: Precipitaciones Medias Mensuales (Sil).....	37
Figura 4-8: Precipitaciones Medias Mensuales (Tordera) .....	37
Figura 4-9: Precipitaciones Medias Mensuales (Tordera) .....	38
Figura 4-10: Distribución mensual de precipitaciones.....	39
Figura 4-11: Precipitaciones medias anuales .....	39
Figura 5-1: Municipios principales de la cuenca del Tordera.....	40
Figura 5-2: Litologías de la cuenca.....	43
Figura 5-3: Materiales de la cuenca.....	44
Figura 5-4: Materiales de la zona de estudio .....	44
Figura 6-1: Materiales de la zona de estudio .....	49
Figura 6-2: Altitudes de la cuenca .....	52
Figura 7-1: Usos de suelo de la zona de estudio. ....	55
Figura 8-1: Análisis de dobles masas .....	58
Figura 8-2: CurvasIDF. Sant Celoni (1).....	60
Figura 8-3: CurvasIDF. Sant Celoni (2).....	60
Figura 8-4: Curvas IDF. Sant Celoni (3).....	61
Figura 8-5: Hietogramas de duración de lluvias (1).....	62
Figura 8-6: Hietogramas de duración de lluvias (2).....	63
Figura 9-1: Esquema hidrológico de la cuenca del Tordera 1 .....	68
Figura 9-2: Esquema hidrológico de la cuenca del Tordera 2 .....	69
Figura 9-3: Hidrograma Sant Celoni. T = 500 años.....	70
Figura 9-4: Hidrograma Sant Celoni. T = 100 años.....	71
Figura 9-4: Hidrograma Sant Celoni. T = 50 años.....	72
Figura 9-5: Hidrograma Santa Coloma. T = 500 años.....	73
Figura 9-6: Hidrograma Santa Coloma. T = 10 años .....	74
Figura 10-1: Dimensiones características de las formas de fondo.....	77
Figura 10-2: Barras en lechos de grava .....	81
Figura 11-1: Puntos en los que se ha analizado el caudal de un tramo.....	84
Figura 11-2: Puntos de muestreo granulométricos en la parte baja de la cuenca del Tordera .....	85
Figura 11-3: Curvas granulométricas del material superficial del cauce del río. ....	86
Figura 11-4: Localización de los puntos y secciones de control granulométrico.....	87
Figura 11-5: Usos de suelo de la zona de estudio. ....	89

Figura 12-1: Representación de los planos de inundación .....	91
Figura 12-2: Modo de avance de las formas del cauce en régimen bajo. ....	93
Figura 12-3: Circulación de sedimentos y separación del flujo en dunas.....	95
Figura 12-4: Modo de avance de las formas del cauce en régimen alto de transporte .....	96
Figura 12-5: Velocidad de corte crítica y tensión de corte crítica en función del diámetro. ....	101
Figura 13-1: Manchas de inundación. Estudio hidráulico 1 .....	105
Figura 13-2: Manchas de inundación. Estudio hidráulico 2 .....	106
Figura 13-3: Comparación “n de Manning” .....	108
Figura 13-4: Comparación manchas de inundación. 10 Años. ....	108
Figura 13-5: Comparación manchas de inundación. 50 Años. ....	109
Figura 13-6: Comparación manchas de inundación. 100 Años. ....	109
Figura 13-7: Comparación manchas de inundación. 500 Años. ....	110
Figura 13-8: Puntos de estudio de manchas de inundación.....	110
Figura 13-9: Puntos de estudio de manchas de inundación. Zona 1 .....	111
Figura 13-10: Perfiles transversales. Zona 1 .....	112
Figura 13-11: Puntos de estudio de manchas de inundación. Zona 2 .....	112
Figura 13-12: Perfiles transversales. Zona 2.....	113
Figura 13-13: Puntos de estudio de manchas de inundación. Zona 3 .....	114
Figura 13-14: Perfiles transversales. Zona 3.....	115
Figura 13-15: Puntos de estudio de manchas de inundación. Zona 4 .....	115
Figura 13-16: Perfiles transversales. Zona 4.....	116

# 1 INTRODUCCIÓN

---

*Nunca andes por el camino trazado, pues te conducirá a donde otros ya fueron.*

*- Alexander Graham Bell -*

En el presente estudio de la “Influencia de las Formas de Fondo en la rugosidad y afección al Estudio de Inundaciones del Río Tordera”, se pretende mostrar la importancia de realizar un análisis sobre la morfología del fondo del río, ya que esto puede suponer una gran variación en los distintos estudios del mismo. El río Tordera es de los pocos de España que presenta dichas características, por lo que se ha visto de importancia la realización del estudio del mismo.

Para ello se ha empleado la siguiente metodología:

- **Recopilación de los datos necesarios para la elaboración del estudio, los cuales se encuentran en los siguientes apartados:**
  1. Localización y antecedentes de la zona de estudio. En dicho apartado se muestra la ubicación de la zona y una pequeña descripción de la cuenca del río estudiado.
  2. Legislación. En el que se muestran los Reales Decretos y leyes consideradas en el estudio.
  3. Estudio climatológico. Está centrado principalmente en conocer la climatología de la cuenca referente a la temperatura, precipitaciones y humedad de la misma.
  4. Geología de la cuenca. En dicho apartado se han explicado los principales sistemas montañosos existentes en la cuenca, así como las litologías y materiales de la misma.
  5. Morfología de la cuenca. Donde se han tratado las características físicas y geomorfológicas de la cuenca.
  6. Usos de suelo. En este apartado se muestra la ocupación de suelo referente a la zona de estudio.
  7. Estudio pluviométrico. Dicho apartado se ha basado en la recopilación de datos pluviométricos necesarios para poder llevar a cabo la realización de los estudios hidráulicos.
  8. Estudio hidrológico. Al igual que en el estudio pluviométrico, se han recopilado los datos necesarios para la realización de los estudios hidráulicos.
- **Estudio y análisis completo de las formas de fondo del río Tordera.**
  9. Introducción a las formas de fondo. El objetivo de este apartado ha sido introducir las formas de fondo, con la finalidad de poder conocerlas mejor antes de llevar a cabo un análisis de las mismas.

- **Estudio de inundación empleando el programa HEC-RAS con la n de Manning habitual.**

10. Estudio hidráulico 1. En el que se encuentran explicados los pasos a seguir para la obtención de los valores (n) de Manning empleados habitualmente.

- **Estudio de inundación empleando el programa HEC-RAS con la n de Manning modificada, calculada y adaptada a las formas de fondo existentes.**

11. Estudio hidráulico 2. Al igual que en el estudio hidráulico 1, se muestran los pasos a seguir para la obtención de la “n de Manning”, pero con la característica de haber incluido las formas de fondo en los cálculos del mismo.

- **Comparativa y conclusiones del resultado de los dos estudios.**

Finalmente se ha llevado a cabo una comparativa y conclusiones de los resultados obtenidos de ambos estudios, en la que se demuestra la finalidad del trabajo realizado.

## 2 LOCALIZACIÓN Y ANTECEDENTES

---

*El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza.*

*- Leonardo Da Vinci -*

**E**l Río Tordera es un río que transcurre por la Comunidad Autónoma de Cataluña (España). Nace en el Montseny entre Les Agudes y el Matagalls y desemboca en el mar Mediterráneo formando el delta de la Tordera entre Blanes y Malgrat de Mar.

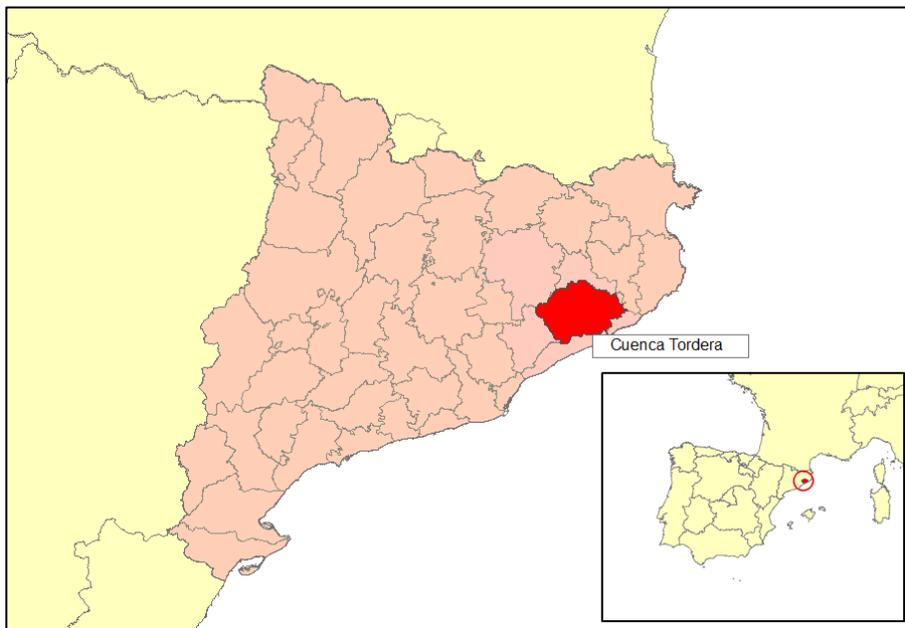


Figura 2-1: Localización de la cuenca del Río Tordera

El presente estudio se ha llevado a cabo en la parte baja del río Tordera (longitud de 20 Km aproximadamente) ya que es la zona que presenta formas de fondo en su cauce. Dicha zona se muestra a continuación:

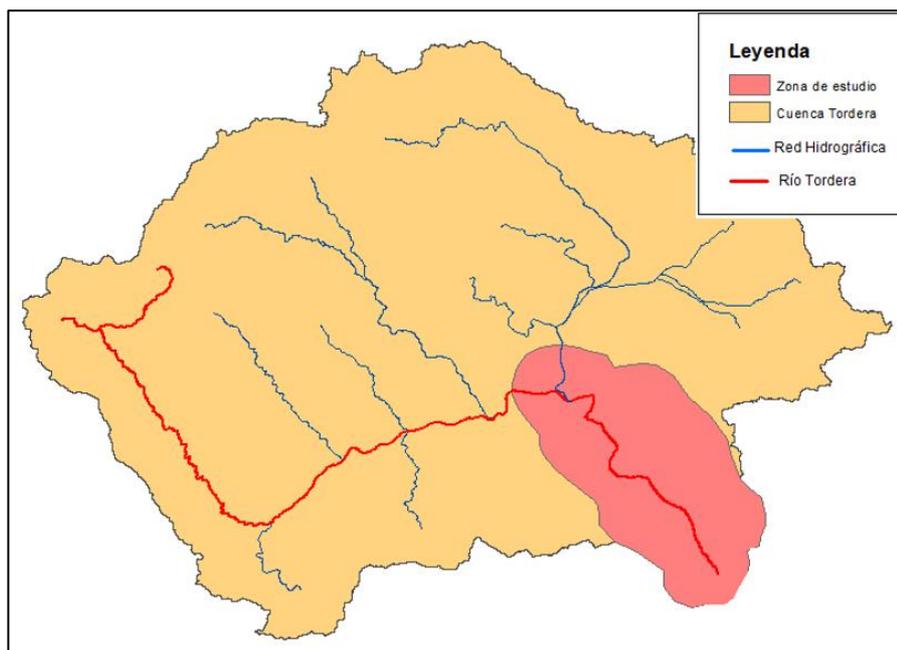


Figura 2-2: Localización de la zona de estudio

El río Tordera pertenece a la demarcación hidrográfica de las Cuencas Internas de Cataluña, las cuales agrupan la vertiente oriental de la red hidrográfica de Cataluña, caracterizada por incluir los ríos que nacen en Cataluña y que finalizan su recorrido en el mar Mediterráneo, sin desembocar en ningún lecho intercomunitario. El Plan Hidrológico de las Cuencas Internas de Cataluña de 1999 aplica una cuádruple división, encontrándose el Tordera en el sistema Norte, junto con el Muga-Fluviá y el Ter.

El río se caracteriza por poseer numerosos afluentes, entre los cuales hay que destacar los de Vallgorguina, Rifer, Gualba, Breda, Arbúcies, Santa Coloma (a su vez con la riera de Sils) y Torderola. Los tramos superiores de la mayor parte de estos ríos, procedentes de zonas declaradas parques naturales, presentan buena parte de las características de los ríos de alta montaña. Cuenta con una cuenca de 876 km<sup>2</sup> de superficie total y una aportación total media de unos 170 hm<sup>3</sup> anuales.

En la cabecera del Tordera y de sus principales afluentes, se pueden encontrar aprovechamientos numerosos y variados, como son las mini centrales hidroeléctricas, pequeños riegos y embotelladoras de aguas minerales, las cuales pueden suponer, a nivel local, demandas significativas. Los abastecimientos principales de la cuenca media y baja, como Sant Celoni o Hostalric, se alimentan de pozos aluviales, al igual que todos los polígonos que existen en su curso. Respecto a los abastecimientos superficiales, éstos se sitúan en Palautordera, complementándose con captaciones del acueducto del Ter, procedente del Pasteral. Como elemento singular, hay que destacar, en la riera de Gualba, la existencia del pequeño embalse de Santa Fe justo en medio del parque natural del Montseny, de uso hidroeléctrico.

En la parte baja del río, aparecen áreas regables más extensas, completadas a menudo con aguas subterráneas del aluvial, entre las cuales destacan las del Canal Gelpí y el Rec del Molí, las dos en retroceso a causa, fundamentalmente, de la expansión de las áreas urbanas. Los pozos de acuífero profundo se encuentran en la deltaica y se destinan al abastecimiento de Alto Maresme o Maresme norte (Consejo Comarcal), Blanes y Lloret de Mar y Tossa de Mar (Consortio de la Costa Brava sur), además de las industrias de la zona.

Dicha configuración provoca que el sistema de gestión de la Tordera se extienda más allá de la cuenca hidrográfica como tal y, de otra, que ahora se pueda considerar también ligado al del Ter-Llobregat. El vínculo entre ambos se ha completado con la conexión directa entre las instalaciones de desalinización de Tordera y la estación potabilizadora de la Red Ter-Llobregat en Cardedeu.

Hace unos años el acuífero deltaico presentó unos problemas de contaminación y sobre todo de sobreexplotación, provocando a su vez intrusión marina y salinización del agua. Se construyó para ello, en el término municipal de Blanes, la desalinizadora de la Tordera, inicialmente de 10 hm<sup>3</sup>/año de producción máxima y ampliada a 20 una vez se ha conectado con la Red Ter-Llobregat. La desalinizadora suministra aproximadamente la mitad de la demanda de las redes de abastecimiento locales, además de mostrar sus beneficios en la recuperación del acuífero, tanto en la piezometría como en la salinidad.

Esta circunstancia ha producido que el río llegue al mar más sólo en momentos de inundaciones excepcionales, impidiendo la llegada de sedimentos al frente marítimo y, por tanto, produciendo una erosión de la línea de costa que se traduce en una regresión generalizada en todo el frente del delta. Esta regresión, agravada por las desmesuradas explotaciones de áridos del cauce del Tordera durante los años 60, 70 y 80 está afectando a la anchura de sus playas y, directamente, a las infraestructuras y a los numerosos campings que, aprovechando las características del espacio natural, están instalados en las inmediaciones, lo cual ha puesto en pie de guerra a los grupos ecologistas y proteccionistas de la zona.

Por otro lado, cabe destacar que tanto la riera de Santa Coloma como las de Arbúcies, Breda y la cabecera de la Tordera han dispuesto tradicionalmente de aportaciones de agua procedentes del Ter. De julio a septiembre se solía hacer una aportación de apoyo desde los diferentes sifones y rebosaderos del acueducto del Pasteral a Cardedeu para recargar los acuíferos locales, de los que dependen diferentes abastecimientos y regadíos. Sin embargo, esta práctica se ha abandonado y se ha sustituido por la conexión directa de los servicios de abastecimiento a la Red Ter-Llobregat.

El río Tordera como río mediterráneo que es, debido justamente a no depender de las nevadas en sus cabeceras, está muy sujeto a las lluvias que tiene. Éstas, al ser predominantemente torrenciales, provocan que el caudal del Tordera varíe extraordinariamente en época de lluvias, pasando de ir prácticamente seco a desbordarse en muy pocas horas. En esta circunstancia, el delta ha avanzado a partir de inundación y de variación de su desembocadura, lo cual ha creado desconfianza en las poblaciones ribereñas, que llevó a finales del siglo XX a canalizar el tramo final de la desembocadura del Tordera.

A pesar de sus innegables cualidades naturales, este joven delta (construido por el río en los últimos 6000 años), en la actualidad no dispone de zonas lagunares o de marjales más allá de la zona de la desembocadura propiamente dicha. Esto se debe a la composición de sus arenas graníticas y gruesas debido al poco recorrido de su cauce, y a la extraordinaria explotación de los importantes acuíferos del delta, ya sea tanto para uso industrial, agrícola o de consumo humano debido a la creciente presión humana del entorno.

Por último, destacar que, de todas las inundaciones producidas en la comunidad de Cataluña, una de las más importantes fue provocada por el río Tordera. Se trata de la inundación que se produjo el 20 de septiembre de 1971, donde cayeron lluvias muy fuertes en gran parte de Catalunya con inundaciones en las comarcas de Girona y Barcelona. También en el Tordera, el Güell y otros ríos, se produjo el desbordamiento del Llobregat, que registró el máximo caudal del siglo, con 3080 m<sup>3</sup>/s. El balance fue de 7000 millones de pesetas de pérdidas y 19 víctimas mortales.

## 3 LEGISLACIÓN

---

*Olvidamos que el ciclo del agua y el de la vida son uno.*

*- Jacques Cousteau -*

**E**n el siguiente apartado, se ha reunido la información relevante, referente a la legislación aplicada en las inundaciones.

- **Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de Evaluación y gestión de riesgos de inundación.**

Establece que: *"La lucha contra los efectos de las inundaciones ha sido desde hace muchos años una constante en la política de aguas y de protección civil y así el enfoque tradicional consistente en plantear y ejecutar soluciones estructurales, como la construcción de presas, encauzamientos y diques de protección, se han revelado en determinados casos insuficientes, por lo que ha sido complementado en las últimas décadas con actuaciones no estructurales, tales como planes de protección civil, implantación de sistemas de alerta, corrección hidrológico-forestal de las cuencas y medidas de ordenación del territorio, para atenuar las posibles consecuencias de las inundaciones. Este último tipo de actuaciones son menos costosas económicamente y a la vez menos agresivas medioambientalmente."* Como también refleja dicho decreto, la búsqueda de soluciones ha tenido un importante respaldo en la legislación. Así, la seguridad de las personas y bienes frente a las inundaciones ha sido recogida tanto en el texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, así como en la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, modificada por la Ley 11/2005, de 22 de junio.

- **Ley 2/1985, de 21 de enero, de Protección Civil.**

Dicha ley se desarrolla mediante la Norma Básica de Protección Civil, aprobada por el Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, incluyendo entre los planes especiales de protección civil a elaborar por la Administración General del Estado y por las comunidades autónomas, los correspondientes al riesgo por inundación. En el marco de esta legislación destaca la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones, aprobada por acuerdo de Consejo de Ministros de 9 de diciembre de 1994, la cual establece el marco sobre el que se han desarrollado los planes especiales de protección civil ante el riesgo de inundaciones y que puede considerarse como la primera disposición que relaciona expresamente el nivel de riesgo de inundación del territorio con la planificación territorial y los usos del suelo.

- **Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril**

Dice que: *"...En las zonas o vías 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. La zona de flujo preferente es aquella zona constituida por la unión de la zona o zonas donde se concentra preferentemente el flujo durante las avenidas, o vía de intenso desagüe, y de la zona donde, para la avenida de 100 años de periodo de retorno, se puedan producir graves daños sobre las personas y los bienes, quedando delimitado su límite exterior mediante la envolvente de ambas zonas."*

A los efectos de la aplicación de la definición anterior, se considerará que pueden producirse graves daños sobre las personas y los bienes cuando las condiciones hidráulicas durante la avenida satisfagan uno o más de los siguientes criterios:

- Que el calado sea superior a 1 m.
- Que la velocidad sea superior a 1 m/s.
- Que el producto de ambas variables sea superior a 0,5 m<sup>2</sup>/s.

- **Directiva de Inundaciones (2007/60)**

En el ámbito europeo y precedida por dos directivas más relativas al agua, Directiva Marco del Agua (DMA 2000/60) y La Directiva Hábitats (1992/42), la Unión Europea publicó en 2007 una tercera directiva relacionada con la gestión hídrica: la directiva relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, conocida como la Directiva de Inundaciones (2007/60). Esta directiva muestra un precedente importantísimo y novedoso al reconocer que *“las inundaciones son fenómenos naturales que no pueden evitarse”*, y que *“algunas actividades humanas (como el incremento de los asentamientos humanos y los bienes económicos en las llanuras aluviales y la reducción de la capacidad natural de retención de las aguas por el suelo), a la vez que el cambio climático, están contribuyendo a aumentar las posibilidades de que ocurran, así como su impacto negativo”*.

- **Directiva y el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio**

Dicha directiva, la cual traspone al ordenamiento español, establece desde el año 2007 la forma en que las administraciones deben de trabajar para evitar los daños producidos por las inundaciones, ya sean estos en forma de pérdidas de millones de euros o de vidas humanas. Para ello, indica que debe de trabajarse en tres líneas: la prevención, evitando por ejemplo construir en zonas inundables, la preparación mediante instrucciones a los habitantes sobre el comportamiento que deben seguir en caso de inundación y la optimización de todos los mecanismos de alerta y control y la protección para lo que propone *“dar más espacio a los ríos (...) mediante el mantenimiento o restablecimiento de llanuras aluviales y las zonas húmedas”*. A su vez, obliga a los Estados miembros a la realización de las siguientes fases:

1. Evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI) e identificación de las Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs) (diciembre 2011).
2. Elaboración de mapas de peligrosidad y riesgo (de las ARPSIs seleccionadas en la EPRI) (diciembre 2013).
3. Plan de gestión de riesgo (de las ARPSIs seleccionadas en la EPRI) (diciembre 2015).

- **Directiva 60/2007**

En definitiva, esta Directiva aboga por un cambio en las políticas de prevención de las inundaciones, que hasta la fecha se han basado en la construcción de infraestructuras, por la recuperación de la laminación natural de las avenidas en las llanuras de inundación, recuperando así tanto los procesos naturales como los valores ecológicos dependientes de éstos, al tiempo que se previenen los daños causados por las inundaciones. Cabe destacar los siguientes aspectos que se encuentran reflejados en dicha directiva:

- Se entiende por vía de intenso desagüe la zona por la que pasaría la avenida de 100 años de periodo de retorno sin producir una sobre-elevación mayor que 0,3 m, respecto a la cota de la lámina de agua que se produciría con esa misma avenida considerando toda la llanura de inundación existente. La sobre-elevación anterior podrá, a criterio del organismo de cuenca, reducirse hasta 0,1 m cuando el incremento de la inundación pueda producir graves perjuicios o aumentarse hasta 0,5 m en zonas rurales o cuando el incremento de la inundación produzca daños reducidos.
- El periodo de retorno define la probabilidad de que una crecida de ese caudal vuelva a ocurrir, lo que no quita para que dos años consecutivos puedan darse crecidas de retorno elevado ya que es un concepto estadístico.

A continuación, se muestra un esquema que representa los distintos escenarios de inundación:

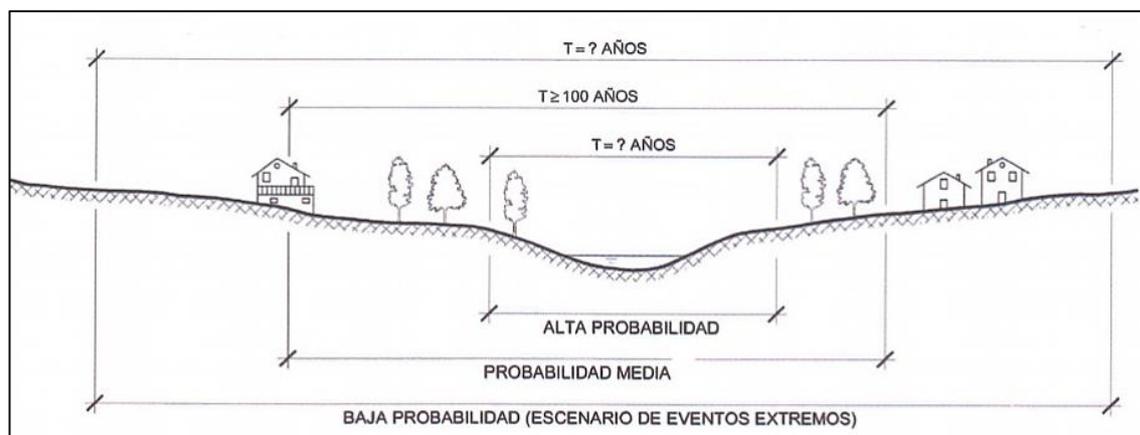


Figura 3-1: Escenarios de inundación. Directiva 60/2007

- **Plan de Gestión del Agua de Cataluña**

Dicho plan contempla un apartado de reducción de daños por inundaciones, en el que se expone la prevención que hay que considerar para dichas inundaciones.

Para prevenir y disminuir los daños que pueden provocar las inundaciones sobre las personas y los bienes, se llevan a cabo medidas destinadas a conocer mejor el funcionamiento del río y del conjunto de espacios que dependen de él directamente, el denominado espacio fluvial, y a preservar el estado natural y las funciones ambientales de este espacio. El objetivo es encontrar un equilibrio entre el mantenimiento de los valores ambientales y la necesaria protección de las personas y los bienes materiales ante el riesgo de inundación. Para ello, las principales actuaciones que se llevarán a cabo son:

- Zonificación del espacio fluvial en más de 2.000 km de la red fluvial principal catalana.
- Delimitación de zonas potencialmente inundables en más de 30.000 km de red fluvial.
- Inventario de 1.000 conos de deyección.
- Mejora de la funcionalidad hidráulica mediante unas 1.000 actuaciones de mantenimiento de la capacidad de desguace de los cauces.
- Más de 250 actuaciones de protección de las ocupaciones consolidadas en el espacio fluvial.

- **Propuesta del Plan de gestión del riesgo de inundación del distrito de cuenca fluvial de Cataluña**

La Propuesta de Plan de gestión del riesgo de inundación del distrito de cuenca fluvial de Cataluña (PGRI) se elabora en cumplimiento del artículo 13 del Real decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación (RDI), que transpone la Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y la gestión de los riesgos de inundación (DI).

El objeto principal del PGRI es integrar todas las medidas de las diferentes administraciones con competencias en relación con la gestión de los riesgos de inundación. Estas medidas se han de adoptar para cada área con riesgo potencial significativo de inundación (ARPSI), identificada el año 2011 en la evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI) del distrito de cuenca fluvial de Cataluña, con el fin de alcanzar los objetivos de la gestión del riesgo de inundación establecidos y centrandolo su atención en la reducción de las consecuencias adversas potenciales de la inundación para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural, la actividad económica y las infraestructuras.

# 4 ESTUDIO CLIMATOLÓGICO

*La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la ingeniería la que cambia el mundo.*

*- Isaac Asimov -*

## 4.1 Introducción

Para definir el clima de una zona, se emplean las estadísticas a largo plazo de los parámetros más característicos, como son, la temperatura, viento, humedad, precipitación, etcétera.

Concretamente en Cataluña se distinguen tres rasgos característicos:

- Clima Mediterráneo en la zona litoral.
- Clima Atlántico en el Valle de Aran.
- Clima predominantemente continental en la zona central.

El clima más predominante es el mediterráneo, por lo que se analizará con mayor profundidad. Este clima se caracteriza por veranos secos y calurosos y por una pluviometría irregular y estacional. Las lluvias intensas en la época de otoño son muy frecuentes, llegando a provocar grandes daños.

Tabla 4-1: Características del clima Mediterráneo

Características del clima Mediterráneo				
	Temperaturas		Precipitaciones	
Media Anual	Media del mes más cálido	Media del mes más frío	Estación lluviosa	Total anual en mm
17°	25°	10°	Otoño	250-1000

A continuación, se muestran los datos correspondientes a la cuenca del Tordera:

Tabla 4-2: Características del clima de la cuenca

Características de la cuenca del Tordera				
	Temperaturas		Precipitaciones	
Media Anual	Media del mes más cálido	Media del mes más frío	Estación lluviosa	Total anual en mm
14,6°C	23,4°C	6,9°C	Otoño y primavera	800

En función de los valores medios de los siguientes parámetros, se distinguen las diferentes zonas climáticas de Cataluña.

- RPE = Régimen pluviométrico estacional
- PMA = Precipitación media anual
- VTP = Variación térmica anual (Diferencia entre la temperatura del mes más cálido y el mes más frío).

- TMA = Temperatura media anual

Dichas zonas climáticas se muestran en la siguiente tabla con sus respectivos parámetros:

Tabla 4-3: Zonas climáticas

Zona Climática	Oceánica	Pirenaica	Prepirenaica	Continental	Prelitoral	Litoral
<b>PMA (mm)</b>	900-1000	1000-1300	650-1100	350-850	600-1000	500-750
<b>RPE</b>	Equilibrado	Máximo verano/Mínimo invierno	Máximo verano y primavera /Mínimo invierno	Máximo otoño y primavera / Mínimo verano	Máximo otoño y primavera	Máximo otoño
<b>TMA (°C)</b>	6 a 9	2 a 9	9 a 12	12 a 14	11 a 15	14,5 a 17
<b>VTP (°C)</b>	13 a 15	13 a 16	16 a 19	17 a 20	15 a 18	14 a 15

Los valores de los parámetros correspondientes a la zona de estudio, son los siguientes:

Tabla 4-4: Características climáticas de la cuenca

<b>Cuenca del Tordera</b>			
<b>PMA (mm)</b>	<b>RPE</b>	<b>TMA (°C)</b>	<b>VTP (°C)</b>
800	Máximo en otoño y primavera	14,6	16,4

Con los datos mostrados se puede observar que la zona de estudio pertenece a la zona climática prelitoral. Dicha zona se caracteriza por lluvias producidas por masas de aire que proceden del mediterráneo, las cuales tienen lugar en otoño.

#### 4.1.1 Consideraciones generales respecto a datos climatológicos

Para la realización del estudio climatológico se han empleado los datos provenientes de algunas estaciones climatológicas que constituyen la Red Climatológica de Cataluña. Se han empleado las estaciones más relevantes respecto a la cercanía con la cuenca como por las series de datos que poseen.

Para realizar el estudio completo de la precipitación se han usado 7 estaciones para cubrir todas las zonas de la cuenca. Se han tomado bastantes estaciones debido a las especiales características de la cuenca y la gran superficie que abarca, siendo de 900 Km<sup>2</sup> aproximadamente.

## 4.2 Características de la cuenca

### 4.2.1 Temperatura

La temperatura del aire es uno de las características climatológicas de mayor importancia. Para la obtención de los datos de temperatura se han empleado los datos de las estaciones de la Red Meteorológica de Cataluña. Dichas estaciones son la de “Santa Coloma de Farners”, situada en la comarca de La selva y la de “Santa María de Palautordera”, situada en Vallés Oriental.

A partir de los datos obtenidos se ha elaborado un análisis de la distribución mensual de la temperatura de la cuenca, cuyos resultados se muestran a continuación.

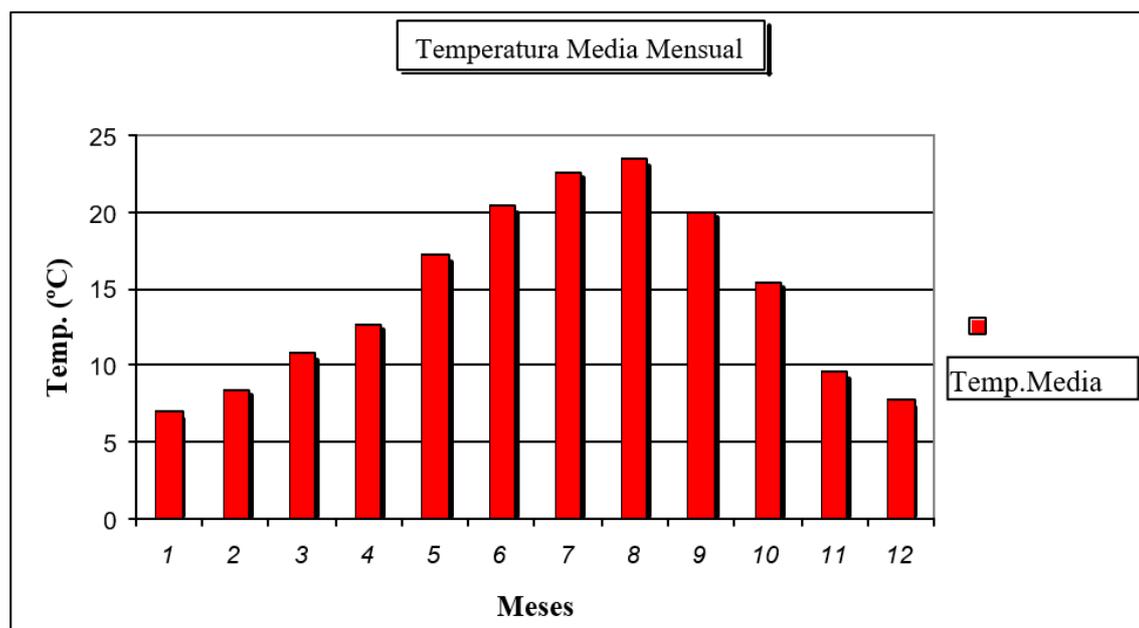


Figura 4-1: Temperaturas Medias Mensuales

Tabla 4-5: Temperaturas Medias Mensuales

DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA TEMPERATURA (°C)											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
6,9	8,5	10,8	12,7	17,3	20,5	22,6	23,4	20,0	15,5	9,6	7,7

Se puede observar en el gráfico como la zona destaca por su carácter mediterráneo con veranos calurosos con temperaturas medias de 23° aproximadamente en julio y agosto, y con temperaturas medias de 7° aproximadamente en diciembre y enero.

La media anual obtenida es de 14,6°.

Para conocer las temperaturas medias anuales de la zona y como se encuentran distribuidas en la cuenca, se ha elaborado la siguiente figura correspondiente al plano “5. Temperatura media anual”:

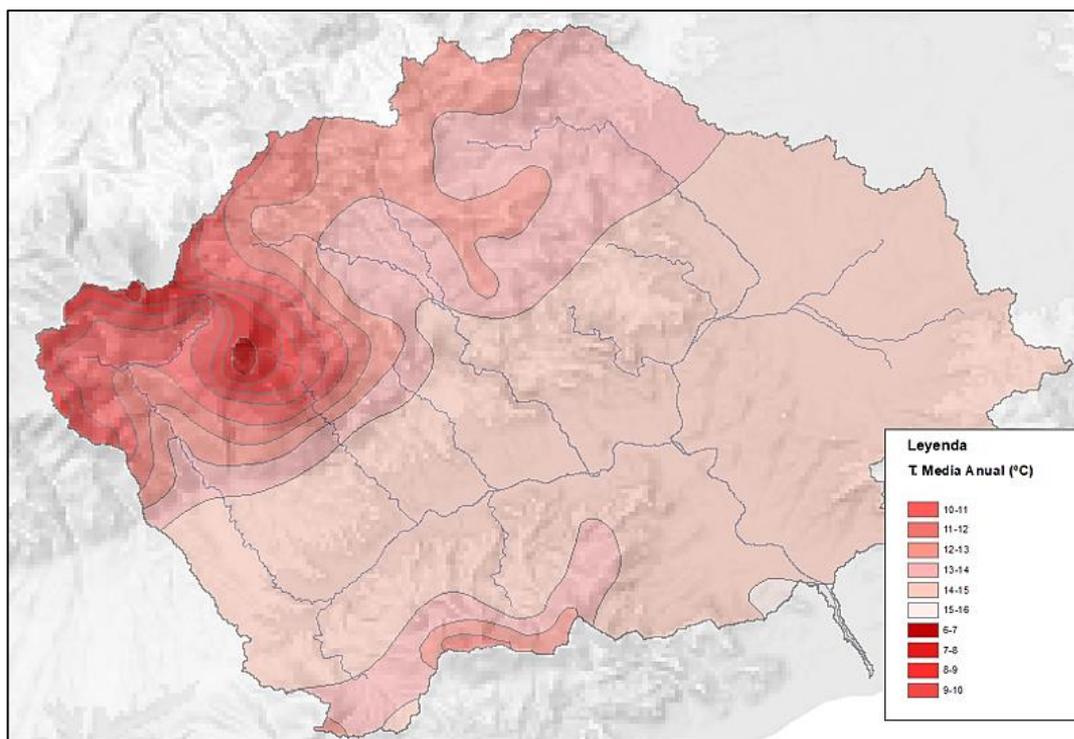


Figura 4-2: Temperaturas Medias Anuales

#### 4.2.2 Humedad atmosférica

La humedad atmosférica también es un parámetro de importancia, ya que se encuentra totalmente relacionada con mecanismos físicos, como son, la precipitación, visibilidad, presencia de nubes y la temperatura. En las siguientes tablas se aportan los datos de humedad relativa, entendiendo los índices mostrados como la relación en tanto por ciento entre la tensión real del vapor de agua y la tensión de saturación en la misma temperatura.

Dichos datos se han obtenido de los datos meteorológicos de la Generalitat de Catalunya en los años 2014, 2015 y 2016. La medida de la humedad relativa del aire se realiza mediante la medida de la variación del tamaño de un elemento de material sintético que actúa sobre un potenciómetro

- **Santa María de Palautordera**

Tabla 4-6: Humedades Relativas Mensuales (Santa María de Palautordera)

HUMEDAD RELATIVA %												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
<b>2014</b>	71	69	77	73	68	74	79	82	81	84	77	76
<b>2015</b>	70	76	73	68	66	66	77	79	82	78	86	74
<b>2016</b>	72	71	73	77	70	63	68	71	84	82	82	74

- **Santa Coloma de Farners**

Tabla 4-7: Humedades Relativas Mensuales (Santa Coloma de Farners)

HUMEDAD RELATIVA %												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
<b>2014</b>	71	68	74	71	66	70	75	79	78	83	79	75
<b>2015</b>	70	75	72	66	63	60	74	75	80	77	85	73
<b>2016</b>	71	70	71	75	67	61	63	66	80	81	81	71

#### 4.2.3 Precipitación

La precipitación viene siempre precedida por los fenómenos de condensación y sublimación o por una combinación de ambos.

La precipitación es una de las características que más definen el clima de una zona, además se trata de un factor controlado por el ciclo hidrológico, así como la ecología, paisaje y usos de suelo.

Para este estudio las estaciones escogidas han sido las siguientes:

Tabla 4-8: Estaciones pluviométricas de estudio

ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA				
Nombre	Provincia	Coord. X	Coord. Y	Cota
San Celoni	Barcelona	458997	4615748	155
Gualba de Dalt	Barcelona	458417	4620371	177
Gualba Juan Rague	Barcelona	458577	4620124	170
Breda	Girona	463580	4622656	175
Sils	Girona	478956	4628763	76
Tordera	Barcelona	476424	4616589	30
Santa Coloma de Farners	Girona	472102	4634523	135

A partir de los datos de precipitación máxima registrada en 24 horas, los anuales, mensuales y diarios, se han obtenido las medias mensuales para cada una de las estaciones. A continuación, se muestran gráficas y tablas con dichas medias mensuales para cada una de las estaciones:

- **Sant Celoni**

Tabla 4-9: Precipitaciones Medias Mensuales (Sant Celoni)

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (dmm)											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
523,8	509,7	637,7	664,6	632,3	488,8	306,2	609,5	853,6	959,1	681,7	702,8

Gráficamente:

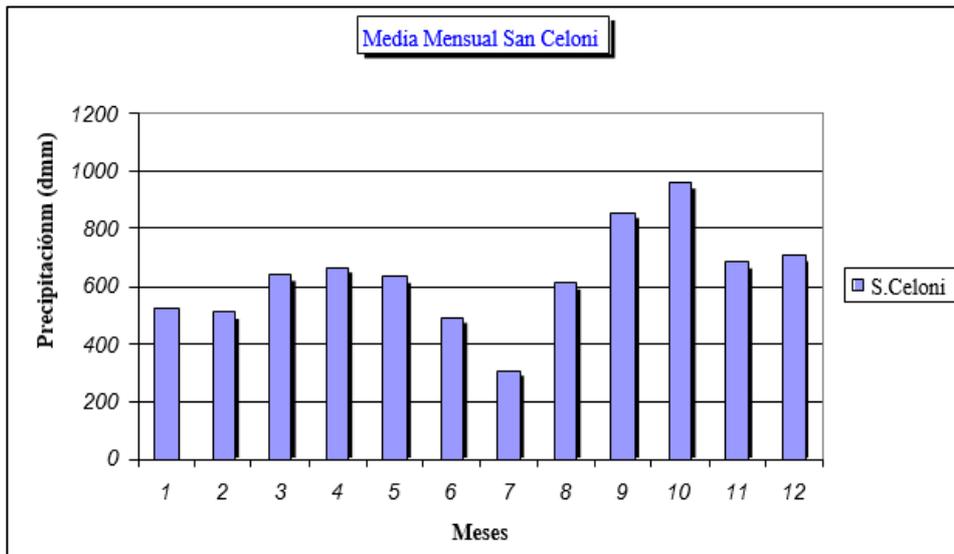


Figura 4-3: Precipitaciones Medias Mensuales (Sant Celoni)

- **Gualba**

Tabla 4-10: Precipitaciones Medias Mensuales (Gualba)

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (dmm)											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
682,5	552,2	699,9	836,1	806,9	621,6	389,7	808,3	1017,6	1087,0	746,4	800,0

Gráficamente:

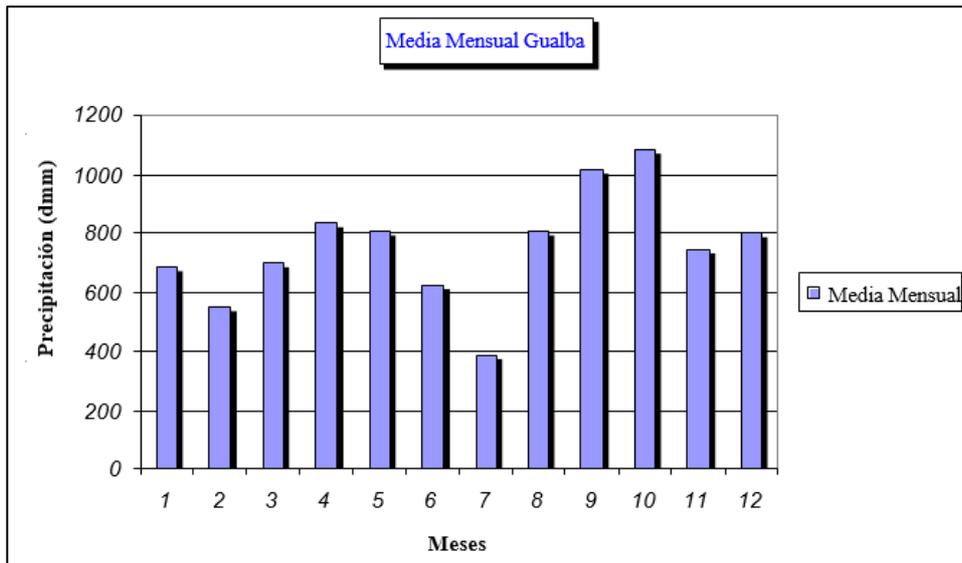


Figura 4-4: Precipitaciones Medias Mensuales (Gualba)

- **Breda**

Tabla 4-11: Precipitaciones Medias Mensuales (Breda)

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (dmm)											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
534,5	461,1	690,2	693,6	692,5	578,5	351,8	628,1	841,3	957,0	667,8	648,0

Gráficamente:

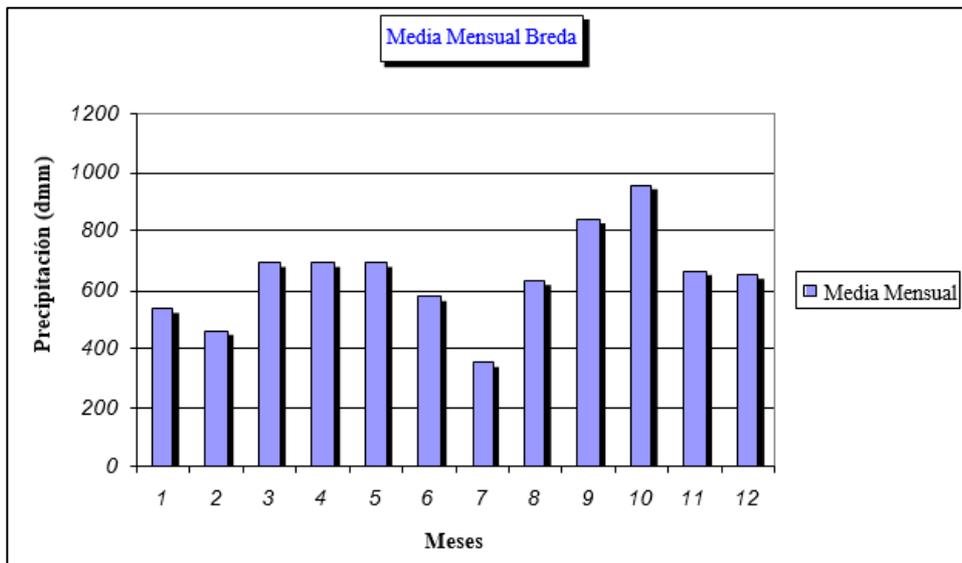


Figura 4-5: Precipitaciones Medias Mensuales (Breda)

- **Arbúcies**

Tabla 4-12: Precipitaciones Medias Mensuales (Arbúcies)

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (dmm)											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
562,3	467,1	680,8	804,7	1011,03	773,7	453,9	901,7	1036,8	1054,0	734,2	767,3

Gráficamente:

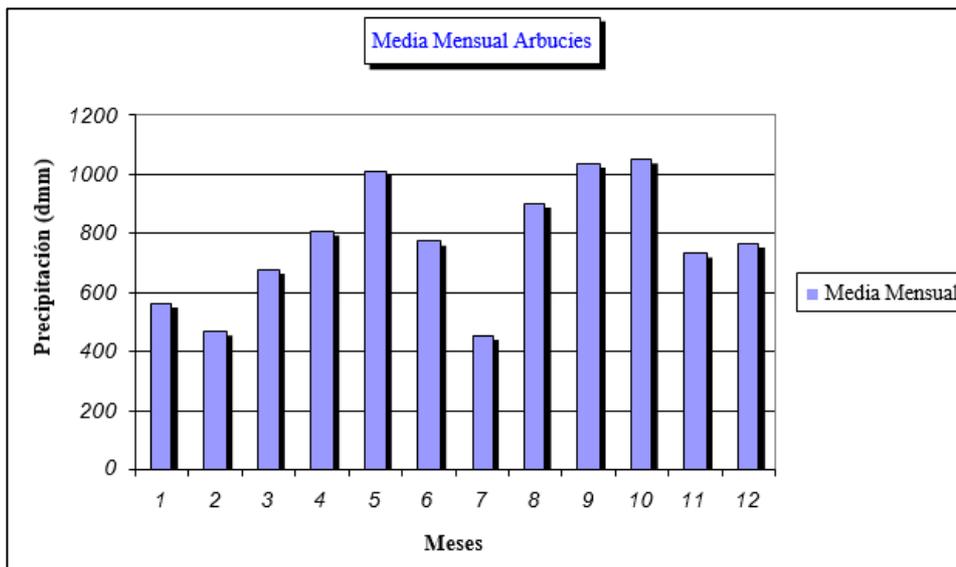


Figura 4-6: Precipitaciones Medias Mensuales (Arbúcies)

- **Sil**

Tabla 4-13: Precipitaciones Medias Mensuales (Sil)

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (dmm)											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
497,6	442,9	532,5	628,7	627,6	488,8	234,9	467,7	814,0	1067,5	667,6	612,2

Gráficamente:

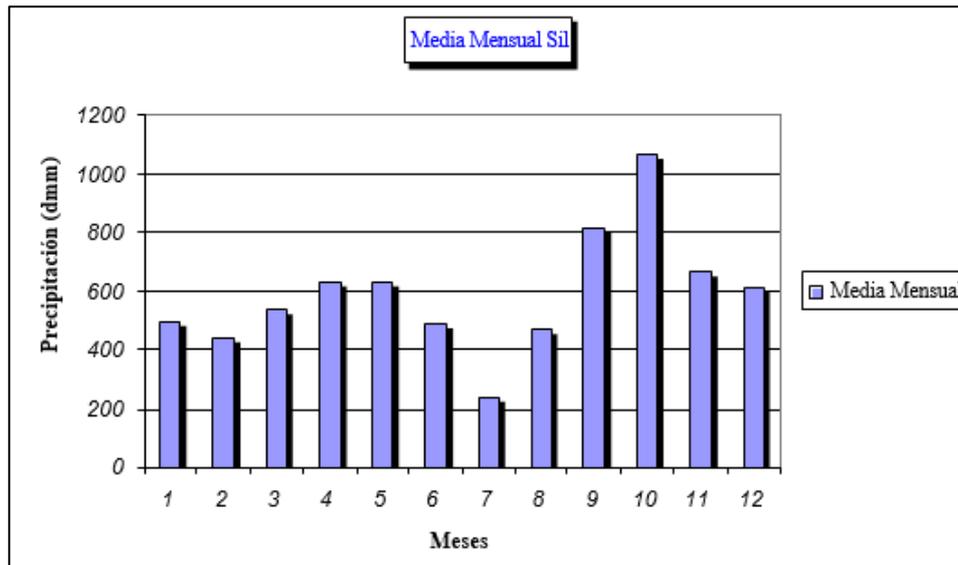


Figura 4-7: Precipitaciones Medias Mensuales (Sil)

- **Tordera**

Tabla 4-14: Precipitaciones Medias Mensuales (Tordera)

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (dmm)											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
564,7	458,0	593,2	635,7	647,0	520,4	278,8	530,4	806,8	937,8	672,0	689,6

Gráficamente:

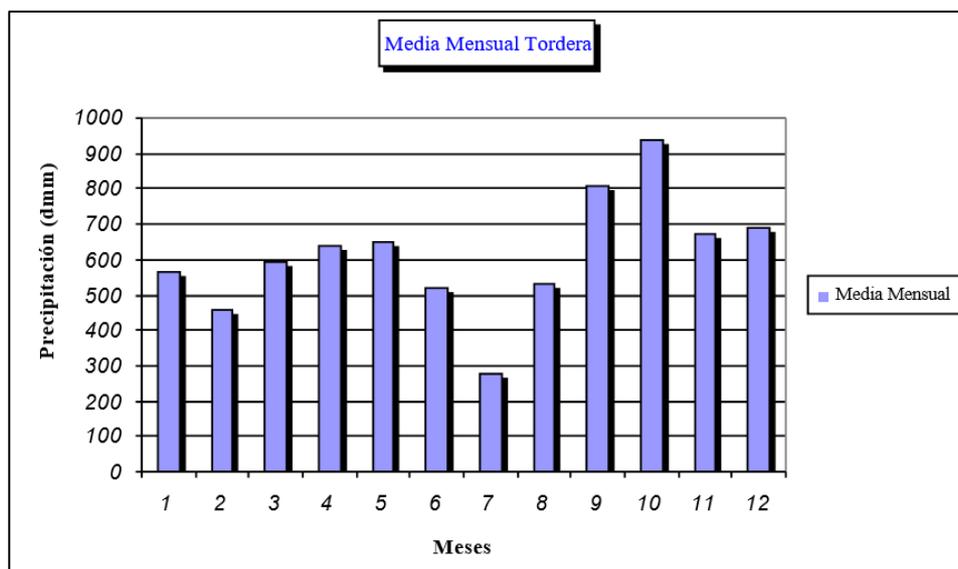


Figura 4-8: Precipitaciones Medias Mensuales (Tordera)

- **Santa Coloma de Farners**

Tabla 4-15: Precipitaciones Medias Mensuales (Tordera)

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (dmm)											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
617,7	429,1	574,1	725,8	703,3	591,5	363,1	491,1	784,2	960,9	781,6	634,1

Gráficamente:

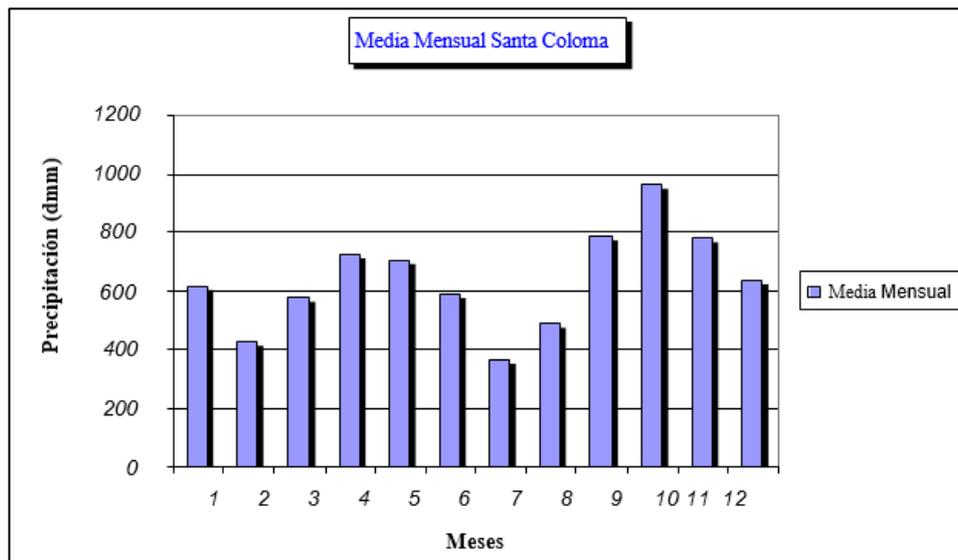


Figura 4-9: Precipitaciones Medias Mensuales (Tordera)

Tras analizar cada una de las estaciones, se ha elaborado una distribución mensual de la precipitación para toda la cuenca, cuya tabla de datos y gráfica se muestra a continuación:

Tabla 4-16: Distribución mensual de precipitaciones

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (dmm)											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
561	472	633	735	822	636	376	716	913	1015	695	719

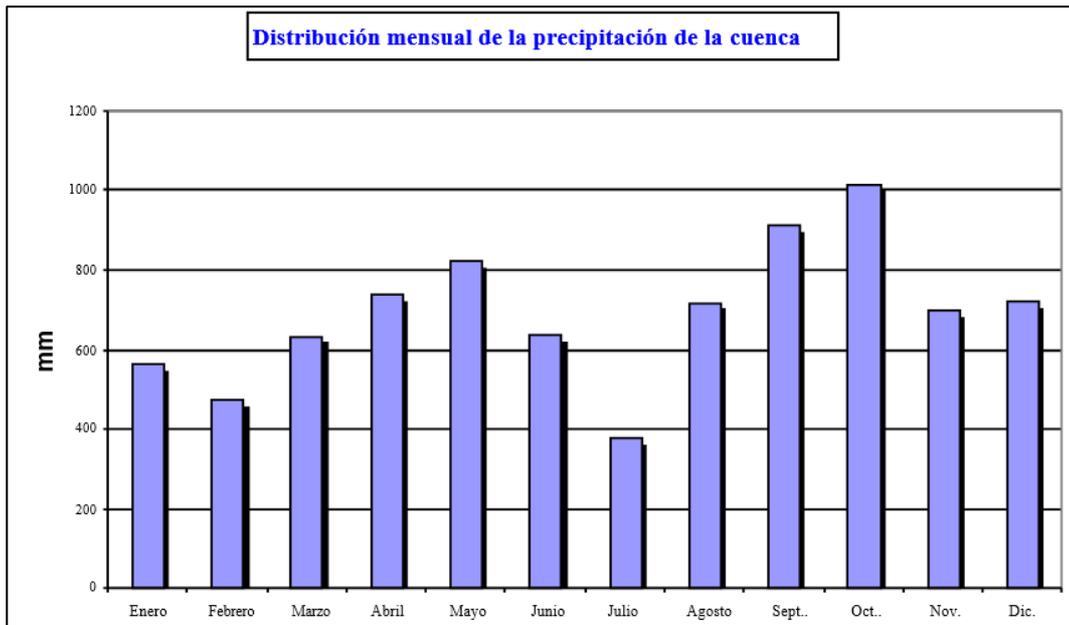


Figura 4-10: Distribución mensual de precipitaciones

En el gráfico anterior se puede observar unos máximos de precipitaciones en los meses de septiembre y octubre, destacando principalmente el mes de octubre. Respecto al mínimo de precipitación, éste se produce en el mes de julio, además de un mínimo relativo invernal en enero y febrero.

Finalmente, para conocer las precipitaciones medias anuales de la zona y como se encuentran distribuidas en la cuenca, se ha elaborado la siguiente figura correspondiente al plano “6. Precipitación Media Anual”:

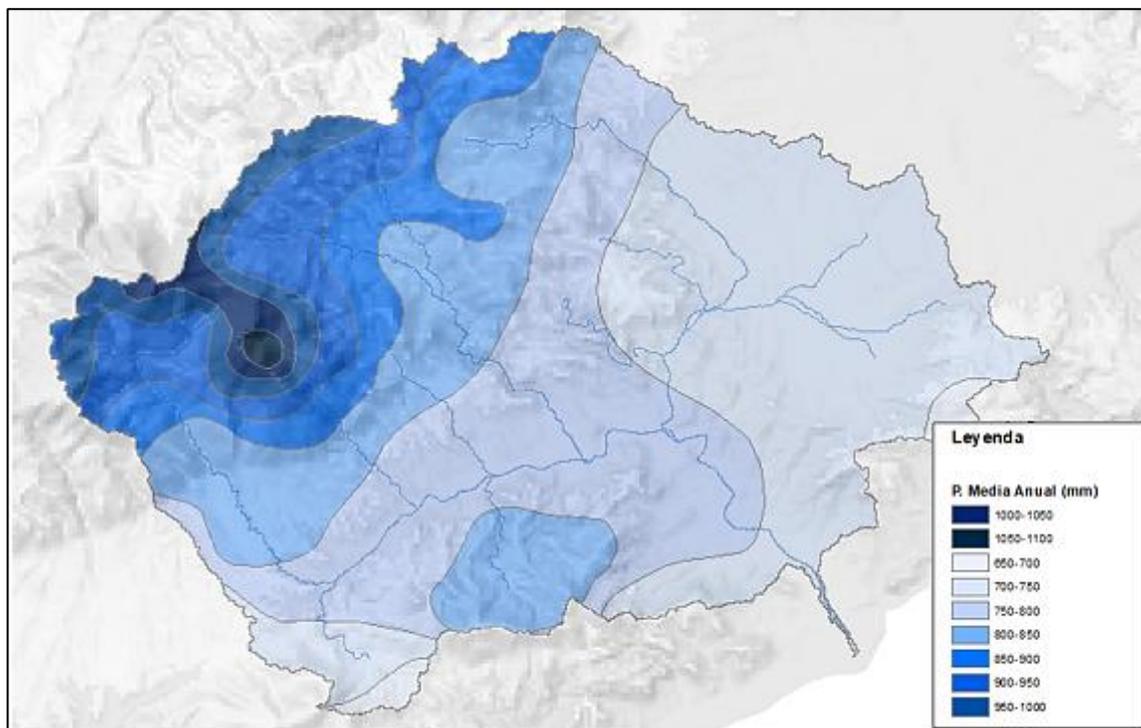


Figura 4-11: Precipitaciones medias anuales

# 5 GEOLOGÍA DE LA CUENCA

*No basta tener buen ingenio; lo principal es aplicarlo bien.*

*- René Descartes -*

## 5.1 Introducción

La Cuenca del Tordera se sitúa en la zona septentrional de una de las grandes unidades geológicas de Cataluña: los Catalánides. Se pretende conocer y caracterizar la principal cuenca de esta unidad geológica, por lo que en el presente trabajo se hace referencia a los diferentes factores que caracterizan los espacios fluviales.

Para conocer donde se ubican los macizos de los que se va a tratar, se muestra la siguiente figura de los principales municipios de la cuenca:

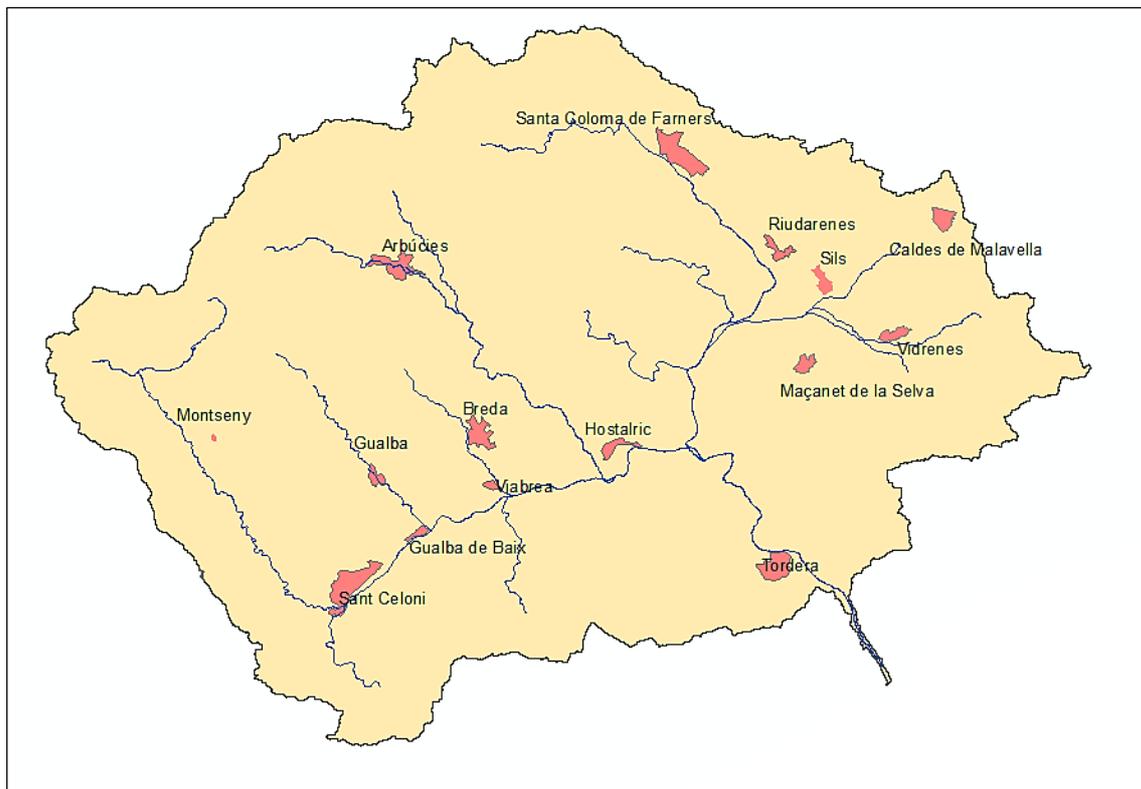


Figura 5-1: Municipios principales de la cuenca del Tordera

El estudio de dichos factores es imprescindible a la hora de realizar una buena planificación de espacios fluviales. Con el fin de estudiarlos, se diferencian en dos grandes grupos: factores intrínsecos y factores extrínsecos.

### ***Factores Intrínsecos***

Los principales factores son los siguientes:

- **Factores geológicos:** se entienden como los materiales que, mediante su composición química y mineralógica, estructuras, textura, porosidad y permeabilidad serán fundamentales para la liberación, removilización y precipitación de los elementos químicos en todos los tramos del espacio fluvial. Estos materiales para la descomposición de los elementos líticos configurarán la cama, terrazas y los elementos deltaicos de un curso fluvial. El conocimiento y descripción de las principales litologías aflorantes en la cuenca permitirá además caracterizar desde el punto de vista mecánico y químico los diferentes materiales que componen los suelos y los aluviones.
- **Factores climáticos:** El clima con sus agentes atmosféricos como precipitaciones, viento, variaciones de temperatura y la humedad, determinará las características y la naturaleza del medio. Dichos factores influyen directamente sobre las aguas subterráneas y superficiales, los seres vivos, los suelos y los sedimentos en redes de drenaje. Sin embargo, el clima también controlará los mecanismos de transporte de los elementos químicos, los minerales y de los materiales líticos. Por último, cabe destacar que el clima condicionará el deshielo y la evaporación.
- **Factores geoquímicos:** La temperatura y la humedad son la causa de la variación de las diferentes velocidades de reacción en los procesos de oxidación y de hidrólisis a consecuencia de la meteorización. Estos procesos permiten la producción de minerales de neoformación como las arcillas, sulfatos, carbonatos, sulfuros, etc.
- **La meteorización** en definitiva será la causa de la selección de los diferentes tipos de minerales y de compuestos líticos que por su elevada resistencia química y / o mecánica serán movilizados o quedarán como residuales in situ.
- **Factores topográficos:** los factores mencionados anteriormente condicionarán el relieve a la vez que controla la escorrentía superficial y subterránea, la cual condiciona la removilización de los productos solubles y el tiempo de residencia de las aguas superficiales y subterráneas. Las reacciones químicas se generan a partir de la humedad atmosférica y la humedad del suelo. Además, la tasa de erosión de los productos alterados se encuentra condicionada por los factores topográficos, así como la humedad.
- **Factores biológicos:** Estos vienen representados por la materia viva, la cual es capaz de movilizar ciertos elementos, modificar el medio y establecer criterios de precipitación y removilización. Las bacterias favorecen a la acidificación del medio y en consecuencia potenciar los factores geoquímicos que permiten la movilización de diferentes elementos químicos. Además, son la causa principal de la reducción de sulfatos a sulfuros, así como de la liberación de elementos químicos y de la oxidación. Los factores biológicos además controlarán la tasa de evapotranspiración, la de escorrentía superficial y el subterráneo.

### ***Factores extrínsecos***

Los principales factores extrínsecos se encuentran representados de forma genérica por los factores antrópicos, entendiéndose como tal, las diferentes acciones del hombre sobre el medio y en este caso concreto, sobre el espacio fluvial. Los factores antrópicos se pueden diferenciar por las siguientes características:

- Los primeros asentamientos humanos se localizaban en las áreas fluviales donde se situaban los principales recursos. Dichos asentamientos también se situaban en espacios fluviales por su disposición estratégica que favorecía una mejor defensa. Por lo tanto, los asentamientos y usos del suelo han sido los primeros condicionantes externos del espacio fluvial.
- Con posterioridad el incremento de la actividad agraria permite la aparición de una incipiente y joven industrialización.
- La primera fase de obra pública que supuso la construcción de una primera red viaria y férrea fue acompañada de la ocupación de buena parte del espacio fluvial.
- Ligada a esta primera fase de desarrollo de la obra pública se favorece una fuerte industrialización de los espacios, lo que supone un incremento de los consumos de aguas superficiales y subterráneas, una ocupación de los suelos y un fuerte incremento de la generación de residuos.
- La construcción de obras públicas dependerá de la ubicación geográfica de estos espacios fluviales.
- Asimismo, la presencia y desarrollo de estas infraestructuras favorece el crecimiento de nuevos espacios urbanísticos con toda la problemática que llevan asociadas. Esta actividad también genera una modificación de los factores intrínsecos y un incremento de los residuos producidos.

## **5.2 Factores geológicos de la cuenca del Tordera dentro de Cataluña**

La Cuenca del Tordera forma parte de una de las grandes unidades geológicas de Cataluña los Catalánides o cordilleras costeras-catalanas. Dentro de estas, se pueden diferenciar:

- **La Cordillera Prelitoral:** que constituye el límite oriental de la Depresión Central Catalana. Esta máxima cota se alcanza en el Macizo del Montseny, Cerro del Hombre con una altura de 1712 m de altura.
- **La Cordillera Litoral** junto a la costa llega a alcanzar los 759 m de altura en el macizo del Montnegre.
- Separando estas dos cordilleras encontramos la depresión prelitoral con una orientación NE-SW, que se extiende por La Selva, Vallès-Penedès y Camp de Tarragona.

Estas cordilleras son muy heterogéneas en lo que se refiere a su constitución y se alinean paralelamente a la costa mediterránea según la dirección general NE-SW y formando frecuentemente la propia línea de costa.

Las cordilleras se encuentran constituidas básicamente por una cobertura mesozoico-terciaria afectada por deformación alpina y discordante sobre un zócalo paleozoico plegado y meteorizado. La distribución de los relieves actuales viene condicionada por la tectónica distensiva de edad Neógena, la que se desarrolló en gran parte a favor de las fracturas preexistentes que habían actuado durante el Paleógeno como fallas compresivas y algunas de ellas como distensivas durante el Mesozoico.

### 5.2.1 Estructura de las cordilleras Costeras-Catalanas

Se trata de una estructura resultado de una deformación polifásica. La deformación se encuentra acompañada por el desarrollo de esquistosidad y metamorfismo regional, aunque los niveles estratigráficos más elevados (Devónico y Carbonífero) se encuentran menos afectados. En contraste los niveles más profundos como los materiales que afloran en las Guilleries presentan un metamorfismo de alto grado lo que explica que en esta área las facies metamórficas predominantes sean las anfibolitas. Además, este metamorfismo va acompañado de un fuerte desarrollo de la esquistosidad.

### 5.2.2 Metamorfismo y esquistosidad presentes en las cordilleras Costeras-Catalanas

En los Catalánides desde el punto de vista metamórfico cabe destacar que los diferentes tipos de esquisto parecen encontrarse muy próximos, por lo que en pocos kilómetros se pasa de esquistos verdes o anfibolita de bajo grado, a anfibolitas de alto grado.

Las diferentes esquistosidades que se presentan en los Catalánides varían notablemente en función del grado de metamorfismo. Así, las zonas donde el metamorfismo es de alto grado como es el caso de las Guilleries y de la parte oriental del Montseny presentan una esquistosidad principal. En los gneis y las anfibolitas la esquistosidad no es tan penetrativa lo que permite observar la primera esquistosidad que se encuentra plegada.

## 5.3 Estudio de la geología de detalle de la cuenca del Tordera

La Cuenca del Tordera no es una unidad geológica lo que supone que sus límites no son de tipo estructural, sino que incluye parcialmente diferentes sectores. El sector occidental de la cuenca forma parte del Macizo Montseny-Guilleries, el sur la cuenca forma parte del Macizo del Montnegre y en las zonas sudoccidental y nororiental las depresiones del Vallès y de la Selva quedan integradas en la cuenca.

El conocimiento de este estudio debe servir de base en todo estudio hidrológico e hidrogeológico para evaluar los diferentes parámetros de interés.

A continuación, se presenta el mapa geológico de la Cuenca del Tordera donde se pueden diferenciar las litologías predominantes.

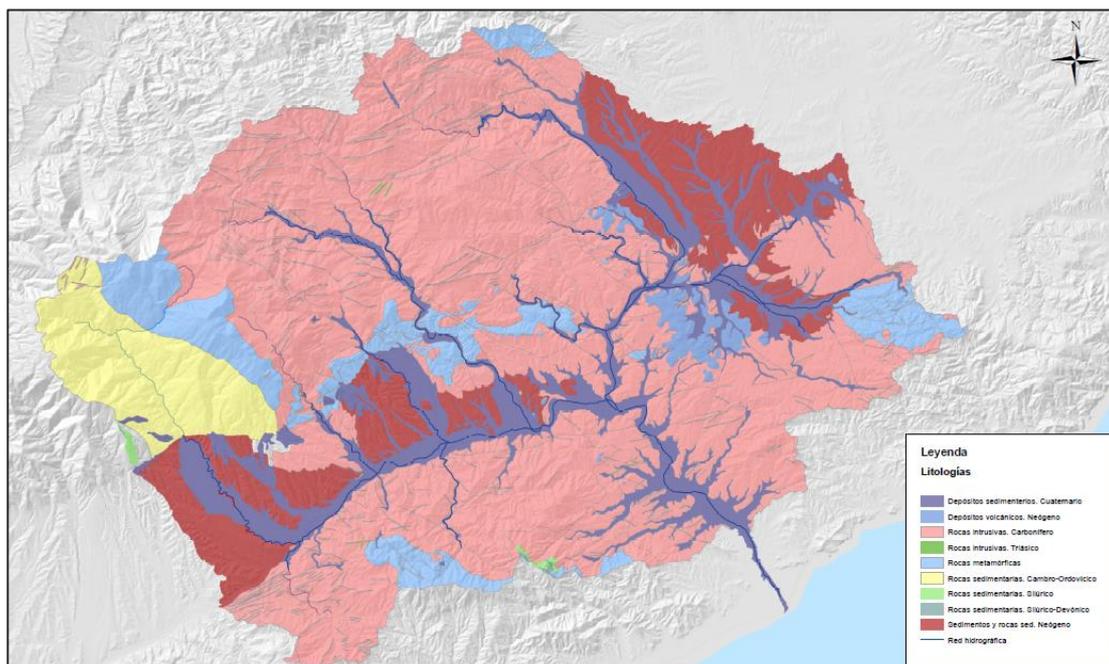


Figura 5-2: Litologías de la cuenca

Como se puede observar la mayor parte de la cuenca está formada por rocas intrínsecas del carbonífero, sin embargo, el área por el que transcurre el río presenta depósitos sedimentarios.

A continuación, se muestran dos figuras que representan los materiales encontrados en la cuenca, concretamente en la zona de estudio, el tramo bajo.

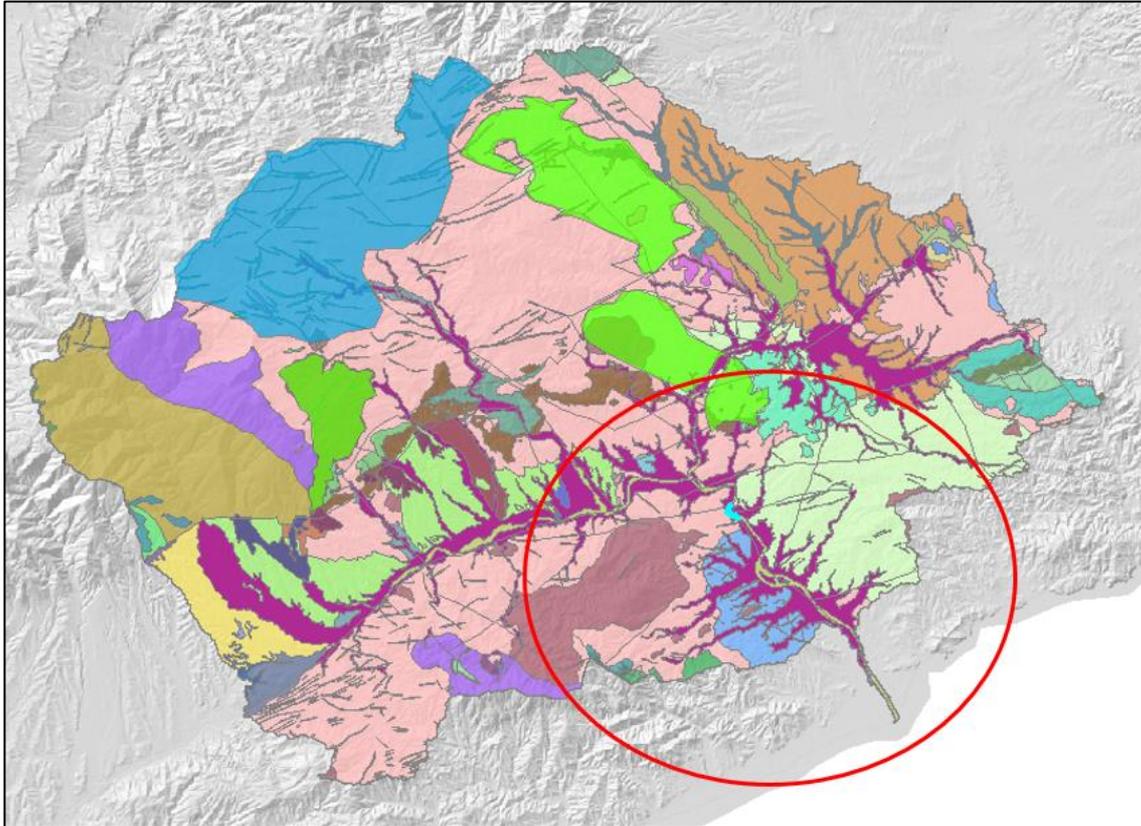


Figura 5-3: Materiales de la cuenca

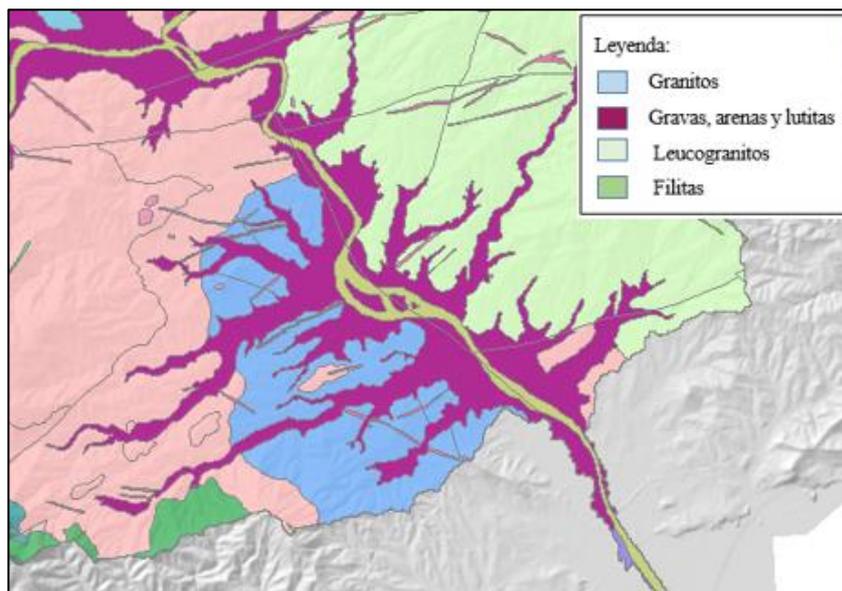


Figura 5-4: Materiales de la zona de estudio

Como se puede observar en la imagen anterior, lo más destacable es el material por el que están formadas las llanuras de inundación del río, en las que encontramos, gravas, arenas y lutitas. El hecho de que haya arenas es uno de los indicativos de que se vayan a producir las formas de fondo en el cauce principal.

#### ***Sector del Macizo Montseny-Guilleries***

La estructura del Macizo Paleozoico del Montseny es compleja. A grandes rasgos se trata de una gran zona con los materiales paleozoicos plegados en dirección N-S al Oeste, girando hacia el Sur hasta direcciones E-W y tomando hacia el Este una dirección NE-SW. En el núcleo de esta zona encontramos una intrusión granodiorítica a granítico-monzonítica. Por otra parte, los ejes de plegamiento y la estructura general se encuentran inclinados o basculados hacia el SW. De ahí que los materiales más modernos se encuentran en la periferia y hacia el Sur y los materiales más antiguos se encuentran en la parte central

Esta estructura se prolonga hacia Guilleries, aunque en esta zona predominan fundamentalmente los granitoides. El Macizo comenzó a formar durante la orogenia herciniana y presenta tres fases de deformación principales más o menos coincidentes con el resto de las Cordilleras Costeras-Catalanas y los Pirineos, unas ligadas al metamorfismo regional y de contacto asociado a el emplazamiento del granítico y otras posteriores a éste. En este macizo predominan además dos sistemas de fallas más o menos ortogonales con una dirección predominantemente NE-SW y NW-SE.

#### ***Sector de la Depresión del Vallès***

Al sur de la zona de Gualba, Breda y Riells Viabrea afloran materiales miocenos, que mayoritariamente presentan buzamientos de entre 8-20°SE, de la Depresión del Vallés además de los materiales cuaternarios de los diferentes arroyos y del aluvial de la propia Tordera.

#### ***Sector de la Depresión de la Selva***

Las zonas de Santa Coloma de Farners, Vallcanera Parque, Riudarenes, Les Mallorquines, Sils, Vidreres situadas en el sector oriental de la cuenca presentan materiales pliocenos que rellenan la depresión de la Selva y en diferentes puntos de esta depresión como son Maçanet de la Selva, Hostalrich y el Esparra afloran complejos volcánicos como el complejo Volcánico de Massanet de la Selva, el del Esparra y los Basaltos olivínicos de Hostalrich.

Al este de esta depresión en la zona del municipio de Caldes de Malavella afloran materiales del zócalo paleozoico de la Cordillera Litoral.

## **5.4 Descripción de los materiales que afloran en la cuenca del Tordera**

Dentro de los materiales que afloran en la cuenca, nos centraremos en la cobertura de la misma y concretamente en los cuaternarios. Se destacan cuatro secuencias que aparecen a lo largo del tramo del río.

- **Secuencia 1:** Esta secuencia aflora en el margen izquierdo del curso medio del Tordera de forma puntual entre Sant Celoni y Hostalric. Esta zona se caracteriza por presentar gravas, arenas y limos y constituye depósitos de origen fluviotorrencial.

Su desarrollo es puntual y discontinuo y en las zonas axiales de la llanura deltaica, la base de la secuencia se encuentra principalmente formada por niveles de gravas y arenas de origen fluvial. Dentro de esta secuencia en esta área también se observa un cambio lateral y vertical. Se observa que los materiales depositados son progresivamente más lutíficos típicos de una llanura deltaica litoral.

- **Secuencia 2:** Se sitúa mayoritariamente en el margen izquierdo del Tordera donde a menudo se enlazan niveles fluviales de otros tributarios. Como en el caso anterior en la parte axial del antiguo lecho predominan las gravas y las arenas de origen fluvial.

La parte alta de esta secuencia se desarrolla hasta el norte del pueblo de Tordera entre este pueblo y Fogars de la Selva. Cabe destacar que este cuerpo de materiales lutíticos se caracteriza por representar la unidad semipermeable intermedia del sistema acuífero bicapa.

El curso medio del Tordera y en la parte proximal del curso bajo está representada por el nivel de terraza baja del río. Litológicamente está formada por un predominio de gravas fluviotorrencial, aunque los niveles del techo pueden presentar ocasionalmente arenas y limos que representan depósitos de desbordamiento.

- **Secuencia 3:** Esta secuencia sólo ha sido detectada en el curso bajo del Tordera entre Palafolls y el mar. Esta secuencia se encuentra constituida por los sedimentos más superficiales que constituyen la plana deltaica y que presentan un espesor fuerza constante (en el sentido longitudinal y transversal) en alrededor de los 10 m. Corresponde a una unidad predominantemente arenosa, aunque ocasionalmente presenta gravas de poca extensión lateral y lutitas en la parte superior.
- **Secuencia 4:** Está representada por los depósitos gravosos y arenosos sedimentados en el fondo y en las partes laterales del cauce actual. Representan depósitos de barras fluviales transversales y longitudinales.

El cauce, erosiona y se encuentra encajada en los materiales que configuran las secuencias deposicionales infrayacentes.

# 6 MORFOLOGÍA DE LA CUENCA

---

*If you want to model nature you must copy nature.*

*If you want to copy nature you must understand nature.*

*- Ib A. Svendsen -*

## 6.1 Descripción general de la Cuenca

La cuenca del río Tordera está situada en la vertiente suroriental del macizo montañoso del Montseny, además ésta discurre entre dicho macizo y la cordillera litoral hasta la desembocadura en el mar, donde se acaba el Maresme y se inicia la Costa Brava.

Esta cuenca se sitúa en una zona intermedia entre las provincias de Barcelona y Girona y drena las comarcas del Vallès Occidental, la Selva y el Maresme. Se incluyen las cumbres y las laderas meridionales de los macizos prelitorales del Montseny y las Guillerries, las cumbres y las laderas septentrionales de los macizos litorales de Montnegre y Blanes, y las depresiones del Vallès y la Selva, desde Sant Celoni a Hostalrich y desde Hostalrich en Caldes de Malavella.

Para adentrarnos en la descripción de la cuenca del Tordera, cabe destacar que El Montseny es el macizo de mayores dimensiones y más altura de la cordillera prelitoral catalana. En su conjunto el espacio tiene una superficie de más de 30.000 ha, repartidas entre las comarcas de la Selva (Girona) y Osona y el Vallès Oriental (Barcelona). A pesar de ser de carácter básicamente silíceo, en algunos sectores encontramos también muestras de materiales de naturaleza caliza.

El río Tordera segmenta la montaña en tres grandes subunidades: La ponente, el plan de la Calma y el Puig Drau (1.344 m); al norte la cima del Matagalls (1.693 m), y en levante el pico de las Agudas (1.706 m) y el cerro del Hombre (1.713 m), lugar culminante del macizo. A lo largo de un hipotético trayecto en alzada, se encontraría en el Montseny los tres dominios biogeográficos característicos de la Europa occidental. Se trata del componente mediterráneo, el eurosiberiano y el borealpino, cada uno de ellos, evidentemente, con los elementos tanto de flora como de fauna que les es propios. La región mediterránea se ve representada desde las partes basales hasta aproximadamente la cota de los 900 m. A partir de esta altura y hasta los 1.600 m, se emplazan los elementos eurosiberianos, con muchos componentes biológicos característicos de la región centroeuropea.

## 6.2 Características físicas de la cuenca

La cuenca del Tordera tiene una superficie real aproximada de 898.18 Km<sup>2</sup> hasta la desembocadura, en forma de delta (actualmente barra de arena) en el mar. Su historia geológica está situada en el sector septentrional de la unidad estructural de los Catalánides, llamados también "Cordilleras Costeras Catalanas" que se extienden con una orientación desde las "Sierras Ibéricas" hasta las Pirenaicas, y constituye así un sistema de enlace entre ambas. En el siguiente cuadro se pueden observar los materiales que afloran en Los Catalánides, agrupados en los tres conjuntos mayoritarios:

Tabla 6-1: Precipitaciones Medias Mensuales (Tordera)

Conjunto	Material	Época
Zócalo herciniano	Sedimentos + Intrusiones	Paleozoica
Cobertura del zócalo	Sedimentos Sedimentos paleógenos	Mesozoico Ciclo Alpino
Sedimentos Neógeno + Rocas volcánicas	Sedimentos Intrusiones de rocas volcánicas	Neógeno y cuaternario

Las "cordilleras costeras catalanas" se diferencian de otras, debido a los movimientos de distensión producidos en el Neógeno, los cuales delimitan dos grandes alineaciones y una depresión intermedia. En el sector septentrional, las fallas generan una subdivisión en tres unidades diferenciadas como son la "Cordillera Costera", la Depresión Prelitoral "y la" Cordillera Prelitoral".

Otro sistema de fallas secundarias perpendiculares a los ejes principales, también subdividen la zona de estudio, diferenciando en el macizo Prelitoral, los bloques del Montseny y las Guilleries; en el macizo Litoral, los bloques del Montnegre y Blanes, y en la depresión Prelitoral, las depresiones del Vallès y de la Selva.

En líneas generales, los materiales más abundantes en la cuenca son las rocas eruptivas, que además han de metamorfizar los sedimentos paleozoicos. Juntos conforman casi la totalidad del relieve montañoso. Principalmente las rocas eruptivas consisten en granodiorites en el macizo Prelitoral y granitos en el macizo Litoral. En cuanto a las metamórficas, las más predominantes son las pizarras, sobre todo en el macizo del Montseny y por último las rocas sedimentarias se encuentran en el fondo de la depresión.

Los depósitos aluviales de los valles se llenan de sedimentos cuaternarios, mientras que la llanura aluvial está formada por limos y arenas finas. En toda la cuenca, el granito es el más predominante (57%), por lo que se espera una elevada formación de arenas.

## 6.3 Geomorfología de la Cuenca

### 6.3.1 Introducción

Las características geológicas, fisiográficas, topográficas, climáticas y geomorfológicas de la cuenca receptora del curso fluvial, deben ser conocidas en cualquier estudio de planificación de un espacio fluvial.

Tal y como se ha destacado en el apartado de geología, la cuenca de estudio presenta una complejidad litológica y tectónica, por lo que su orografía se ve condicionada. Se observa por un lado un relieve abrupto como el encontrado en el Macizo del Montseny y del Montnegre, lo cual contrasta con las pendientes suaves del margen izquierdo de la Tordera. Por otro lado, cabe destacar la elevada pluviometría, diversidad vegetal, variabilidad fisiográfica y litológica, lo que explica la dinámica morfológica de la cuenca.

En el siguiente apartado se ha realizado un resumen de los principales rasgos geomorfológicos de la zona para poder explicar la meteorización y erosión que se produce en la misma.

### 6.3.2 Descripción de la fisiografía de la cuenca de la Tordera

Debido a las diferentes características litológicas y estructurales de la cuenca, la fisiografía de la misma es de carácter heterogéneo. Este es el principal motivo por el que la geología hay que tenerla en cuenta en dicha cuenca, ya que debido a su complejidad se condiciona bastante el modelado del terreno.

Para conocer dicha geología con mayor profundidad se han observado las zonas que tienen una mayor erosionabilidad, la cual se ha dividido en diferentes categorías en función del grado de la misma.

En la siguiente figura se pueden observar las cinco categorías en las que se han dividido los materiales en función de su erosionabilidad.

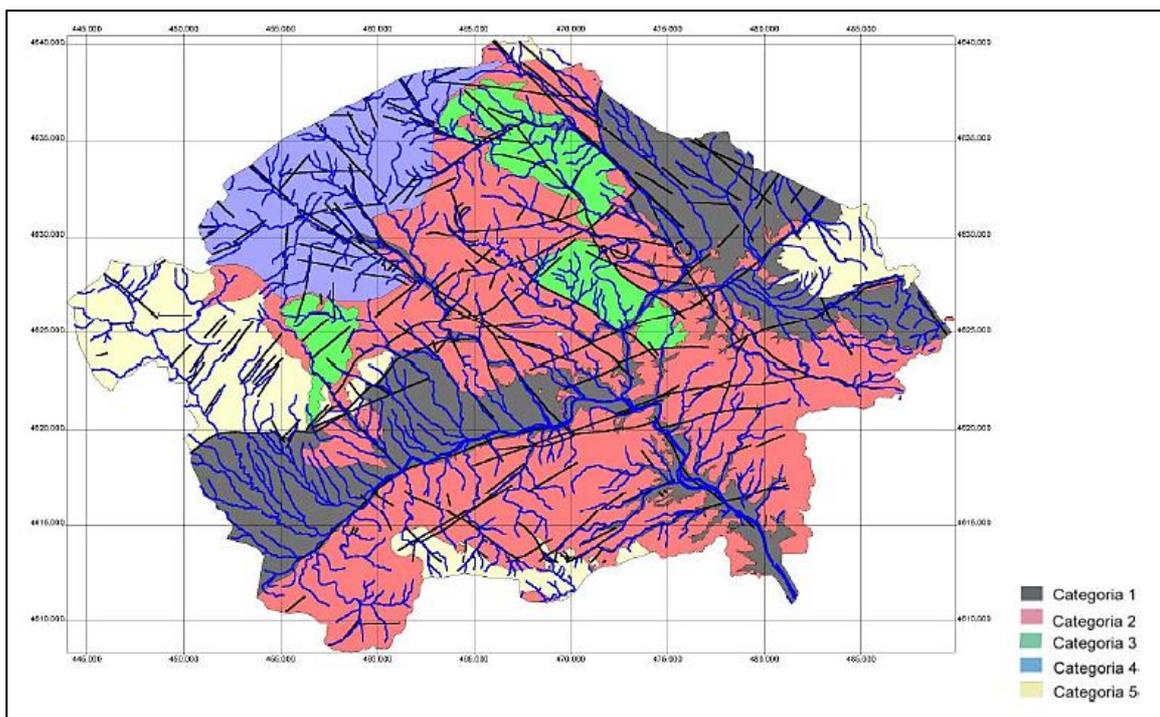


Figura 6-1: Materiales de la zona de estudio

A continuación, se detallan los principales factores de cada una de las categorías:

- **Categoría 1:** corresponde a los materiales más fácilmente erosionables. Si se compara la zona marcada con la figura 5-2, se puede observar que principalmente está formada por materiales miocénicos y pliocuaternarios de la depresión del Vallès y de la Selva y los materiales cuaternarios aluviales de los principales arroyos.

Dichos materiales favorecen el principio de los procesos geomorfológicos, los cuales se encuentran relacionados con la dinámica fluvial. Además, se observa como en esta zona se sigue la incisión de la red hidrográfica de la estructura tectónica de los Catalánides.

- **Categoría 2:** se encuentra relacionada con los materiales medianamente erosionables. En esta categoría se encuentran las granodioritas y granitos de la cuenca, los materiales volcánicos pliocuaternarios y los gneisos del sector de Gualba.

En las zonas donde se encuentran más meteorizados los materiales, estos permiten la incisión de la red hidrográfica, aunque cabe destacar que el grado de meteorización que presentan no es homogéneo. La granodiorita a menudo se encuentra fracturada, lo que puede incrementar el grado de meteorización.

- **Categoría 3:** se encuentra representada por los materiales leucogranítica que son materiales más competentes que las granodioritas. Esto explica que en el afloramiento de dichos materiales se observen pendientes abruptas.

La infiltración, la escorrentía superficial y la incisión de la red fluvial se ven condicionadas por esta morfología ya que se produce una sectorización de las áreas donde se encuentra dicha litología.

- **Categoría 4:** en esta zona afloran los diques de pórfidos, los cuales condicionan la asociación barra rocosa-rellano. Dicha asociación se produce normalmente en el sector de Sant Hilari donde se generan una gran cantidad de diques.

En esta categoría también se encuentran zonas muy fracturadas debido a la circulación de fluidos hidrotermales.

- **Categoría 5:** en esta categoría se encuentran los materiales más difícilmente erosionables. Al comparar esta zona con el mapa geológico, se observa que se trata de los materiales del zócalo paleozoico, los cuales afloran en el sector del Montseny, de las Guilleries y de Rupy. Además, dichas zonas coinciden con los relieves más abruptos, ya que estos materiales son más difícilmente meteorizables.

Con la figura 6-1 tenemos una idea de la erosionabilidad que existe en los distintos materiales encontrados, sin embargo, la estructura tectónica de los macizos también influye en el grado de alteración de las rocas.

Como se ha observado en la geología de la cuenca, hay zonas que presentan una elevada fracturación, las cuales a su vez causan un doble interés. Por un lado, dichas zonas favorecen a la infiltración y la meteorización de la roca y por otro las grandes fracturas favorecen la circulación de fluidos hidrotermales que han dado lugar a la cristalización de episanites y la silicificación. Este hecho provoca que las zonas atravesadas por fallas resultan difícilmente erosionables, lo que da lugar a barras rocosas y por tanto a relieves más abruptos.

Por otro lado, se han identificado las áreas que presentan distintos grados de fracturación, ya que ésta controla el trazado de la red hidrográfica. Las áreas principales donde se produce un mayor grado de fisuración son las siguientes:

- La cabecera de la **Riera de Santa Coloma** donde predominan las dos familias de fallas anteriormente mencionadas (se produce el cruce de la falla de Santa Coloma-Osor con las fracturas de dirección NE-SW).
- El sector de la **falla de San Hilario** también presenta elevada fracturación en un ámbito de influencia a ambos lados de la falla.
- El sector de la **Esparra, Riudarenes y de las Mallorquinas** donde se presentan complejos volcánicos pliocuaternarios de la Selva. Estos complejos se vieron favorecidos durante la etapa distensiva Neógena-cuaternaria.
- Las otras zonas donde la fracturación es intensa, son los dos sectores donde afloran las dos grandes fallas que limitan al norte y al sur con la **depresión del Vallès-Penedès**. Debido al hundimiento de bloques y al relleno de la depresión con materiales de relieves vecinos, estas fallas favorecieron a la formación de fundición tectónica. Cabe destacar la falla que limita al sur la depresión del Vallès-Penedès con los granitoides del sector del Montnegre, ya que es la que ha favorecido el encaje de la propia Tordera.
- En el **sector del Montnegre** destaca el sector comprendido entre la Riera de Montnegre y de Fuirosos donde la fracturación es elevada. Como en los casos anteriores se trata de una zona donde predomina la intersección entre dos familias de fallas.

Respecto a las fallas encontradas, en la figura mostrada anteriormente se observan las principales direcciones de fracturación que han permitido el encaje de la red hidrográfica, las cuales se detallan a continuación:

- En el sector del Montseny se observa que la fracturación predominante presenta una dirección NE-SW y ha favorecido el nacimiento de numerosas rieras e incluida la propia Tordera tal y como se ha expuesto anteriormente. Por otro lado, el sector noroccidental del macizo del Montseny-Guilleries se encuentra dividido en dos sectores:
  - Sector comprendido entre la falda del Cerro del Hombre y del Matagalls y la falla de la Riera de Arbúcies-Espinelves. En esta zona se observan las fallas en dirección NE-SW y N-S, pero de menor longitud que la falla de la Riera de Arbúcies-Espinelves. Además, estas fracturas son aprovechadas por la red de drenaje.
  - En la zona comprendida entre la Riera de Arbúcies y la de Santa Coloma destaca por presentar fracturas de dirección NW-SE, E-W y NE-SW. En este caso las fallas poseen una menor longitud que las anteriores, pero también favorecen la creación de la red hidrográfica.
  - En el sector nororiental del macizo en el sector de Palafolls la Riera de Vallmanya y de la Mina de Oro orientan o transcurren incidiendo con la fracturación NE-SW predominante en la zona.
- El sector litoral presenta 3 grandes direcciones de fracturación que explican que en la zona categoría 2. Las dos grandes familias de fallas son: E-W, NE-SW. La red de drenaje de este sector se caracteriza por presentar una orientación predominante NE-SW.

Cabe destacar por último que la esquistosidad también influye en la erosionabilidad y meteorización de los materiales, aunque no se encuentra reflejada en el mapa.

A continuación, se muestra una figura en la que se ha representado el relieve desde el punto de vista orográfico, con altitudes de los 100 a los 1700 m.

Esta diferencia de altitudes se encuentra totalmente relacionada con los principales rasgos que presenta la cuenca. De esta forma el Macizo de Montseny destaca por poseer un relieve muy abrupto. Entre los dos relieves distintos se sitúa el nacimiento del Tordera. Por un lado, encontramos relieves más abruptos constituidos por materiales pizarrosos y por otro lado se encuentran materiales miocénicos. Por otro lado, las zonas dominadas por granitoides no muestran contrastes altitudinales tanto marcados como las zonas dominadas por materiales metamórficos.

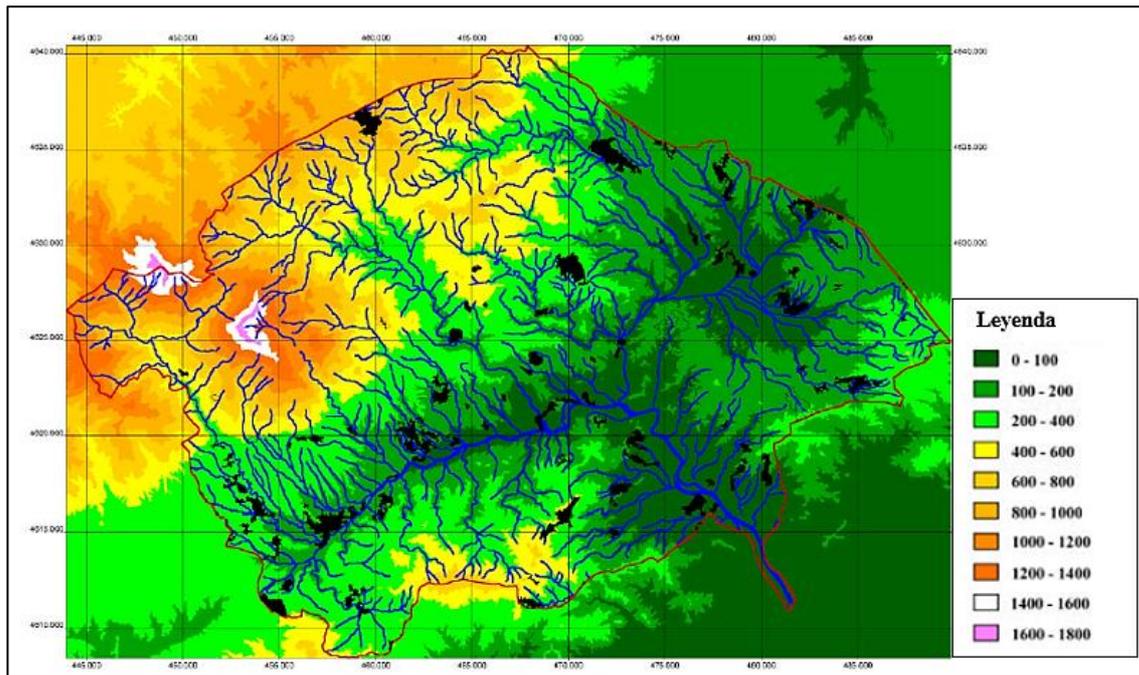


Figura 6-2: Altitudes de la cuenca

Debido a la variación de altitudes se pone de manifiesto el comportamiento diferencial frente a los agentes erosivos de las diferentes litologías predominantes en el Macizo del Montseny-Guilleries que da como resultado un relieve diversificado. Por otro lado, los materiales metamórficos tienen un comportamiento bastante competente, lo cual hace que su tasa de erosión sea baja y que los granitoides sean más fácilmente meteorizables y por tanto den lugar a arenas.

Un claro ejemplo de las diferencias fisiográficas causadas por las diferencias litológicas y estructurales es el que se presenta en el nacimiento del Tordera. El río nace en la zona de Sant Marçal situada entre dos relieves importantes como son el Cerro del Hombre y el Matagalls. En el sector de Sant Marçal aflora granodiorita lo que explica que haya producido la incisión de la red hidrográfica. Dicha incisión sigue una de las direcciones de fracturación de los Catalánides, lo que pone de manifiesto que la estructura tectónica está caracterizada por una fuerte regionalización de la cuenca en función de la fracturación. Además, la erosión en el nacimiento se ve favorecida ya que la zona se sitúa en el contacto de dos materiales competentes.

En las áreas donde predominan los materiales paleozoicos, la erosión se ve claramente condicionada por las estructuras tectónicas, probablemente será fuertemente controlada por las principales direcciones de esquistosidad que afectan a estos materiales.

En la figura 6-1 se observa como los cursos fluviales de los arroyos que drenan al macizo del Montseny-Guilleries coinciden con una de las grandes direcciones de fracturación NW-SE y que por lo tanto se han convertido en zonas de fácil erosionabilidad. Por otro lado, cabe destacar que la disposición rectilínea y sin ramificar del curso bajo del Tordera refleja la influencia del sustrato sedimentario.

En esta también se puede observar el nacimiento de la Riera de Santa Coloma alineada bastante bien con el nacimiento del Tordera coincidiendo con una de las otras direcciones de fracturación de los Catalánides. Esto provoca que la presencia de una falla en este sector haya favorecido la incisión de la red hidrográfica.

En la parte oriental de la cuenca la orografía es más suave y las cotas son más bajas. Dicha orografía se encuentra controlada por la estructura tectónica de la zona y por las litologías predominantes. Dicha zona se sitúa en la Depresión de la Selva, la cual ha permitido la estructuración en bloques fallados, los cuales se fueron hundiendo. Los materiales detríticos fácilmente erosionables rellenaron esta depresión.

Por otro lado, la depresión del Vallés al igual que la de la Selva constituye una fundición tectónica rellena por materiales detríticos fácilmente erosionables.

Respecto al este de la cuenca se observa un área con relieves más marcados. En dicho sector hay presencia de materiales del zócalo paleozoico aflorantes y además se observan zonas relativamente planas debido a la elevada erosionabilidad de los granitoides.

Al sur de la cuenca el MDT presenta una zona con relieve abrupto. Esta zona se encuentra representada por el macizo del Montnegre, constituido por materiales del zócalo paleozoico de carácter competente. Este macizo no presenta altitudes superiores a los 750 m, además se caracteriza por presentar laderas cortas y abruptas muy diseminadas por la incisión fluvial y con pequeños fondos de valle aluviales discontinuos y sinuosos. Las laderas de estos sectores son largas y moldeadas por una espesa formación superficial.

Al sur de dicho macizo los relieves son más suaves coincidiendo con la presencia de los granitoides en el margen derecho del Tordera y se observa un predominio de la incisión fluvial que da lugar a una red de drenaje densa y con pendientes fuertes. Si se comparan los dos márgenes del Tordera se observa que el derecho presenta un relieve más suave mientras que el izquierdo se encuentra relacionado con diferencias litológicas existentes.

# 7 USOS DE SUELO

---

*Es preferible obtener una respuesta razonablemente aproximada pero rápida que le indique si el diseño funciona o no, que invertir más tiempo y obtener el mismo resultado sólo que con más decimales.*

*- Robert L. Norton -*

## 7.1 El uso del suelo y su empleo

La cuenca del Tordera es muy forestada y cuenta con un relieve abrupto en el que hasta los 500-600 metros dominan los pinares y los alcornoques, y por encima los encinares y las plantaciones de castaños. Alrededor de los 1000-1100 metros el encinar se sustituye por el hayedo, el cual se encuentra por los prados a partir de los 1600 metros.

Debido a que la cuenca posee tanto bosque y desnivel, sólo se encuentra una pequeña parte de agricultura, la cual está ubicada en la depresión Prelitoral y en los valles de la Selva y del Tordera donde tiene importancia.

En la parte más baja de la cuenca, el terreno es plano y perfectamente comunicado, lo que provoca que la población urbana e industrial se concentre en dicha zona. La población de la cuenca ha evolucionado de la siguiente forma:

<b>Año</b>	<b>Nº Habitantes</b>
1920	44.645
1930	47.180
1940	48.030
1950	49.428
1960	56.633
1970	79.233
1973	83.784
1991	103.062

Tabla 7-1: Evolución de la población de la cuenca. Instituto de estadística de Cataluña

Se puede observar un aumento considerable de población entre el 1960 y el 1970, casi de un 40 % y entre 1973 y 1991 de casi un 19%.

### 7.1.1 Tipo de uso y cambios en el empleo del espacio fluvial

El uso de suelo y el cambio de las actividades del Tordera, se puede extrapolar desde Sant Celoni en Blanes.

En los niveles aluviales inferiores y en las zonas más cercanas al cauce, los cultivos han sido el uso predominante. A partir de los sesenta, se han ido generando industrias a partir de terraplenados principalmente del canal. Este hecho se produjo principalmente en la zona de Sant Celoni, La Batllòria y el pueblo de Tordera.

En la actualidad en la zona de la desembocadura se está produciendo un cambio progresivo de los cultivos, los cuales han pasado a ser zonas turísticas (campings). Por otro lado, no se encuentran urbanizaciones residenciales ni de segunda vivienda cerca del cauce del río. Aquellas parcelas que pertenecen a propiedades que históricamente se habían inundado, en la actualidad se encuentran protegidas con escollera.

Otro uso del canal ha sido su utilización como zona de vertido de los productos de lavado y clasificación de los áridos que provienen de las numerosas plantas de extracción situadas a lo largo del tramo.

El cambio más reciente se ha producido en el tramo de Sant Celoni - La Batllòria, donde se ha provocado una reducción de la zona de paso del agua debido a los huertos ilegales, incluso en crecidas de muy baja magnitud. Esto ha provocado la reducción de la capacidad de desagüe y ha aportado mucha suciedad.

Algunas de las zonas se encuentran liberadas para las industrias tras las riadas producidas en los años sesenta y setenta, las cuales han sido ocupadas posteriormente por huertos.

Los usos del suelo de la zona de estudio se pueden observar en la siguiente figura:

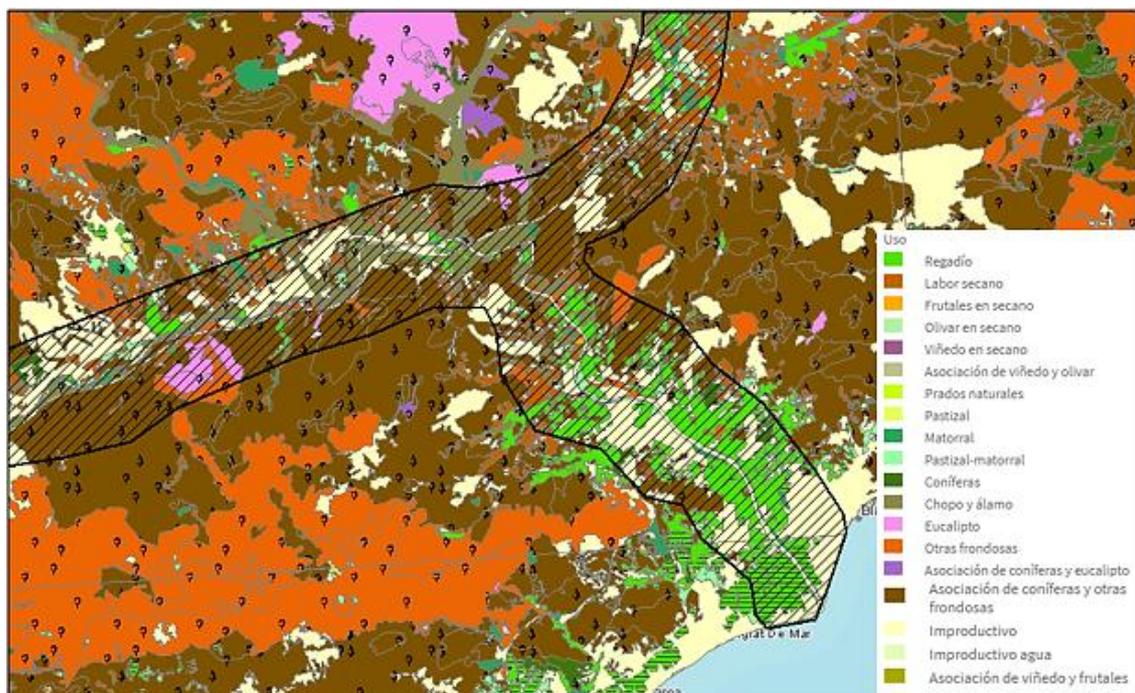


Figura 7-1: Usos de suelo de la zona de estudio.

# 8 ESTUDIO PLUVIOMÉTRICO

---

Si hay magia en este planeta, está  
contenida en el agua.

- Loran Eisely -

## 8.1 Análisis atmosférico. Precipitación

En la cuenca del Tordera se presentan tres situaciones meteorológicas que propician las tormentas extremas, aunque se puede decir que el comportamiento atmosférico de esta cuenca es muy variable. Dicha información proviene del profesor de climatología y geografía física del Departamento de Geografía de la Universidad de Barcelona, el cual expone las siguientes situaciones:

- 1) Se produce un desplazamiento en dirección SW-NE por la depresión prelitoral de la cuenca. Dichos eventos están provocados por la subida de latitud debido a las lluvias torrenciales que comienzan en el Golfo de Cádiz. Se trasladan por la costa mediterránea hasta llegar a Girona.
- 2) Otra situación con tendencia a generar fuertes precipitaciones se debe a la entrada de la lluvia por Blanes en dirección hacia Sils y el Empordà, dejando el Montseny a la izquierda. Se trata de temporales septentrionales que entran por el mar a través del delta y ocupan la parte NE de la cuenca de la Tordera y dejan en esta zona de Sils y Sta. Coloma precipitaciones abundantes.
- 3) La última situación atmosférica se refiere a las tormentas de verano que se producen por lluvias convectivas y descarga en la cabecera del Montseny. La lluvia disminuye progresivamente hacia los valles. La precipitación que se produce de esta manera se denomina lluvia o precipitación orográfica y está relacionada con la presencia de montañas; esta es la precipitación que se produce en la zona de estudio de este proyecto: el Montseny. Es por ello que en la falda del Montseny se producen importantes precipitaciones tanto en volumen como en intensidad. Las condiciones óptimas para que desencadenen las precipitaciones torrenciales son las siguientes:
  - Inestabilidad, especialmente por la presencia de una gota fría o, a veces, por la llegada de un frente frío, vaguada, etc. o una borrasca dinámica.
  - Temperatura de las aguas marinas superficiales alta.
  - Carga higrométrica elevada de las masas de aire preexistentes (muy húmedas y cálidas).
  - Vientos de procedencia marina (del este en las costas catalanas, valencianas, murcianas y parte de las andaluzas).
  - Efecto de inicio por la presencia de relieve paralelo a la costa.
  - Diferencia en altura.

## 8.2 Datos de precipitación de la cuenca del Tordera

### 8.2.1 Fuentes de datos

Para llevar a cabo la recopilación de datos pluviométricos será necesario contar con el registro de pluviómetros. En el estudio realizado para la cuenca del Tordera se contaron con 14 pluviómetros interiores y 9 exteriores, cuyas estaciones se muestran a continuación:

Tabla 8-1: Estaciones pluviométricas de estudio

Estaciones Pluviométricas	
Santa María de Palautordera	Balenya
Vallgorguina Vivers	Centelles
Sant Celoni	Llinàs Del Vallès
Gualba De Dalt	Cànoves Can Garriga
Gualba Joan Ragué	Cardedeu
Breda	Taradell Catalunya
Castanyet	Vilanova Sau El Tortadès
Sils	Aeropuerto Girona-Costa Brava
Massanet De La Selva	Llambilles
Tordera	Santa Coloma De Farnès "Font De Glòria"

### 8.2.2 Análisis de datos

Además de los datos obtenidos por las estaciones, una de las partes importantes para analizar los datos de cualquier variable física es el contraste entre sus componentes, como es el caso del contraste entre precipitación de los diferentes pluviómetros a fin de detectar las diferencias de comportamientos en la evolución temporal.

El gráfico de la evolución temporal de las series de datos es muy ilustrativo de las tendencias, saltos, etc. es habitual que una estación meteorológica o de aforos de caudales cambie la localización y esto repercuta en los datos medidos.

Un método muy intuitivo y de una gran utilización para detectar inconsistencias en los datos de una estación es el análisis de dobles masas; este método se basa en la comparación de los datos de una estación con las otras de su entorno. Los valores acumulados (anuales, estacionales o mensuales) de una estación se dibujan enfrentados a los de otra estación cercana fiable o bien a la media, aritmética o ponderada de un grupo de estaciones. Este dibujo da lugar a la curva conocida como "dobles masas" que hay que examinar posteriormente para detectar tendencias y cambios en la pendiente.

La teoría del método de dobles masas se basa en el hecho de que, si se representan en unos ejes coordenados las acumulaciones sucesivas de dos series de valores en el mismo periodo y con un régimen meteorológico o hidrológico igual, estos datos tienden a alinearse siguiendo una recta.

Para aplicar el método deben distribuirse previamente las estaciones de medida en grupos homogéneos. Algunos de los criterios que suelen seguirse para establecer estos grupos son:

- Estadísticos similares.
  - Valores medios y desviaciones típicas anuales.
  - Valores medios y desviaciones típicas estacionales.
- Proximidad entre estaciones.
- Altitudes similares.

Concretamente en el estudio tomado como referencia, la comparación se realizó entre la estación de Sant Celoni respecto a las de Gualba, Breda, Tordera y Sils. En las siguientes figuras se pueden observar los análisis de dobles masas realizados entre dichas estaciones, midiéndose la precipitación total anual acumulada en mm.

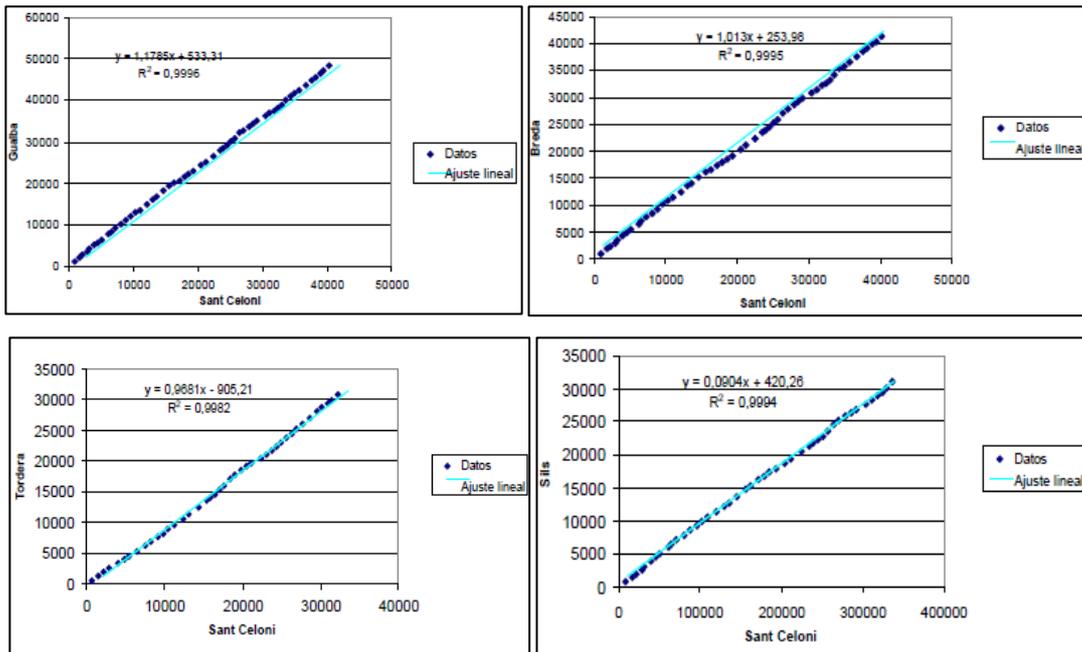


Figura 8-1: Análisis de dobles masas

Tal como puede observarse en estos gráficos, el resultado del análisis de dobles masas proporciona un ajuste lineal prácticamente perfecto y no se intuyen roturas ni errores apreciables que sea necesario señalar o que estorben el proceso de completado de series bases

## 8.3 Análisis de frecuencias. Regímenes extremales de precipitación

### 8.3.1 Introducción. Funciones de distribución

El régimen extremal de cualquier fenómeno natural nos sirve para poder estimar la frecuencia con que los máximos valores del fenómeno se presentarán a lo largo del tiempo. Así, al realizar el estudio hidrológico de una cuenca, a partir de los datos de pluviometría recabados, podemos analizar los máximos de cada año y realizar un estudio estadístico que se ajuste a una distribución de función conocida, con la que poder estimar la probabilidad de que estos extremos se repitan en un período de tiempo dado.

En el caso de análisis de precipitación es común utilizar el concepto de periodo de retorno  $T$  de un determinado fenómeno extremal como el tiempo medio, en años, que transcurre entre distintas ocurrencias de la variable superiores a un valor dado  $x$ . La definición de las relaciones  $P$  (precipitación) - Probabilidad o  $T$  (periodo de retorno) es el resultado habitual de los análisis estadísticos extremales de cualquier variable.

En un determinado punto de la cuenca, con datos de precipitaciones máximas a lo largo de un número suficiente de  $N$  años, la estimación de la relación  $P$ - $T$  puede abordarse con el uso de uno de los siguientes tipos de modelo estadístico:

- Modelos de series anuales de máximos.
- Modelos de series de valores sobre un umbral o series parciales.
- Modelos de series de tiempo.

En nuestro caso, al tener suficientes años de datos sólo fue necesario considerar el máximo valor de todos los datos del año para que la muestra fuera representativa. Una vez obtenidos los máximos de cada año se procedió a ordenarlos de menor a mayor y se les asignó un número de orden que proporcionaría la cantidad total de datos manejados.

A continuación, se obtuvo la función de distribución de las lluvias para los pluviómetros considerados, realizando una serie de ajustes a distribuciones conocidas como la función generalizada de extremos (GEV), la Gumbel o la función de distribución SQRT. Una vez ajustados los datos a estas distribuciones, se realizó una comparación entre los diferentes métodos de estimación para seleccionar la distribución más adecuada al caso de estudio.

### 8.3.2 Ajustes de calibración

En base a todo lo anterior, se realizaron una serie de ajustes sobre las series temporales que describen la evolución de las lluvias máximas diarias recogidas en las estaciones pluviométricas de Breda, Santa Coloma y Arbúcies durante los últimos 60 años.

Cada serie fue ajustada a la distribución Generalized Extreme Value (GEV), estimando los parámetros por el Método de los Momentos y por el Método de la Máxima Verosimilitud; a la distribución Gumbel, también por el Método de los Momentos y a la distribución SQRT, según correspondiera.

Como conclusión y comparando las distintas distribuciones a las que se ajustaron los datos pluviométricos, se pudo concluir que:

- La función de distribución de Gumbel, presentó realmente resultados para datos extremos de periodos de retorno altos, pero bajos respecto de los datos reales proporcionados por los pluviómetros.
- La función de distribución de GEV, asignó periodos de retorno mucho más bajos a los eventos históricos registrados, dentro del rango lógico del período de tiempo esperado y obtuvo unos valores para períodos de regreso alto, bastante más grande a los obtenidos por la Gumbel.
- La función de distribución de SQRT por su parte, producía ligeras variaciones en comparación con la GEV

Finalmente, como elección de la distribución que se utilizaría para el estudio pluviométrico y la posterior estimación de los hietogramas de cálculo, se optó por la distribución SQRT, para mantener la consistencia con varios estudios ya realizados por la Agencia Catalana del Agua (entre ellos el INUNCAT) y para presentar ajustes muy buenos y resultados muy similares a la distribución GEV, teóricamente la mejor candidata para la modelización de eventos extremos de fenómenos naturales.

## 8.4 Obtención de las curvas IDF. Estaciones

### 8.4.1 Pluviógrafo

Con el fin de obtener las curvas IDF se contó con datos de diferentes pluviógrafos, que son fundamentales para conocer no sólo la lluvia máxima sino también la intensidad máxima que puede caer en un periodo de tiempo determinado.

Con el fin de tratar los datos de manera ordenada y eficiente, se empleó un programa en lenguaje Fortran90, con el que leer los datos y separarlos en tramos de aguaceros o tormentas, calculando para cada una la máxima lluvia caída en un tiempo considerado, calculada como la suma de los valores consecutivos que cubren dicho intervalo. Para cada tramo definido, se escogió el máximo valor del pico para cada duración considerada. La solución adoptada fue la de seleccionar 30 máximos por estación.

Finalmente, tras todo el proceso, se llegó a concluir que se podía aceptar que los valores obtenidos para lluvias de duración ininterrumpida 1 h, 2 h y 3 h no fuesen exactos, ya que pueden existir aguaceros de duración menor que den valores más altos de lluvia acumulada. Así, el análisis de las lluvias de duración superior o igual a 1 h, se considera siempre la lluvia total caída en este intervalo de tiempo (existan o no interrupciones de la lluvia).

A modo de ejemplo, se muestra la curva IDF obtenida para la estación de Sant Celoni:

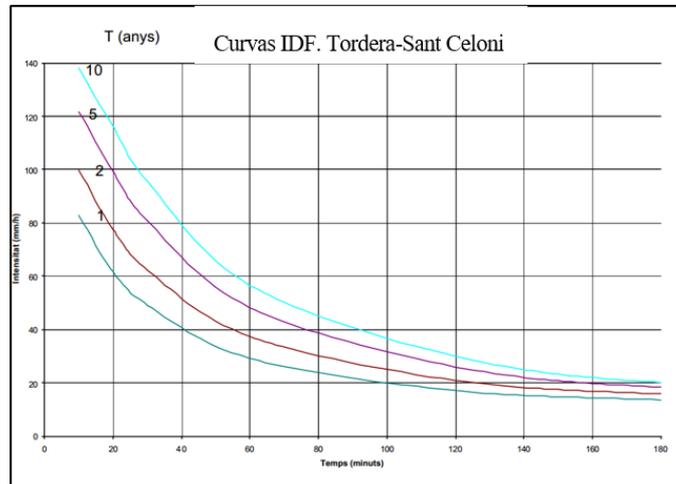


Figura 8-2: Curvas IDF. Sant Celoni (1)

Seguidamente, el método empleado para calcular la lluvia total caída en un intervalo de tiempo dado, aplicado a duraciones desde 1 h hasta 48 h, se extendería a una duración de 24 horas, por su sencillez.

Dado ya que no existe ninguna lluvia de duración (ininterrumpida) superior a 24 horas, para el análisis de las lluvias de duración de 24 horas, se consideró cada registro de lluvia y se sumó la lluvia registrada en ese momento más todas las lluvias caídas hasta 24 horas después. En este caso, el número de máximos seleccionados fue de uno 15 (de modo que el máximo de la serie es el doble del mínimo, aproximadamente). Esto suponía más de dos registros por año.

Nuevamente, a modo de ejemplo, se muestra la curva IDF obtenida en este caso para la estación de Sant Celoni:

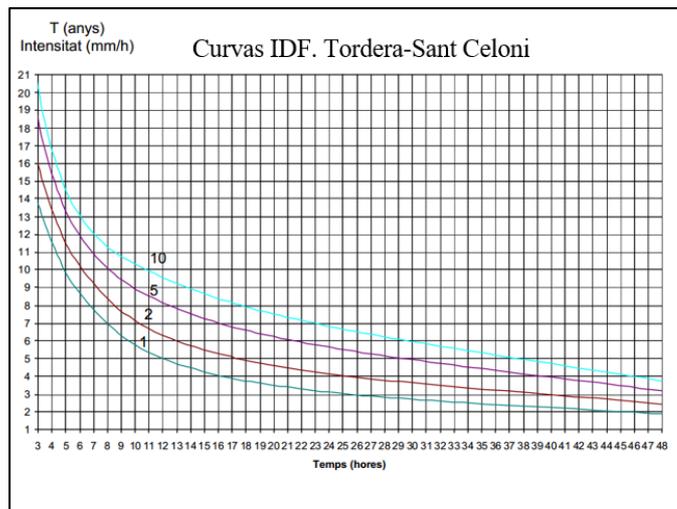


Figura 8-3: Curvas IDF. Sant Celoni (2)

### 8.4.2 Pluviómetros

Con el fin de continuar las curvas IDF hasta períodos de retorno más grandes y debido al escaso registro que se tenía de los pluviógrafos, lo que limitaba la extrapolación de sus resultados a períodos de retorno mayores de 10 años, se calcularon los coeficientes entre los pluviómetros y pluviógrafos, es decir, el coeficiente entre Pd y P24.

La metodología propuesta para completar las curvas IDF hasta periodos de retorno altos se basaba en calcular las curvas de períodos de retorno mayores a  $T = 10$  años, que fueran proporcionales, a partir de los datos pluviométricos. Así, se seguiría un proceso de estimación de los coeficientes entre la Pd, para un T determinado, y la Pd ( $T = 10$  años) en cada una de las estaciones.

Para la estación pluviográfica de Sant Celoni y tomando el pluviómetro de la misma estación se obtuvieron los siguientes resultados:

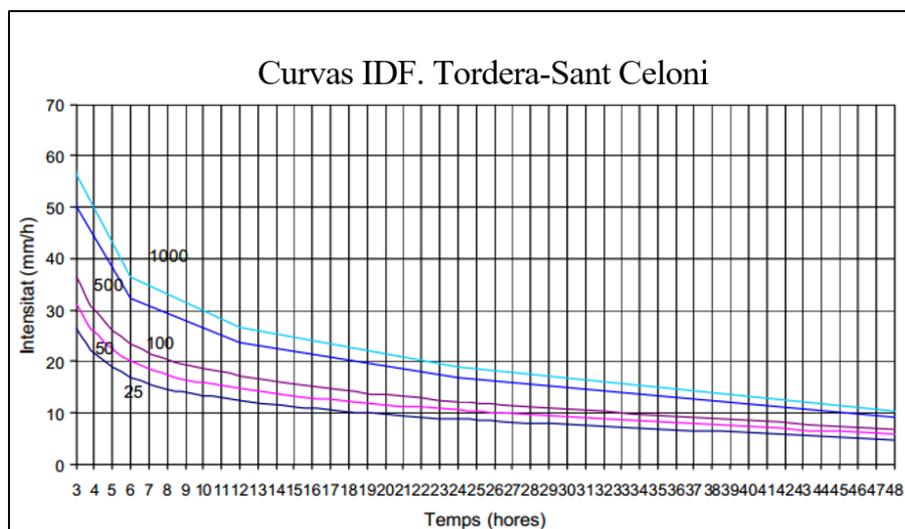


Figura 8-4: Curvas IDF. Sant Celoni (3)

## 8.5 Definición de los hietogramas de tormenta

### 8.5.1 Metodología de cálculo

Cualquier estudio de inundabilidad asociada a lluvias extremas debe asumir unas hipótesis relativas al hietograma de cálculo. El método utilizado en la cuenca del Tordera, se inspiró en el análisis original de Huff, si bien fue necesario realizar algunas modificaciones, debido a la poca cantidad y baja representatividad de los datos disponibles.

El punto de partida fue el de analizar la relación entre la duración de las tormentas disponibles y el porcentaje de lluvia precipitado respecto a la total, una vez transcurrida la fracción (pt) de su duración.

Llegados a este punto, se adoptaron una serie de hipótesis que permitirán en última instancia definir los hietogramas de cálculo. En primer lugar, se asumió la existencia de una familia de curvas que definía, en función de la duración de la tormenta, el porcentaje de lluvia acumulada para cada percentil de tiempo transcurrido.

Seguidamente, y después de probar varios métodos, se decidió tomar la envolvente superior de los datos que quedan tras censurar el 25% de los valores más altos de la muestra; Huff, en su trabajo original, tomó la medida de cuartil superior de los datos de que disponía, más numerosos que en la cuenca del Tordera. Dado que el número de chubascos analizado era de 120, después de descontar los que produjeron menos de 40 mm de precipitación total, se censuraron en cada caso los 30 puntos superiores.

De esta forma ya era posible determinar la forma de los hietogramas obtenida para cualquier duración de la lluvia. En la siguiente figura, se muestran los hietogramas para duraciones de 3, 6, 12 y 24 horas.

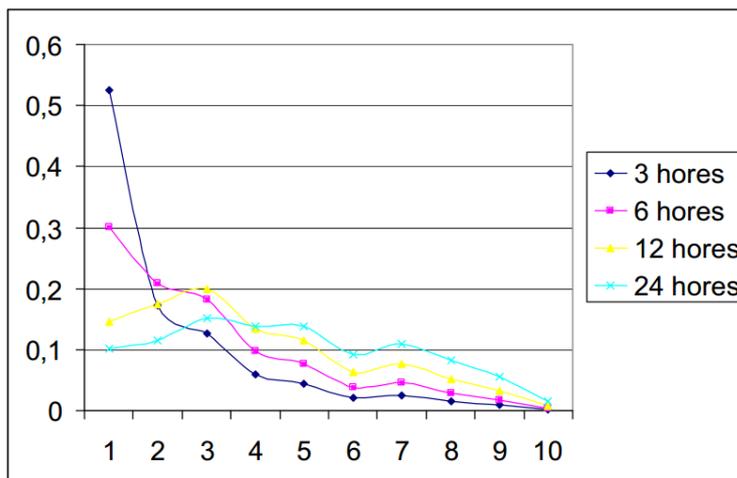


Figura 8-5: Hietogramas de duración de lluvias (1)

Como puede observarse, las lluvias más cortas tenían su máxima intensidad al principio, mientras que las más largas presentaban un máximo transcurrido un 25% de la duración total.

## 8.6 Definición de los hietogramas de diseño

Los resultados mostrados en el apartado anterior pueden utilizarse de forma inmediata como hietogramas de cálculo en el estudio de avenidas en la cuenca del Tordera. Sin embargo, se comprobó que las formas que se obtienen presentan oscilaciones poco explicables desde el punto de vista físico, aunque mostraban pautas de comportamiento interesantes que coincidían con las obtenidas por Huff. Por ello, se propuso ajustar los hietogramas obtenidos mediante funciones que permitieran, por un lado, suavizar su comportamiento y por otro, operar de forma simple.

En la siguiente figura, se presentan los ajustes a los hietogramas obtenidos mediante dichas funciones que, cómo puede verse, reproducían de forma satisfactoria el comportamiento observado de las curvas.

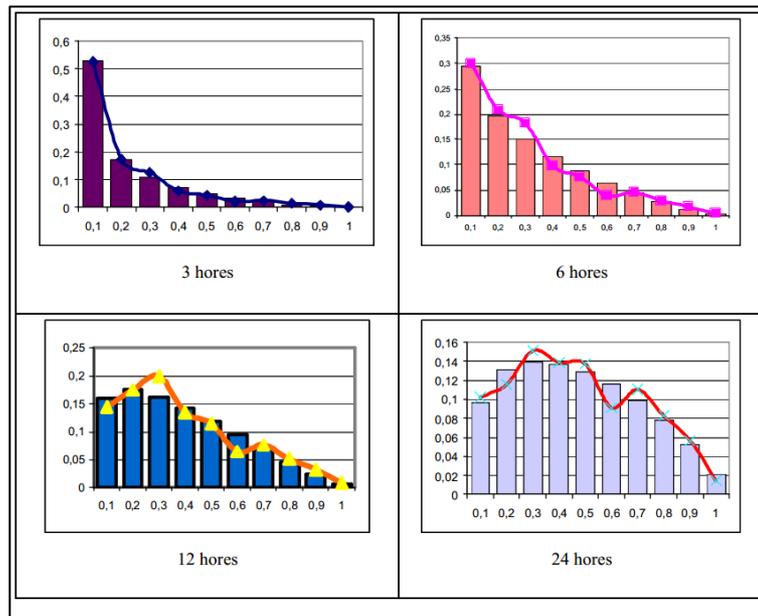


Figura 8-6: Hietogramas de duración de lluvias (2)

La ventaja de estas expresiones, es que permitían plantear, al menos con respecto a esta cuenca, una metodología compacta, con expresión analítica para hietogramas de duración cualquiera.

## 8.7 Distribución espacial de la lluvia

Otro aspecto a tener en cuenta, fue la distribución espacial de la lluvia dentro de la cuenca, basada en los dos fenómenos meteorológicos que rigen las grandes avenidas en la misma (Gota fría que entra por el oeste y se desplaza hacia el este, dejando la mayor cantidad de lluvia en el Montseny y el que entra por el delta y gira hacia el Empordà, dejando la mayor parte de la precipitación en la zona de Sta. Coloma). Tras analizar las relaciones de correlación entre las diferentes estaciones de la cuenca y las dos estaciones base (Sant Celoni y Sta. Coloma), se observó que, a partir de un cierto umbral de precipitación, la lluvia cae en una o en otra zona de la cuenca, pero no se distribuye uniformemente ya que llueve cantidades muy diferentes. Por ello, se modelizaron ambos fenómenos de precipitación, y se obtuvieron los coeficientes reductores de la cuenca a partir de los cocientes entre la lluvia caída en las dos estaciones base y la caída en el mismo día en el resto de estaciones por un período de retorno dado, obteniendo, para el caso de Sant Celoni, lo siguiente:

Tabla 8-2: Hietogramas de duración de lluvias (2)

$R^2$	Santa Coloma	Breda	Gualba	Sil	Tordera
Sant Celoni	0,346	0,6038	0,4958	0,1997	0,3989

Como puede observarse, la correlación entre estaciones cercanas se aproximaba más a valores de 1, mientras que, para estaciones alejadas este coeficiente tendía a cero. Finalmente, se optó por tomar un valor mínimo del coeficiente reductor mayor de 0,5 e inferior a 1, para quedar del lado de la seguridad.

# 9 ESTUDIO HIDROLÓGICO

---

*Las matemáticas son el alfabeto con el cual Dios  
ha escrito el universo.*

*- Galileo Galilei -*

## 9.1 Introducción y objetivos

En este capítulo, que constituye el estudio hidrológico del proyecto, se describen tanto el modelo usado para la obtención de resultados, como el valor de los mismos, los cuales sirven de entrada al estudio hidráulico.

Tal como se ha reflejado en otros capítulos anteriores, la cuenca del Tordera presenta grandes complejidades desde el punto de vista hidrológico debido a su estructura geológica e hidrogeológica y también debido a su propia morfología, sobre todo en la parte de la depresión de Sils y Santa Coloma, donde el terreno es prácticamente plano, con una gran capacidad de encharcamiento.

Por tanto, el objetivo de este capítulo es la recopilación de los datos hidrológicos necesarios para la posterior obtención de los caudales de escorrentía generados por la precipitación de cálculo. Se puede decir que el objetivo último de este capítulo es la obtención del régimen extremal de la hidrología de la cuenca, sin contener un estudio de sus aportaciones que correspondería a un régimen medio puro. En este caso llamamos régimen extremal los periodos de retorno de cálculo de 500, 100 y 50 años y "régimen medio" en el período de retorno de 10 años y al correspondiente al caudal de la máxima avenida ordinaria.

Debido a esta complejidad, la elección del modelo hidrológico es fundamental para intentar acercarse lo máximo posible a la realidad del comportamiento de la cuenca ante una cantidad de lluvia caída. En el estudio tomado de referencia se optó por un modelo de transferencia lluvia-caudal basado en el comportamiento del terreno, que contenga todos los procesos que suceden en la cuenca, denominado NAM.

Así pues, se ha optado por un modelo de transferencia lluvia-caudal basado en el comportamiento del terreno, que contenga todos los procesos que suceden en la cuenca. El modelo elegido es el NAM que queda suficientemente explicado en los apartados siguientes.

En el estudio hidrológico que se llevó a cabo, se dividió la cuenca en varias subcuencas lo más homogéneas posibles con respecto a la mayoría de sus características; así pues, la cuenca del Tordera va quedar dividida en cincuenta subcuencas.

Estas agrupaciones se han realizado en las subcuencas que presentaban unas características similares (Uso y tipo del suelo, pendiente media...) y se justificaba su agrupación para presentar comportamientos hidrológicos parecidos de cara al modelo NAM.

## 9.2 Descripción del modelo hidrológico

### 9.2.1 Introducción

Debido a la complejidad hidrogeológica de la cuenca en estudio, acentuada sobre todo en la parte este de la cuenca (zona de Sils y Santa Coloma), en el estudio se optó por la utilización del modelo NAM que forma parte del módulo hidrológico (RR) del sistema de modelización de ríos MIKE 11.

El modelo hidrológico NAM simula los procesos de lluvia-escorrentía que se producen en la cuenca. Este modelo hidrológico puede ser aplicado independientemente o ser usado para representar una o varias cuencas vertientes que generan flujo en un río. Así es posible considerar una cuenca sola o una gran cuenca dividida en varias subcuencas y una compleja red de cauces y cuencas en la misma modelización.

### 9.2.2 Datos de entrada

Los datos básicos que requiere el modelo se pueden dividir en los siguientes grupos:

- Parámetros del modelo
- Condiciones iniciales
- Datos meteorológicos
- Datos de caudales para la calibración y validación del modelo.

En cuanto a los datos meteorológicos necesarios:

- Datos de lluvia, los cuales se trataron como datos de lluvia acumulados.
- Datos de evapotranspiración potencial, los cuales también fueron tratados como acumulados.

### 9.2.3 Componentes básicos de la modelización

Los componentes básicos para llevar a cabo la realización del modelo son los siguientes:

- **Almacenamiento superficial:** La humedad interceptada en la vegetación, así como el agua atrapada en depresiones y las partes cultivadas del suelo suponen un almacenamiento o depósito artificial.  $U_{max}$  representa el límite superior de la cantidad de agua en el depósito superficial.
- **Almacenamiento en la zona de raíces:** La humedad del suelo en la zona de raíces, una capa del suelo situada justo por debajo de la zona superficial desde la que la vegetación puede asimilar el agua para la transpiración, se presenta como el almacenamiento a la zona de raíces.  $L_{max}$  representa el límite superior de la cantidad de agua en este depósito
- **Evapotranspiración:** Las demandas de evapotranspiración se encuentran primero en el ratio potencial del depósito superficial. si la humedad contenida  $U$  en la superficie es menor que estos requerimientos ( $U < E_p$ ), la fracción sobrante se asume que será retirada por la actividad de las raíces de la zona de depósito subterráneo a un ritmo actual,  $E_a$ .  $E_a$  es proporcional a la evapotranspiración potencial y varía linealmente con la humedad relativa que contiene el suelo,  $L / L_{max}$  de la zona de raíces.
- **Flujo superficial:** Cuando el almacenamiento superficial sobrepasa,  $U > U_{max}$ , el exceso de agua  $PN$  proporciona un aumento en el flujo superficial, así como en la infiltración.  $QOF$  corresponde a la parte de  $PN$  que contribuye al flujo superficial. Se asume que es proporcional a  $PN$  y varía linealmente con el contenido de humedad relativa del suelo,  $L / L_{max}$  de la zona de almacenamiento de raíces.
- **Routing del interflow y del flujo superficial:** El interflow pasa a través de dos depósitos lineales en serie con la misma constante de tiempo  $CK12$ . El camino del flujo superficial se basa también en el concepto de depósito lineal, pero con una constante de tiempo variable.

- **Recarga subterránea:** La cantidad de agua infiltrada  $G$  que recarga el almacenamiento subterráneo depende del contenido en humedad del suelo en la zona de raíces.

#### 9.2.4 Parámetros del modelo

En este apartado se muestran los parámetros empleados en el modelo y se da una breve descripción de los mismos.

- **Parámetros de la zona superficial y de raíces:**
  - Máxima agua contenida en el depósito superficial,  $U_{max}$ :  $U_{max}$  (mm) define el máximo nivel de agua contenido en la zona superficial.
  - Máxima agua contenida en la zona de raíces,  $L_{max}$ :  $L_{max}$  (mm) define el máximo nivel de agua contenida en la zona de raíces.  $L_{max}$  puede ser interpretado como la máxima humedad del suelo de la zona de raíces disponible para la transpiración de la vegetación.
  - Coefficiente de escorrentía superficial,  $CQOF$ :  $CQOF$  es un parámetro muy importante que determina la cantidad de exceso de lluvia que corre por el suelo superficial y la magnitud de la infiltración.
  - Constante de tiempo del interflow,  $CKIF$ :  $CKIF$  (s) determina junto con  $U_{max}$  la cantidad de interflow ( $(CKIF) - 1$  que es la cantidad de agua superficial contenida en  $U$  que se drena hacia el interflow cada hora). Este es el parámetro dominante del interflow porque  $CKIF \gg CK12$ .
  - Constante de tiempo del interflow y flujo superficial  $CK12$ : La constante de tiempo del interflow y el flujo superficial  $CK12$  (s) determina la forma del pico del hidrograma.
  - Valor umbral del flujo superficial en la zona de raíces  $TOF$ :  $TOF$  es un valor umbral para el flujo superficial en el sentido de que no se genera flujo si la humedad contenida en la zona de raíces  $L / L_{max}$  es menor que  $TOF$ .
  - Valor umbral del interflow en la zona de raíces  $TIF$ : El valor umbral en la zona de raíces cumple la misma función para el interflow que el  $TOF$  para el flujo superficial. Este no es usualmente un parámetro muy importante y se le puede dar en muchos casos un valor igual a cero.

### 9.3 Calibración del modelo NAM para la cuenca del Tordera

Para obtener los parámetros básicos del modelo hidrológico se llevó a cabo la calibración de los mismos con los acontecimientos más significativos que se han encontrado en la serie de datos pluviométricas y de aforos que se tiene.

Además, se tuvo en cuenta que en la serie de datos de la que se disponía no hay eventos suficientemente extremos como para poder calibrar el modelo para períodos de regreso muy elevados. Por todos estos motivos se optó, además de la calibración del modelo con eventos que tenemos, por la utilización de otros métodos clásicos (Teoría del número de curva del SCS o formulaciones clásicas para la obtención del tiempo de concentración) para evaluar parámetros básicos del NAM, tal como  $CQOF$  o el  $CK12$ .

Por lo tanto, se emplearon tres tipos de métodos para la obtención de los parámetros del NAM:

- Eventos reales: por medio de la calibración del modelo para los eventos realmente registrados en la cuenca.
- Formulación clásica hidrológica: para dos de los parámetros importantes, que definen el coeficiente de escorrentía (CQOF) y el tiempo de concentración de las subcuencas (CK12).
- Rasgos hidrogeológicos de las distintas litologías que forman la cuenca: para la obtención del parámetro  $L_{max}$  y las condiciones iniciales para eventos extremos.

A partir de la calibración del modelo con eventos reales se llevó a cabo una estadística con los parámetros que, obtenidos para cada uno de los sucesos, con el fin de encontrar un valor medio o de tendencia de los diferentes parámetros necesarios para el modelo NAM. Así pues, los resultados obtenidos para estos son los siguientes:

- **Parámetro  $U_{max}$ :** Corresponde a la máxima capacidad del suelo superficial de retención de agua. Entre todos los resultados obtenidos por los sucesos calibrados obtenemos un valor medio de 13.625.
- **Parámetro CKIF:** determina junto con  $U_{max}$  la cantidad de interflow que se da en la cuenca. el valor medio que presentan los resultados obtenidos para este parámetro en la calibración de los acontecimientos reales toma un valor aproximado de 611 h, valor que ha sido redondeado a 600 en el modelo utilizado.
- **Parámetro TOF:** es un valor umbral para el flujo superficial. Este parámetro toma un valor medio de doce y cincuenta y uno, redondeado a 0.5 en el modelo.
- **Parámetro TIF:** El valor umbral en la zona de raíces cumple la misma función para el interflow que el TOF para el flujo superficial. Este no es normalmente un parámetro muy importante y en muchos casos se le puede dar un valor igual a cero. En estos casos toma un valor medio de 0.47 que ha sido redondeado a 0.5.

#### 9.4 Estimación de los parámetros para el modelo de la cuenca del Tordera

Tal como se ha comentado en el apartado anterior, los parámetros que no han podido obtenerse por la calibración de los acontecimientos reales de la cuenca, se calcularon mediante otros métodos, según el parámetro a estimar:

Se utilizaron diferentes métodos de forma que fueran los más adecuados a cada parámetro y ajustaran de mejor forma a la realidad física y / o conceptual de lo que representan en el modelo:

- **Métodos hidrogeológicos:** por medio de los cuales se ha realizado la estimación del parámetro  $L_{max}$ , así como las condiciones iniciales para eventos extremos.
- **Métodos y formulación clásica hidrológicos:** por medio de los cuales se han estimado los parámetros CQOF y CK12.



- Siguiendo con el régimen extremal y para evaluar la máxima escorrentía que puede generarse en cada una de las rieras de la cuenca que desembocan en el río Tordera, se supone una lluvia convectiva situada en cabecera de cada una de ellas. Por lo tanto, la hipótesis de cálculo para cada una de las rieras se convierte en un tercer fenómeno (del que se había hablado al inicio del estudio pluviométrico) que es la lluvia convectiva en un punto concreto de la cuenca. En el caso del arroyo de Santa Coloma, la su lluvia convectiva coincide con el fenómeno II de foco en Sta. Coloma, como es de suponer debido a la magnitud del tamaño de su cuenca.
- En el caso de régimen medio, la situación varía, ya que se puede producir una lluvia promedio en toda superficie de la cuenca, con lo cual desaparecen los escenarios de localización y variación espacial de la precipitación originaria de la escorrentía. Por lo tanto, para los periodos de retorno situados dentro del régimen medio, los hietogramas de entrada en el modelo hidrológico no sufren ninguna modificación por coeficientes de reducción adicionales a los tradicionales por área.

## 9.7 Resultados del modelo hidrológico

Los resultados del estudio hidrológico proporcionan los hidrogramas de caudales de escorrentía en las cabeceras de los tramos de arroyos donde desembocan las subcuencas hidrológicas, es decir, en sus puntos de vertido. Las subcuencas que no vierten agua directamente a una cama de estudio han sido incorporadas a otras subcuencas mediante la propagación de sus hidrogramas a través de la red secundaria. En este punto se presentan los resultados de la hidrología para los periodos de retorno de estudio: 500, 100, 50 y 10 años.

Para facilitar la recopilación de los datos obtenidos a partir del modelo hidrológico, se ha llevado a cabo un esquema más simplificado. Concretamente se desea conocer los caudales que llegan al punto de estudio, indicado en la figura, ya que el estudio hidráulico se llevará a cabo a partir de ese punto. Es por ello que la subcuenca "T" se ha dividido en dos tramos, antes del punto de estudio (T1) y después del punto (T2).

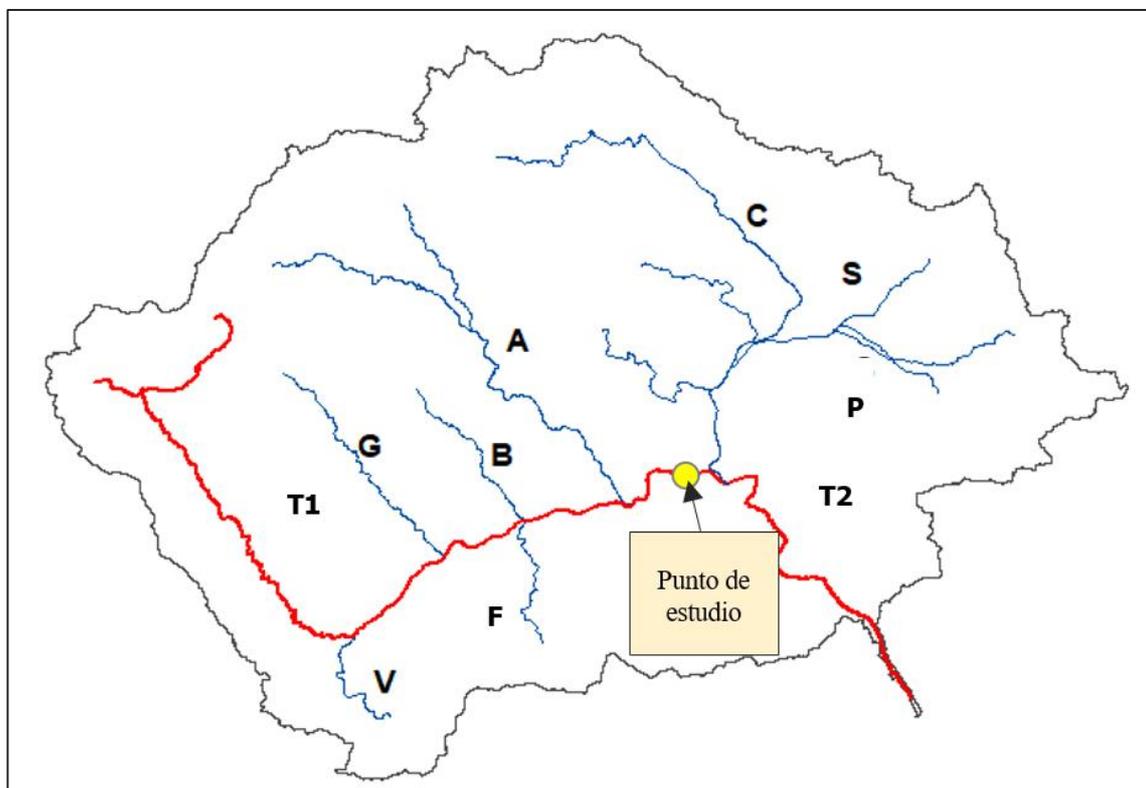


Figura 9-2: Esquema hidrológico de la cuenca del Tordera 2

Se han elaborado unas tablas de resultados con los caudales máximos (Q de pico) de cada hidrograma que proporciona cada subcuenca en que ha sido dividida la cuenca del Tordera.

❖ **Cuenca entera con comienzo en Sant Celoni**

A continuación, se muestran los hidrogramas y los resultados obtenidos para cada uno de los periodos de retorno.

- *Periodo de retorno T=500 años*

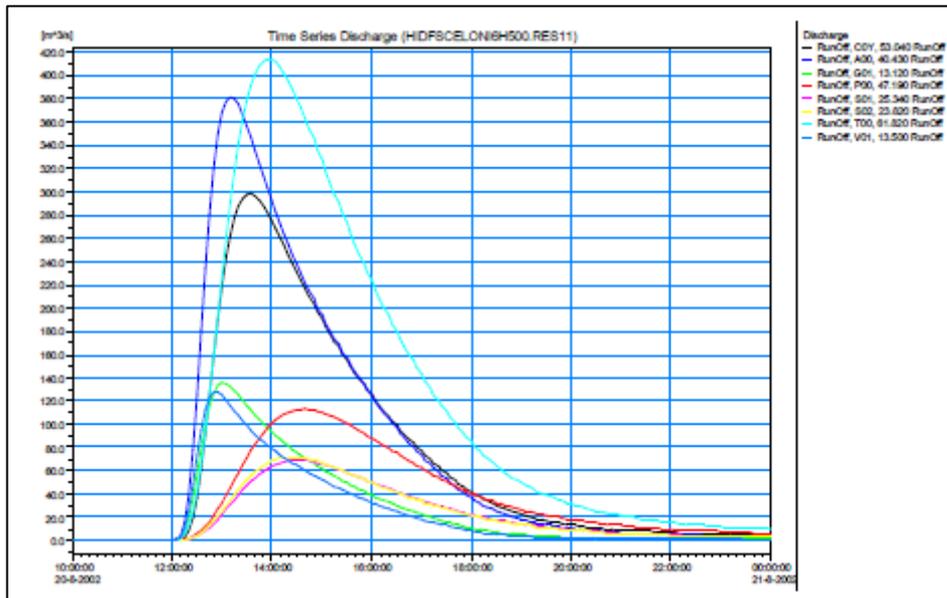


Figura 9-3: Hidrograma Sant Celoni. T = 500 años

Obteniendo lo siguiente:

Tabla 9-1: Caudales máximos Sant Celoni. T = 500 años

Nombre	Superficie (km <sup>2</sup> )	Máximo Q (m <sup>3</sup> /s)
A	110.68	970.348
B	31.29	285.77
C	190.71	892.446
F	26.31	165.641
G	26.25	266.377
P	47.19	112.996
S	84.02	265.91
T	309.55	1997.727
V	36.64	319.491

- *Periodo de retorno T=100 años*

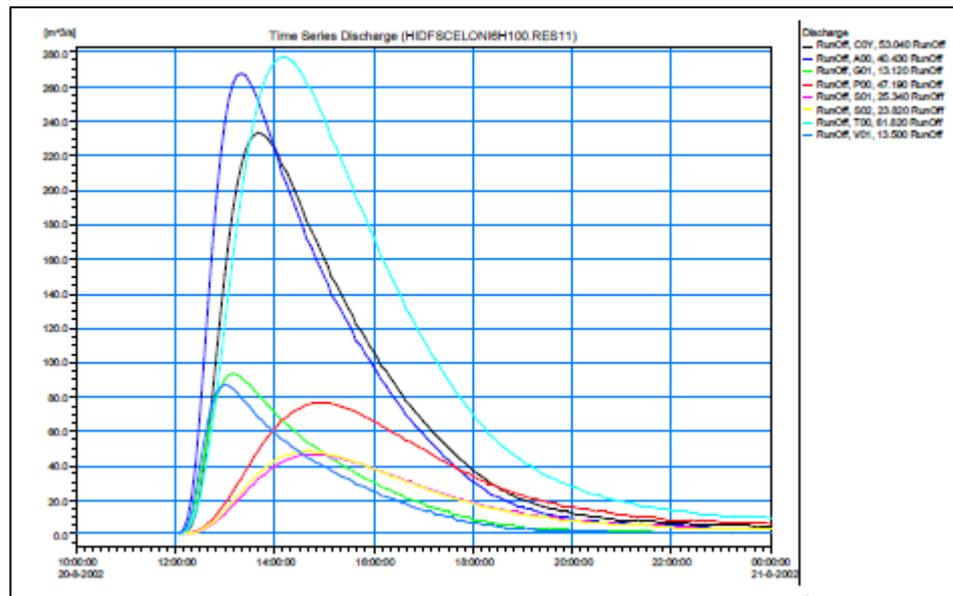


Figura 9-4: Hidrograma Sant Celoni. T = 100 años

Obteniendo lo siguiente:

Tabla 9-2: Caudales máximos Sant Celoni. T = 100 años

Nombre	Superficie (km <sup>2</sup> )	Máximo Q (m <sup>3</sup> /s)
A	110.68	619.92
B	31.29	200.92
C	190.71	532.791
F	26.31	114.035
G	26.25	184.451
P	47.19	76.263
S	84.02	180.819
T	309.55	1184.789
V	36.64	216.658

- *Periodo de retorno T=50 años*

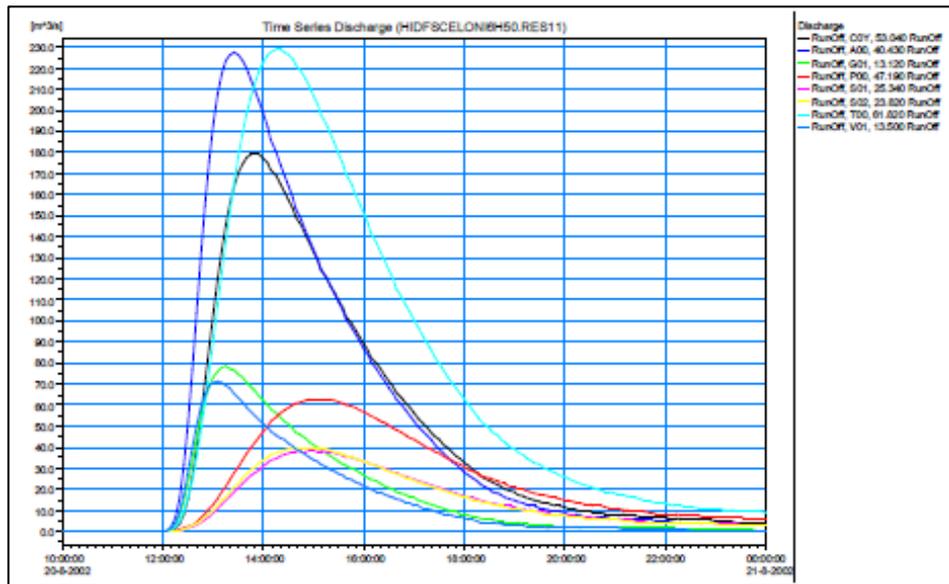


Figura 9-4: Hidrograma Sant Celoni. T = 50 años

Obteniendo lo siguiente:

Tabla 9-3: Caudales máximos Sant Celoni. T = 50 años

Nombre	Superficie (km <sup>2</sup> )	Máximo Q (m <sup>3</sup> /s)
A	110.68	622.421
B	31.29	169.916
C	190.71	529.18
F	26.31	94.71
G	26.25	154.434
P	47.19	63.024
S	84.02	72.064
T	309.55	1135.617
V	36.64	182.032

## ❖ Cuenca entera con comienzo en Santa Coloma

- *Periodo de retorno T=500 años*

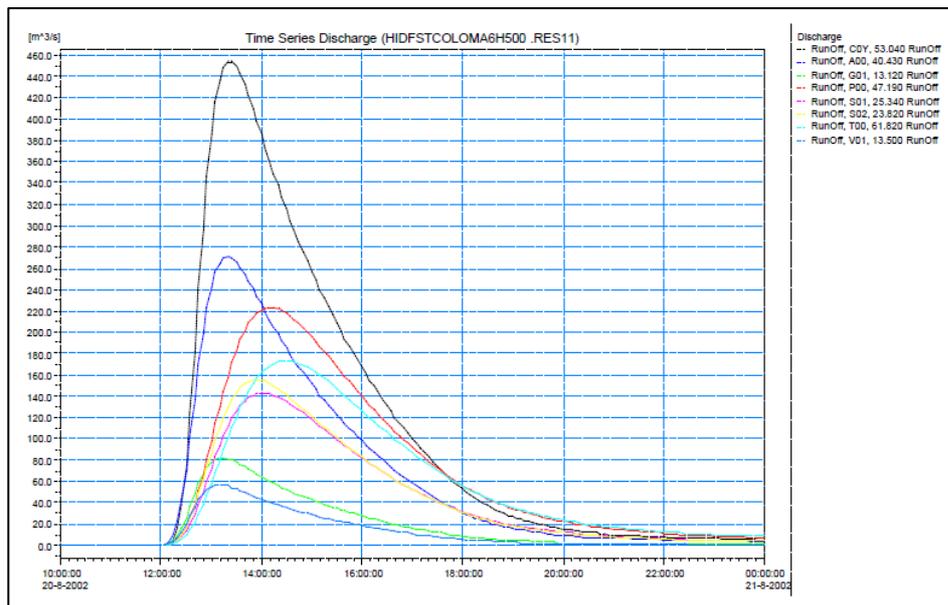


Figura 9-5: Hidrograma Santa Coloma. T = 500 años

Obteniendo lo siguiente:

Tabla 9-4: Caudales máximos Santa Coloma. T = 50 años

Nombre	Superficie (km <sup>2</sup> )	Máximo Q (m <sup>3</sup> /s)
A	110.68	726.547
B	31.29	395.604
C	190.71	1266.424
F	26.31	109.575
G	26.25	162.674
P	47.19	223.495
S	84.02	221.576
T	309.55	1108.06
V	36.64	139.377

- *Periodo de retorno T=10 años*

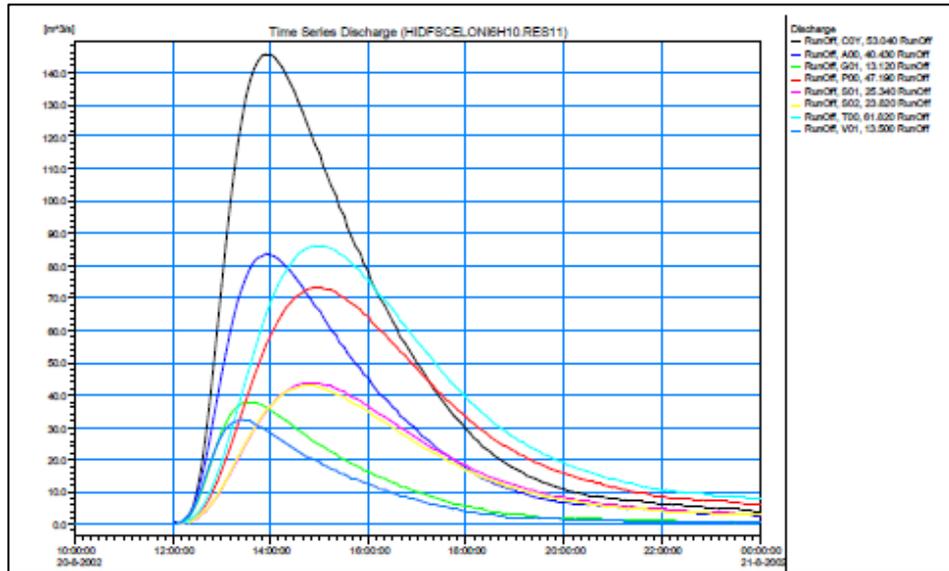


Figura 9-6: Hidrograma Santa Coloma. T = 10 años

Obteniendo lo siguiente:

Tabla 9-5: Caudales máximos Santa Coloma. T = 10 años

Nombre	Superficie (km <sup>2</sup> )	Máximo Q (m <sup>3</sup> /s)
A	110.68	150.567
B	31.29	88.42
C	190.71	492.122
F	26.31	47.684
G	26.25	74.989
P	47.19	73.262
S	84.02	68.668
T	309.55	614.058
V	36.64	78.01

Los resultados obtenidos son los caudales de escorrentía superficial para cada una de las subcuencas en que se ha dividido la cuenca general, los cuales sirven de entrada para el estudio hidráulico.

# 10 INTRODUCCIÓN A LAS FORMAS DE FONDO

---

*Lo que sabemos es una gota de agua, lo que ignoramos es el océano.*

*- Isaac Newton -*

## 10.1 Introducción

Tal y como se ha comentado anteriormente, en el presente estudio se pretende demostrar la importancia de las formas de fondo en el estudio de inundación de un río, ya que estas pueden provocar resultados totalmente distintos. Concretamente el río de estudio es uno de los pocos de España que posee dichas formas, por lo que se ha considerado de interés el estudio de las mismas.

Es por ello, que antes de entrar en los cálculos hidráulicos relacionados con dichas características se ha llevado a cabo una introducción para tener un mejor entendimiento de dichas formas.

Además de la explicación correspondiente de las formas de fondo, se ha indicado una pequeña introducción del transporte de sedimentos que se produce en los ríos, ya que ambas características se encuentran relacionadas.

## 10.2 Introducción al transporte de sedimentos

Para poder entender mejor las formas de fondo que se producen en el lecho de un río, se ha llevado a cabo una pequeña explicación sobre el transporte de sedimentos, ya que ambas acciones están totalmente conectadas.

### 10.2.1 Transporte de sedimentos en un río

La clasificación del transporte de sedimentos de un río tiene dos criterios: según el modo de transporte y según el origen del material que se transporta. El material se puede transportar de dos formas, en suspensión, donde se mantiene entre la masa del flujo gracias a los fenómenos de turbulencia, o por el fondo, arrastrándose, saltando o rodando. Dichos transportes se dan siempre en conjunto en un río y la proporción de uno u otro depende de las características geológicas, orográficas, forestales o climatológicas de la cuenca.

Es de importancia distinguir entre un grano de sedimento que avanza a grandes saltos y un grano que se transporta en suspensión con pequeñas interrupciones.

Respecto a la procedencia, puede tener distintos orígenes, en el propio cauce, o bien en otras zonas de la cuenca hidrográfica por las que no discurre ningún curso de agua salvo en avenidas.

Si el material procede del propio cauce, el transporte de sedimento se reparte entre el transporte en suspensión, referente al material más fino, y de fondo, referente al material más grueso. Sin embargo, el material que procede de la cuenca hidrográfica, es un material muy fino que sólo se transporta en suspensión.

Si se busca separar el material transportado en suspensión procedente del propio cauce y el de lavado, se podría establecer un diámetro límite de 0,063 mm, siendo el material más fino el de lavado. Sin embargo, el tamaño de las partículas es orientativo, ya que la misma partícula puede encontrarse en distintas situaciones, reposo, desplazándose por el fondo, saltando o transportándose en suspensión.

Cabe destacar que en la Hidráulica Fluvial, el transporte de fondo es el que más repercute en el río en aspectos de su morfología, como el ancho o la pendiente, ya que es la causa de sus modificaciones (aunque en determinados casos sólo represente el 10% del transporte total).

### 10.2.2 Equilibrio del fondo en presencia del transporte de sedimentos

Decimos que un fondo se encuentra en equilibrio en presencia transporte de sedimentos (en suspensión y en el fondo) cuando no sufre modificación en su cota.

Interesa destacar la idea de que los caudales líquidos y sólidos del fondo de un río pueden estar equilibrados o no. En este segundo caso, una corriente puede presentar un exceso de transporte de fondo (sobrealimentación) o un defecto (subalimentación) y se producirá sedimentación o erosión respectivamente. De esta forma, cuando se da un desequilibrio de caudales, el fondo evoluciona hacia una nueva situación de equilibrio variando su pendiente hasta conseguir una nueva pendiente de equilibrio. Un ejemplo de esto sería un desequilibrio en el que se tiene mucha agua y pocos sólidos, entonces se da una erosión del fondo que se va equilibrando hasta alcanzar una pendiente menor.

Por último, cabe destacar que el equilibrio también depende del tamaño del sedimento, porque para un mismo caudal líquido y sólido la pendiente de equilibrio será más alta en la medida que el sedimento sea más grueso.

### 10.2.3 Inicio del movimiento de partículas

Las circunstancias en las que se produce el desplazamiento de una partícula del fondo por el efecto de la fuerza de arrastre del agua, se encuentran totalmente ligadas a la erosión.

Se denomina umbral o inicio del movimiento a la situación en la que se inicia el movimiento de las partículas de fondo. Dicho movimiento es un problema que ha sido investigado en hidráulica a partir de ensayos de laboratorio con arenas uniformes. De todos ellos, con el que mejores resultados se obtiene y por tanto el más usado a día de hoy es el ábaco de Shields.

## 10.3 Formas de fondo

En el siguiente apartado se ha llevado a cabo una introducción a las formas de fondo generadas en el mar y en ríos, para entender mejor el efecto de las mismas en dichos medios.

### 10.3.1 Origen de las formas de fondo

Existe una amplia gama de modelos que intentan explicar las condiciones que llevan al nacimiento de las formas de fondo. Sin embargo, todas ellas se deben a la interacción fluido-partícula que ocurre en la interfaz existente entre el flujo y el fondo. Para lograr entender el punto de partida de las ondas sedimentarias es necesario comprender los conceptos de estabilidad e inestabilidad.

Un sistema cualquiera se considera estable si el resultado de pequeñas perturbaciones decrece en el tiempo, y por lo tanto el sistema no cambia de estado. Por ejemplo, para números de Reynolds suficientemente bajos en régimen laminar, ínfimas variaciones de este parámetro ocasionan pequeños cambios en las propiedades del flujo, pero las características generales del flujo laminar no se ven alteradas.

Por otro lado, existen sistemas en los cuales pequeñas variaciones de cierto parámetro llegan a producir un gran cambio en el comportamiento general del sistema. Por ejemplo, para ciertos valores del número de Reynolds, un pequeño aumento en su valor conduce a un cambio en el comportamiento del sistema, y es así como un flujo laminar deja de ser estable y comienza un período de transición, para convertirse en un flujo turbulento.

Para estas condiciones de flujo, el fondo se vuelve inestable y después de cierto tiempo tiende a un estado de equilibrio distinto que se caracteriza por un fondo con ondas sedimentarias o formas de fondo.

### 10.3.2 Caracterización e influencia de las formas de fondo

Las formas de fondo muestran una forma de onda cuasi periódica y geometría bien definida.

Para caracterizar estas ondas se deben definir ciertas dimensiones que ayudan a modelar y comprender el comportamiento de las mismas. Para ayudar a caracterizar su geometría se muestra el siguiente esquema de las formas de fondo.

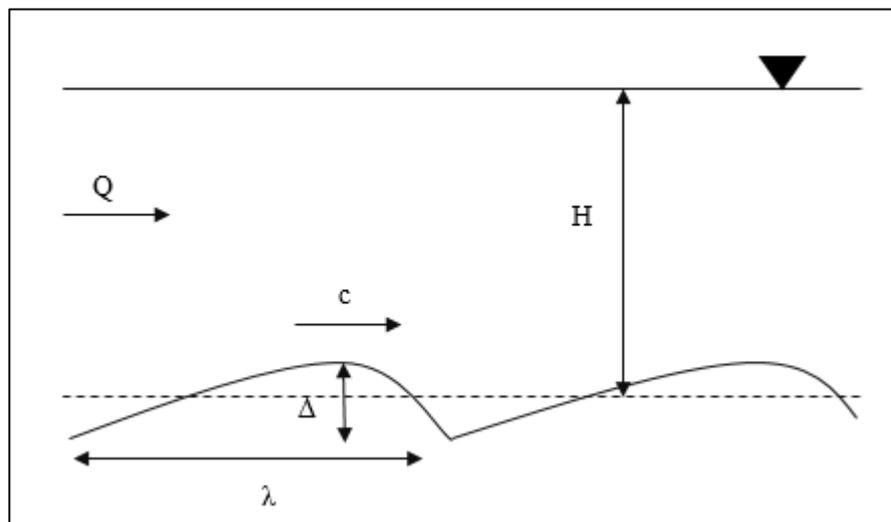


Figura 10-1: Dimensiones características de las formas de fondo

Donde:

- $c$ : celeridad de la onda con unidades de  $[L/T]$ .
- $\Delta$ : amplitud.
- $\lambda$ : longitud de onda

Las formas de fondo guardan una estrecha relación con el flujo y el sedimento. El flujo genera el movimiento del sedimento que se encuentra presente en el lecho y estos llevan a la formación de las formas de fondo. Además, las partículas del sedimento y las formas de fondo responden al flujo al introducir resistencia a través de la fricción, generando así una interconexión entre los tres elementos.

Dicha resistencia es la que hace interesante el estudio de las formas de fondo. Esto se debe a que aguas abajo se produce una separación del flujo de la onda sedimentaria produciendo, se esta forma, una fuerza de arrastre sobre el lecho, lo que implica una resistencia adicional por efecto de la forma. Dicha resistencia se añade a la propia del grano, resultando en una fricción mayor a la que se tiene sin la presencia de formas de fondo.

### 10.3.3 Evaluación del transporte de fondo

Las ecuaciones del transporte de fondo son fórmulas que tratan de cuantificar el caudal sólido de una corriente en función de sus características hidráulicas y de las características geométricas y granulométricas del lecho.

Debido a todas las variables que intervienen y a la compleja mecánica del transporte de sedimento, no se ha encontrado una ecuación dinámica del transporte de fondo. Es por ello que se han ido proponiendo diferentes ecuaciones aproximadas (ecuaciones empíricas, semiempíricas o basadas en diferentes teorías) de distintos autores, las cuales presentan una serie de limitaciones.

La limitación más destacable de las ecuaciones de transporte en régimen uniforme, es desconocer cómo influyen en el caudal sólido de sedimento con una curva granulométrica diferente, pero con el mismo diámetro específico. Se trata de un problema complejo, ya que se encuentran implicados fenómenos diferentes como la segregación del sedimento o su desigualdad de distribución en la profundidad del flujo. Dichos fenómenos harán variar la viscosidad aparente del agua y la rugosidad, entre otros.

Las ecuaciones de transporte de fondo son fórmulas unívocas entre el caudal sólido unitario  $q_s$  y las características hidráulicas. Dichas ecuaciones adoptan la siguiente forma:

$$q_s = f(\tau_0 - \tau_c)$$

Siendo  $\tau_c$  la tensión crítica de Shields.

A partir de dicha ecuación se deduce que el caudal sólido depende directamente del exceso de tensión de corte en el fondo sobre la tensión crítica de inicio del movimiento.

Las ecuaciones de fondo que se consideran más interesantes son las de Meyer-Peter & Müller y la ecuación de Einstein-Brown. En las dos ecuaciones, la variable  $q_s$  (caudal sólido unitario en volumen neto) aparece combinada con el diámetro de las partículas  $D$  formando la variable caudal sólido adimensional ( $\phi$ ):

$$\phi = \sqrt{\frac{q_s^2}{g \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) D^3}}$$

Siendo  $\rho_s$  la densidad del material del lecho y  $g$  la aceleración de la gravedad.

- Ecuación de Meyer-Peter & Müller

Se trata de una ecuación empírica que se obtuvo en Suiza a partir de ensayos de laboratorio, siendo su expresión la siguiente:

$$\left( \frac{n_s}{n} \right)^{3/2} \bar{\tau} = 0,047 + 0,25\phi^{2/3}$$

Siendo  $n_s$  la rugosidad del grano y  $n$  es la rugosidad total (del grano más el de las formas de fondo).

El diámetro  $D$  presente en  $\bar{\tau}$  y en  $\phi$  es el diámetro medio ( $D_m$ ) y el número 0,047 equivale a la tensión crítica  $\tau_c$  o umbral adimensional.

El cociente entre  $n_s$  y  $n$ , que oscila entre 0,5 y 1, tiene el objetivo de contemplar la reducción de la tensión total de la corriente cuando existen formas de fondo (en el caso de fondo plano  $n_s = n$ , por lo que el cociente valdrá 1). El valor de  $n$  puede determinarse a partir del tamaño del grano utilizando la fórmula de Strickler:

$$n_s = \frac{D_{50}^{1/6}(m)}{21}$$

Y para lechos acorazados, se emplea la siguiente:

$$n_s = \frac{D_{90}^{1/6}(m)}{26}$$

Siendo  $D_{50}$  ( $D_{90}$ ) el tamaño del tamiz por el que pasan el 50% (90%) de las partículas.

La ecuación de Meyer-Peter & Müller es válida para medidas de material inferiores a 3 cm y para pendientes de fondo inferiores al 2%.

Por último, cabe destacar que se puede observar que la estructura general de la ecuación da lugar a una proporcionalidad del tipo  $q_s \leftrightarrow (\tau_0 - \tau_c)^{3/2}$ .

- Ecuación de Einstein-Brown

La ecuación de Einstein-Brown es una ecuación semiteórica que fue obtenida en Estados Unidos. Su expresión es  $\phi = 40\bar{\tau}^3$  y de forma más explícita puede escribirse como:

$$q_s = \sqrt{g \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) D^3} \cdot 40 \left[ \frac{\gamma R_h S_f}{(\gamma_s - \gamma) D} \right]^3$$

Estableciéndose en este caso la siguiente proporcionalidad:

$$q_s \leftrightarrow \frac{R_h^3 S_f^3}{D^{3/2}}$$

Si se supone lecho rectangular ancho, el radio hidráulico se puede aproximar al calado y si el régimen es uniforme, la pendiente motriz ( $i$ ) es igual a la pendiente geométrica, entonces:

$$q_s D^{3/2} \leftrightarrow y^3 i^3$$

De la fórmula de Chézy:

$$v = c \sqrt{R_h i}$$

Se obtiene lo siguiente:

$$q \leftrightarrow y^{3/2} i^{1/2}$$

La agrupación de las dos ecuaciones, da lugar a una expresión cuantitativa de la Balanza de Lane:

$$q_s D^{3/2} \leftrightarrow q^2 i^2$$

La cual permite evaluar en qué proporción varía una variable al introducir un cambio en otra, por ejemplo, se puede observar como en una avenida, dada por un aumento del caudal líquido, hay un gran aumento del caudal sólido.

### 10.3.4 Formas de fondo en ríos

Las formas de fondo de los cauces aluviales, se definen como todas aquellas irregularidades que son más grandes que el tamaño mayor de partículas que lo conforman y que además ofrecen una mayor resistencia al flujo de los canales. La forma del cauce dependerá del material que componga al lecho y la intensidad de los procesos erosivos. También se debe al balance entre la fuerza del agua y la resistencia del lecho

El coeficiente que determina la configuración del lecho es el número de Froude. A medida que se incrementa dicho número, el lecho irá cambiando de un lecho plano sin transporte a otras configuraciones.

El fondo de un río con transporte de sedimento puede ser liso o presentar unas ondulaciones conocidas como formas de fondo, tal y como se ha comentado anteriormente. Las formas de fondo son importantes porque participan en el transporte de sedimento y son decisivas en la rugosidad.

Si en un lecho de arena con transporte de fondo se aumentase paulatinamente la velocidad a partir del umbral del movimiento, se puede presentar una configuración ondulada formando dichas formas de fondo.

Este fenómeno tiene gran importancia porque participa en el transporte de sedimentos e interviene en la resistencia al flujo ya que incrementa la rugosidad del lecho. Las formas de fondo ocurren en lechos de arena, mientras que en ríos de grava o de materiales gruesos y de granulometría extendida se presentan en forma limitada o directamente no se producen. Al comenzar el movimiento en un lecho de arena e ir aumentando la velocidad se presentan las siguientes formas:

- **Lecho plano y sin transporte.** La resistencia al flujo, anterior al inicio del movimiento de sedimentos, es equivalente a la situación de un cauce en lecho fijo. Se puede decir que, generalmente en el período de aguas bajas, en estiaje, no hay movimiento de los sedimentos del fondo.

La resistencia al flujo depende básicamente de la rugosidad del lecho. Los valores del coeficiente  $n$  de Manning varían entre 0.012 y 0.014 dependiendo del tamaño de la arena. Después de que se inicia el movimiento, un lecho plano puede presentar rizos para arenas menores que 0.5 mm o dunas para arenas de tamaños mayores.

- **Rizos.** Los rizos son ondulaciones triangulares con una pendiente suave en la cara de aguas arriba y la pendiente natural del material en la cara de aguas abajo. La longitud varía entre 12 y 60 cm. Su altura varía entre 0.6 cm y 6 cm. Su distribución en el lecho es irregular. El coeficiente  $n$  de Manning varía entre 0.018 y 0.030.

Se forman si el tamaño del sedimento es menor que 0.5 mm. Las partículas se transportan principalmente en el fondo del lecho. Cuando el material consiste de arena muy fina y las velocidades del flujo son bajas, los rizos se conservan y no se vuelve a condición de lecho plano. Los rizos causan mínima alteración en la superficie del agua.

- **Lecho plano con transporte.** Si el número de Froude sigue aumentando, las dunas tienden a desaparecer y condiciones de lecho plano se pueden volver a presentar, provocando una disminución en la rugosidad del lecho. En este caso, el coeficiente de rugosidad de Manning varía entre 0.010 y 0.013.

Un lecho con dunas puede cambiar directamente a uno con ondas estacionarias sin necesariamente implicar la formación de lecho plano.

- **Ondas estacionarias.** El lecho adopta aproximadamente una forma sinusoidal. Aunque las partículas se muevan aguas abajo, las ondulaciones pueden permanecer en el sitio o también pueden moverse.

Las ondas estacionarias mantienen su forma durante algún tiempo. El coeficiente de rugosidad de Manning varía entre 0.011 y 0.016.

- **Dunas.** Las dunas son ondulaciones mayores que los rizos con pendiente más suave aguas arriba y ángulo de reposo aguas abajo. La longitud de las dunas varía entre 0.6 m y varios metros.

Se presentan cuando el esfuerzo cortante aumenta para causar movimiento de partículas, pero con números de Froude menores que 1. La distribución de las dunas en el lecho y su altura son bastante irregulares. El coeficiente de rugosidad de Manning varía entre 0.018 y 0.040.

Las dunas tienden a desaparecer para velocidades altas formando un lecho plano o pueden presentar rizos sobre ellas. Si el diámetro del material es mayor que 0.5 mm, rizos no se pueden formar, pero sí se da lugar a lecho plano con o sin transporte de sedimentos. Vórtices intermitentes con eje vertical se forman en la cara aguas abajo de las dunas y remueven grandes cantidades de arena del lecho, que son posteriormente transportadas en suspensión. Cuando la velocidad baja, las partículas caen nuevamente al fondo lo que puede tomar entre 20 y 60 segundos. Este proceso es conocido como saltación.

- **Antidunas.** Al igual que las ondas estacionarias, las antidunas adoptan aproximadamente una forma de tren de ondas en el lecho del cauce que se manifiesta también en la superficie del agua. Aunque las partículas se muevan aguas abajo, las ondulaciones pueden permanecer en el sitio o también pueden moverse.

Las antidunas siguen un proceso de formación cíclico que demora de 0.5 a 2 minutos. Ellas crecen al moverse aguas arriba, luego se destruyen y después son lavadas por el flujo para empezar otra vez el ciclo. El coeficiente de rugosidad de Manning varía entre 0.012 y 0.020.

En cauces aluviales con lechos de grava, es decir con granulometría gruesa y extendida, las ondas sedimentarias del tipo rizos, dunas y antidunas no ocurren. En su lugar se forman una gran variedad de barras que tienen una incidencia importante en la morfología de ese tipo de cauces.

Este tipo de formas de fondo se denominan macroformas por su gran tamaño, que es del orden del ancho del cauce que las contiene. Los rizos que ocurren en lechos arenosos, en cambio, se denominan microformas por su pequeño tamaño, que es del orden del diámetro del sedimento, en tanto que las dunas y antidunas se denominan mesoformas, por su tamaño inferior al de las barras, que es del orden de la altura de escurrimiento.

Las barras o macroformas observadas en lechos de grava tienen su origen en una baja capacidad de transporte de sedimentos del flujo. Ellas se forman en cauces relativamente inestables cuyas características cambian rápidamente. Las barras se desarrollan a partir de lo que se denomina láminas de grava, las cuales corresponden a ondas de muy pequeña amplitud de sedimento grueso (usualmente de sólo unos diámetros de espesor), que migran hacia aguas abajo sobre el lecho.

Estas láminas se acumulan formando barras en puntos donde el flujo tiende a diverger, es decir en zonas de baja capacidad de transporte de sedimentos. En otras circunstancias, el sedimento excavado en ciertas zonas del lecho, como un fenómeno de socavación local, puede también dar lugar a la formación de barras.

Se pueden identificar cinco distintos tipos de unidades, tal y como se observa en la siguiente figura:

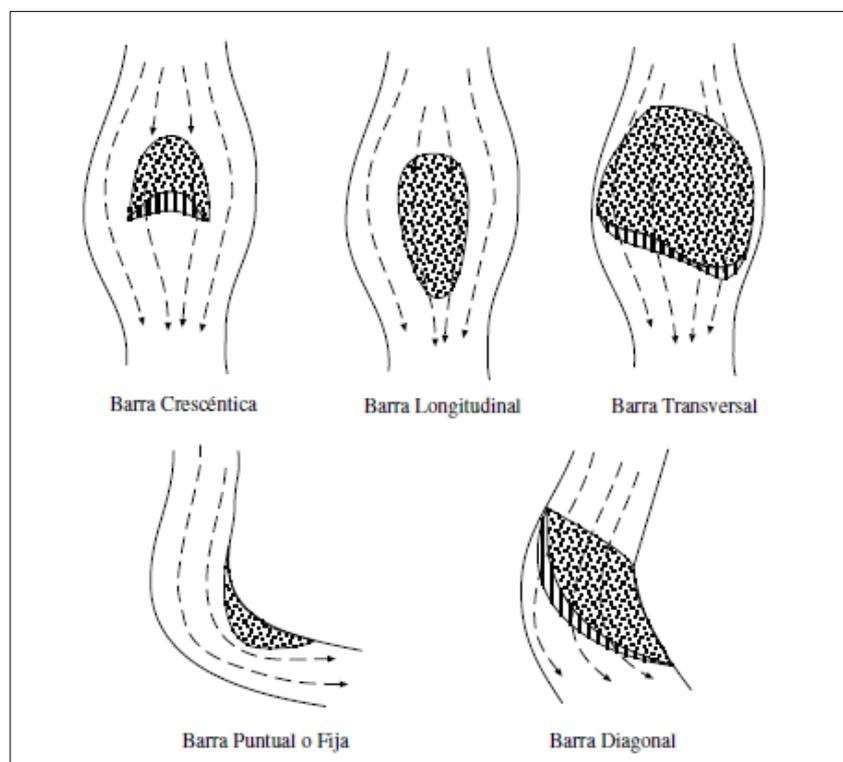


Figura 10-2: Barras en lechos de grava

A continuación, se explican cada una de las formas:

- Las **barras longitudinales** se forman en el centro del canal en un lugar donde el cauce se ensancha. Ellas son de forma convexa y alargada y crecen mediante la acumulación de sedimento más fino en sus extremos de aguas arriba y aguas abajo.
- Las **barras crescénticas**, tienen forma de media luna y están ligadas a las barras longitudinales, ya que ellas pueden ser las predecesoras de estas últimas, es decir, una forma de transición entre las láminas de grava y las barras longitudinales.
- Las **barras transversales** tienden a cubrir todo el ancho del canal y se forman en zonas de expansión abrupta del cauce. Este tipo de unidad tiende a favorecer la formación de bifurcaciones o consecuencias del cauce.
- Las **barras fijas o puntuales** ocurren en el lado interno de una curva del cauce.
- Las **barras diagonales** tienden a orientarse oblicuamente a través del canal y están en contacto con ambas riberas.

Estas unidades son destruidas frecuentemente ante condiciones de flujo cambiantes en cauces inestables. Asimismo, ante condiciones de bajo caudal las barras tienden a emerger. Es común que las barras se transformen en una u otra de las unidades antes descritas. La transformación más común es hacia la forma diagonal, aun cuando la transformación desde una barra diagonal a una longitudinal también suele ocurrir. En general, las barras diagonales tienden a ser más estables que las otras, y eventualmente pueden convertirse en elementos cuasi-permanentes, estabilizadores de la morfología del cauce.

# 11 ESTUDIO HIDRÁULICO 1. MODELADO CON (N) DE MANNING CLÁSICA

---

*Sólo aquellos que tengan la paciencia de hacer perfectamente las cosas simples, adquirirán la habilidad de hacer las difíciles fácilmente.*

*- Friedrich Schiller -*

## 11.1 Cauce

### 11.1.1 Dinámica fluvial del río Tordera

Como ya se ha comentado, el río Tordera es uno de los cursos de agua de las cuencas internas de Cataluña con más interés como espacio natural, entre varios factores, por sus dimensiones, por su aspecto y por la relativa abundancia de caudal (al menos en su tramo medio). No obstante, las intervenciones humanas han sido bastante importantes, como la construcción de vías de comunicación ocupando la llanura de inundación o la extracción masiva de áridos.

El Tordera, es un río que presenta un comportamiento dinámico como curso fluvial. Se puede decir, que existe una gran “variabilidad”, especialmente en el tramo bajo del río, desde Hostalric al mar, caracterizado por una total presencia de arenas. Esta variabilidad, significa sobre todo una gran movilidad del fondo (movimientos transitorios durante las avenidas, movimientos del fondo de tipo permanente, o manifestados a largo plazo, desplazamientos laterales con erosión de orillas, etc.).

La cimentación de muchos puentes (carretera N-II en Tordera), la historia de otros que sucumbieron a las crecidas (autopista A7 en 1971, en la desembocadura de la riera de Santa Coloma), el estado de otras obras en el cauce (tan socavadas como la estación de aforos de Can Simó en Fogars de Tordera) o la incisión de un brazo en la isla de Tordera, son algunos ejemplos de estas variaciones.

Para la correcta ejecución del estudio de inundación, objeto del trabajo, se precisan evaluar los movimientos o cambios fluviales experimentados por el río Tordera, dentro de su dinámica fluvial, haciéndose evidente, la necesidad de una buena recopilación de datos granulométricos de la zona de estudio, con los que recalcular el parámetro de rugosidad ( $n$ ). Para ello se ha empleado el programa HEC-RAS.

### 11.1.2 Parámetros del modelo

Para la ejecución del modelo en el programa nombrado anteriormente, se requieren una serie de parámetros hidráulicos y morfológicos característicos de la cuenca, como son los caudales y la pendiente de la misma.

La pendiente ha sido analizada en el programa Arc-Gis, a partir del cual se ha obtenido un valor de 0.00273684, es decir un 0.276384 %.

Respecto a la cartografía de la zona, se ha empleado un modelo de elevación del terreno MDT 25, es decir con paso de malla de 25 metros. Dicho modelo se ha obtenido del “Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG)”.

Como se ha comentado anteriormente, el tramo de estudio cuenta con una extensión de 20 Km aproximadamente. Para obtener una mayor fiabilidad de los datos obtenidos y realizar un estudio más completo de la zona, se han analizado las secciones cada 50 metros, es decir una totalidad de 388 secciones.

El caudal empleado en el modelo, se ha obtenido a partir de la suma de los caudales de las partes de la cuenca que convergen en el tramo de estudio (Destacado en rojo). Dichos caudales han sido obtenidos en el apartado “9. Estudio Hidrológico”.

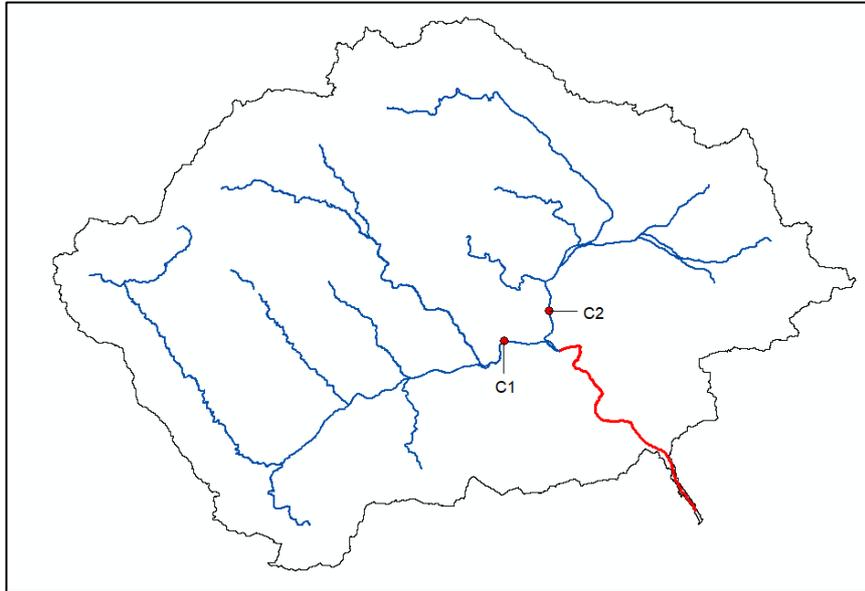


Figura 11-1: Puntos en los que se ha analizado el caudal de un tramo.

A continuación, se muestra una tabla con el valor de dichos caudales y la sección correspondiente en el modelo ejecutado. Tal y como se ha visto en el apartado hidrológico, la obtención de dichos caudales ha quedado detallada.

Tabla 11-1: Valores de Caudal (m<sup>3</sup>/s) para cada periodo de retorno.

Código	Q-10 (m <sup>3</sup> /s)	Q-50 (m <sup>3</sup> /s)	Q-100 (m <sup>3</sup> /s)	Q-500 (m <sup>3</sup> /s)
C1	702.474	1360.08	1584.3	2224.86
C2	370.71	609.4	729.53	1040.15

Tabla 11-2: Valores de Caudal (m<sup>3</sup>/s) para cada sección del modelo en función del periodo de retorno.

Nº Sección	Q-10 (m <sup>3</sup> /s)	Q-50 (m <sup>3</sup> /s)	Q-100 (m <sup>3</sup> /s)	Q-500 (m <sup>3</sup> /s)
388	702.474	1360.08	1584.3	2224.86
342	1073.184	1969.48	2313.83	3265.01

### 11.1.3 Datos granulométricos del tramo bajo del río Tordera

Partiendo de los datos de antiguos estudios realizados para la caracterización granulométrica del río Tordera a través de determinadas estaciones de muestreo, se ha podido apreciar, una clara separación del río en dos zonas completamente distintas en cuanto a la composición granulométrica y por tanto en cuanto a comportamiento frente al transporte de sedimento.

Concretamente, para la caracterización del tramo bajo del río, se han tomado de base las muestras obtenidas en tres puntos del cauce en el verano de 1999, momento en el que no circulaba agua por ningún de las tres secciones.

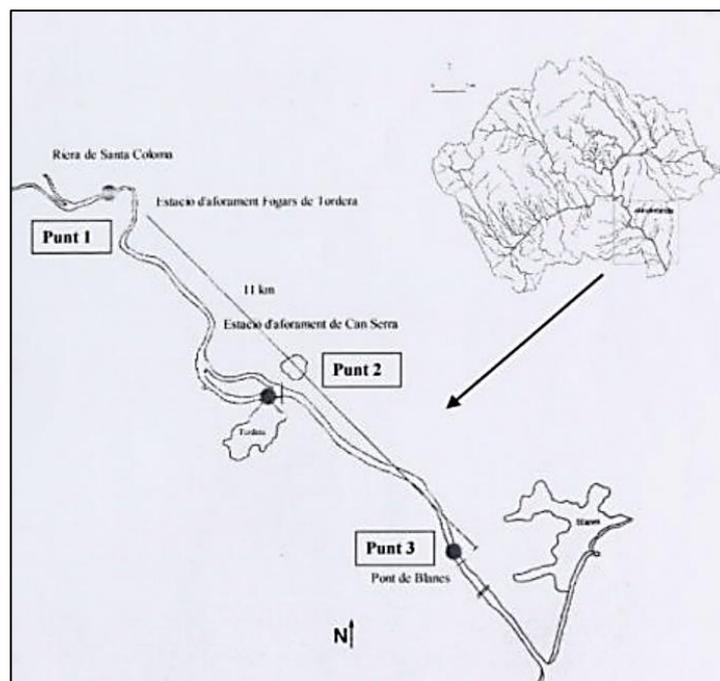


Figura 11-2: Puntos de muestreo granulométricos en la parte baja de la cuenca del Tordera.

- 1) Punto 8: A 300 metros de la estación de aforo de Fogars de Tordera.

Las muestras (48 Kg), se recogieron en la margen izquierda del canal principal, siguiendo el método de Church et al. (1987). Para la estimación estadística de la precisión de la muestra, se siguió el método propuesto por Ferguson & Paola (1997). El volumen de muestra recogido en esta sección ha permitido obtener una buena representación de la granulometría del lecho del río hasta el percentil 90 (D90).

- 2) Punto 9: Tordera Pueblo, a 6 Km aguas abajo del primer punto.

En este sector, la anchura del canal es de unos 80 m. La metodología empleada para la recogida de las muestras fue la misma que en el punto anterior. A fin de obtener la máxima representatividad del material presente en el cauce del río se muestreó en dos puntos de la sección, obteniendo en este caso y según el método de Ferguson y Paola (1997), una buena representación del material de la cama al percentil 95 (D95).

- 3) Punto 10: Sección de control de Blanes, a 50 m del puente de la B682.

La anchura del canal en este punto es de 91 m. El muestreo consistió en la recogida de un total de 13 Kg siguiendo Church et al. (1987), mediante muestras volumétricas en dos puntos diferentes de la sección. Al no apreciarse ninguna diferencia entre el material de ambos puntos, las muestras se analizaron conjuntamente. Según el método de Ferguson y Paola (1997), se obtendría una buena representación del material del lodo del río hasta el percentil 95 (D95).

A continuación, se muestran las curvas granulométricas obtenidas en base a cada uno de los puntos analizados.

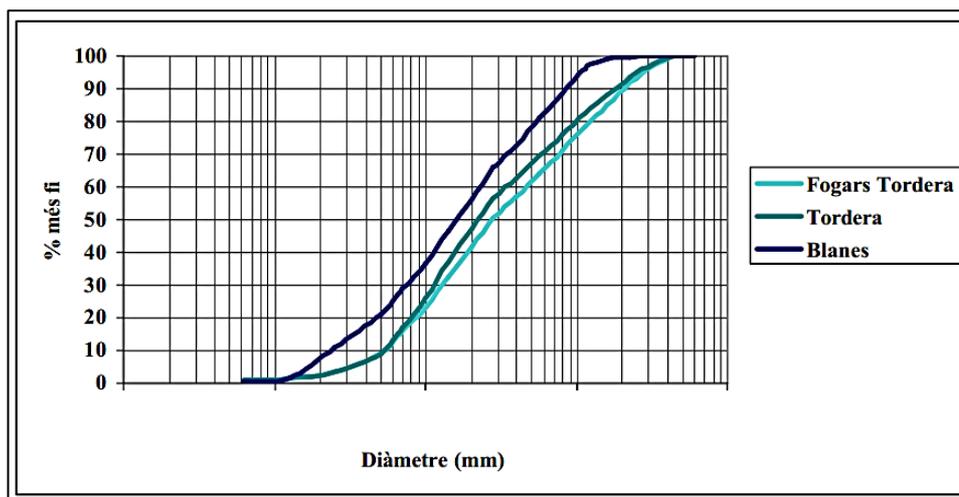


Figura 11-3: Curvas granulométricas del material superficial del cauce del río.

No obstante, estos puntos no llegan a ser representativos de todo el tramo bajo del río Tordera, por ello, desde la desembocadura de la riera de Santa Coloma hasta el mar, se cuenta con 7 muestras granulométricas procedentes de los trabajos desarrollados por los grupos de la Universidad de Lleida (UdLl) y la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Ordenadas desde aguas arriba a aguas abajo, tal y como se muestra en la figura de más adelante, los resultados de los principales parámetros granulométricos son:

Tabla 11-3: Características granulométricas de los puntos de control.

Ptos	Dist. Desembocadura (m)	Peso (Kg)	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)	Dm (mm)
Hostalric	18160	50	0,46	1,22	6,58	5,64
CanSimó	14800	47,8	0,73	3,21	10,8	7,58
CanSerra	10285	4,88	1,0	4,0	25	10,5
Tordera	8580	45,9	0,68	2,22	12,2	8,57
Puente NII	7070	8,20	0,8	2,20	15	7,42
Carbón	5895	1,15	0,8	1,35	3,0	1,80
Blanes	2650	12,8	0,35	1,60	6,46	4,43
Costa	0	-	-	-	-	-

A tener en cuenta:

- El (Dm) es el tamaño medio, calculado aritméticamente.
- El peso (Kg) es el total de la muestra de material ensayado.
- Aunque Hostalric no pertenece realmente a la parte baja del río, se ha considerado como punto de partida del primer tramo de estudio.
- El punto de Costa, hace referencia a la desembocadura del río Tordera, por lo que no se consideran valores dentro de este, solo se toma como punto final del último tramo.
- Debido a la mayor presencia de arenas en este tramo, no ha sido posible disponer de la información necesaria para la evaluación del (D90).

En todos los puntos, se veló porque los muestreos fueran representativos del conjunto del material, lo que en ocasiones significó tomar material en varios lugares de la sección.



Tabla 11-4: Valores del parámetro (n) o rugosidad del cauce para cada sección del modelo.

Nº Sección	Tramo	D50 (mm)	(n) Strickler
1 -- 81	Hostalric / CanSimó	1.22	0.0156
82 -- 96	CanSimó / CanSerra	3.21	0.0183
97 -- 157	CanSerra / Tordera	4	0.0190
158 -- 227	Tordera / Puente NII	2.22	0.0172
228 -- 266	Puente NII / Carbón	2.2	0.0172
267--326	Carbón / Blanes	1.35	0.0158
327--384	Blanes / Costa	1.6	0.0163

Como se ha podido observar, para la determinación de los valores de rugosidad en este caso, se ha aplicado directamente una fórmula empleada al uso, sin considerar ninguna otra variable salvo la granulometría. A continuación, en el Estudio Hidráulico 2, se analizará la existencia de otros factores que pueden afectar a la definición del parámetro (n) y por ende al estudio de inundación.

## 11.2 Llanuras de inundación

### 11.2.1 Introducción

En el siguiente apartado, se expone el proceso seguido para la determinación de los coeficientes de rugosidad de Manning en las llanuras de inundación, con el fin de conseguir una correcta definición de la resistencia al flujo de la vegetación del río Tordera y de la rugosidad del cauce para la mejora en la precisión de los cálculos hidráulicos realizados.

### 11.2.2 Información de referencia

El material básico para la determinación de los coeficientes de rugosidad de Manning en las llanuras de inundación ha consistido en:

- Mapa de cultivos y aprovechamientos (2000-2010), del MAPAMA.
- SIOSE: Sistema de información de ocupación del suelo en España.
- Bibliografía sobre determinación de coeficientes de rugosidad.

### 11.2.3 Resultados

Los coeficientes de rugosidad obtenidos para la llanura de inundación del río Tordera, se presentan en la figura 11-5. En dicha tabla, se señalan los distintos tipos de vegetación asociados a un valor del coeficiente de Manning, siguiendo las siguientes categorías, obtenidas del libro “*Ingeniería de ríos – Juan P. Martín Vide*”:

Tabla 11-5: Categorías para la definición de la rugosidad (n) de Manning.

Categorías de Vegetación	(n) Manning
Hierba y prados (incluidas también zonas con vegetación escasa)	0,035
Cultivos (cereales, huerta, vid, etc.)	0,040
Explotación forestal (árboles alineados)	0,060
Arbustos, bosquines, vegetación de ribera	0,075
Bosque natural	0,085

Para conocer la vegetación que se encuentra en la zona de estudio, se ha empleado el visor de cultivos del MAPAMA, el cual se muestra a continuación:

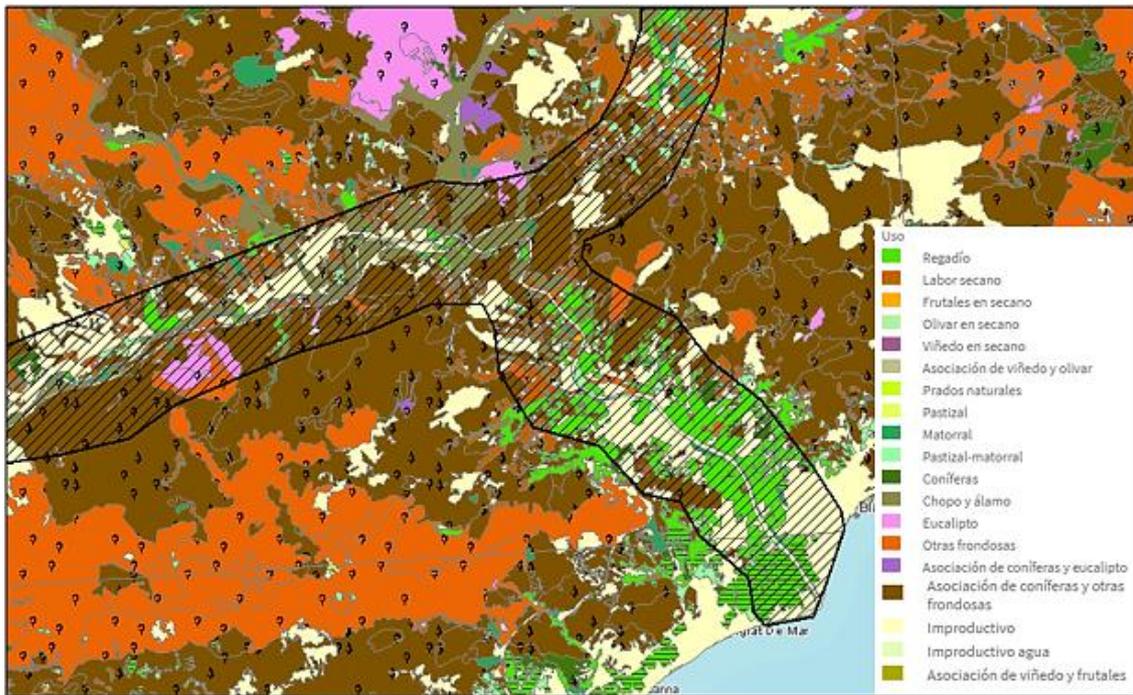


Figura 11-5: Usos de suelo de la zona de estudio.

Con todo ello, los valores obtenidos para la rugosidad de las llanuras de inundación en cada una de las secciones de estudio son:

Tabla 11-6. Valores de la rugosidad ( $n$ ) en las llanuras de inundación para cada sección del modelo.

Nº Sección	( $n$ ) Manning
1 -- 38	0.04
39 -- 122	0.085
123 -- 207	0.04
208 -- 217	0.075
218 -- 236	0.04
237 -- 266	0.075
267 -- 276	0.04
277 -- 285	0.075
286 -- 388	0.04

Estos valores, son válidos tanto para el estudio hidráulico 1 como para el estudio hidráulico 2, pues no dependen de las características del grano ni de las formas de fondo.

# 12 ESTUDIO HIDRÁULICO 2. MODELIZACIÓN CON (N) DE MANNING MODIFICADA

---

*Los científicos estudian el mundo tal como es; los ingenieros crean el mundo que nunca ha sido.*

*- Theodore von Karman -*

## 12.1 Introducción

La rugosidad de los cauces, depende básicamente de la granulometría que constituye su lecho. La resistencia que el cauce provoca al avance del fluido, se concreta, en el caso de lecho fijo, en la rugosidad de los granos del fondo que, con su irregularidad, provocan la distorsión de las líneas de corriente.

Cuando las condiciones del flujo superan aquellas para las que los granos del lecho comienzan el movimiento, estos inician un reagrupamiento y generan formas de fondo. Dichas formas, incrementan en general la resistencia al flujo. Esta resistencia adicional, se puede evaluar a través de la rugosidad equivalente de la forma de fondo que, sumada a la rugosidad equivalente del grano, proporciona la rugosidad equivalente total que experimenta el flujo.

En este caso, utilizaremos el coeficiente de Manning (n) a la hora de evaluar la rugosidad del lecho fluvial. Este coeficiente ya es un parámetro indicador de la rugosidad total del lecho, que a través de la pendiente de fricción mide la disipación de energía por rozamiento, por unidad de longitud. Para su evaluación, se emplea la fórmula de Manning-Strickler:

$$i = \frac{n^2 * v^2}{Rh^{4/3}}$$

Así pues, queda evidenciado que, además de considerar la resistencia al flujo por el tamaño de grano, hay que incluir la resistencia por formas de fondo, que dependen del régimen hidráulico del río.

## 12.2 Parámetros hidráulicos

A continuación, se muestran las hipótesis empleadas a lo largo de toda la modelización, las cuales irán en función de las exigencias del modelo y de las propias características del río estudiado.

### ❖ *Secciones*

Las secciones se introducen en el modelo a partir del MDT empleado para el mismo. El número de secciones utilizadas ha dependido de la longitud del tramo de estudio y del criterio considerado para obtener una información lo más cerca de la realidad posible. Como se ha comentado anteriormente se han analizado un total de 388 secciones con una separación de 50 metros entre las mismas.

### ❖ *Rugosidades*

Para la definición de la rugosidad del fondo en el modelo, se ha empleado el coeficiente de Manning, el cual se ha definido de la siguiente manera:

$$\frac{gQ|Q|}{M^2AR^{4/3}}$$

Donde:

- g = Aceleración de la gravedad.
- Q = Caudal.
- M = Número de Manning o coeficiente de Strickler.
- A = Área fluyente.
- R = Radio Hidráulico.

#### • Rugosidades en los distintos cauces

A la hora de definir una rugosidad para el fondo de un cauce, hay que considerar factores como la resistencia relativa y el factor de resistencia. En función del radio que se escoja (radio de resistencia o radio hidráulico), la resistencia relativa se comportará de una manera o de otra. El factor de resistencia indica la variación de resistencia con la altura de agua, sin embargo, en este caso se ha asumido que el factor tiene valor 1 y no varía en toda la columna de agua.

Respecto a la elección entre radio hidráulico o radio de resistencia, ésta dependerá del tipo de cauce que haya. En el caso de que el cauce sea estrecho y profundo, se empleará el radio hidráulico, mientras que, si las secciones son muy variables, se utiliza el radio de resistencia.

#### • Rugosidades de los planos

A la hora de definir las secciones de río, se deberá incluir una o dos llanuras de inundación además del canal principal. Dichas llanuras se tratarán como canales paralelos al canal principal. Las características hidrodinámicas se calculan para los tres canales y se obtiene una media para la sección. En el siguiente esquema se muestran dichas llanuras:

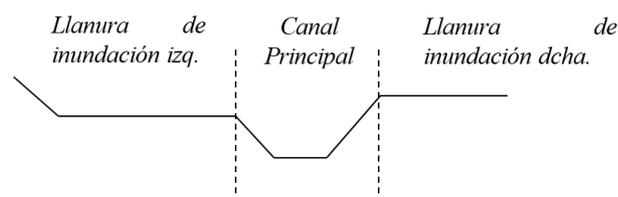


Figura 12-1: Representación de los planos de inundación

### 12.2.1 Datos hidráulicos

Una vez definida la geometría de las secciones, se deberán introducir los datos hidráulicos correspondientes al río estudiado, los cuales se muestran a continuación:

- Definición del número de perfiles.
- Definición de las condiciones de contorno.
- Introducción de los cambios en los caudales en determinadas secciones. Ya que considera que el caudal no cambia hacia aguas abajo hasta que se encuentra con otro valor en otra sección.
- Definición de los caudales de cada perfil en cada sección donde se produce un cambio de caudal (no permite introducir cambios de caudales en secciones interpoladas).

### 12.2.2 Condiciones de contorno

El modelo requiere condiciones de contorno en todos los contornos del modelo, es decir, en todos los extremos del modelo que no están conectados. Las condiciones de contorno admitidas en el programa son las siguientes:

- Nivel de agua conocido: adecuada si se conoce un nivel en alguna sección transversal. Es importante destacar que el programa exige NIVEL, por lo que hay que introducir el calado más la cota más baja de la sección.
- Calado crítico: adecuada si existe alguna sección de control. En esta opción no se exige ningún dato adicional.
- Calado normal: adecuada para situaciones donde el flujo se aproxime al uniforme. Se deberá introducir la pendiente del tramo de influencia.
- Curva de gasto: adecuada si existe alguna sección de control con una relación entre calado y caudal fija.

## 12.3 Estudio de la rugosidad del lecho. Formas de fondo.

### 12.3.1 Introducción

Uno de los parámetros hidráulicos más importantes es la rugosidad. Dicho parámetro es empleado para obtener los caudales y otras variables del modelo hidráulico, además de condicionar de una manera notable los niveles a los que ha llegado el agua, por lo que resulta imprescindible en un estudio de inundaciones.

En el caso de los canales artificiales, la rugosidad tiene un valor establecido, el cual viene determinado por el material con el que se haya construido (Normalmente son de hormigón) y por las características de construcción de dicho material. En lechos naturales pasa lo mismo, la rugosidad también viene dada por el material que constituye el cauce (Normalmente se trata de gravas y arenas). En este tipo de materiales, es el tamaño del mismo el que proporciona la rugosidad del lecho en el caso de ríos de material con gran tamaño. Este tamaño de partículas se traduce en una "n" de Manning, la cual actúa de rugosidad ante el flujo hidráulico.

Por otro lado, en el caso de ríos con material fino, hay que tener en cuenta otros fenómenos a parte del tamaño que añaden una rugosidad adicional a la propia del grano. Dichos fenómenos se definen como formas de fondo, las cuales son la consecuencia sobre un fondo móvil del transporte sólido que se produce en el cauce del río como veremos a continuación.

Existen diferencias notables entre tener en cuenta dichos fenómenos adicionales o no, las cuales pueden ser decisivas en la inundación de una zona o la velocidad en el cálculo de la erosión.

### 12.3.2 Formas de fondo en flujo uniforme

En el caso de una corriente uniforme sobre un fondo móvil, la acción de ésta produce un transporte de sedimentos que origina las formas de fondo. Dichas formas provocan un aumento en la rugosidad del fondo y modifican las velocidades y, por tanto, el transporte.

Se denomina K a la rugosidad resultante de sumar la rugosidad asociada al grano ( $K^{\wedge}$ ), considerando este grano perteneciente a un cauce fija e impermeable y la asociada a la forma del cauce que ha generado  $K^{\wedge}$ . Este hecho implica que la tensión tangencial en el fondo sea la superposición de los dos efectos (grano y forma del cauce).

Las formas de fondo pueden presentarse de forma perpendicular a la corriente (transversales) o paralelas (longitudinales). Principalmente se analizarán las transversales y se distinguirán aquellas de escala de longitud menor que la profundidad de las de dimensiones más grandes que la profundidad.

Las formas del lecho dependerán principalmente del material que tengamos en el fondo ( $D_{50}$ ) y del régimen del transporte, el cual puede ser alto, bajo o de transición.

Existen distintas formas para clasificar el lecho, aunque las más aceptadas son aquellas que se han basado en la observación, tanto en laboratorio como en campo.

Cada una de las clasificaciones utiliza distintos parámetros:

- Lui (1957): Las formas de fondo son función de  $\frac{u_*c}{f}$ ,  $\frac{u_*cD_{50}}{v}$ , donde  $u_*c$  es la velocidad de caída del grano.
- Simond-Richardson (1966): Las formas del cauce son función de  $\tau_{0c}$ ,  $U$ ;  $d_f$  donde  $d_f$  es el diámetro medio de caída del grano.
- Van der Berg - Van Gelder (1989): Las formas de fondo son función de  $\theta' = \frac{\tau'_{0c}}{(\rho_s - \rho_w)gD_{50}}$  donde  $\tau_{0c}$  es la tensión tangencial en el fondo asociada a la rugosidad de grano.
- Van Rijn (1984): Las formas del cauce son función de  $T$  y  $D_*$  donde:  $T = \frac{\tau'_{0c} - \tau_{0cr}}{\tau_{0cr}}$ ,  $D_* = D_{50} \left( \frac{(s-1)g}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}}$ ;  $\tau_{0cr}$  es la tensión tangencial crítica o estricta con el fin de iniciar el movimiento de los sedimentos.

### 12.3.3 Clasificación y dimensiones

Las formas de fondo se pueden clasificar según el transporte y el tamaño del grano de las siguientes formas:

❖ Régimen bajo de transporte

Anterior al inicio del movimiento hay un cauce plano inmóvil, aunque se puede dar el caso de que en este cauce haya formas procedentes de estados de transporte anteriores. Cuando la velocidad media de la corriente aumenta y, dependiendo del tamaño del sedimento, empiezan a aparecer las distintas formas del cauce. Las formas del lecho propias de un régimen de transporte bajo son los ripples y las dunas, aunque en ocasiones pueden aparecer barras. Los ripples van en dirección del avance de la corriente y además van erosionando la parte de aguas arriba y depositándola aguas abajo.

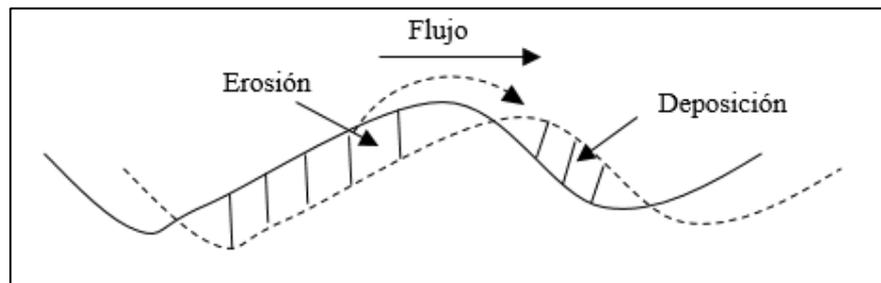


Figura 12-2: Modo de avance de las formas del cauce en régimen bajo.

Su sección transversal es asimétrica con pendiente suave aguas arriba y pendiente más pronunciada aguas abajo.

- **Ripples**

➤ Mini-ripples: Las condiciones bajo las que aparecen los mini-ripples son:

$$1 \leq D^* \leq 10 \text{ y } 0 \leq T \leq 3.$$

Sus dimensiones pueden estimarse por:

$$\Delta_r = 50-200 D_{50}$$

$$\lambda_r = 500 - 1000 D_{50}$$

Por lo tanto, su tamaño es del orden de la rugosidad del cauce y mucho menor que la profundidad.

➤ Mega-ripples: Aparecen para  $1 \leq D^* \leq 10$  y  $3 \leq T \leq 10$  y experimentalmente se ha obtenido la curva de mejor ajuste de sus dimensiones:

$$\frac{\Delta_r}{h} = 0.02(1 - e^{-0.1T})(10 - T)$$

$$\lambda_r = 0.5h$$

Por lo tanto, su longitud es del mismo orden de magnitud que la profundidad.

- **Dunas**

Las condiciones de formación de dunas son:

$$3 < T \leq 15 \text{ para cualquier } D^*$$

$$0 < T \leq 3 \text{ para cualquier } D^* > 10$$

y sus dimensiones pueden estimarse a partir de la ecuación:

$$\frac{\Delta_d}{h} = 0.11 \left( \frac{D_{50}}{h} \right)^{0.3} (1 - e^{-0.5T})(25 - T)$$

$$\lambda_d = 7.3 h$$

Tiene una pendiente mayor aguas abajo que arriba y su forma es triangular. En este caso la escala de longitud es mayor que la profundidad. Cabe destacar que las dunas pueden producir la separación del flujo aguas debajo de la cresta, zona donde se produce una recirculación y turbulencia máxima.

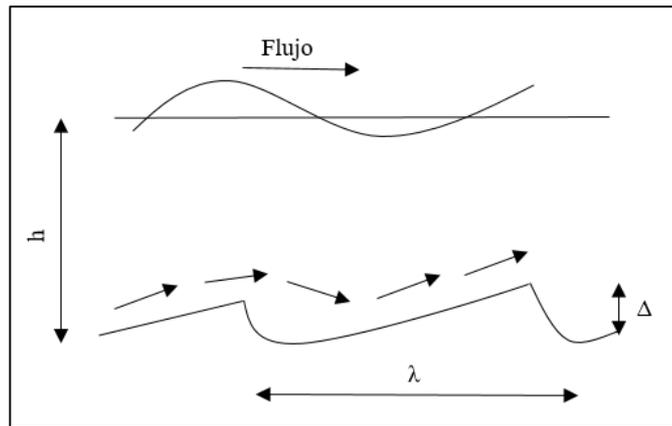


Figura 12-3: Circulación de sedimentos y separación del flujo en dunas

Si el tamaño del grano del material no es uniforme, el más grande se deposita en la región del seno la duna. También es bastante habitual que, bajo ciertas condiciones de flujo ( $3 < T \leq 10$  y  $1 \leq D_* \leq 10$ ) aparezcan mini o mega -ripples superpuestas a las dunas.

❖ Régimen de transporte de transición

Las formas del fondo se forman con unas velocidades bajas, y éstas van desapareciendo a medida que se aumenta la velocidad. La altura de las formas va disminuyendo mientras que la longitud va creciendo hasta obtener un cauce. Aparecen formas más simétricas, con pendiente más suave y prácticamente con separación de flujo. Principalmente el transporte de sedimentos es por suspensión.

Desaparición de las dunas y formación de ondas de arena:

Las condiciones bajo las que se producen son  $15 < T < 25$  y sus dimensiones se pueden estimar de la siguiente forma:

- **Dunas**

$$\frac{\Delta_d}{h} = 0.11 \left( \frac{D_{50}}{h} \right)^{0.3} (1 - e^{-0.5T})(25 - T)$$

$$\lambda_d = 7.3 h$$

- **Ondas de arena**

$$\frac{\Delta_{sw}}{h} = 0.15 \left( 1 - e^{-\frac{1}{2}(T-15)} \right)^{0.3} (1 - Fr^2)$$

$$\lambda_{sw} = 10 h$$

❖ Régimen alto de transporte

Se pueden distinguir dos tipos de subrégimenes en el régimen alto de transporte:

- **Subcrítica:** Ondas de arena

Se produce para:  $T \geq 25$  y  $Fr < 0.8$

Las formas de fondo que se encuentran asociadas a este régimen son las ondas de arena simétricas, cuyas dimensiones pueden ser estimadas a partir de las ecuaciones que se han expuesto anteriormente para las ondas de arena.

- **Supercrítico:** cauce plan o antidunas

Se produce para  $T \geq 2.5$  y  $Fr \geq 0.8$

La longitud de onda de las antidunas es similar a la de las ondas y están en fase con ellas. Su forma de adelanto es diferente a la de las dunas o los ripples, ya que avanzan en contra del corriente y lo hacen por erosión de la cara de aguas abajo y deposición sobre la cara de aguas arriba.

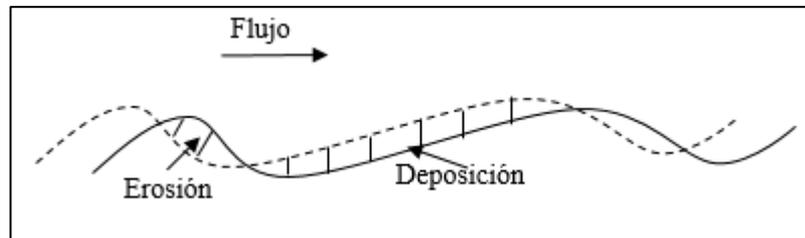


Figura 12-4: Modo de avance de las formas del cauce en régimen alto de transporte

Se pueden resumir las condiciones bajo las que se producen las diferentes formas del lecho a la tabla:

Tabla 12-1: Resumen de condiciones bajo distintas formas de lecho

Régimen de transporte	Tamaño del grano	
	$1 \leq D_* \leq 3$	$D_* > 10$
Bajo	$0 \leq T \leq 3$	Mini ripples dunas
	$3 < T \leq 10$	Mega ripples y dunas dunas
	$10 < T \leq 15$	dunas dunas
Transición	$15 < T < 25$	Desaparición de las dunas y ondas de arena
Alto	$T \geq 25, Fr < 0.8$	Ondas de arena
	$T \geq 25, Fr \geq 0.8$	Cauce plano y/o antidunas

## 12.4 Rugosidad equivalente

Para la determinación de los coeficientes de rugosidad en el cauce principal, dependientes de la rugosidad de grano y de las formas de fondo, se emplea el concepto de “rugosidad equivalente”. Dicha rugosidad solo será aplicada en el cauce ya que es la zona que se encuentra afectada por las formas de fondo. Los valores de  $n$  de Manning para las llanuras de inundación, serán los mismos que los calculados en el estudio hidráulico 1.

La altura de rugosidad equivalente o rugosidad efectiva, se introduce con el fin de simular la rugosidad de los elementos que constituyen el fondo. Tal como se ha dicho anteriormente, si éste es móvil, a su rugosidad contribuyen dos factores: por un lado, aquella asociada al grano ( $K'$ ), que es constante para un tamaño de grano dado y no depende de las características del flujo, y por otro, aquella asociada a las formas de fondo ( $K''$ ) que sí depende de las condiciones del flujo (velocidad, profundidad, etc.). Esta doble dependencia, se traduce en una mayor complejidad del proceso de cálculo, haciéndose necesario emplear métodos iterativos.

Para un canal con un cauce fijo, plano y rugoso, la tensión tangencial en el fondo es proporcional a la velocidad media elevada al cuadrado ( $\tau_0 \approx U^2$ ), pero a medida que se generan formas de fondo, la fricción y, por tanto, la tensión tangencial, aumentan, debido a la rugosidad adicional que estas originan.

La tensión tangencial, ( $\tau_0$ ), que actúa en el fondo del cauce se puede separar en:

- $\tau'_0$ : asociada al tamaño del grano.
- $\tau''_0$ : asociada a la forma del fondo.

De manera que:

$$\tau_0 = \tau'_0 + \tau''_0$$

Siendo:

$$\tau'_0 = \frac{1}{8} \rho f' U^2$$

$$\tau''_0 = \frac{1}{8} \rho f'' U^2$$

Por tanto:

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \rho u^2 (f' + f'') = \frac{1}{8} \rho u^2 f$$

Es decir que:

$$f = f' + f''$$

También se puede simplificar de la siguiente manera:

$$K = K' + K''$$

Siendo:

- $K'$ : rugosidad asociada al tamaño del grano.
- $K''$ : rugosidad asociada a la forma del cauce.

Antes de empezar propiamente con el proceso de cálculo, se definen, los siguientes parámetros o variables auxiliares, que serán necesarias la realización del mismo:

Tabla 12-2: Parámetros auxiliares.

Variable	Descripción	Valor
$\rho_s$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad de los Sedimentos	2650
$\rho_w$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad del Agua	1000
$g$ (m/s <sup>2</sup> )	Gravedad	9.81
$\gamma_s$ (N/m <sup>3</sup> )	Peso Específico de los Sedi.	25996.5
$\gamma_w$ (N/m <sup>3</sup> )	Peso Específico del Agua	9810
$\Delta$	P.E. Relativo del Sedimento	1.65
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	Viscosidad Cinemática	0.000001
$\gamma_d$	Coef. Característico Dunas	0.7
$\Delta$	P.E. Relativo del Sedimento	1.65

Los cálculos realizados de aquí en adelante, se basan en los estudios de Van Rijn (1989) y se han llevado a cabo mediante una hoja de Excel.

### 12.4.1 Rugosidad asociada al grano (K')

Como ya se ha comentado, se trata de la rugosidad propia de los sedimentos, dispuestos sobre un lecho plano, fijo o móvil. Depende del tamaño de las partículas colocadas en la capa superior e influye poco en la movilidad de estas.

Van Rijn, para régimen bajo de transporte ( $\theta < 1$ ), propone:

- Lecho plano fijo  $\rightarrow K' = 2 - 3 D_{90}$
- Lecho plano móvil  $\rightarrow K'' = 3 - 5 D_{90}$

Para el caso de régimen alto de transporte, aumenta la concentración de sedimentos y, por tanto, la viscosidad de la mezcla agua-sedimentos puede ser diez veces mayor que la del agua ( $\nu_m = 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$ ). Esto, reduce en gran medida la velocidad de las partículas debido a los choques entre ellas o contra el fondo, lo que se traduce en un aumento de  $K'$ .

Para la determinación de la rugosidad asociada al grano, Wilson (1987) propone:

$$K' = 3\theta D_{90} \quad \theta \geq 1$$

$$\theta = \frac{u_*^2}{[(s-1)gD_{50}]}$$

$$C_f = 18 \log \frac{12h}{K' + 3.3 \frac{\nu_m}{u_*}} = 18 \log \frac{12h}{K' + \nu_m \frac{C_f}{u}}$$

$$K' \geq 0.01$$

Con flujo uniforme la ecuación del coeficiente de Chezy es la del flujo turbulento transitorio.

Sin embargo, cuando la cantidad de datos granulométricas es suficiente y fiable se puede usar la expresión de Strickler  $n = (D_{90} \text{ (m)})^{1/6} / 26$  a fin de encontrar la rugosidad asociada al tamaño de grano directamente.

No obstante, tal y como se indicó en el apartado anterior (Estudio Hidráulico 1), para los tramos localizados entre las secciones del modelo, no se dispone de datos fiables con los que obtener directamente el ( $D_{90}$ ). Por ello, se ha llevado a cabo una interpolación entre los valores conocidos de ( $D_{90}$ ) y ( $D_{50}$ ) de los puntos de muestreo, mediante la siguiente ecuación:

$$D_{90} = D'_{90} + (D_{50} - D'_{50}) \frac{(D''_{90} - D'_{90})}{(D''_{50} - D'_{50})}$$

Una vez definidos dichos diámetros, y partiendo de la consideración de que ( $\theta \geq 1$ ), se procede a calcular las rugosidades asociadas al grano ( $K'$ ) mediante:

$$K' = 3\theta D_{90}$$

Obteniendo valores comprendidos entre 0.01 y 0.136.

Para la determinación del coeficiente ( $C_f$ ), se emplea la ecuación anterior:

$$C_f = 18 \log \frac{12h}{K' + \nu_m \frac{C_f}{u}}$$

Siendo:

- $\nu_m$ : viscosidad cinemática ( $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s).
- h: calado (m).
- u: velocidad del flujo (m/s).

Dado que, como puede observarse el término de (Cf) aparece en la propia ecuación, su evaluación debe realizarse por medio de iteraciones sucesivas.

#### 12.4.2 Rugosidad asociada a las formas del cauce (K'')

La rugosidad (K'') incluida para las formas de fondo, se produce por la acción de las fuerzas de presión y depende de la altura de la forma y de su peralte. En los últimos años se ha trabajado con intensidad para obtener valores de rugosidad relacionados con el tamaño de la forma y la modalidad de flujo. En este término, se han adoptado las ecuaciones ajustadas por Van Rijn (1989) a partir de medidas experimentales.

La rugosidad asociada a las formas de fondo, es proporcional a la altura de la forma ( $\Delta$ ) y a su peralte  $\left(\frac{\Delta}{\lambda}\right)$ . Para el flujo uniforme, las relaciones encontradas son las siguientes, en función del tipo de forma:

- **Ripples:** Van Rijn propone la siguiente ecuación:

$$K''_r = 20\gamma_r\Delta_r\left(\frac{\Delta_r}{\lambda_r}\right)$$

Siendo:

- $\Delta_r$  = altura del ripple.
- $\lambda_r$  = longitud de onda del ripple.
- $\gamma_r = 0.7$  para ripples superpuestos a dunas o 1 si no lo están. \*

\* ( $\gamma_r$ ) es menor para ripples superpuestos a dunas, ya que, en este caso, los ripples no se encuentran en toda la superficie, ya que en la zona cercana a la cresta y el seno tienen tendencia a desaparecer.

- **Dunas:** Basándonos en el análisis de datos, Van Rijn (1989) ajustó:

$$K''_d = 1.1\gamma_d\Delta_d\left(1 - e^{-25\frac{\Delta_d}{\lambda_d}}\right)$$

Siendo:

- $\Delta_d$  = altura del ripple.
- $\lambda_d$  = longitud de la duna.
- $\gamma_d = 0.7$ .

- **Ondas de arena**

Como son formas de longitud mucho mayor que la profundidad, simétricas y de pendientes suaves, la separación del flujo no se produce y por lo tanto la rugosidad adicional que generan será nula.

Así pues, como es lógico, el siguiente paso consiste en saber qué tipo o tipos de formas de fondo se dan en el río. Para ello se empleará la siguiente tabla, definida anteriormente:

Tabla 12-3: Condiciones para la formación de formas de fondo.

Régimen de transporte	Tamaño del grano	
	$1 \leq D_* \leq 3$	$D_* > 10$
Bajo	$0 \leq T \leq 3$	Mini ripples dunas
	$3 < T \leq 10$	Mega ripples y dunas dunas
	$10 < T \leq 15$	dunas dunas
Transición	$15 < T < 25$	Desaparición de las dunas y ondas de arena
Alto	$T \geq 25, Fr < 0.8$	Ondas de arena
	$T \geq 25, Fr \geq 0.8$	Cauce plano y/o antidunas

Como se puede apreciar, las formas de fondo dependen de dos parámetros básicos. El primero ( $D^*$ ) considera las características de las partículas del sedimento, el segundo ( $T$ ), va asociado al transporte de sedimentos.

$$D_* = D_{50} \left( \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right)^{1/3}$$

Siendo nuevamente ( $\nu$ ) la viscosidad cinemática ( $m^2/s$ ).

$$T = \frac{\tau'_{0c} - \tau_{0cr}}{\tau_{0cr}}$$

Siendo:

- $\tau'_{0c}$ : tensión tangencial en el fondo asociada a la rugosidad de grano.
- $\tau_{0cr}$ : tensión tangencial crítica o estricta que inicia el movimiento de los sedimentos.

Para el cálculo de ( $D^*$ ), no hay más que sustituir cada uno de los datos, ya conocidos, para cada una de las secciones de estudio. En el caso de ( $T$ ), el proceso es un poco más complejo.

En primer lugar, se obtiene ( $\tau'_{0c}$ ), despejándolo de la siguiente expresión:

$$U'_* = \sqrt{\frac{\tau'_{0c}}{\rho_w}}$$

Donde ( $U'_*$ ), es definida como la velocidad de fricción asociada a la rugosidad de los granos:

$$U'_* = \left( \frac{\sqrt{g}}{C'} \right) U$$

Siendo:

- $U$ : velocidad del flujo ( $m/s$ ).
- $C' \approx Cf$ .

Seguidamente, se procede a calcular el valor de ( $\tau_{0cr}$ ) para cada una de las secciones de estudio. Para ello, partiendo del valor ( $D_{50}$ ) en mm característico de cada sección, se entra en la siguiente gráfica, obteniendo el valor de la tensión tangencial crítica correspondiente.

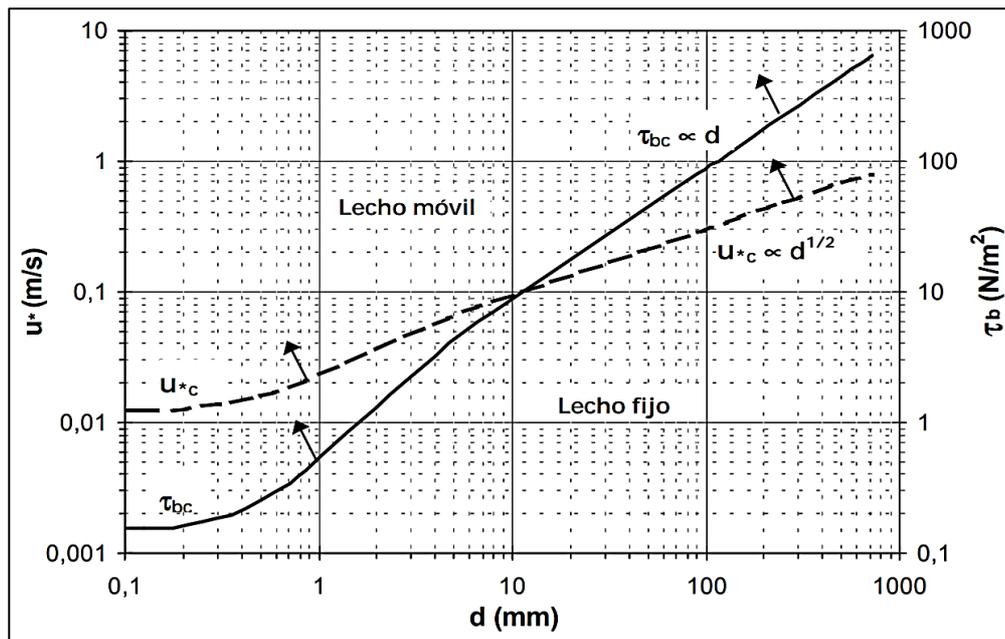


Figura 12-5. Velocidad de corte crítica y tensión de corte crítica en función del diámetro.

Con todo ello, se obtienen unos valores de  $(D^*)$  entre 30,86 y 101,18 y de  $(T)$  entre 3,90 y 10,54, lo que, observando la tabla 12-3, pone de manifiesto que nos encontramos en un régimen de transporte bajo y con dunas como formas de fondo.

Así pues, recuperando las ecuaciones anteriores, referidas a dunas, se tiene que, la rugosidad asociada a las formas de fondo es:

$$K''_d = 1.1\gamma_d\Delta_d \left(1 - e^{-25\frac{\Delta_d}{\lambda d}}\right)$$

Con:

$$\Delta_d = \left[0.11 \left(\frac{D_{50}}{h}\right)^{0.3} (1 - e^{-0.5T})(25 - T)\right] * h$$

$$\lambda d = 7.3h$$

$$\gamma d = 0.7$$

Por último, quedaría que la rugosidad final  $(K)$ , es igual a:

$$K = K' + K''$$

Y el coeficiente de Chezy global:

$$C = 18 \log\left(\frac{11h}{K}\right)$$

Con todo ello, los valores obtenidos de la (n) de Manning modificados son los siguientes:

Tabla 12-4: Valores de n de Manning modificada.

Nº Sección	(n) Manning Modificado
1 - 81	0.022769
82 - 96	0.02747
97 - 157	0.028691
158 - 227	0.0253
228 - 266	0.02578
266 - 326	0.024273
327 - 288	0.0248

Los escenarios de cálculo escogidos para el estudio hidráulico son continuación de los ya expuestos para el estudio hidrológico y que, a su vez, vienen impuestos a partir del estudio pluviométrico en definir los dos fenómenos meteorológicos que rigen la cuenca en eventos extremos. Tampoco se puede perder de vista uno de los objetivos primordiales del estudio de Planificación del Espacio Fluvial del río Tordera, como es el estudio de inundaciones.

Estas dos premisas son las que marcan los diferentes escenarios de cálculo hidráulico.

Así pues, y tras definir los periodos de retorno de cálculo requeridos (Régimen extremal: 500, 100 y 50 años; y Régimen Medio: 10 y periodo de retorno del caudal que defina la avenida ordinaria) se han distinguido varios escenarios de cálculo.

Por un lado, tenemos la escala temporal definida por los periodos de retorno y por la otra, la escala o distribución espacial, distinguiendo entre los diversos fenómenos hidrológicos que ya han dado como resultado un caudal de escorrentía. De este modo, establecemos las siguientes hipótesis:

### 12.4.3 Escenarios de cálculo hidráulico

- **Períodos de retorno englobados dentro del régimen extremal (500, 100 y 50 años)**

Tenemos diferentes escenarios de cálculo según los fenómenos de precipitación: Fenómeno Y con focos de la precipitación situado en la zona del Montseny (Sant Celoni) y Fenómeno II con foco en Sta. Coloma. Estos dos escenarios son los que producirían los acontecimientos extremos en la cuenca del Tordera de forma general. Con esta hipótesis se calcularía por ejemplo la hidráulica del tramo bajo del río Tordera, tomando para situarnos del lado de la seguridad, el evento más desfavorable (lo que proporcione caudales más elevados) que se ha comprobado en este estudio que es el foco situado en Sant Celoni.

- **Régimen extremal**

Siguiendo con dicho régimen y para evaluar la máxima avenida que puede generarse en cada una de las rieras de la red de estudio que vierten al río Tordera, se supone una lluvia convectiva situada en cabecera de cada una de las rieras. Así, por ejemplo, para el arroyo de Arbúcies, una avenida de alto período de retorno no se producirá con la precipitación originada en Sant Celoni (Fenómeno I), ya que llegará a Arbúcies reducida a través de los coeficientes reductores, por tanto, la hipótesis de cálculo para cada una de las rieras se convierte en un tercer fenómeno (Del que se había hablado ya al inicio del estudio pluviométrico) que es la lluvia convectiva en un lugar concreto de la cuenca. En el caso del arroyo de Santa Coloma, su lluvia convectiva coincide con el fenómeno II de foco en Sta. Coloma, como es de suponer debido a la magnitud del tamaño de su cuenca.

- **Régimen medio**

En este caso la situación varía, ya que sí se puede producir una lluvia media en toda la superficie de la cuenca. Por ello desaparecen los escenarios de localización y variación especial de la precipitación originarios del caudal. Así pues y para resumir los diversos escenarios de cálculo propuestos podemos decir:

- **Régimen extremal o Río Tordera**

Hasta su confluencia con el arroyo de Santa Coloma se modeliza con la esorrentía correspondiente al fenómeno meteorológico Y, con foco en Sant Celoni. El tramo desde la confluencia de Santa Coloma hasta el mar, se ha modelizado con los dos escenarios proporcionados por ambos fenómenos meteorológicos I (foco en Sant Celoni) y II (foco en Santa Coloma y tomar el más desfavorable para el estudio de inundaciones. o Rieras: Cada una de ellas se ha modelizado con una lluvia convectiva situada en la su cabecera sin coeficientes de reducción, salvo la riera de Santa Coloma en que usa el fenómeno II dentro de su cuenca para su cálculo hidrológico.

- **Régimen medio o se ha modelizado toda la cuenca con lluvia homogénea**

Así pues, para el estudio de inundaciones se tendrán superpuestos varios escenarios de cálculo que generan el caso más desfavorable para cada uno de los puntos donde se estudie el caudal de avenida que produce la máxima inundación, según el período de retorno. Quedaría por resolver el caso de las confluencias de los arroyos con el río Tordera, ya que para estas desembocaduras hay dos escenarios diferentes, el originado por el estudio de avenidas de la cuenca entera con el foco en Sant Celoni y el originado por el estudio hidráulico individual de cada una de las rieras supuesta una precipitación máxima convectiva en estas rieras. En este caso se tomará el escenario que ofrezca la situación más desfavorable, con una mancha más grande de inundación.

# 13 ESTUDIO COMPARATIVO

---

*Si buscas resultados distintos no hagas  
siempre lo mismo.*

*- Albert Einstein -*

## 13.1 Introducción

En el siguiente apartado se recogen los resultados obtenidos a partir de los estudios hidráulicos explicados anteriormente. Tal y como se ha comentado, se han elaborado dos estudios diferentes. En el primero de ellos se ha empleado la  $n$  de Manning que se utiliza normalmente, mientras que en el segundo se ha tenido en cuenta la peculiaridad que posee el río de estudio, las formas de fondo.

Además de la exposición de los resultados, se ha llevado a cabo la comparación de los mismos, siendo posible demostrar la finalidad del estudio, es decir la importancia de tener o no en cuenta las formas de fondo en los cálculos realizados.

## 13.2 Resultados. Estudio hidráulico 1

Una vez calculadas las “ $n$  de Manning” de cada uno de los estudios, tomados los caudales que desaguan por la cuenca y conociendo la pendiente del tramo de estudio, se han elaborados las manchas de inundación referentes a dichos datos.

Como se comentó anteriormente el estudio se ha realizado para distintos periodos de retorno de, 10, 50, 100 y 500 años, con los que se han obtenido las siguientes manchas de inundación:

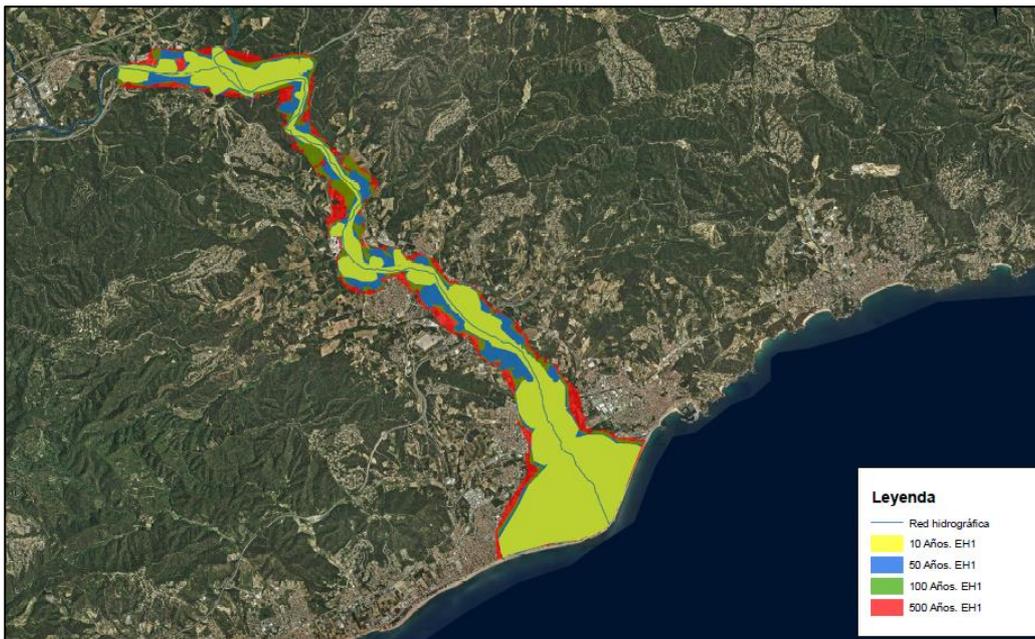


Figura 13-1: Manchas de inundación. Estudio hidráulico 1

Como se puede observar en la figura, a medida que el periodo de retorno es mayor, los caudales de entrada son mayores y por tanto se generará una mayor mancha de inundación. Cabe destacar que el mayor aumento de zona de inundación, se ha producido en la parte más urbanizada perteneciente al municipio de Blanes. Este hecho pone de manifiesto que sería necesario realizar actuaciones en la desembocadura del Tordera, como puede ser un encauzamiento.

La representación de las manchas de inundación es una forma muy visual de observar las zonas afectadas, sin embargo, también nos centraremos en conocer los calados y las velocidades de cada uno de los estudios. A partir de dichos datos se podrá realizar una comparación más exhaustiva de las diferencias presentadas entre un estudio y otro. Los valores referentes a dichos parámetros para cada una de las secciones, se encuentran reflejados en las tablas de resultados del “Anexo B: Resultados HEC-RAS”.

### 13.2.1 Calados

A continuación, se muestra una tabla con la media de los calados obtenidos en el estudio hidráulico 1 para cada uno de los períodos de retorno:

Tabla 13-1: Media de calados. Estudio hidráulico 1

<b>Calados (m)</b>			
<b>10 Años</b>	<b>50 Años</b>	<b>100 Años</b>	<b>500 Años</b>
2,66	3,54	3,76	4,16

Se puede observar que los resultados son totalmente acordes con las manchas de inundación mostradas anteriormente, ya que, a mayores calados, mayor zona inundada.

### 13.2.2 Velocidades

En la siguiente tabla se muestra la media de las velocidades para cada uno de los periodos de retorno:

Tabla 13-2: Media de velocidades. Estudio hidráulico 1

<b>Velocidades (m/s)</b>			
<b>10 Años</b>	<b>50 Años</b>	<b>100 Años</b>	<b>500 Años</b>
3,23	3,61	3,73	3,82

### 13.3 Resultados. Estudio hidráulico 2

Al igual que en el estudio anterior, se han obtenido las manchas de inundación para cada uno de los periodos de retorno:

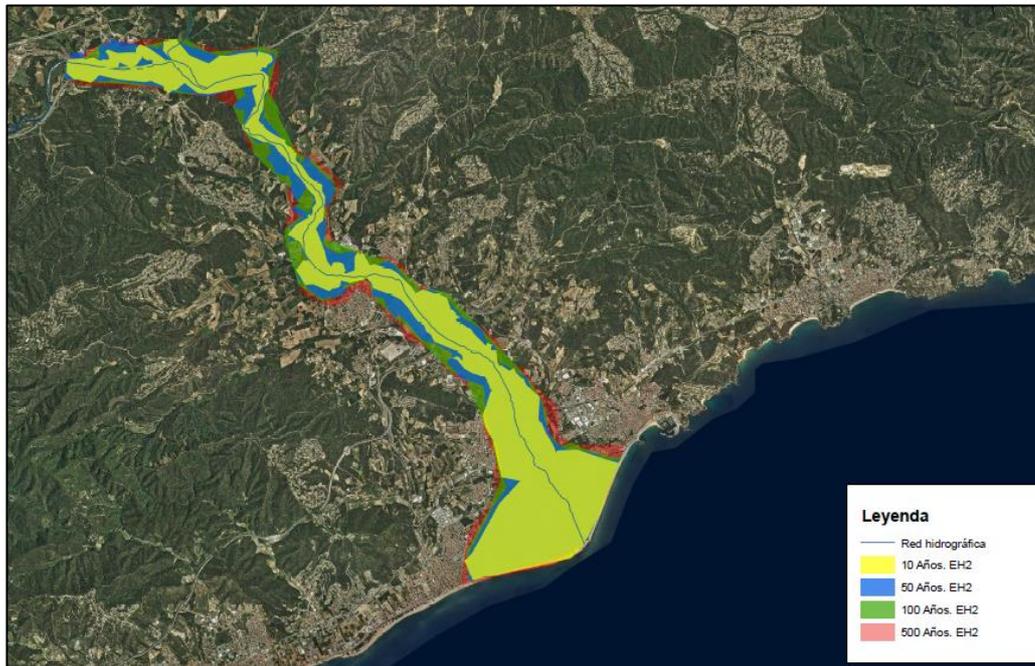


Figura 13-2: Manchas de inundación. Estudio hidráulico 2

A simple vista no se observan grandes cambios entre las manchas de un estudio y otro, sin embargo, sí que se presentan bastantes más zonas inundadas en este caso. Para conocer con mayor exactitud dichas zonas, se ha elaborado una comparación de ambas manchas, el cual se encuentra en el punto de comparación de resultados. En el estudio hidráulico 2, los valores de calados y velocidades obtenidos han sido los siguientes:

#### 13.3.1 Calados

A continuación, se muestra una tabla con la media de los calados obtenidos en el estudio hidráulico 2 para cada uno de los periodos de retorno:

Tabla 13-3: Media de calados. Estudio hidráulico 2

<b>Calados (m)</b>			
<b>10 Años</b>	<b>50 Años</b>	<b>100 Años</b>	<b>500 Años</b>
3,04	3,88	4,05	4,51

#### 13.3.2 Velocidades

En la siguiente tabla se muestra la media de las velocidades para cada uno de los periodos de retorno:

Tabla 13-4: Media de velocidades. Estudio hidráulico 2

<b>Velocidades (m/s)</b>			
<b>10 Años</b>	<b>50 Años</b>	<b>100 Años</b>	<b>500 Años</b>
2,45	2,82	2,91	2,95

## 13.4 Comparación de resultados

Una vez obtenidos los resultados para cada uno de los estudios hidráulicos, se ha llevado a cabo la comparación de los mismos respecto a “n de Manning”, manchas de inundación, calados y velocidades. De esta forma se comprobarán las diferencias más destacadas entre ambos.

### 13.4.1 n de Manning

Tal y como se ha comentado en el apartado de “Estudios hidráulicos”, una de las diferencias más características entre ambos estudios, es el aumento que supone en dicho parámetro la inclusión de las formas de fondo para el cálculo del mismo.

Para una mayor apreciación de dicha distinción, se ha elaborado el siguiente gráfico:

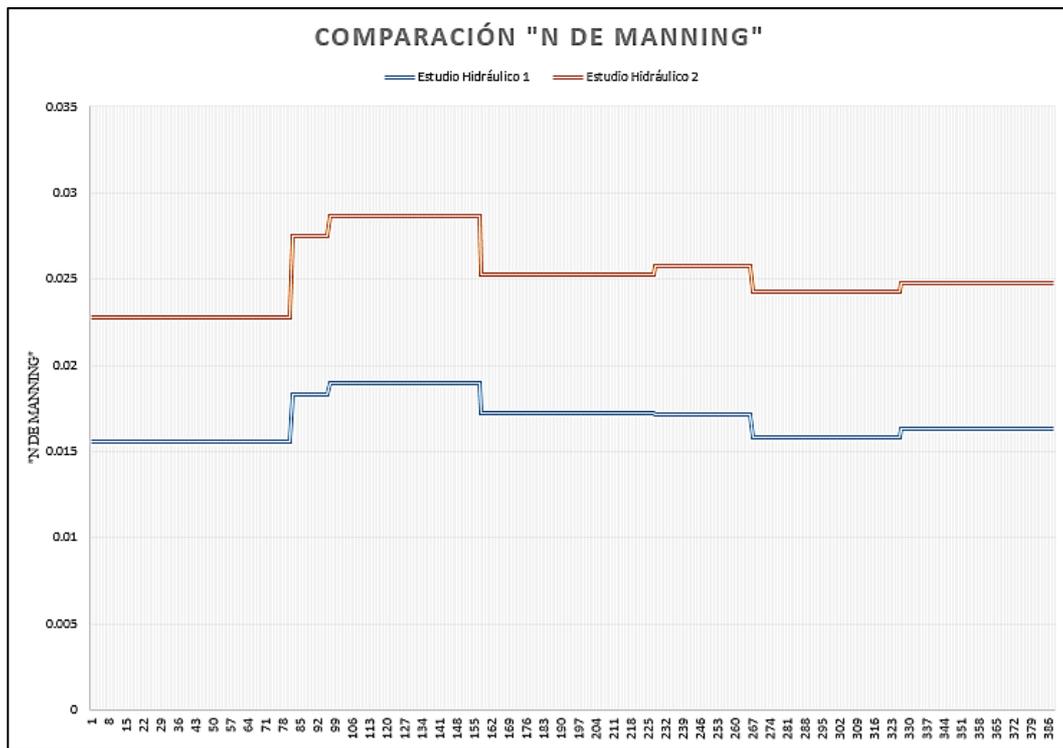


Figura 13-3: Comparación “n de Manning”

Como se observa en la gráfica existe un aumento prácticamente constante de dicho parámetro en el estudio hidráulico 2. La diferencia entre ambos estudios alcanza un valor de 0,007 aproximadamente, lo que supone variaciones considerables en el resto de resultados.

### 13.4.2 Calados

En la siguiente tabla se recogen los valores de la media de los calados mostrados anteriormente para cada uno de los estudios:

Tabla 13-5: Comparación de calados

	Calados (m)			
	10 Años	50 Años	100 Años	500 Años
Estudio Hidráulico 1	2,66	3,54	3,76	4,16
Estudio Hidráulico 2	3,04	3,88	4,05	4,51

Como se puede observar, en el segundo estudio se produce un aumento de calado, ya que, a mayor  $n$  de Manning, mayor área mojada y por tanto mayor calado. La diferencia entre ambos estudios es de 0,4 m aproximadamente, lo cual puede suponer una mayor inundación en función de la geometría de la zona.

### 13.4.3 Velocidades

En la siguiente tabla se recogen los valores de velocidades mostrados anteriormente para cada uno de los estudios:

Tabla 13-6: Comparación de velocidades

	Velocidades (m/s)			
	10 Años	50 Años	100 Años	500 Años
Estudio Hidráulico 1	3,23	3,61	3,73	3,82
Estudio Hidráulico 2	2,45	2,82	2,91	2,95

Al contrario que lo que sucede con el calado, a medida que aumenta la  $n$  de Manning la velocidad se disminuye, ya que ambos parámetros son inversamente proporcionales. Es por ello que en el estudio hidráulico 2, los valores de velocidad son menores.

### 13.4.4 Manchas de inundación

Para conocer con más detalle las zonas que se encuentran afectadas, se ha realizado una comparación de las manchas de inundación para cada periodo de retorno de los dos estudios.

#### ❖ 10 Años

En la siguiente figura se muestran las manchas de inundación de los estudios realizados para un periodo de retorno de 10 años:

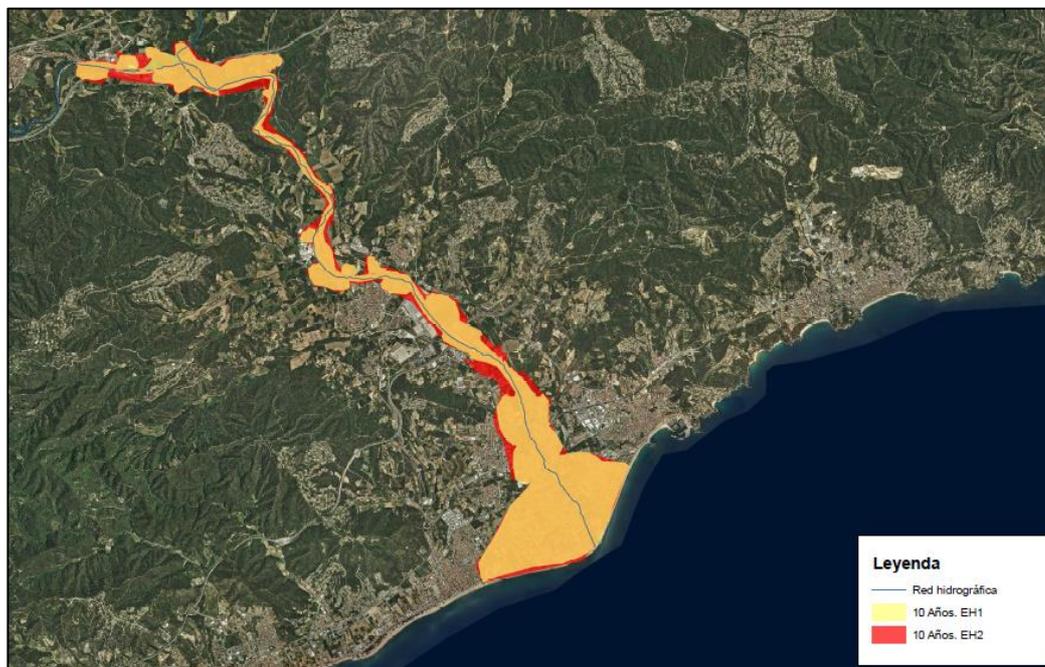


Figura 13-4: Comparación manchas de inundación. 10 Años.

Se puede observar como la mancha de inundación ha aumentado en el estudio hidráulico 2, lo cual es totalmente acorde a los datos de calado mostrados anteriormente. La zona que se encuentra más afectada es la central del tramo de estudio, así como la entrada del río al municipio de Blenes.

**❖ 50 Años**

Figura 13-5: Comparación manchas de inundación. 50 Años.

En este caso también se observa como hay más zonas afectadas por la mancha de inundación en el segundo estudio. De nuevo vuelve a estar más afectada la zona central del tramo.

**❖ 100 Años**

Figura 13-6: Comparación manchas de inundación. 100 Años.

Para este periodo de retorno se observa como las manchas de ambos estudios se van igualando, sin embargo, sigue habiendo bastantes más zonas afectadas por la inundación en el estudio hidráulico 2.

## ❖ 500 Años



Figura 13-7: Comparación manchas de inundación. 500 Años.

Al igual que en el caso anterior las dos manchas se pueden ver parecidas a simple vista, sin embargo, si se analizan las zonas que se encuentran afectadas, sí que hay diferencias apreciables entre un lado y otro.

Es por ello que para poder conocer con mayor exactitud las edificaciones que se encuentran afectadas se ha realizado un estudio de una serie de secciones del modelo. Dicho estudio se ha realizado para el periodo de 500 años, ya que es el más desfavorable de todos los mostrados.



Figura 13-8: Puntos de estudio de manchas de inundación.

La comparación de los dos estudios realizados se ha llevado a cabo a partir de la figura mostrada anteriormente, con la que se observa la planta de la zona y a partir de las secciones obtenidas con el programa HEC-RAS.

- *Zona 1*

Esta zona se corresponde con la sección 377 del modelo realizado. A continuación se muestra una imagen donde se observan las edificaciones afectadas por las manchas de inundación.

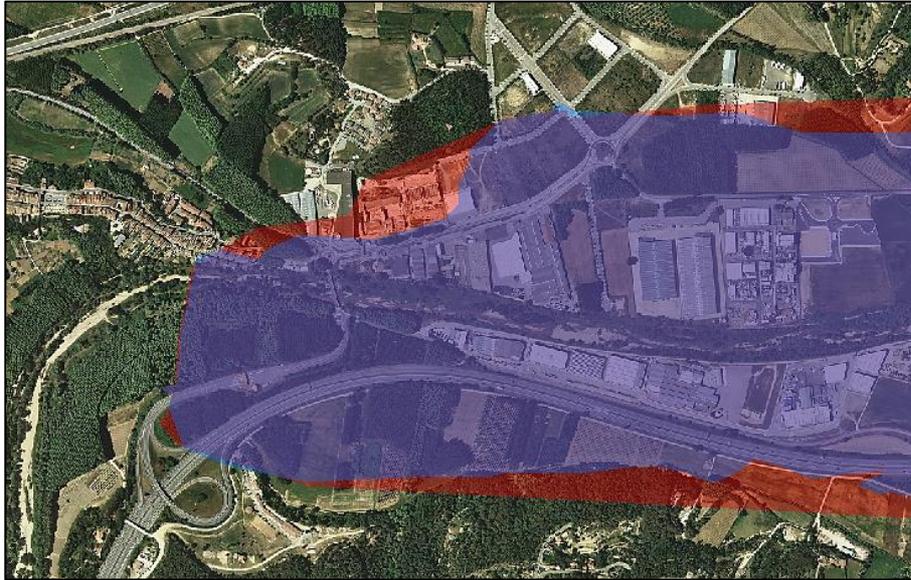
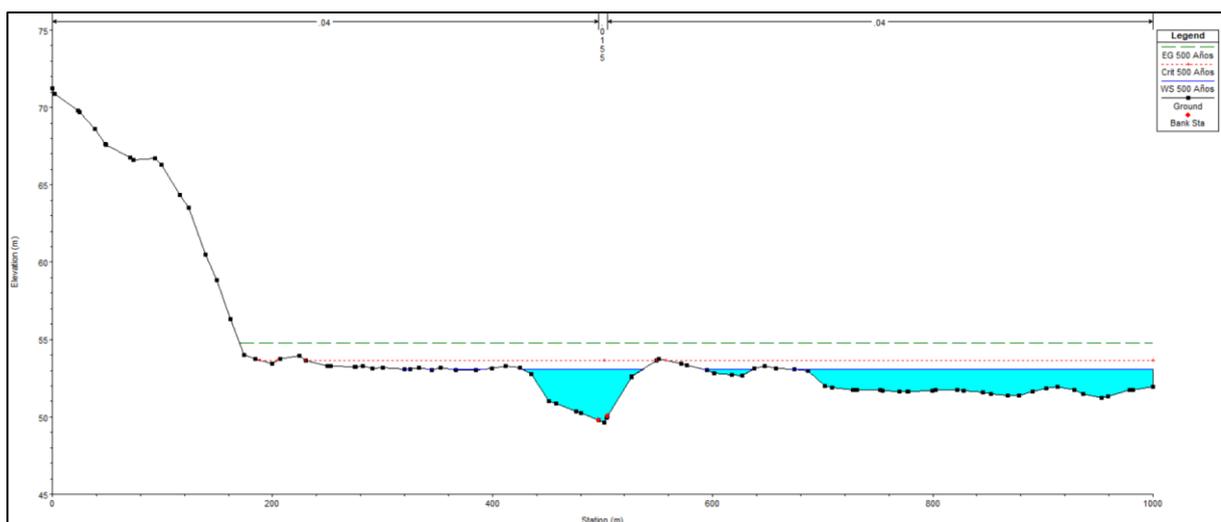


Figura 13-9: Puntos de estudio de manchas de inundación. Zona 1

Se observa como una serie de edificaciones que en el primer estudio no se encuentran afectadas, en el segundo quedarían totalmente inundadas. Dichas edificaciones se corresponden con unas naves industriales pertenecientes a la empresa Giperplast de moldeo por inyección de plástico.

A continuación, se muestran los perfiles transversales correspondientes a la sección analizada de ambos estudios:



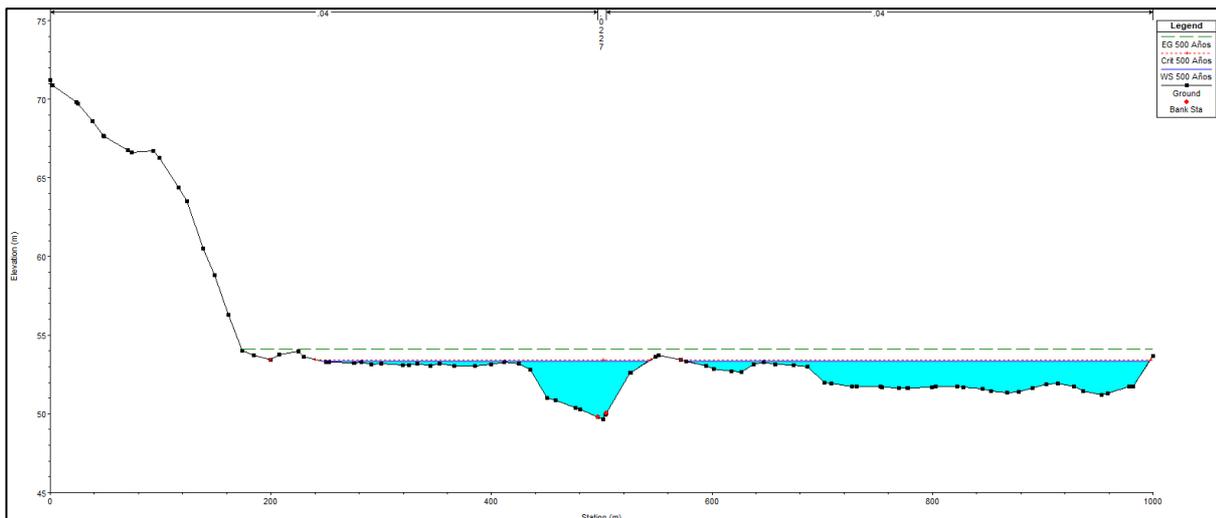


Figura 13-10: Perfiles transversales. Zona 1

Acorde con la figura mostrada anteriormente, se observa como al aumentar el calado en el estudio hidráulico 2, la parte izquierda de la sección queda inundada. Debido a la geometría de la zona, con una pequeña diferencia de calado entre ambos estudios, se ha producido la inundación de unos 150 metros más de terreno.

- Zona 2

Esta zona se corresponde con la sección 215. Las manchas creadas en cada estudio se muestran a continuación:



Figura 13-11: Puntos de estudio de manchas de inundación. Zona 2

Al igual que en el caso anterior, se observa como unas edificaciones que no estaban inundadas en el primer estudio realizado, han quedado inundadas en el segundo. Dicha zona se corresponde con un polígono industrial que pertenece al municipio de Tordera.

Los perfiles de dicha se muestran a continuación:

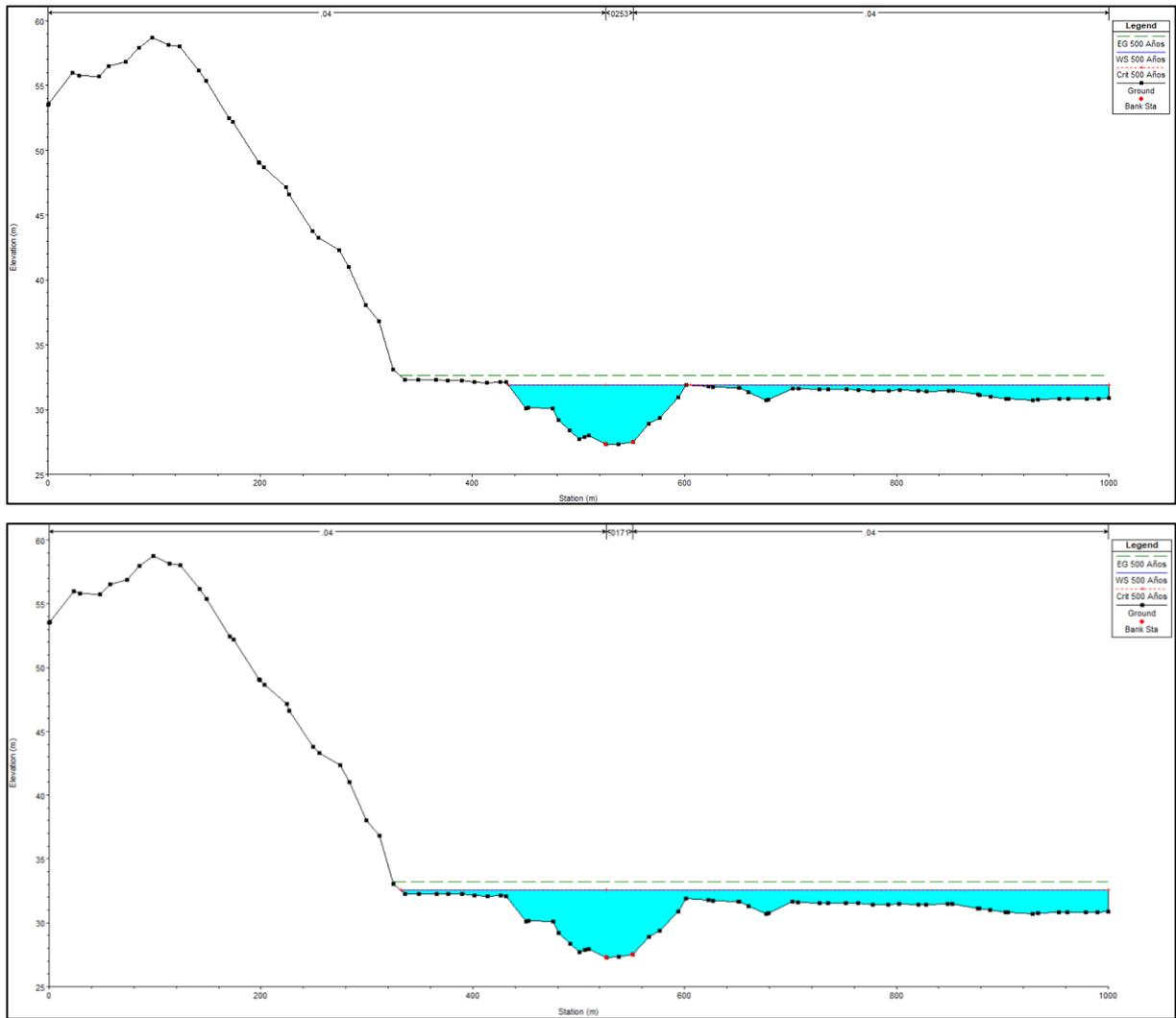


Figura 13-12: Perfiles transversales. Zona 2

Al igual que en el caso anterior, también se produce una mayor inundación en la margen izquierda del río. La geometría de la sección estudiada también provoca que el aumento del calado inunde gran parte de terreno, aproximadamente de 90 metros.

- Zona 3

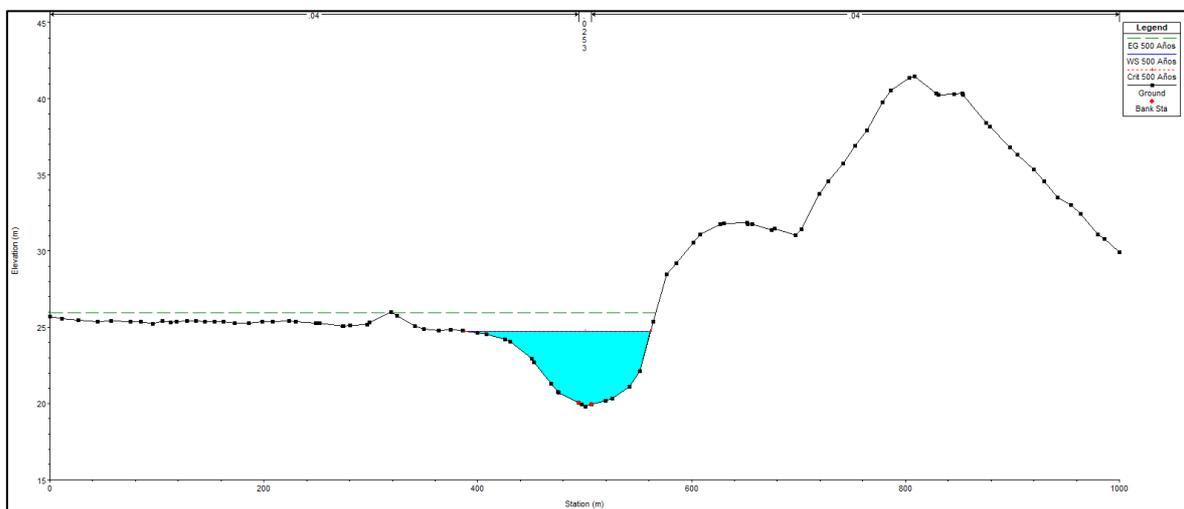
Esta zona se corresponde con la sección 155 del modelo. Las manchas se muestran a continuación:



Figura 13-13: Puntos de estudio de manchas de inundación. Zona 3

De nuevo se vuelven a inundar una serie de edificaciones, las cuales se corresponden a una zona de restaurantes y bares del municipio de Sant Pere.

En las siguientes figuras se muestran los perfiles transversales correspondientes a la sección estudiada.



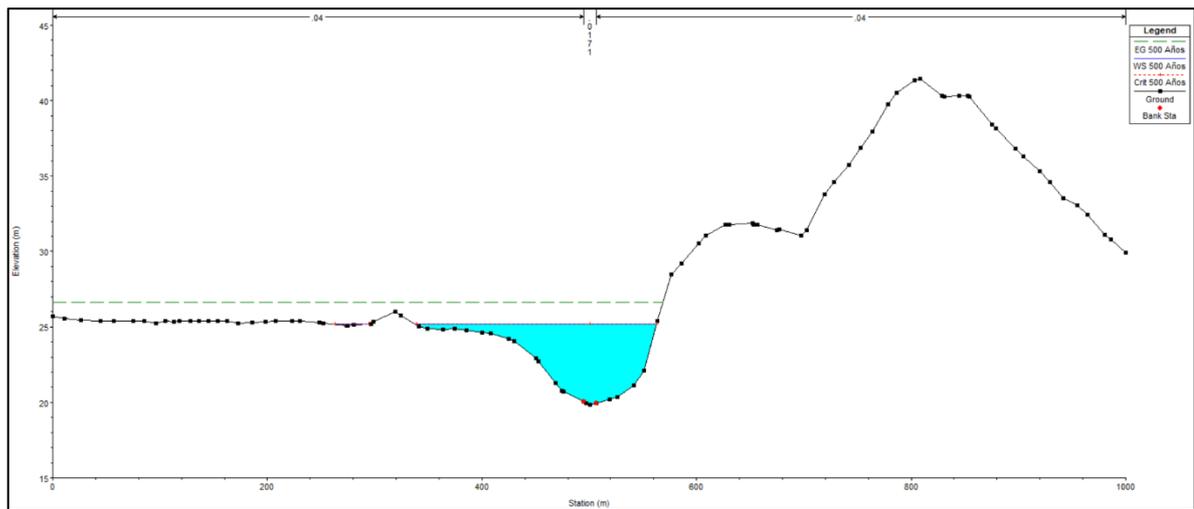


Figura 13-14: Perfiles transversales. Zona 3

En este caso la zona inundada es menor que en los anteriores, de aproximadamente 50 metros. Sin embargo, como se ha podido observar en la imagen, ha sido suficiente para inundar las edificaciones cercanas.

- Zona 4

Esta zona se corresponde con la sección 58. A continuación se muestran las manchas de inundación de cada uno de los estudios.



Figura 13-15: Puntos de estudio de manchas de inundación. Zona 4

En este caso encontramos un mayor número de edificaciones en la zona. Concretamente la zona inundada es una urbanización de viviendas, lo que puede suponer un mayor peligro provocado por la inundación.

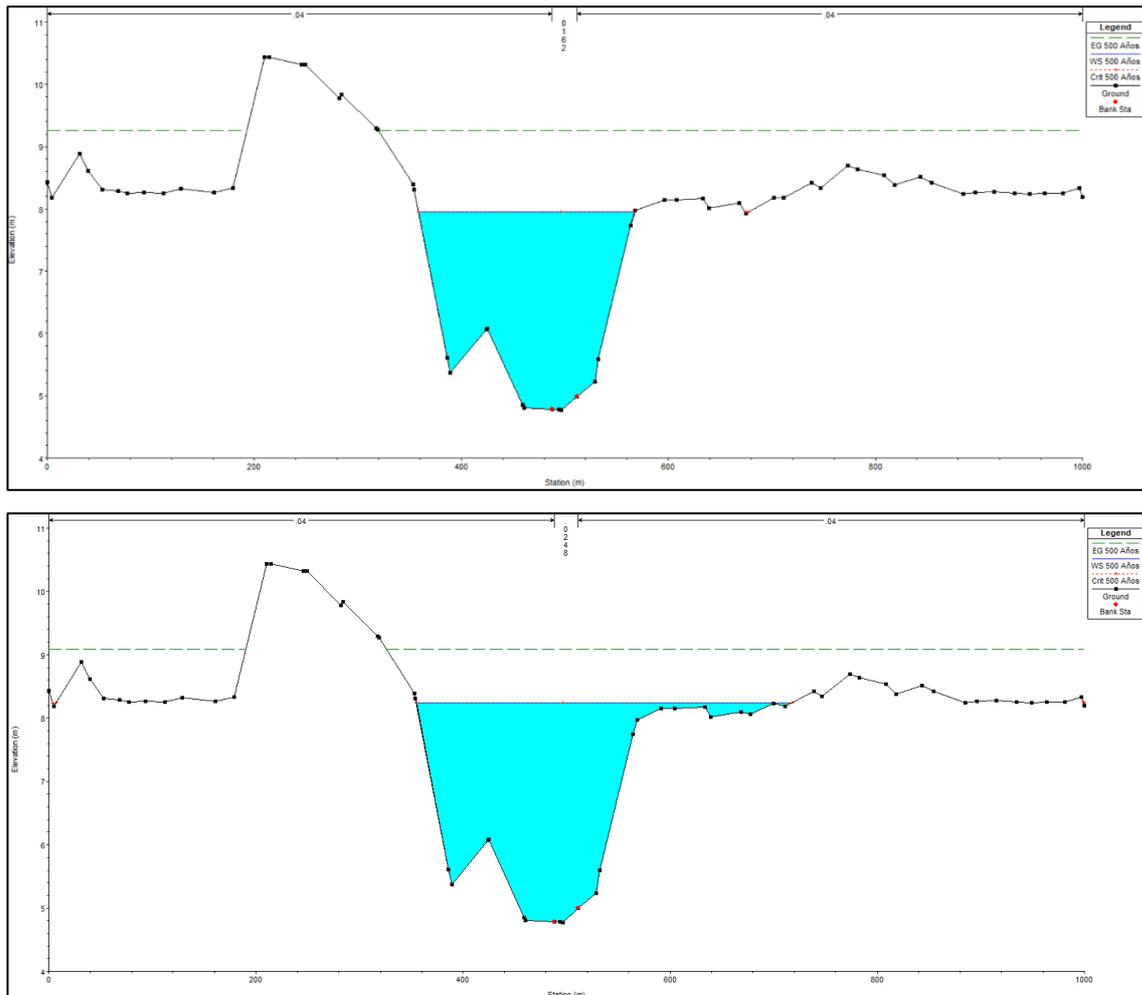


Figura 13-16: Perfiles transversales. Zona 4

A diferencia de los casos anteriores, en este, la zona inundada se produce en la margen derecha del río. De nuevo se da el caso en el que la diferencia de calado provoca que se inunde bastante terreno, concretamente de 100 metros aproximadamente.

# 14 CONCLUSIONES

---

*El valor de una idea, radica en el uso de la misma.*

*- Tomas A. Edison -*

Una vez realizado el estudio al completo y tras conocer los resultados obtenidos, ha quedado demostrada la finalidad del mismo, la importancia en la consideración de las formas de fondo.

Habitualmente se lleva a cabo un empleo de la “n de Manning” muy generalizada para todo tipo de ríos, sin embargo, tal y como se ha podido observar, cada río cuenta con unas características especiales que se deben tener en cuenta. En el caso del río estudiado, el Tordera, la distinción de tener formas de fondo en la parte baja del mismo, hace que la aplicación de dicho coeficiente no sea la correcta.

Como se ha podido observar existe una diferencia notable entre los resultados obtenidos por el método de Strikler-Van Rijn, en el que únicamente se consideran unos valores base establecidos para la “n de Manning”, respecto a tener en consideración las formas de fondo.

Dicho coeficiente ha aumentado considerablemente en el segundo caso, provocando por tanto un mayor calado de las secciones analizadas. Quizás la diferencia entre los valores de calado obtenidos entre un estudio y otro no parece muy apreciables a simple vista, sin embargo, tal y como se ha comprobado en el estudio de comparación puede suponer una gran diferencia en la inundación de las zonas afectadas. La geometría de las secciones ha jugado un papel muy importante, es que en determinadas zonas encontramos una pendiente en la llanura de inundación bastante tendida, lo que ha provocado una inundación mayor con sólo un pequeño aumento de calado.

La comparación de las manchas de inundación tampoco parece apreciable, sin embargo, al realizar el estudio de las zonas que realmente se encuentran afectadas, se ha podido observar como un elevado número de edificaciones quedarían inundadas. En el estudio realizado la mayoría de ellas son de carácter empresarial, lo que supondría grandes daños de producción para las mismas, además de encontrar una zona de viviendas que también quedaría totalmente afectada.

Respecto a las actuaciones que se deberían llevar a cabo una vez realizado el estudio de inundación de la zona, cabe destacar que, si se rigen por los datos calculados en el primer estudio, éstas no cumplirían con su finalidad al completo. Un área elevada de cultivos y edificaciones se podrían ver inundadas, provocando por tanto pérdidas económicas y repercusiones sociales.

# REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

---

Las referencias bibliográficas empleadas para la realización del presente trabajo son las siguientes:

❖ **Normativas y Planes:**

- Ley de Aguas.
- Reglamento de dominio público hidráulico.
- Directiva Marco del Agua.
- Directiva de inundaciones.
- Plan de gestión de agua de Cataluña.
- Plan de gestión de riesgo de inundación del distrito de cuenca fluvial de Cataluña.

❖ **Libros, publicaciones y/o estudios:**

- Estudio experimental de formas de fondo en flujos laminares con superficie libre de fluidos pseudoplásticos
- Incisión, erosión transitoria y formas de fondo en los tramos medio y bajo del río Tordera. J.P. Martín y R.J. Batalla.
- Hidráulica fluvial y transporte de sedimentos. Transporte hidráulico de sólidos. Universidad de Chile.
- Planificación del espacio fluvial de la cuenca del río Tordera. Generalitat de Cataluña SENER.
- Artículo: “El desconocido delta del río Tordera”. Ireneu Castillo.
- Artículo: “Riadas catastróficas”. Blog: Barcelona. Historias del tiempo.

**❖ Softwares, bases de datos GIS, ortofotos y cartografía:**

- Manual básico de HEC-RAS, HEC-GeoRAS y ArcMap 10.1.
- Manual de referencia hidráulico de HEC-RAS, HEC-GeoRAS.
- Curso: Simulación hidráulica aplicada (HEC-RAS).
- Instituto Geográfico Nacional.
- Instituto Geológico y Minero de España.
- Instituto de Cartografía y Geología de Cataluña.
- Visor “Hipermapa” de la Generalitat de Cataluña.
- Geoportal IDE (Infraestructura de datos espaciales de España).
- Centro nacional de información geográfica (CNIG).



