



LIFE
ALNUS
TAEJO

CONSERVATION AND RESTORATION
OF MEDITERRANEAN ALDER FORESTS PRIORITY HABITAT
IN WESTERN INTERNATIONAL TAJO RIVER BASIN
LIFE20 NAT/ES/000021



A1.2 MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA Y CARTOGRAFÍA DIGITAL DE LAS DIFERENTES LLANURAS DE INUNDACIÓN PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO. DEFINICIÓN DE ESPACIO FLUVIAL DE LOS HÁBITATS 91E0*.



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



Entregable

A1.2 MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA Y CARTOGRAFÍA DIGITAL DE LAS DIFERENTES LLANURAS DE INUNDACIÓN PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO. DEFINICIÓN DE ESPACIO FLUVIAL DE LOS HÁBITATS 91E0*.

UPM – UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

31/10/2023

Proyecto LIFE20 NAT/ES/000021

CONSERVATION AND RESTORATION OF MEDITERRANEAN ALDER FORESTS
PRIORITY HABITAT IN WESTERN INTERNATIONAL TAJO RIVER BASIN

Proyecto LIFE Nature and Biodiversity

Inicio del proyecto: 01/09/2021 Fin del Proyecto: 31/08/2025



CONSERVATION AND RESTORATION
OF MEDITERRANEAN ALDER FORESTS PRIORITY HABITAT
IN WESTERN INTERNATIONAL TAJO RIVER BASIN
LIFE20 NAT/ES/000021



www.lifealnustaejo.eu

SUMMARY

A hydraulic simulation of the extraordinary flows calculated according to the reference application in official hydrological studies, CAUMAX, has been carried out. The results obtained using the HEC-RAS software have been contrasted with the level and flow readings provided by the Official Network of Gauging Stations (ROEA) at the stations located in the study sections. The flood levels obtained for the different values of extraordinary flow have been used to determine the extent of the fluvial space associated with the riparian vegetation. It also allows estimating, in the first instance from the flows corresponding to the return periods of 2 and 5 years, the space associated with the Public Hydraulic Domain (DPH).

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. OBJETIVOS.....	6
3. MATERIALES Y MÉTODOS	6
3.1. Trabajo previo.....	6
3.2. Modelizaciones hidráulicas	10
3.2.1. Preparación del modelo geométrico.....	10
3.2.2. Cálculo hidráulico	13
3.2.3. Postproceso	13
3.3. Metodología para generar mapas de inundación	15
3.4. Metodología para elaborar las secciones transversales	16
4. RESULTADOS	17
4.1. Estimación de los caudales máximos	17
4.2. Cálculo de curvas de gasto	17
4.3. Estimación del Dominio Público Hidráulico.....	31
4.4. Elaboración de mapas de inundación.....	31
4.5. Elaboración de secciones transversales	38
5. CONCLUSIONES.....	41
6. BIBLIOGRAFÍA.....	42
ANEXOS	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cálculo de caudales máximos para diferentes periodos de retorno con CAUMAX.....	7
Figura 2. Tramo F representado sobre un modelo digital del terreno 5x5m.....	8
Figura 3. Sección transversal sobre el subtramo F__03.....	8
Figura 4. Conjunto de tramos y secciones.....	9
Figura 5. Tramo F representado sobre la ortofoto.....	9
Figura 6. Ejemplo de estudio del subtramo F__01 con una malla de 5x5m y con las condiciones de contorno (entrada y salida) establecidas.....	11
Figura 7. Ejemplo de asignación de los usos de suelo al subtramo F__01.....	12
Figura 8. Resultado final de la modelización que muestra la profundidad de 0m a 3m en el subtramo F__01....	14
Figura 9. Comparación de los valores obtenidos de las simulaciones hidráulicas en el subtramo E__03 con los datos aforados en la estación ROEA 3146.....	15
Figura 11. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3146 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo E__03.....	18
Figura 12. Vista aérea sobre la estación de aforo 3146 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.....	18
Figura 13. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3147 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo G__07.....	19
Figura 14. Vista aérea sobre la estación de aforo 3147 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.....	19
Figura 15. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3162 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo M__07.....	20
Figura 16. Vista aérea sobre la estación de aforo 3162 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.....	20
Figura 17. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3163 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo P__08.....	21
Figura 18. Vista aérea sobre la estación de aforo 3163 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.....	21
Figura 19. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3182 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo 02_01.....	22
Figura 20. Vista aérea sobre la estación de aforo 3182 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.....	22
Figura 21. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3185 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo J__04.....	23
Figura 22. Vista aérea sobre la estación de aforo 3185 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.....	23
Figura 23. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3200 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo B__01.....	24
Figura 24. Vista aérea sobre la estación de aforo 3200 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.....	24
Figura 25. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3218 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo 02_11.....	25
Figura 26. Vista aérea sobre la estación de aforo 3218 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.....	25
Figura 27. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3240 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo 03_01.....	26
Figura 28. Vista aérea sobre la estación de aforo 3240 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.....	26

Figura 29. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3242 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo 06_06.....	27
Figura 30. Vista aérea sobre la estación de aforo 3242 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.	27
Figura 31. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3245 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo L__04.	28
Figura 32. Vista aérea sobre la estación de aforo 3245 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.	28
Figura 33. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3283 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo 08_05.....	29
Figura 34. Vista aérea sobre la estación de aforo 3283 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.	29
Figura 35. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3940 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo K__07.....	30
Figura 36. Vista aérea sobre la estación de aforo 3940 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.	30
Figura 37. Modelo hidrológico en el subtramo F__02 sobre mapa topográfico (1).	32
Figura 38. Modelo hidrológico en el subtramo F__02 sobre ortofoto (1).	33
Figura 39. Modelo hidrológico en el subtramo F__02 sobre mapa topográfico (2).	34
Figura 40. Modelo hidrológico en el subtramo F__02 sobre ortofoto (2).	35
Figura 41. Mapas detallados de las parcelas de estudio del subtramo F__02 (1).	36
Figura 42. Mapas detallados de las parcelas de estudio del subtramo F__02 (2).	37
Figura 43. Secciones transversales en cada parcela del subtramo F__02 con la lámina de agua para los periodos de retorno de 2,5,100 y 500 años.....	38
Figura 44. Sección transversal sobre la parcela F__02_2 donde se aprecia que corta a las carreteras a ambos lados del cauce. La sombra representa el alcance de la lámina de agua para un periodo de retorno de 100 años.	39
Figura 45. Sección transversal sobre la parcela F__02_3. La sombra representa el alcance de la lámina de agua para un periodo de retorno de 100 años.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Usos de suelo presentes en el estudio junto con su valor de n de manning. Fuente: Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables.	12
Tabla 2. Datos del tramo F que muestran la pendiente y calados máximos diarios para diferentes periodos de retorno.	13
Tabla 3. Caudales máximos para distintos periodos de retorno, expresado en m^3/s .	17

1. INTRODUCCIÓN

Las condiciones del hábitat 91E0* están íntimamente ligadas con el régimen de caudales que circulan por los cauces sobre los que se sitúa dicho hábitat.

Aunque el régimen de flujo tiene en cuenta tanto los caudales ordinarios como los extraordinarios, son estos últimos los que mayoritariamente definen la amplitud de espacio fluvial asociado a la vegetación de ribera. Es importante definir este espacio para valorar el grado de presión e impacto que soporta el hábitat, por lo que estimar los valores de caudal máximo para distintas probabilidades, es el primer paso para la posterior estimación del alcance de las inundaciones producidas por dichas avenidas.

Estas estimaciones se llevan a cabo mediante modelizaciones matemáticas, que son una representación simplificada de la realidad. El modelo necesita ser calibrado para asegurarnos que los resultados que nos ofrezca se ajustan a lo que en los eventos reales pueda ocurrir. En nuestro caso, no tenemos información real para calibrar estos modelos, por lo que recurrimos a valores de parámetros recogidos en la bibliografía para eventos similares.

Las modelizaciones hidráulicas que se han llevado a cabo permiten conocer, para un tramo determinado y para un caudal concreto, el comportamiento de la lámina de agua sobre la topografía del terreno, delimitando el alcance de las distintas magnitudes de caudal y marcando la probabilidad de inundación que tienen las distintas zonas de la ribera según nos alejamos del eje del cauce.

2. OBJETIVOS

- Obtener los caudales máximos para los periodos de retorno de, 2, 5, 25, 50, 100 y 500 años, correspondientes a los tramos de estudio.
- Obtener las superficies de inundación para los diferentes períodos de retorno para todos los tramos de estudio.
- Elaborar mapas de las zonas inundables para todos los tramos de estudio.
- Obtener secciones transversales con los calados delimitados para los diferentes periodos de retorno seleccionados.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Trabajo previo

Para el cálculo de los caudales máximos que caracterizan el régimen de flujo de los ríos se ha utilizado la aplicación CAUMAX, elaborada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Con esta aplicación se estiman los caudales máximos para los periodos de retorno de, 2, 5, 25, 50, 100 y 500 años, así como, en las cuencas pequeñas, el caudal correspondiente a la Máxima Crecida Ordinaria.

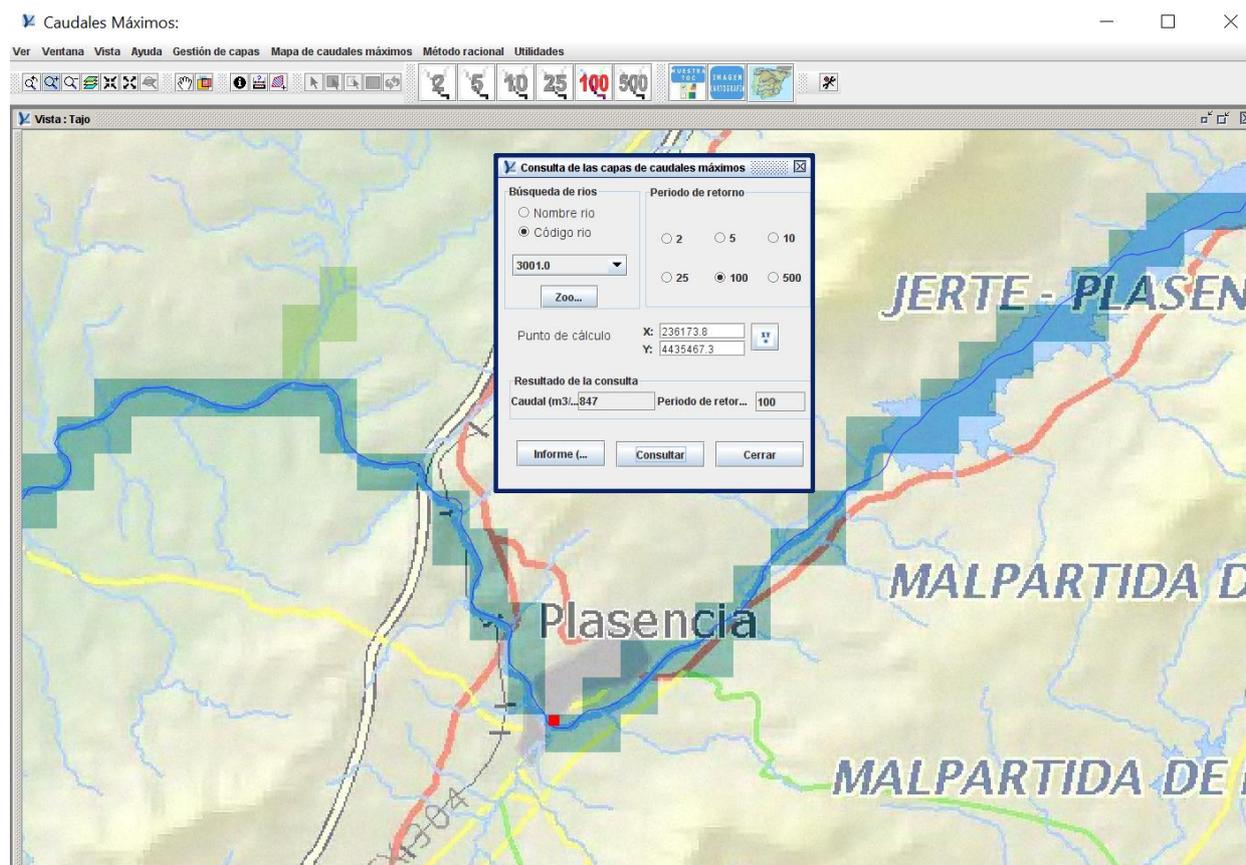


Figura 1. Cálculo de caudales máximos para diferentes periodos de retorno con CAUMAX.

También existen estaciones de aforo en algunos de los tramos objeto de estudio donde se pueden consultar registros reales relativos a la magnitud de los caudales.

Dado que en Portugal no existe una aplicación similar a la comentada, asumimos que las características de suelo y climáticas, son equiparables a las existentes en el lado español de la frontera, por lo que se emplea esta aplicación sustituyendo los datos de superficie por los correspondientes a la cuencas portuguesas de los tramos de estudio.

Para realizar las modelizaciones hidráulicas, es necesario recopilar una serie de datos geométricos previos para introducirlos en el programa que se vaya a utilizar. La mayoría de estos datos se han extraído del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

Para que las simulaciones sean fiables es necesario utilizar información detallada, sobre todo a nivel topográfico. Hoy en día en España existe información relativa a modelos digitales de elevaciones (MDE) bastante detallada. En muchas zonas se encuentra disponible el Modelo de Elevaciones con un detalle de pixel de 2x2 m. Sin embargo, algunas zonas pertenecientes a este estudio, no disponen de dicho detalle, por lo que se ha utilizado el MDE de 5x5 metros de tamaño de celda. Además, los requerimientos de potencia de cálculo serían muy altos para la modelización si se utilizara el MDE de 2x2 m.

Por otro lado, en Portugal no se dispone de esta información topográfica. El MDE que se ha utilizado tiene una resolución de 25x25m, lo que supone una importante diferencia a la hora de analizar resultados, ya que se obtendrán valores menos precisos. Sin embargo, es la única vía posible de realizar modelizaciones en estas localizaciones.

Los datos que se han usado son los siguientes:

- Modelo digital del terreno (MDT) con una resolución 5x5 metros (Para España).
- Modelo digital del terreno con una resolución 25x25 metros (Para Portugal).
- Mapa de rugosidad basado en el número de Manning realizado manualmente a partir de mapas SIOSE (Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España, integrado dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio, PNOT, cuyo objetivo es generar una base de datos de Ocupación del Suelo para toda España).
- Ortofoto PNOA-máxima actualidad. Extraído del CNIG
- Caudales para los periodos de retorno T002, T005, T100 y T500. Obtenido del CAUMAX
- Pendiente de cada tramo de estudio.

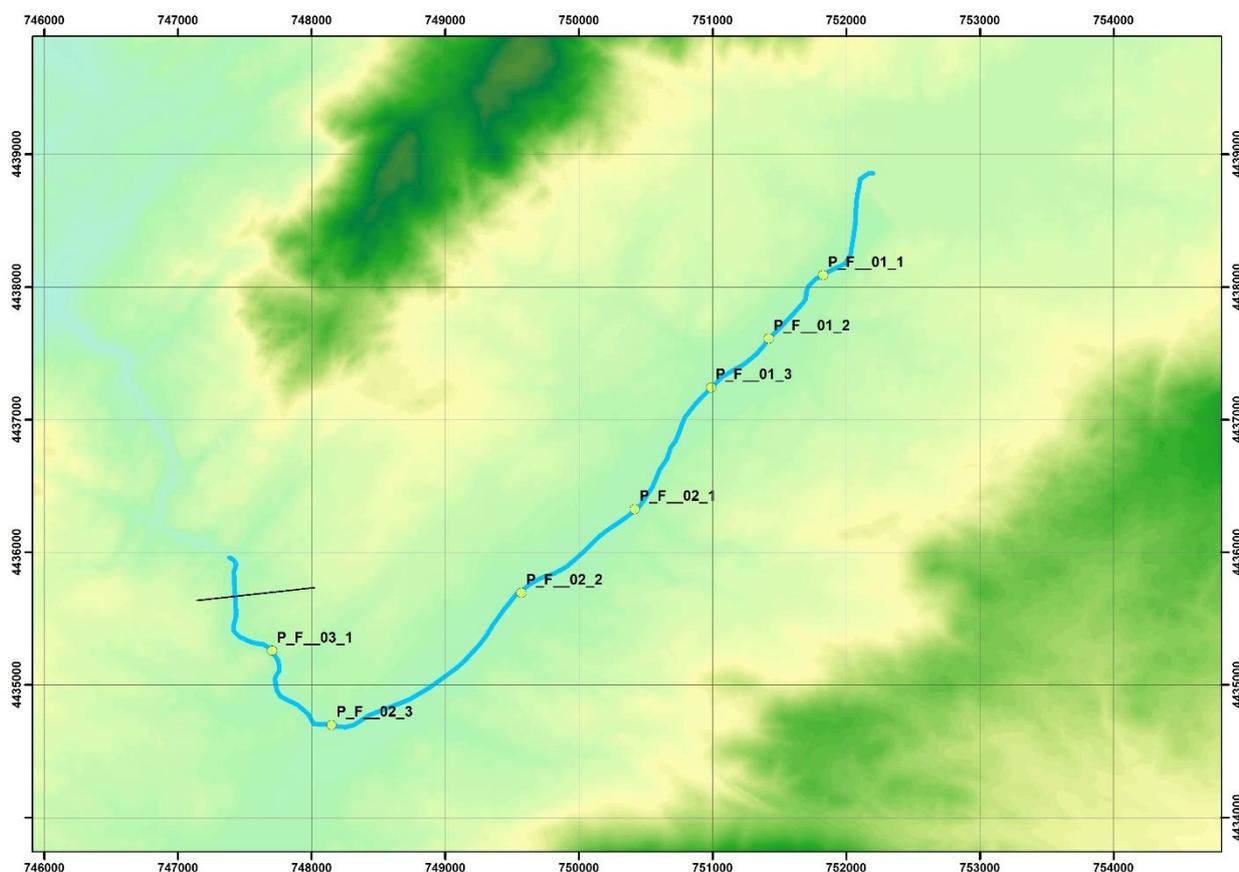


Figura 2. Tramo F representado sobre un modelo digital del terreno 5x5m.

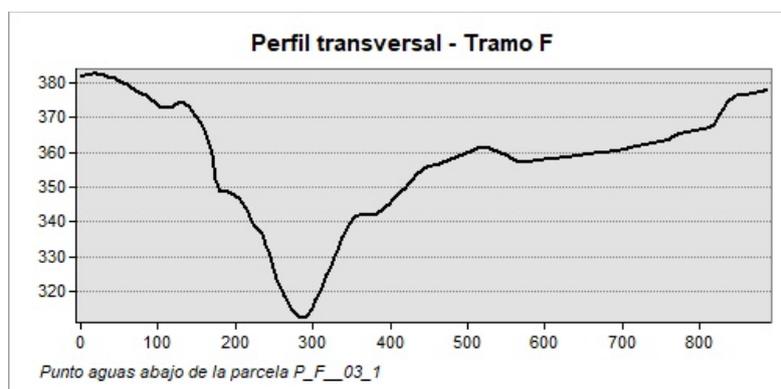


Figura 3. Sección transversal sobre el subtramo F__03.

A1.2_ Modelización hidrológica y cartografía digital de las diferentes llanuras de inundación para distintos periodos de retorno. Definición de espacio fluvial de los hábitats 91e0*.

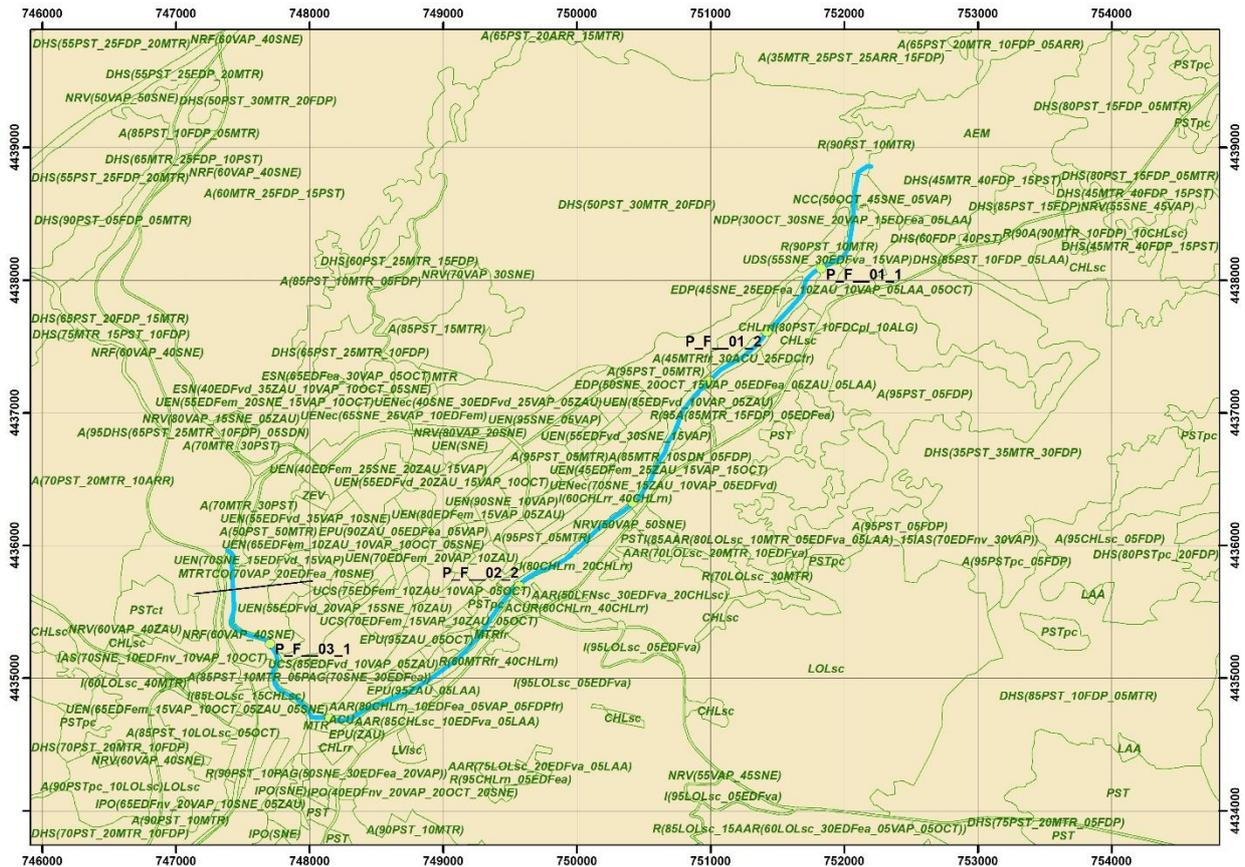


Figura 4. Conjunto de tramos y secciones.

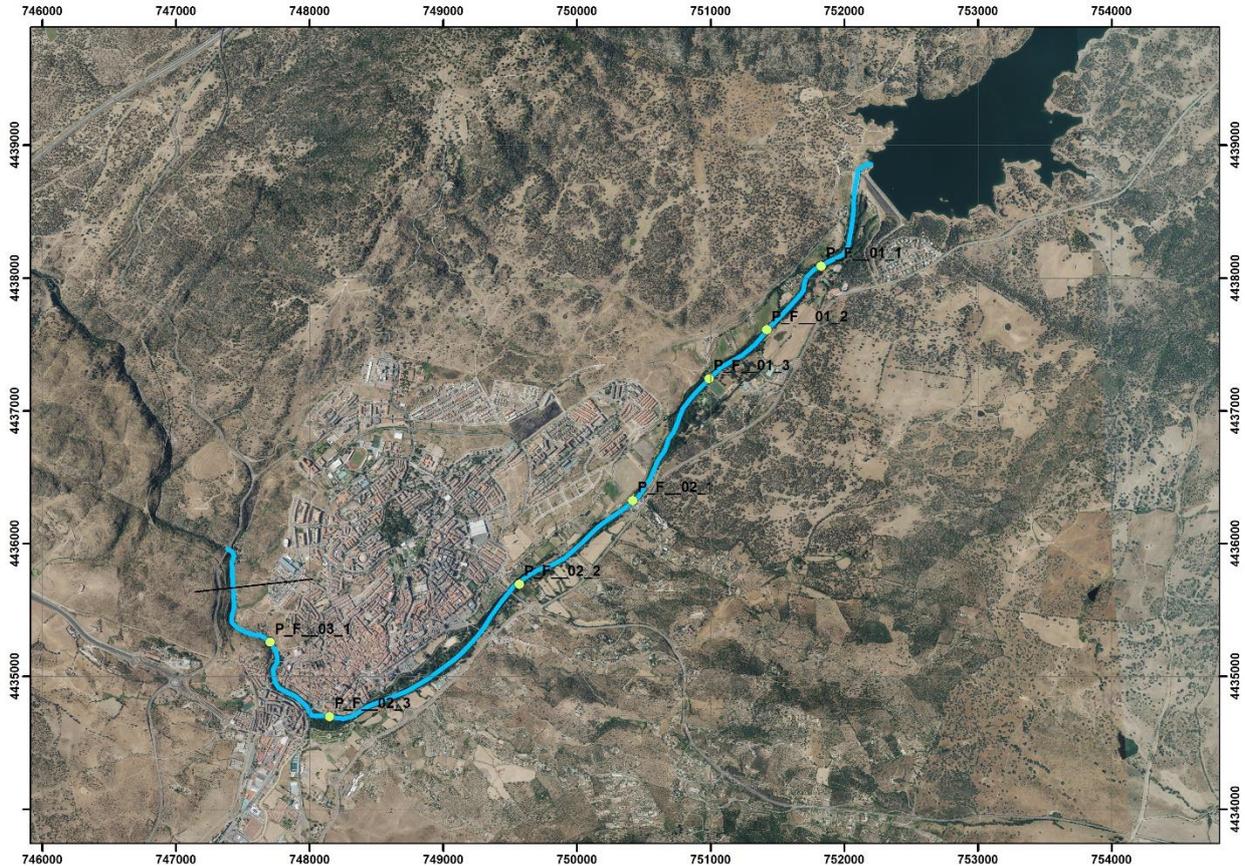


Figura 5. Tramo F representado sobre la ortofoto.

3.2. Modelizaciones hidráulicas

Las modelizaciones hidráulicas se pueden realizar mediante muchos paquetes de software elaborados al efecto. En España los programas HecRas e IBER son los más utilizados. Ambos programas están destinados a este fin. Dada la magnitud del trabajo a llevar a cabo, con 500 km de tramos de cauce sobre los que realizar las simulaciones y la precisión del MDE disponible, se optó por usar el programa, HecRas debido a que su manejo es un poco más sencillo y que el proceso de cálculo es más rápido que el proceso del programa IBER. El tipo de modelización escogido es el de dos dimensiones (2D), debido a que se van a simular elevados valores de caudal que inundarán amplias zonas de los márgenes, por lo que el flujo se moverá claramente en varias direcciones.

3.2.1. Preparación del modelo geométrico

El cálculo hidráulico se realiza sobre un modelo geométrico que defina en cada punto su cota y su rugosidad, para poder establecer las pendientes del terreno que van a interactuar con los calados y la rugosidad y definir las direcciones del movimiento del fluido en cada zona y su velocidad.

En primer lugar, el programa genera una malla de elementos de cálculo en base al MDE de 5x5m (Figura 6) y asigna a cada elemento una rugosidad que se estima a través del mapa del SIOSE, según los valores que se muestran en la Tabla 1. Los valores de la rugosidad, n , de Manning, se corresponden con los que aparecen en el anejo 5 “Valores de coeficientes de rugosidad de manning asignados a los usos del suelo del SIOSE” de la Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables

Como ya se ha comentado, el detalle del terreno está al límite de los requerimientos para poder realizar una simulación detallada, pero la amplitud de la zona a simular y el número de simulaciones a realizar en cada zona, junto a la disponibilidad de información, ha llevado a uniformizar las simulaciones con el modelo descrito.

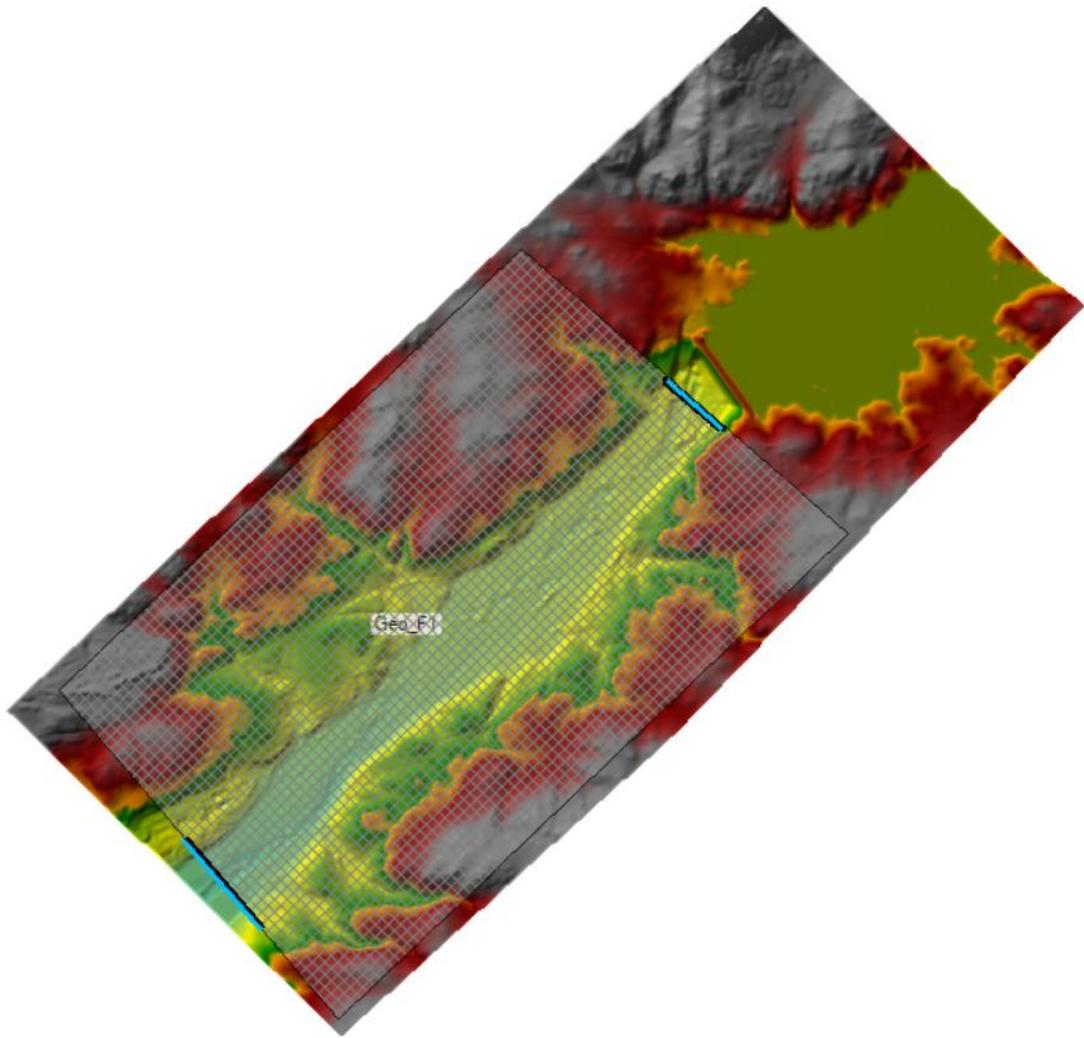


Figura 6. Ejemplo de estudio del subtramo F__01 con una malla de 5x5m y con las condiciones de contorno (entrada y salida) establecidas.

Tabla 1. Usos de suelo presentes en el estudio junto con su valor de n de manning. Fuente: Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables.

Uso de suelo	Valor de n de Manning	Uso de suelo	Valor de n de Manning
Embalse	0.025	Combinación de vegetación	0.06
Lámina de agua artificial	0.025	Frutal no cítrico	0.06
Lago o laguna	0.025	Instalación forestal	0.06
Roquedo	0.025	Matorral	0.06
Suelo desnudo	0.03	Olivar	0.06
Temporalmente desarbolado	0.03	Bosque de coníferas	0.07
Pastizal o herbazal	0.035	Bosque de frondosas	0.07
Prado	0.035	Bosque mixto	0.07
Servicio dotacional	0.035	Discontinuo	0.09
Combinación de cultivos	0.04	Zona verde urbana	0.09
Cultivo herbáceo	0.04	Casco	0.1
Extracción minera	0.04	Ensanche	0.1
Instalación agrícola y/o ganadera	0.04	Industrial	0.1
Asentamiento agrícola y huerta	0.047	Infraestructura de residuos	0.1
Combinación de cultivos leñosos	0.05	Infraestructura de suministro	0.1
Combinación de cultivos con vegetación	0.05	Invernadero	0.1
Viñedo	0.05	Red viaria o ferroviaria	0.1

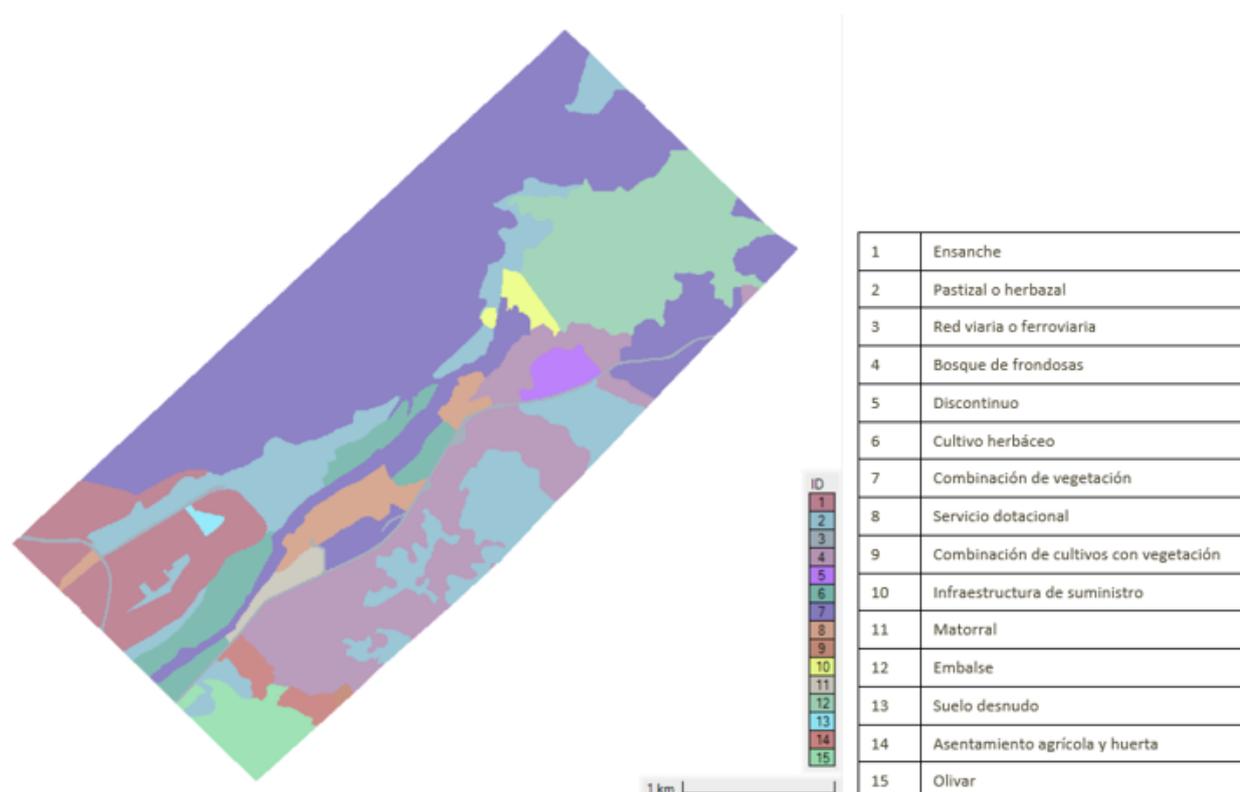


Figura 7. Ejemplo de asignación de los usos de suelo al subtramo F__01.

3.2.2. Cálculo hidráulico

Para llevar a cabo el cálculo hidráulico del comportamiento de un flujo que recorre la zona simulada, es necesario definir unas condiciones de contorno relativas a cómo se incorpora y cómo sale el flujo de la zona analizada.

Antes de cualquier cálculo un dato fundamental es definir el caudal entrante al modelo durante la simulación.

La simulación que se ha llevado a cabo se ha realizado bajo la condición de flujo no estacionario, en la cual las variables hidráulicas en cada punto varían con el tiempo. Dado que el interés de las simulaciones es delimitar el alcance de la inundación para un caudal concreto, el caudal de entrada en el modelo se hace corresponder con el valor de caudal que se quiere simular y se mantiene constante hasta que el valor de salida de flujo del modelo se estabiliza a un valor igual, o muy aproximado, al de entrada, entendiéndose en ese momento que se ha alcanzado el movimiento permanente, no variable con el tiempo, y que los niveles de agua y las velocidades del flujo en cada punto corresponden con el caudal de cálculo preestablecido.

En las proximidades de las secciones de entrada y la de salida, los resultados están condicionados a unas suposiciones variables hidráulicas más allá de la zona simulada, de las que no se tienen datos, llamadas Condiciones de Contorno. Estas Condiciones de Contorno, se asumen como verdaderas, pero sin saber si realmente se cumplen en la realidad. Cuanto más nos alejemos de estas secciones de entrada y salida del modelo, la incertidumbre de los resultados obtenidos disminuye considerablemente. Por esta razón, se suelen ampliar las zonas simuladas más allá de la zona de interés para disminuir en lo posible la incertidumbre de los valores obtenidos en las zonas de interés.

Las condiciones de contorno utilizadas son, básicamente, definir una pendiente hidráulica en la sección de salida, con la que poder estimar la velocidad que tendrá el flujo en esos puntos y, por ende, los niveles de calado para un caudal determinado.

Los valores de caudal de cálculo, como ya se indicó, se obtienen de la aplicación CAUMAX y las pendientes hidráulicas se hacen coincidir con las pendientes medias de los tramos, asumiendo que, más o menos, en dichas zonas el movimiento del flujo se asimila a un movimiento permanente y uniforme.

Los datos introducidos en el programa para el tramo F se muestran en la siguiente Tabla 2. Los datos del resto de tramos se muestran en el anexo Ia.

Tabla 2. Datos del tramo F que muestran la pendiente y calados máximos diarios para diferentes periodos de retorno.

TRAMO	PENDIENTE	Q-T002	Q-T005	Q-T010	Q-T025	Q-T100	Q-T500	Q-MCO
F__01	1.24206813	204	342	425	572	820	1167	
F__02	0.24560792	205	345	429	577	828	1179	
F__03	0.82331353	208	352	439	591	848	1209	

3.2.3. Postproceso

Una vez realizados los cálculos hidráulicos, los resultados se pueden presentar a dos niveles; mediante mapas de nivel de agua y de mapas de velocidades, y mediante secciones transversales

en puntos de interés del modelo (figura 8). Ambas representaciones se obtienen a partir de los resultados obtenidos de la simulación matemática y para los que se utilizan, normalmente, otros programas más específicos, como los sistemas de información geográfica o las hojas de cálculo.

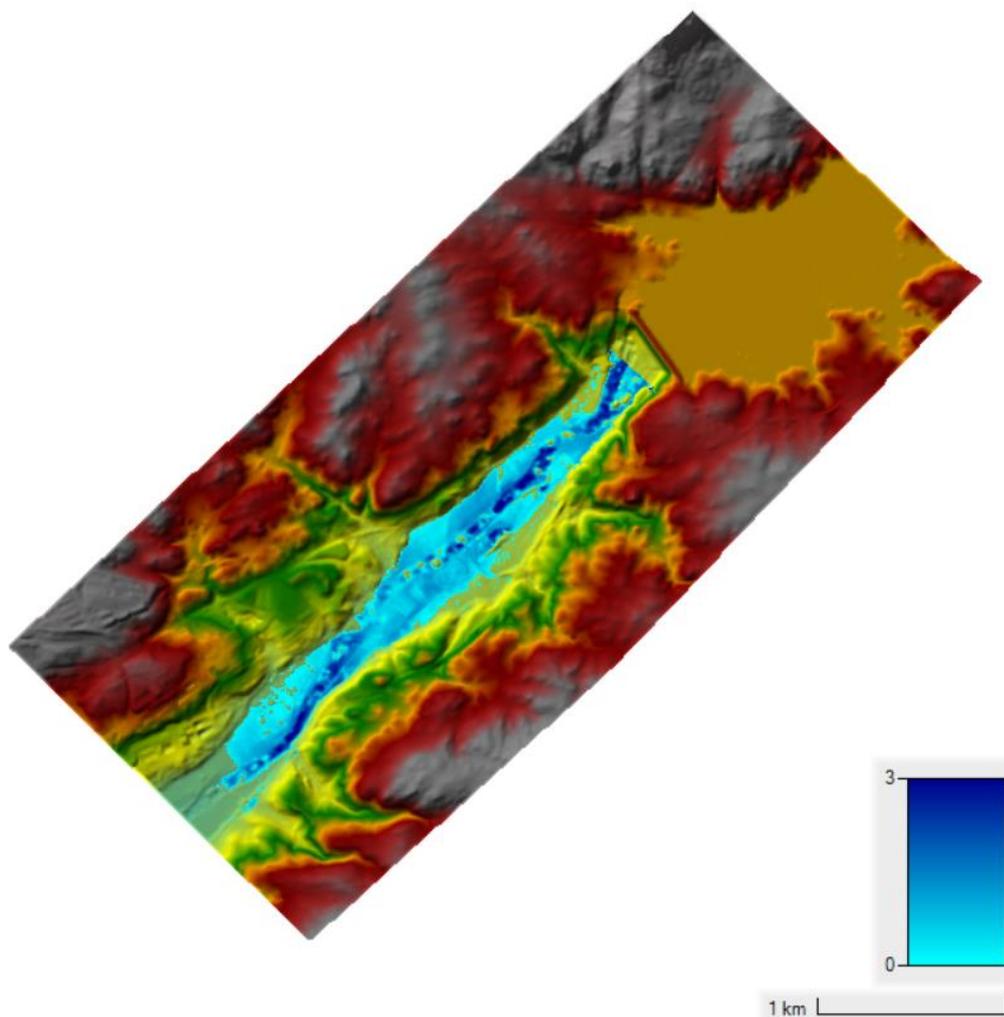


Figura 8. Resultado final de la modelización que muestra la profundidad de 0m a 3m en el subtramo F__01.

En los tramos de río analizados existe estaciones de aforo con datos de nivel y caudal registrados por los organismos de cuenca. Con dichos datos se pueden valorar los resultados obtenidos por la simulación, con el fin de visualizar el grado de incertidumbre asociado a dichos resultados.

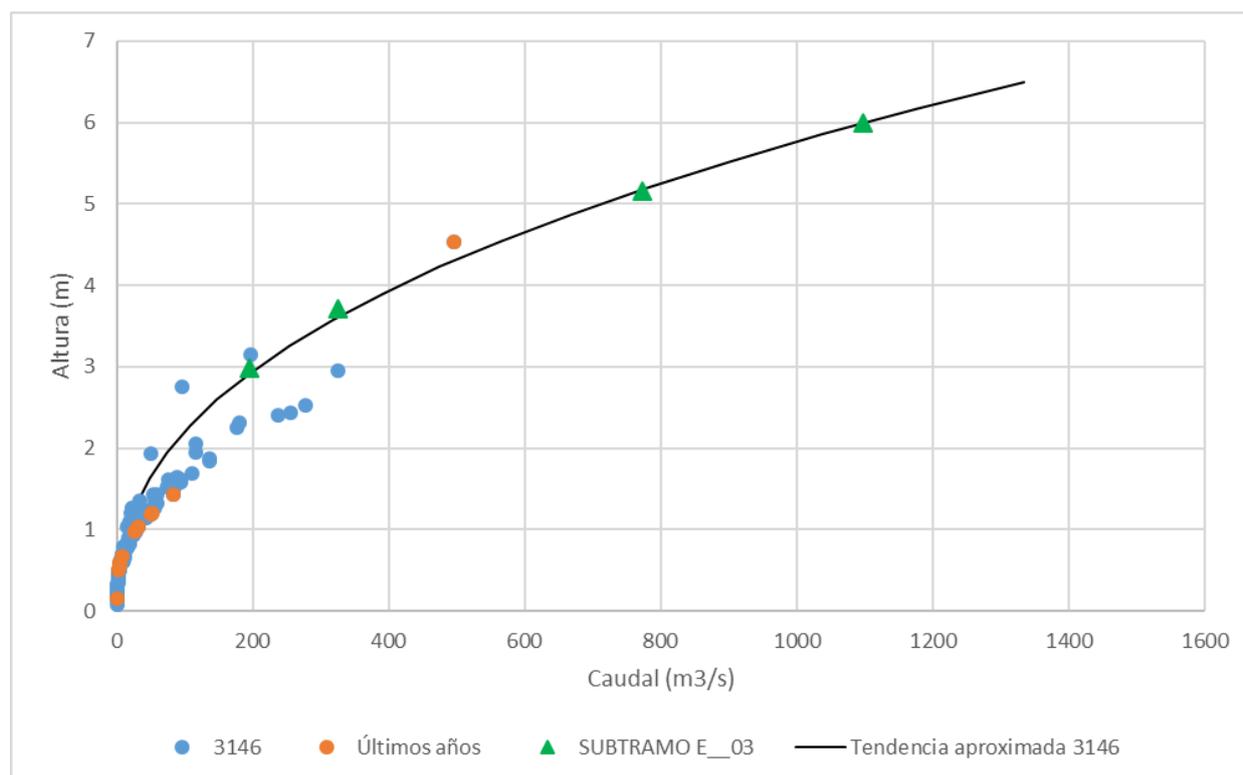


Figura 9. Comparación de los valores obtenidos de las simulaciones hidráulicas en el subtramo E_03 con los datos aforados en la estación ROEA 3146.

La simulación hidráulica tiene las limitaciones inherentes a la precisión del modelo de elevaciones utilizado, pero da una idea de la tendencia de los niveles de inundación esperados para los distintos periodos de retorno, que en general, responden bastante bien a los datos de aforos registrados en las estaciones de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA). En el apartado de resultados se muestran los gráficos correspondientes a todas las estaciones ubicadas en los tramos analizados.

3.3. Metodología para generar mapas de inundación

Una vez realizada la modelización hidráulica, el modelo HEC-RAS puede generar mapas con los datos de las variables hidráulicas para su posterior visualización en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). La elaboración de mapas se ha realizado con Arcgis 10.4.1 y se han exportado a un formato de imagen para su incorporación al presente documento.

En los mapas se representa la siguiente información:

- Calado obtenido para un periodo de retorno de 2 años. Su clasificación se muestra en la leyenda.
- Calado obtenido para un periodo de retorno de 500 años. Concretamente, se muestra el límite de la zona inundada para este periodo de retorno.
- Línea del cauce

Se han elaborado dos tipos de mapas; uno con una vista general del subtramo y otro con una vista detallada sobre las parcelas de estudio. En ambos casos los mapas se presentan sobre un mapa topográfico y sobre una ortofoto.

Con el fin de no realizar un documento muy extenso, con información base que puede resultar redundante, se han elaborado **mapas conjuntos** con las zonas de inundación (Acción A1.2) y la delimitación del espacio fluvial (Acción A1.3), que facilita la comprensión de los resultados de ambas acciones. Por tanto, el diseño de la elaboración de los mapas que se muestran a continuación son conjuntas para ambas acciones. Sin embargo en la presentación de resultados, correspondiente a esta acción, no aparecen las capas de la acción A1.3.

Características de los mapas generados:

Mapa general:

- Mapa que incluye todos los puntos o su gran mayoría de un subtramo. Es decir, si en un tramo hay muchas parcelas separadas, se harán tantos mapas generales como se crea conveniente para una buena visualización
- Se hace con T002 y T500 sin transparencias. Aparece también el cauce y el límite del espacio fluvial.
- Las coordenadas se definen en UTM cada 250m
- Se hace sobre el topográfico y la ortofoto

Mapas detallados

- Mapa que incluye cada parcela o un conjunto de parcelas siempre y cuando entre en el marco de **escala**, 1:1000
- Se hace con T002 transparencia 40% y T500 transparencia 60%. Aparece también el cauce y el límite del espacio fluvial.
- Las coordenadas se definen en UTM cada 50m
- Se visualiza sobre el mapa topográfico y la ortofoto

3.4. Metodología para elaborar las secciones transversales

La sección transversal de un tramo de río es un dato más a incluir en la caracterización del río ya que nos proporciona información de cómo es el terreno en el entorno del cauce. Además, muestra cómo se encuentra el cauce de encajonado, si está conectado con la llanura de inundación, si las márgenes del río están sobre unos taludes con una pendiente importante, etc. A esta sección transversal se le superponen las cotas de lámina de agua correspondientes a los distintos periodos de retorno, que nos muestran la periodicidad con la que se podrían producir desbordamientos en el cauce.

Se han realizado secciones transversales en los puntos de estudio, interpolando primero sobre el MDE para obtener el perfil del terreno y después marcando los resultados de las cotas de lámina de agua correspondientes a las distintas simulaciones hidráulicas realizadas.

También se marcan, con un par de puntos rojos, el límite de la lámina de agua observada en la ortofoto. De esta forma es más sencillo tener una idea mas clara de lo que ocupa el cauce, con niveles ordinarios, con respecto a la sección transversal total.

Por otro lado, a estas gráficas también hay que añadir una nueva línea que marcará el espacio fluvial potencial delimitado por el hábitat E910. Para ello, en primer lugar es necesario identificar sobre la ortofoto hasta donde llegan las especies incluidas en este hábitat y posteriormente, sobre el MDT se determina la cota que alcanzan. Esta cota es la que aparece sobre las secciones transversales. El objetivo es realizar una comparación entre los periodos de retorno y la cota que alcanza el espacio fluvial y analizar si existe una correlación entre ambas.

4. RESULTADOS

4.1. Estimación de los caudales máximos

Toda esta información referente a los caudales máximos calculados para cada subtramo y para cada periodo de retorno se recoge en la base de datos de los tramos de estudio comentada en el informe A1.1. y reflejada en el anexo la.

A modo de ejemplo, en la Tabla 3, se muestran los caudales máximos correspondientes al tramo F.

Tabla 3. Caudales máximos para distintos periodos de retorno, expresado en m³/s.

COD_SUBT	Q-T002	Q-T005	Q-T010	Q-T025	Q-T100	Q-T500
F__01	204	342	425	572	820	1167
F__02	205	345	429	577	828	1179
F__03	208	352	439	591	848	1209

4.2. Cálculo de curvas de gasto

Las curvas de gasto, para un punto concreto del cauces, son una relación, normalmente representada gráficamente, entre la altura que alcanza la lámina de agua y el caudal que circula por ese punto en un determinado momento. Estas curvas de gasto son únicas para cada sección del río, ya que depende de su geometría y del entorno del punto en cuestión. Este entorno, en ocasiones, puede ser muy amplio, sobre todo aguas abajo, dado que los niveles de agua pueden influir de forma importante en secciones aguas arriba (curvas de remanso).

Para comprobar si los resultados de las modelizaciones son correctas y asociar un valor de incertidumbre a los mismos, es interesante comparar los resultados de las simulaciones con los valores de nivel y caudal registrados en las estaciones de aforo. A continuación, se van a mostrar las gráficas con las curvas de gasto que representan los datos obtenidos de las estaciones de aforo y de las modelizaciones. También se incorpora una ortofoto sobre la estación de aforo para poder visualizar el entorno de la estación forométrica.

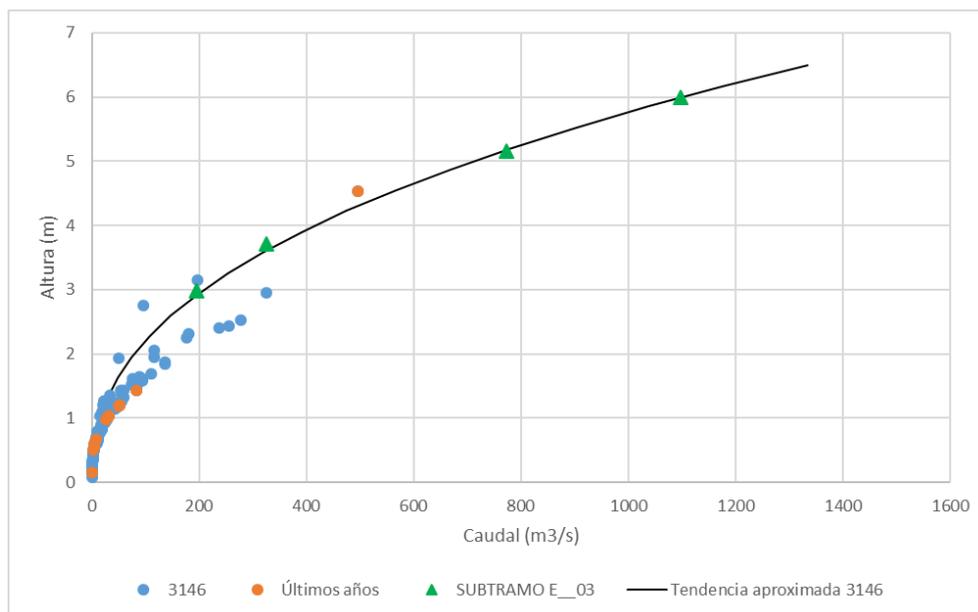


Figura 10. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3146 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo E_03.



Figura 11. Vista aérea sobre la estación de aforo 3146 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.

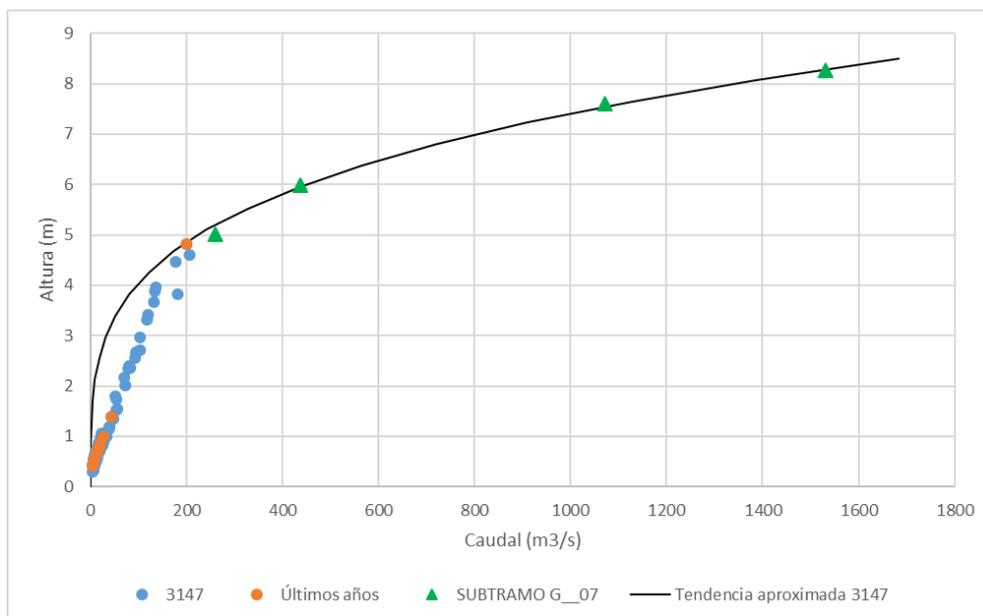


Figura 12. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3147 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo G_07.



Figura 13. Vista aérea sobre la estación de aforo 3147 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.

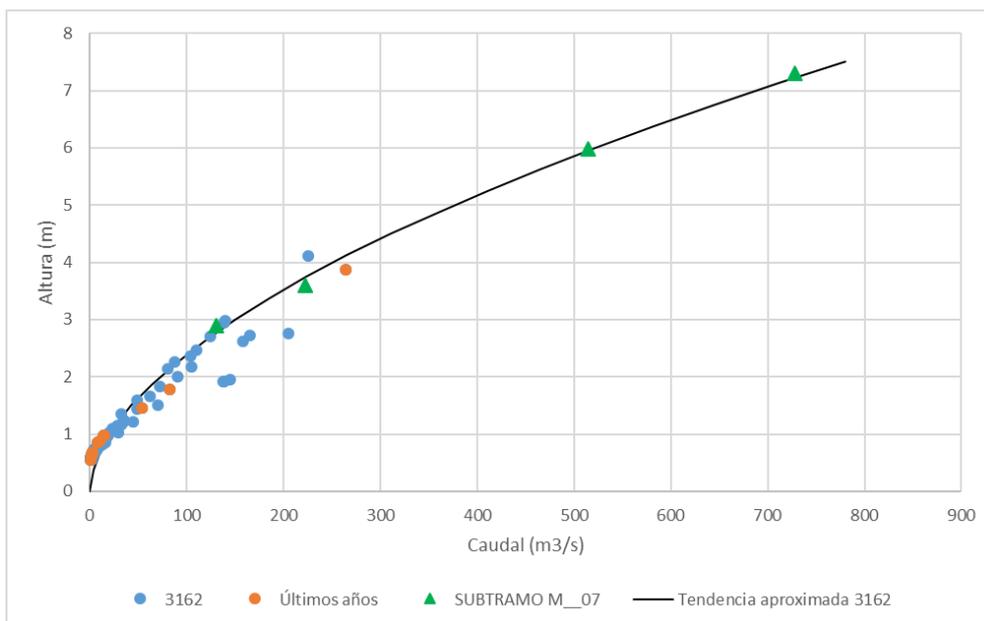


Figura 14. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3162 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo M_07.

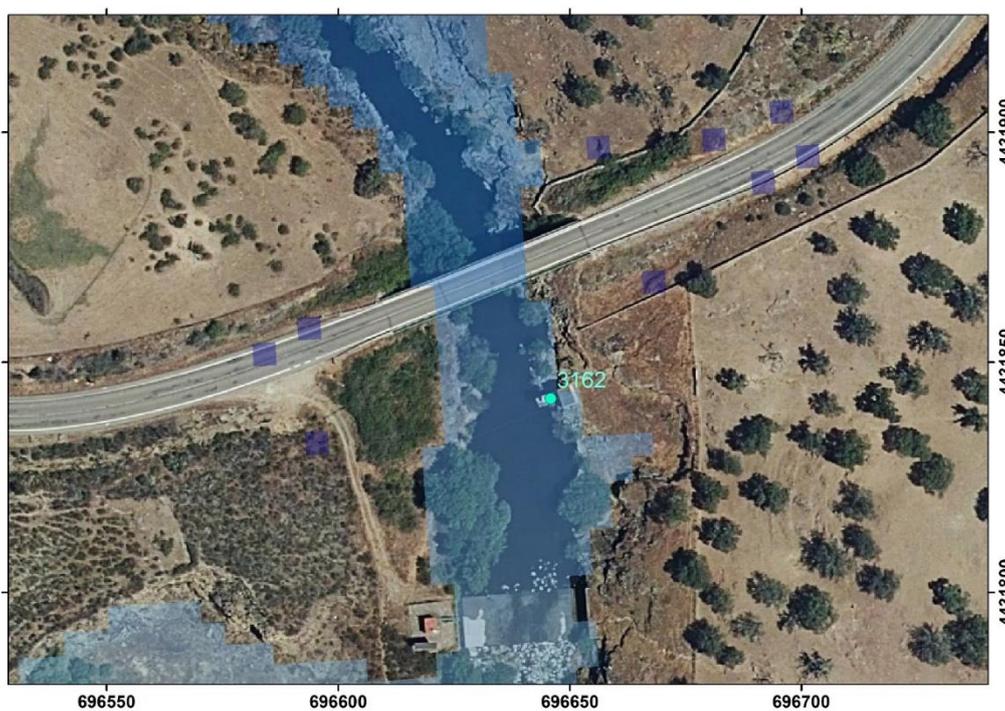


Figura 15. Vista aérea sobre la estación de aforo 3162 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.

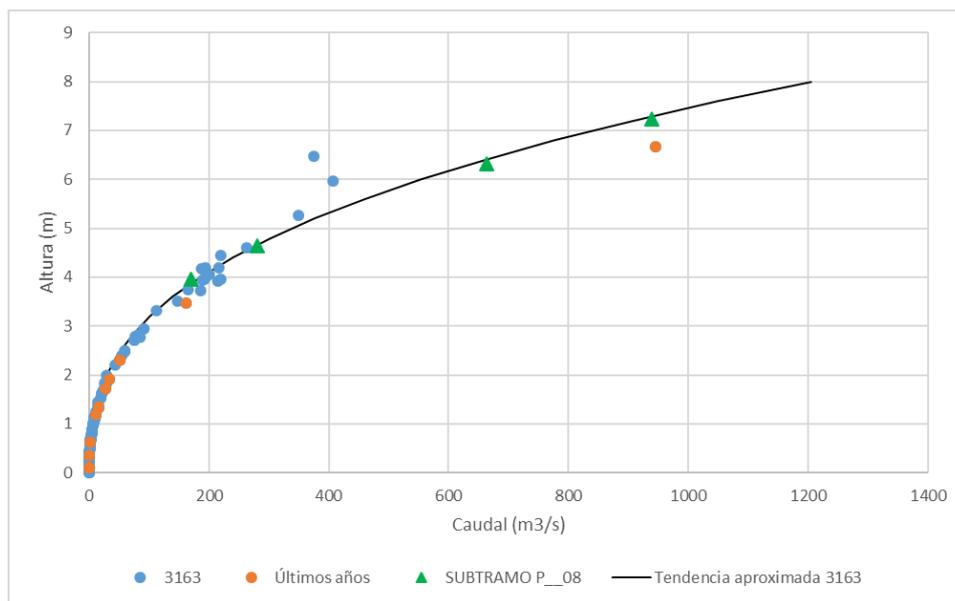


Figura 16. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3163 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo P_08.

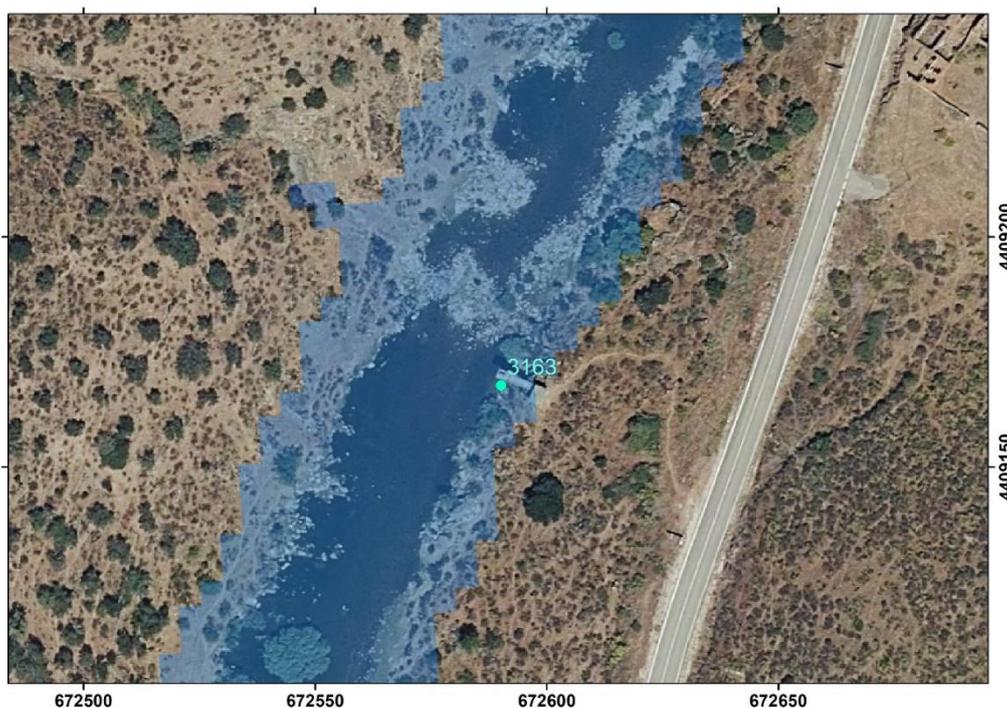


Figura 17. Vista aérea sobre la estación de aforo 3163 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.

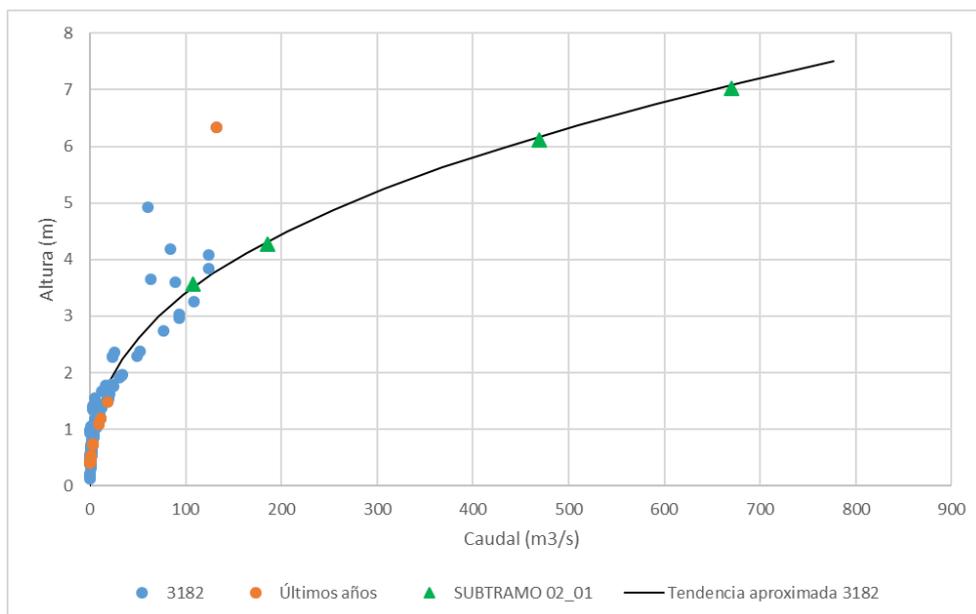


Figura 18. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3182 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo 02_01.

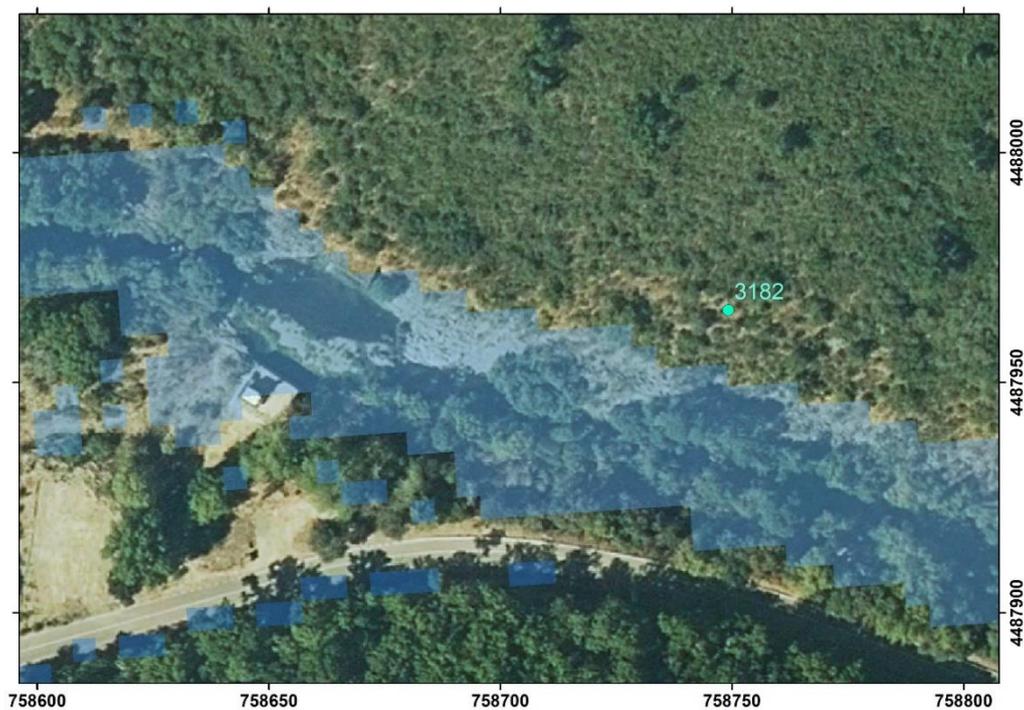


Figura 19. Vista aérea sobre la estación de aforo 3182 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.

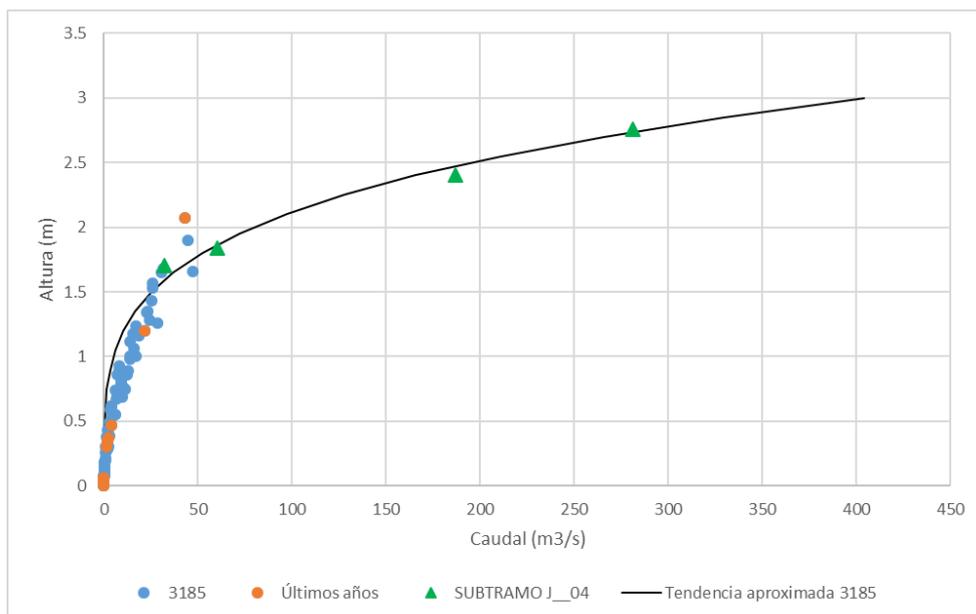


Figura 20. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3185 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo J_04.



Figura 21. Vista aérea sobre la estación de aforo 3185 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.

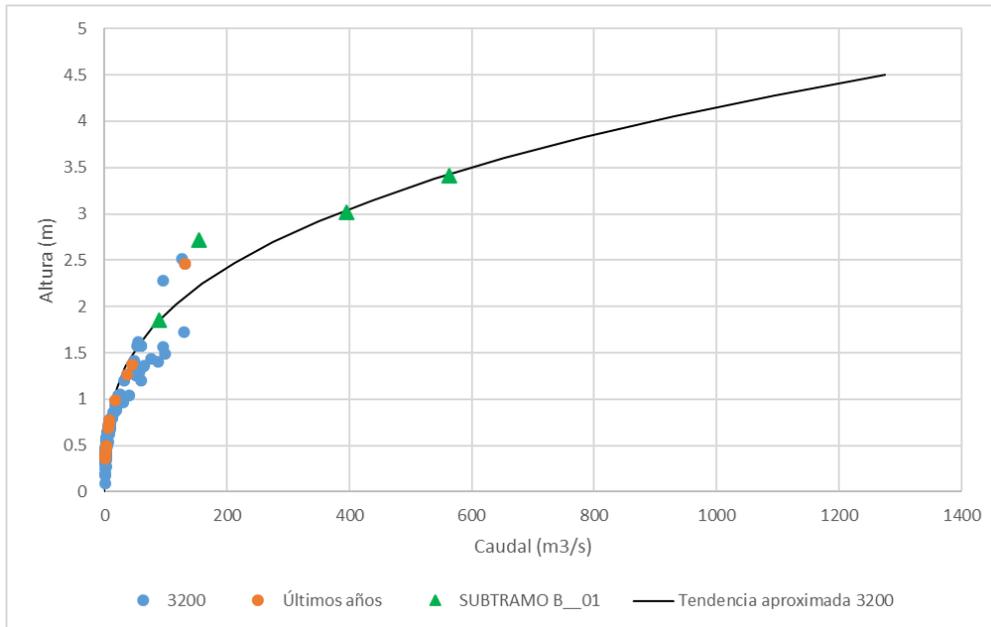


Figura 22. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3200 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo B_01.

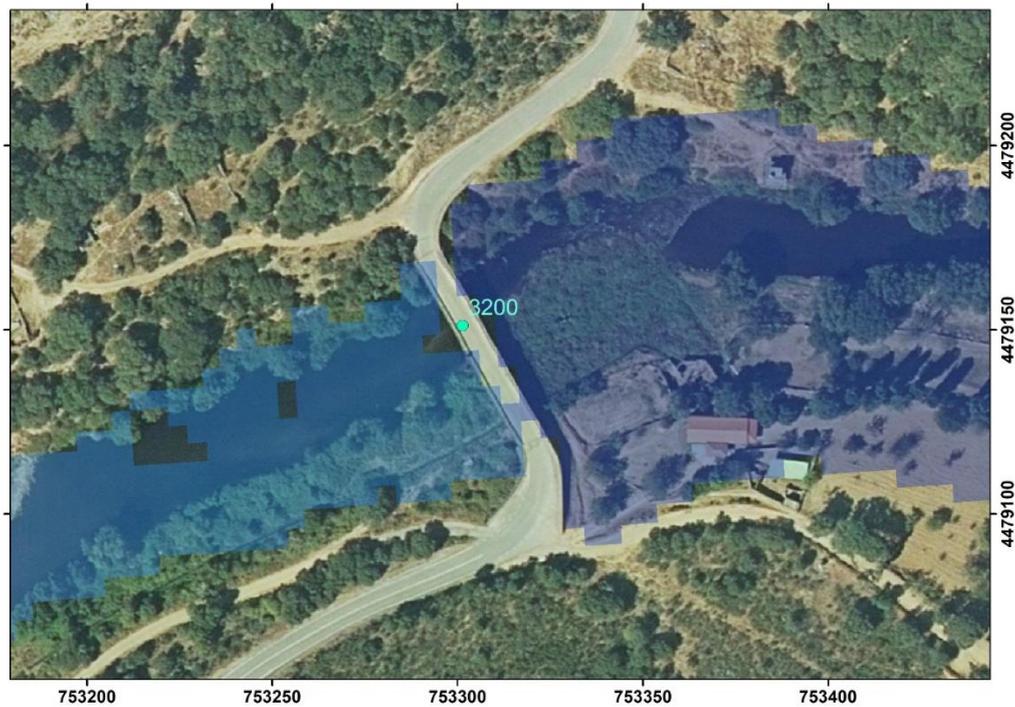


Figura 23. Vista aérea sobre la estación de aforo 3200 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.

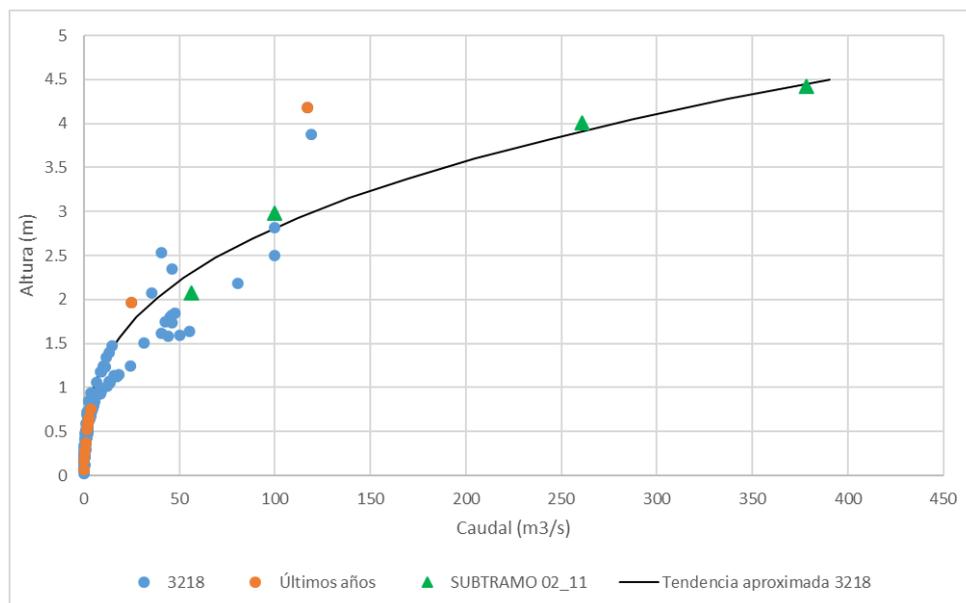


Figura 24. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3218 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo 02_11.



Figura 25. Vista aérea sobre la estación de aforo 3218 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.

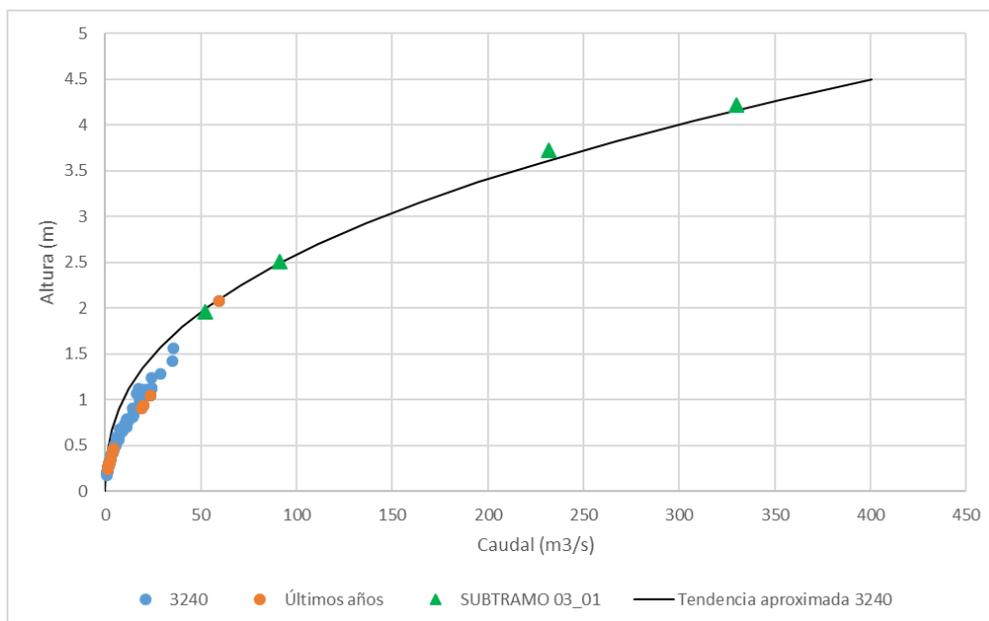


Figura 26. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3240 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo 03_01.



Figura 27. Vista aérea sobre la estación de aforo 3240 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.

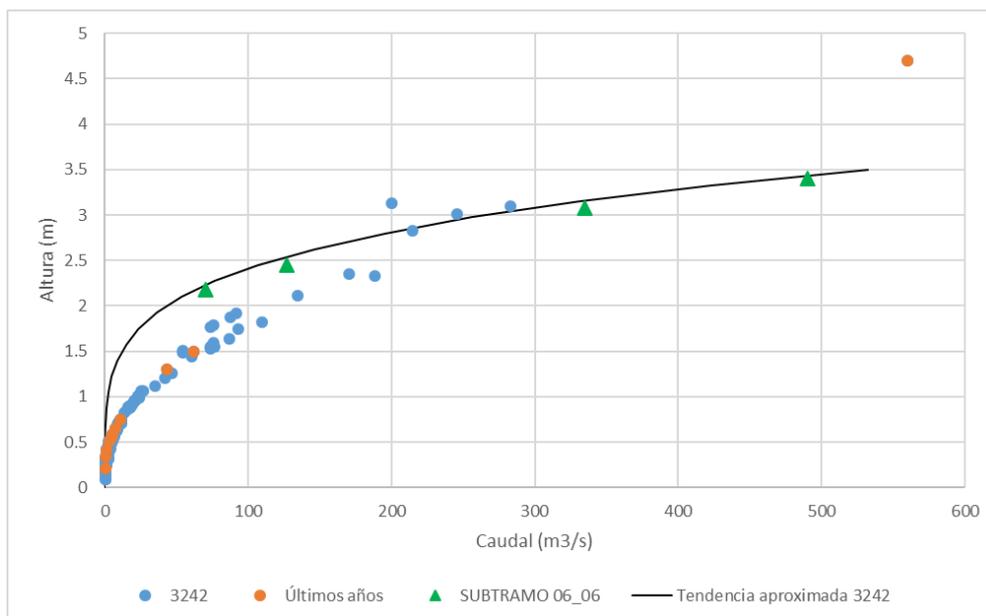


Figura 28. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3242 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo 06_06.

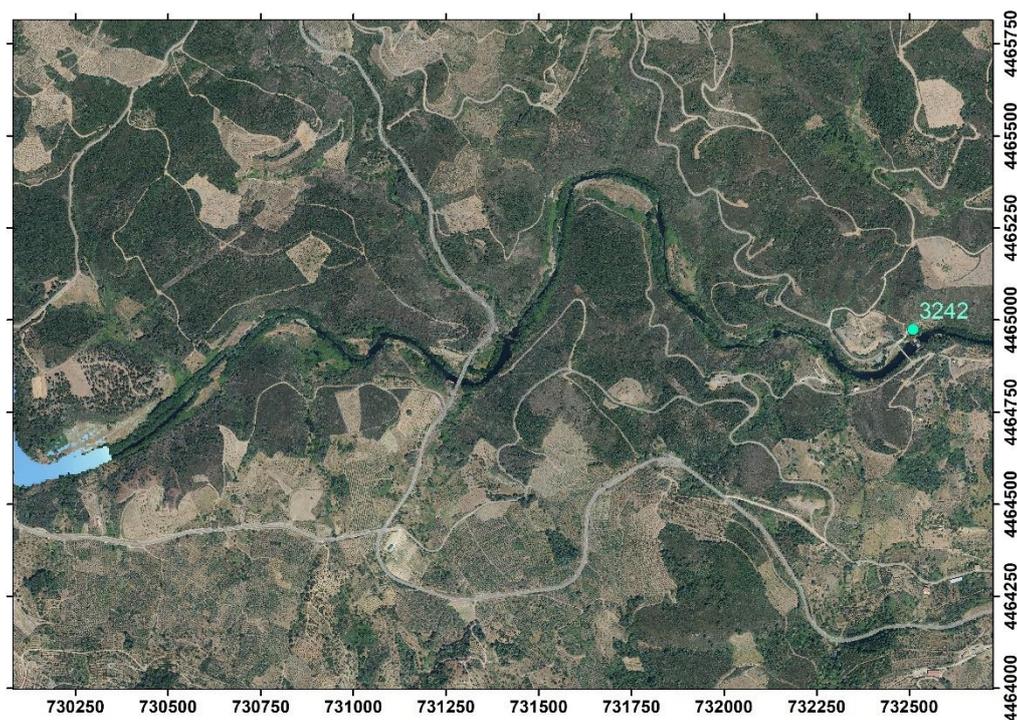
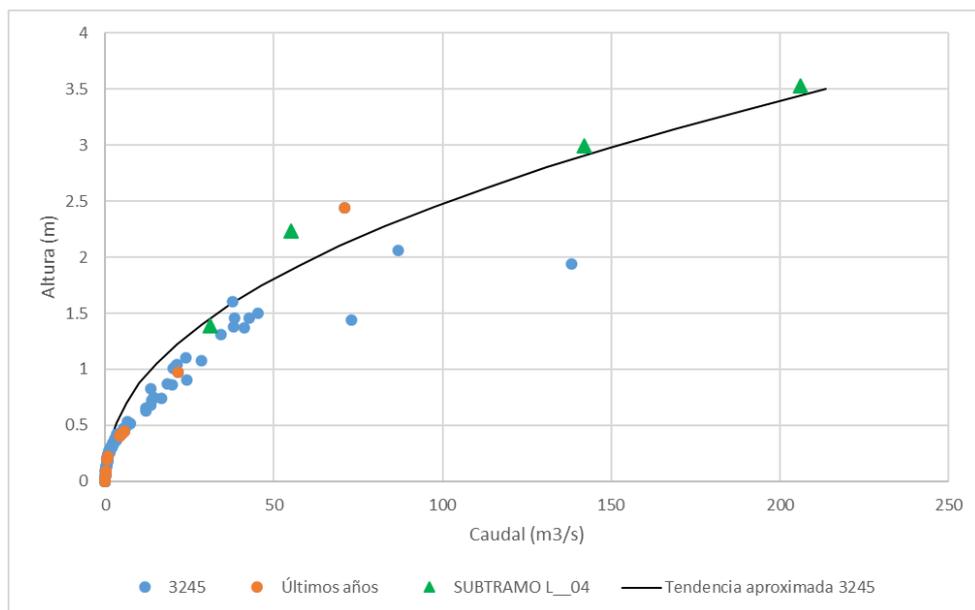


Figura 29. Vista aérea sobre la estación de aforo 3242 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.



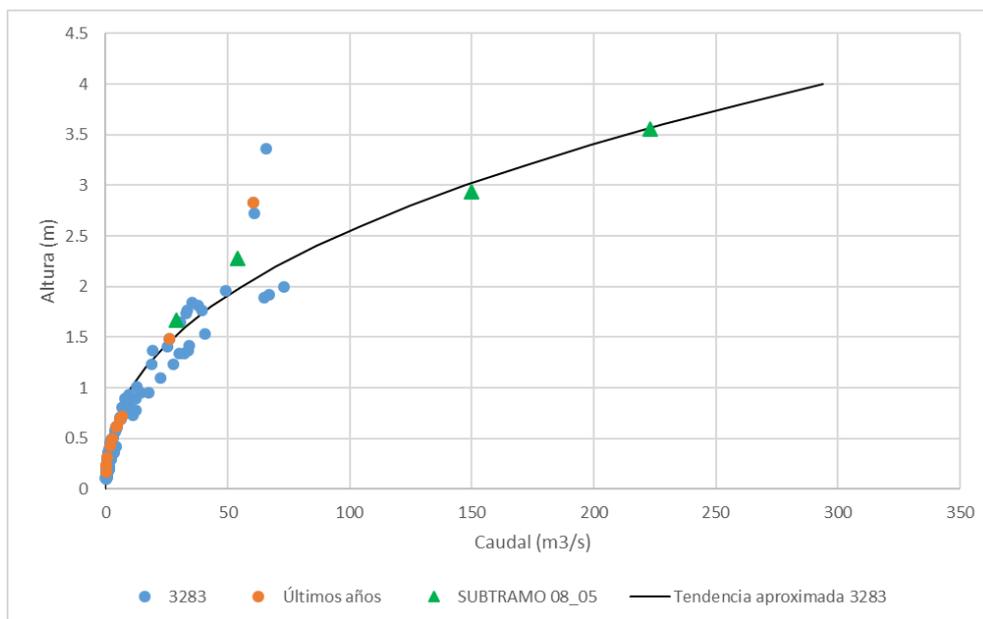


Figura 32. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3283 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo 08_05.

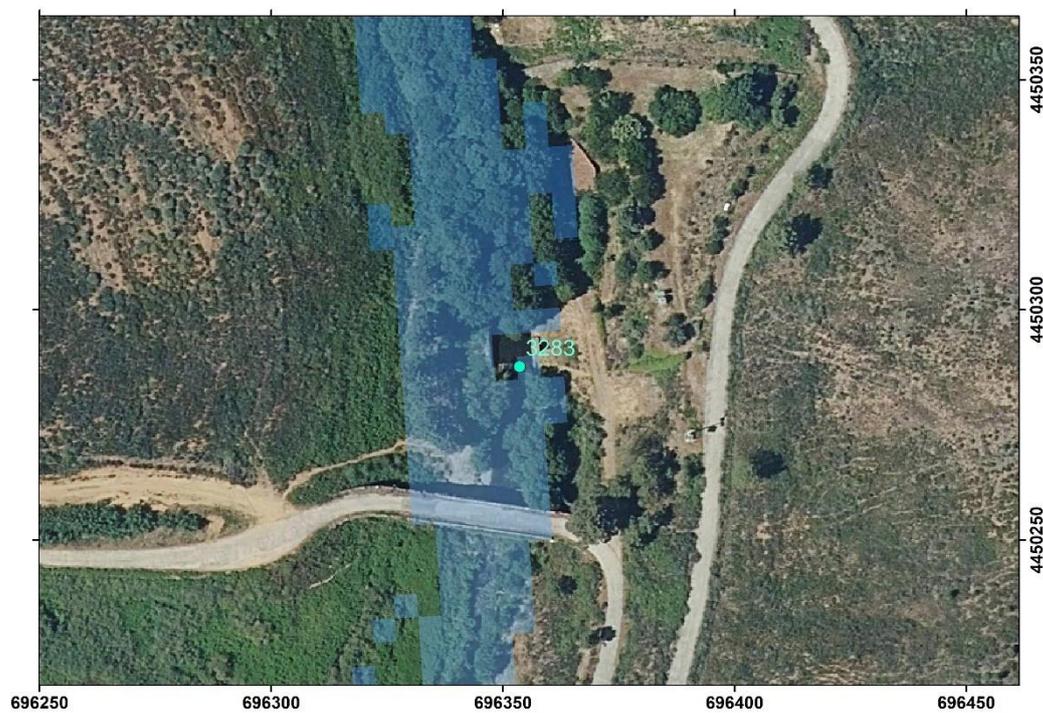


Figura 33. Vista aérea sobre la estación de aforo 3283 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.

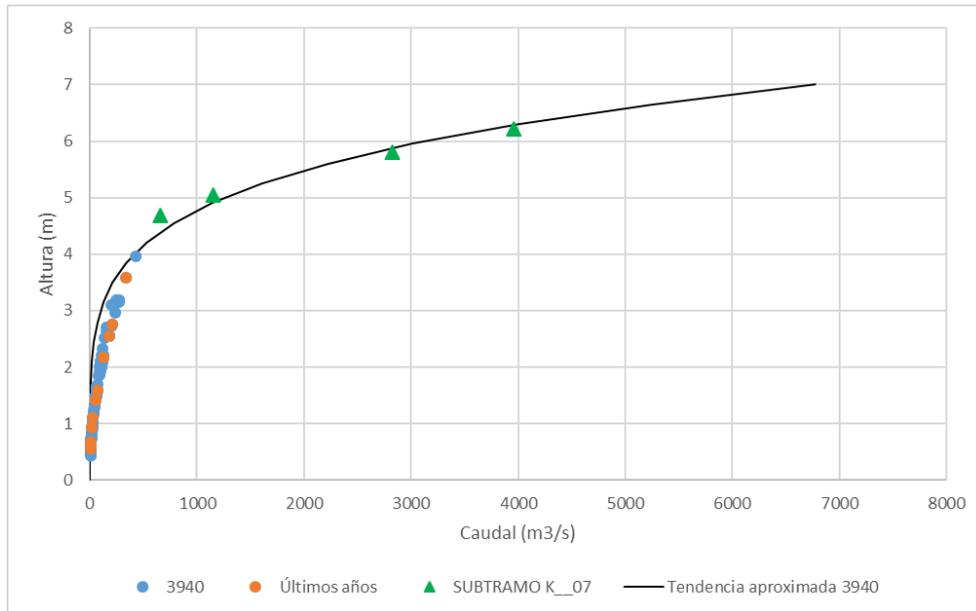


Figura 34. Datos de caudal/altura de la estación de aforo 3940 y curva de gasto obtenida basada en los resultados de la modelización del subtramo K_07.

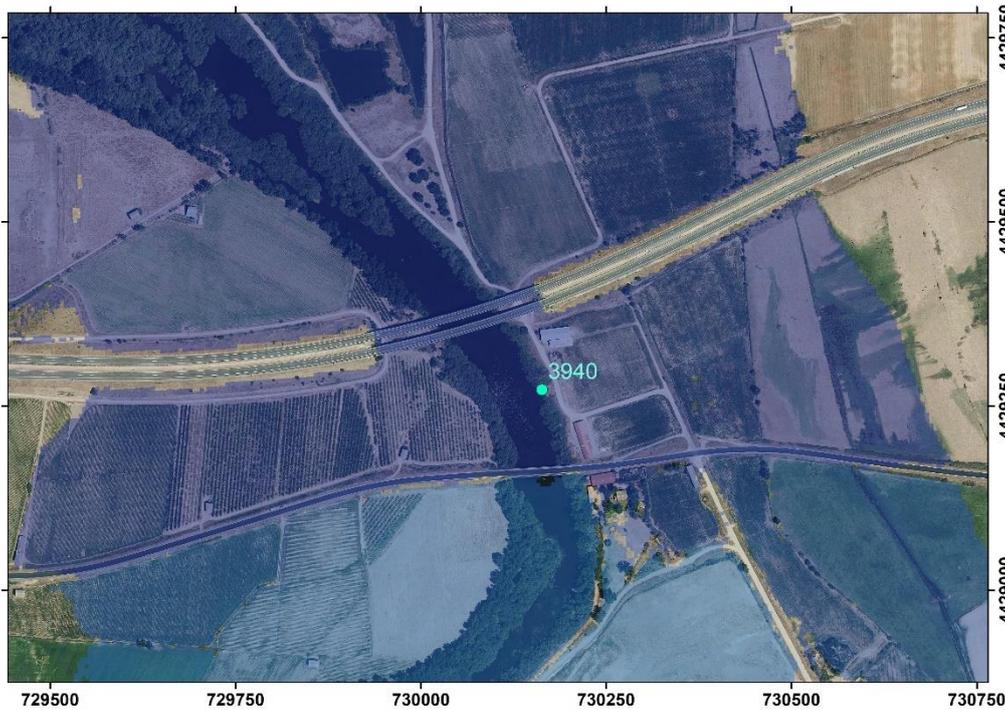


Figura 35. Vista aérea sobre la estación de aforo 3940 y con la zona inundable para un periodo de retorno de 5 años.

Para comparar los pares de valores (caudal, calado) obtenidos en las simulaciones con los datos registrados en las estaciones, ha habido que ajustar la cota de referencia del calado, que en general sería 0 si estuviésemos seguros que el modelo de elevaciones utilizado tuviera la cota exacta del terreno que utiliza como cota de nivel 0 la curva de gasto de la estación de aforos. Prácticamente todas las estaciones tienen una corrección menor a 1 metro (entre -1 m y 1 m de corrección). Se han encontrado cuatro excepciones que se comentan a continuación:

La estación 3240 tiene un ajuste de 1.8 m y esto se debe a que los datos tomados de la modelización se encuentra aguas arriba de la estación de aforo, ya que la modelización no alcanza la misma (Figura 28), y por lo tanto no se han podido comparar valores de calado junto en la posición de la estación. Lo mismo ocurre con la estación 3242 cuya modelización queda lejos de alcanzar la estación de aforo (Figura 30). En este caso tiene un ajuste de -1 m.

El caso de la estación 3940 es diferente. El caudal máximo registrado por la estación de aforo es de, $426.78 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el caudal establecido para un periodo de retorno de 2 años es de, $655 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 35). Por tanto, la tendencia para caudales altos no queda registrada y se puede encontrar una variación en la línea de tendencia obtenida, por ello para ajustarla se ha utilizado un ajuste de 2.5 m. En la misma situación se encuentra la 3147 ya que el caudal máximo registrado por la estación de aforo es de $206.85 \text{ m}^3/\text{s}$ mientras que el caudal establecido para un periodo de retorno de 2 años es de, $260 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 13), aunque en este caso no ha sido necesario un ajuste de cota.

4.3. Estimación del Dominio Público Hidráulico

La determinación del Dominio Público Hidráulico, DPH, es laborioso de determinar dado que se tienen en cuenta múltiples factores y requiere un cálculo hidráulico detallado. Se podría asociar, de forma aproximada, a la Máxima Crecida Ordinaria, que generalmente está entre los niveles de inundación obtenidos para las avenidas extraordinarias de 2 y 5 años de periodo de retorno. Estos límites así obtenidos pueden servir de servir de referencia en las negociaciones de acuerdos de custodia y permiten visualizar el alcance de lo que podría delimitarse como DPH en un deslinde oficial que pudiera realizarse en el futuro.

4.4. Elaboración de mapas de inundación

Para mostrar los resultados se va a tomar como ejemplo el Tramo de Regeneración F, cercano a la ciudad de Plasencia en la provincia de Cáceres. El resto de los resultados se muestran en el Anexo Va, donde se muestran los mapas de inundación, y el anexo Vb, donde se almacenan en un archivo comprimido las capas de variables hidráulicas correspondientes a las simulaciones realizadas por cada subtramo. En este mismo anexo, se puede comprobar que los mapas correspondientes a la zona portuguesa tienen un aspecto diferente a los mapas relativos a España. Esto se debe a la resolución menos precisa (de 25 m) que se mencionaba anteriormente.

MODELO HIDROLÓGICO EN EL SUBTRAMO F_02 → MAPA TOPOGRÁFICO GENERAL

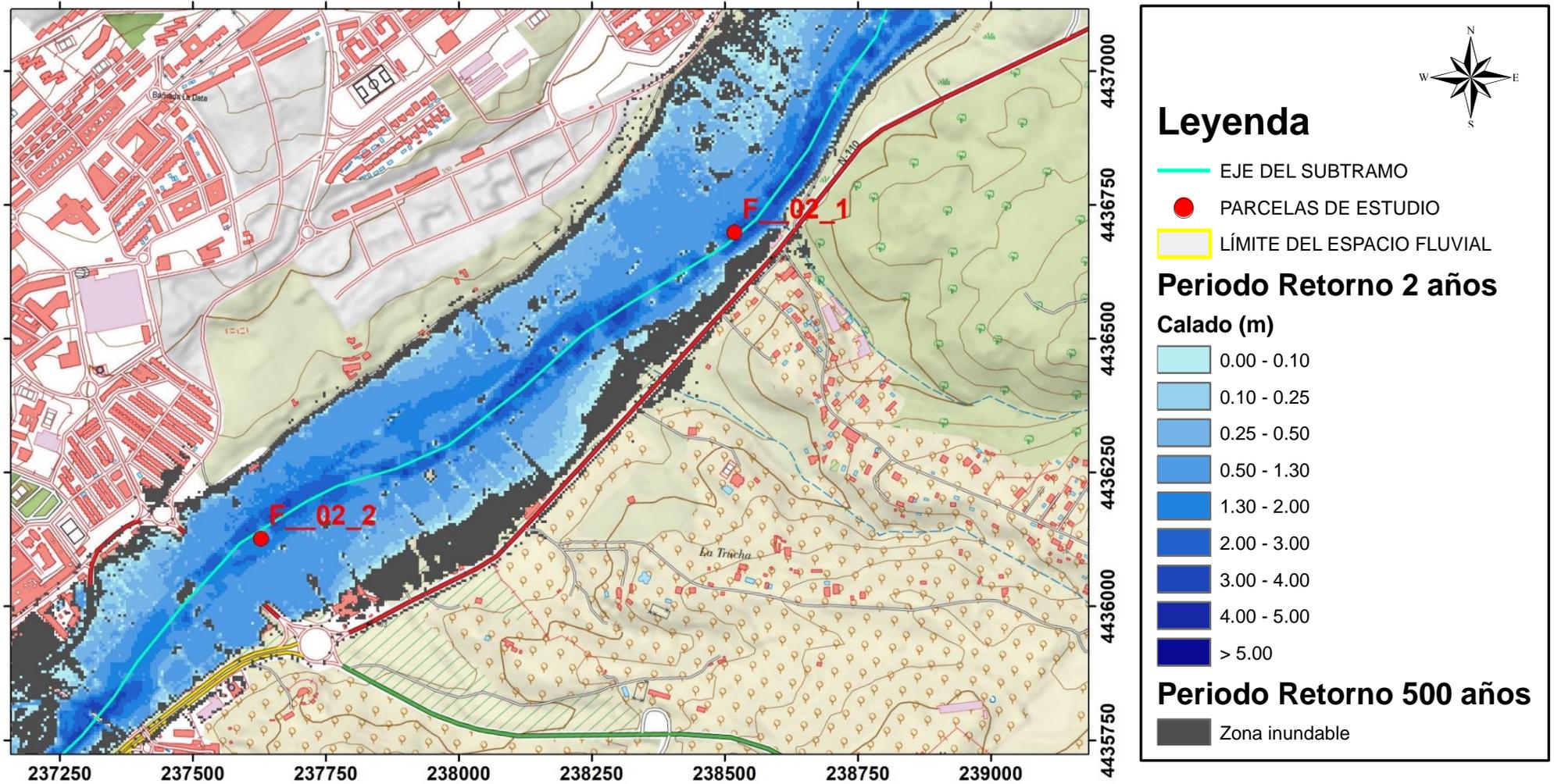


Figura 36. Modelo hidrológico en el subtramo F__02 sobre mapa topográfico (1).

MODELO HIDROLÓGICO EN EL SUBTRAMO F_02 → ORTOFOTO

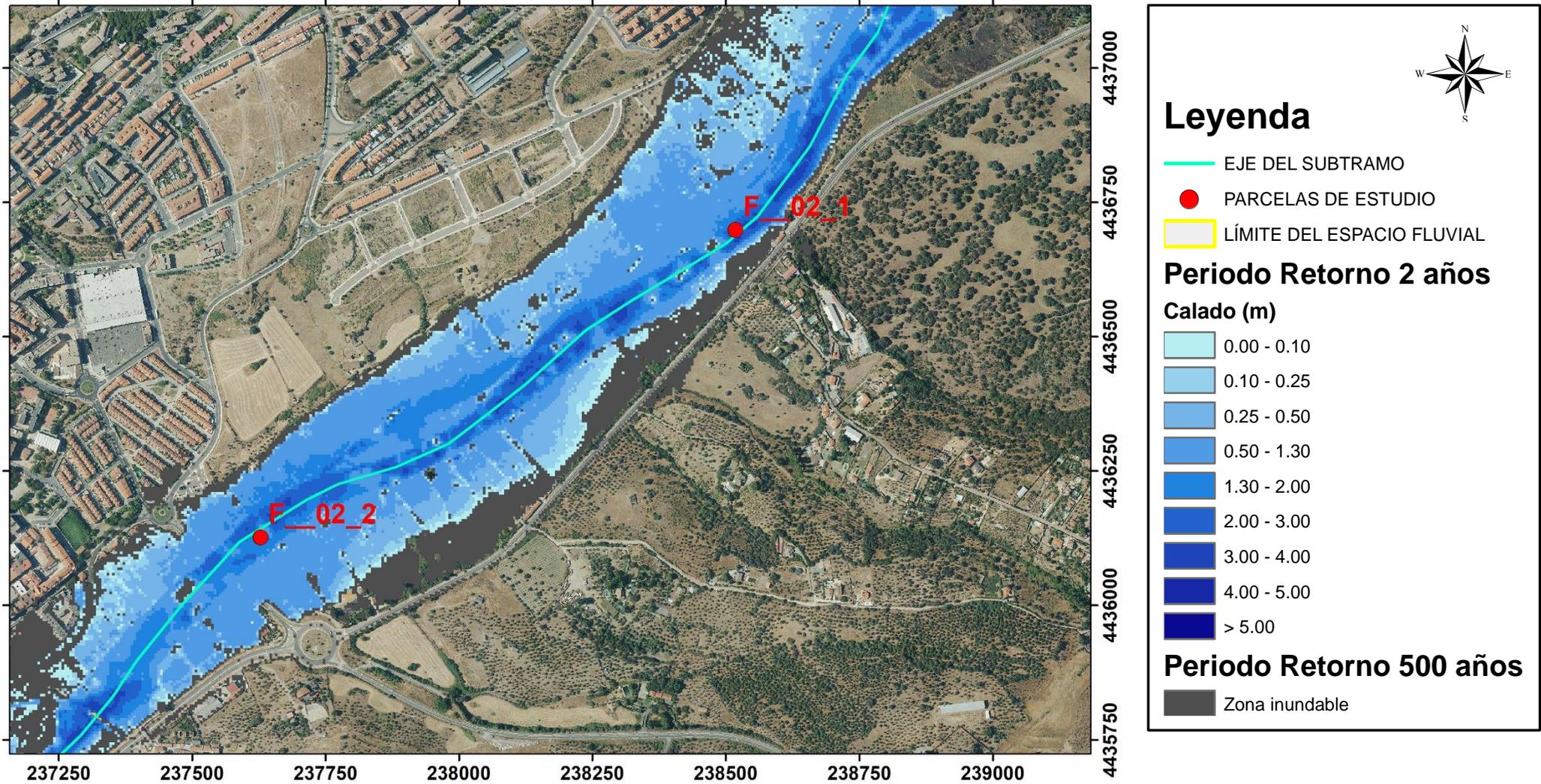


Figura 37. Modelo hidrológico en el subtramo F_02 sobre ortofoto (1).

MODELO HIDROLÓGICO EN EL SUBTRAMO F_02 → MAPA TOPOGRÁFICO GENERAL

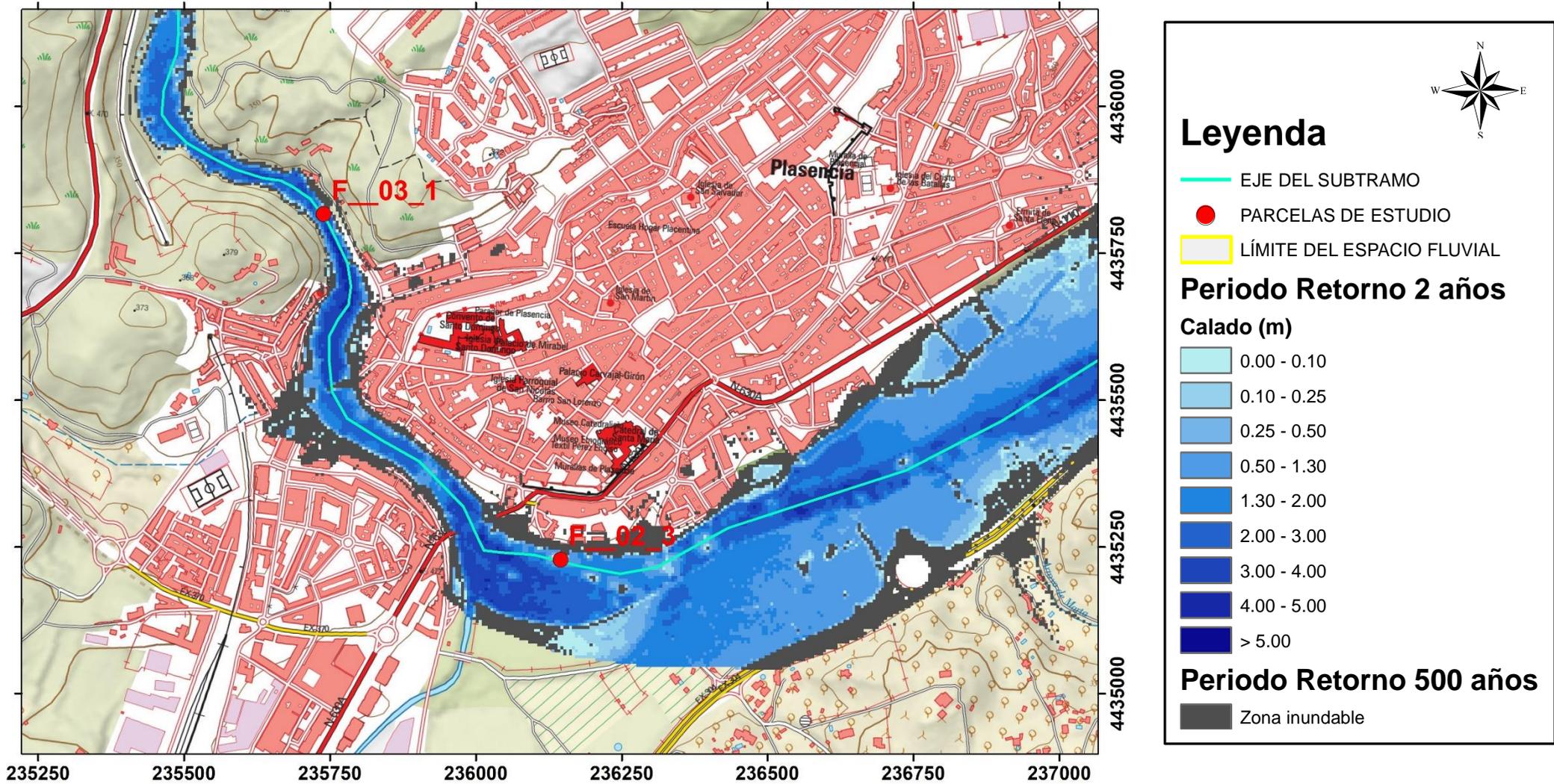


Figura 38. Modelo hidrológico en el subtramo F_02 sobre mapa topográfico (2).

MODELO HIDROLÓGICO EN EL SUBTRAMO F_02 → ORTOFOTO

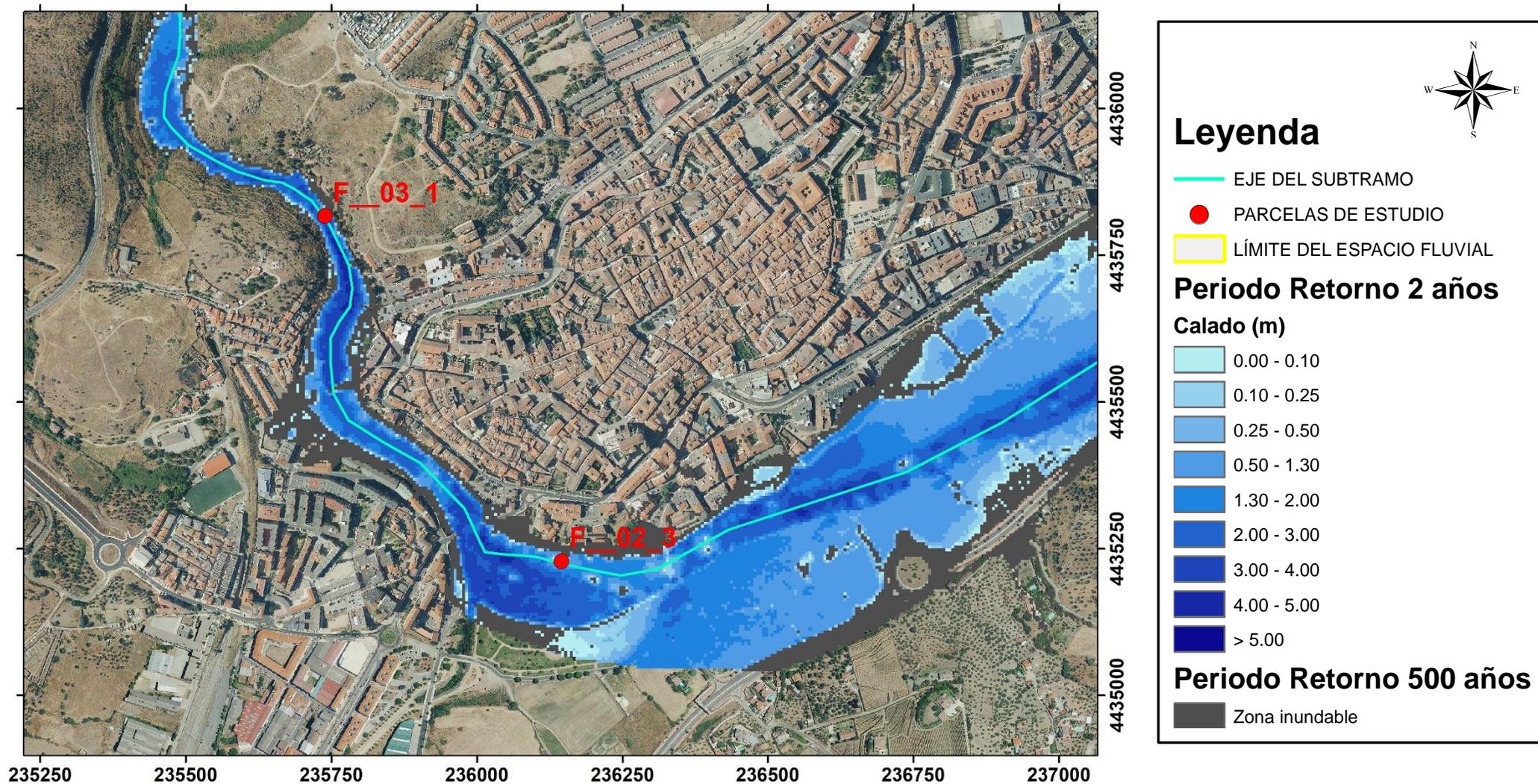


Figura 39. Modelo hidrológico en el subtramo F_02 sobre ortofoto (2).

MODELO HIDROLÓGICO EN EL SUBTRAMO F_02 → MAPAS DETALLADOS

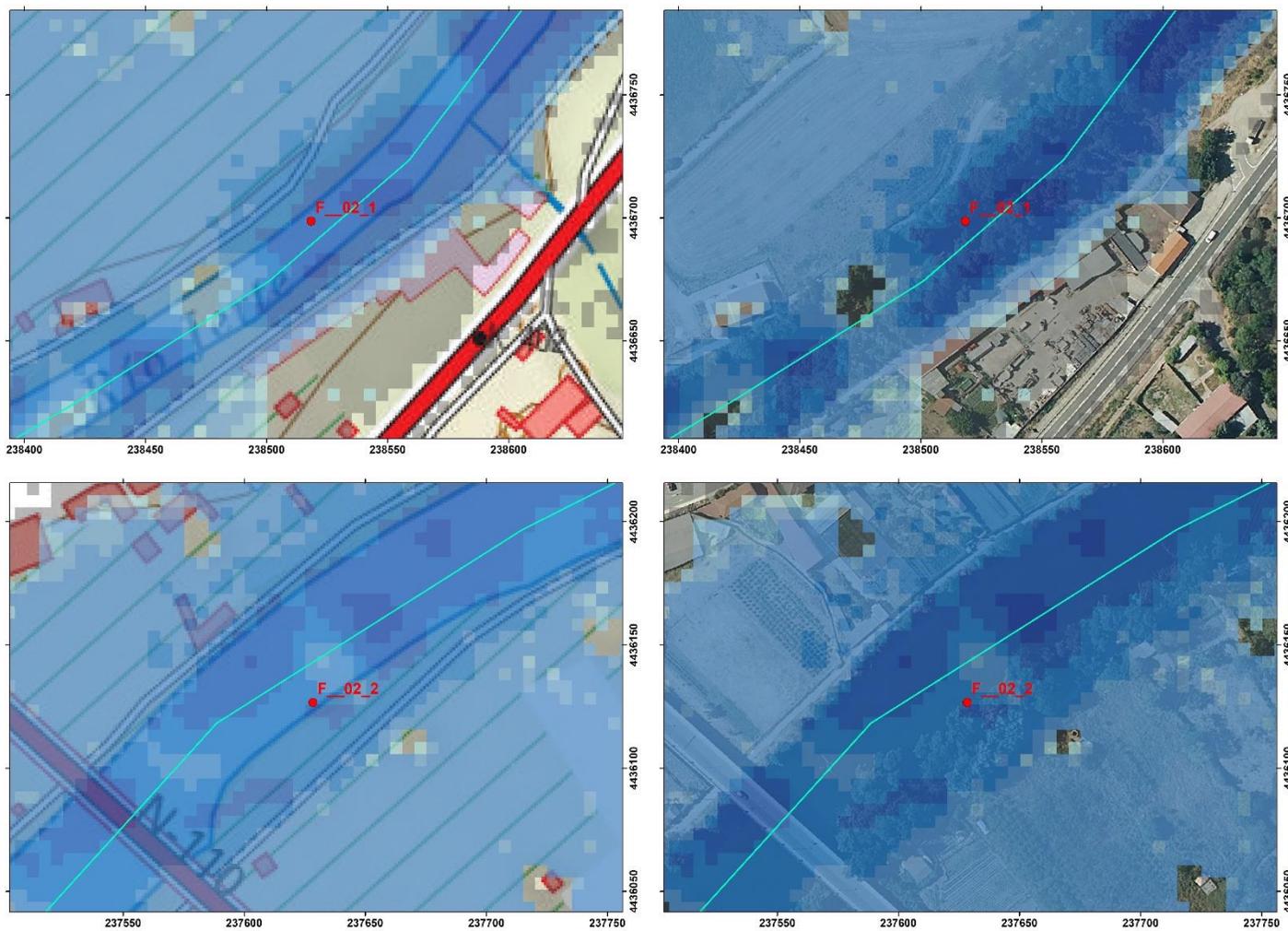


Figura 40. Mapas detallados de las parcelas de estudio del subtramo F_02 (1).

MODELO HIDROLÓGICO EN EL SUBTRAMO F_02 → MAPAS DETALLADOS

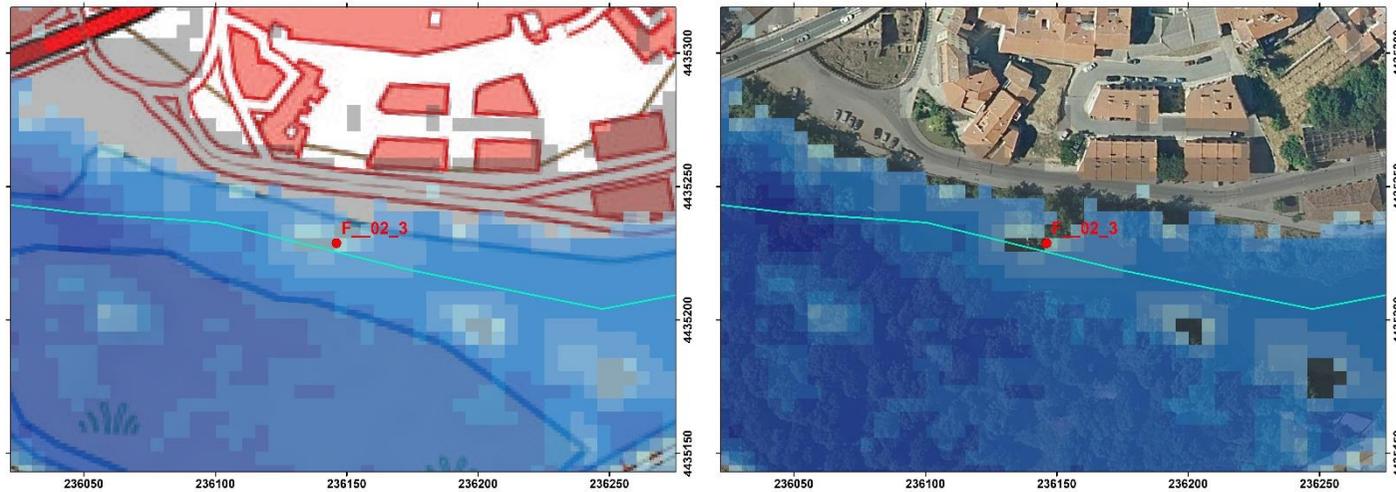


Figura 41. Mapas detallados de las parcelas de estudio del subtramo F__02 (2).

4.5. Elaboración de secciones transversales

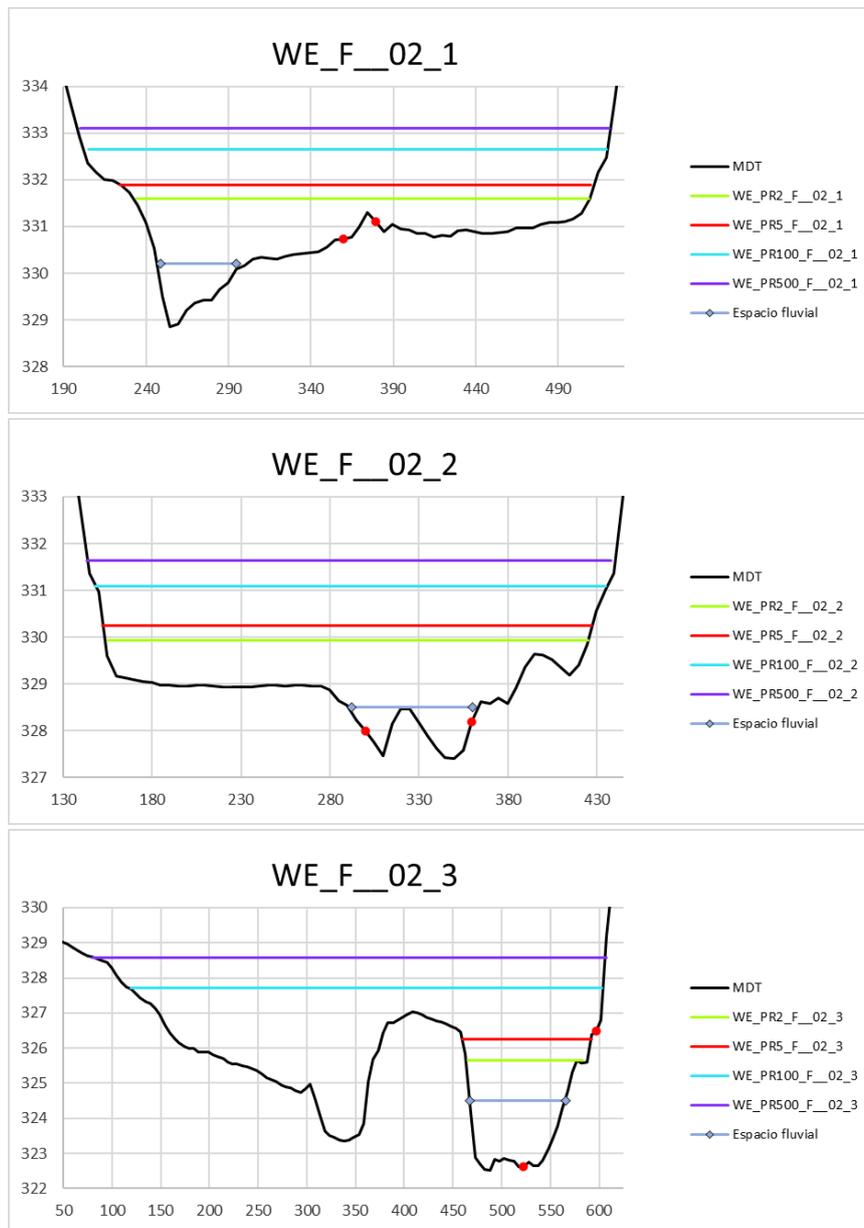


Figura 42. Secciones transversales en cada parcela del subtramo F__02 con la lámina de agua para los periodos de retorno de 2,5,100 y 500 años.

Las tres parcelas, de las que se muestran sus perfiles transversales, están a una distancia total de menos 3 km entre la primera y la última. Aún así, es reseñable la variabilidad del terreno entre unas secciones transversales y otras.

Las tres parcelas coinciden en que están encajonadas entre un par de motas, que corresponderían con los niveles de las carreteras que discurren a lo largo de ambas márgenes, como se observa en la Figura 43 y Figura 44

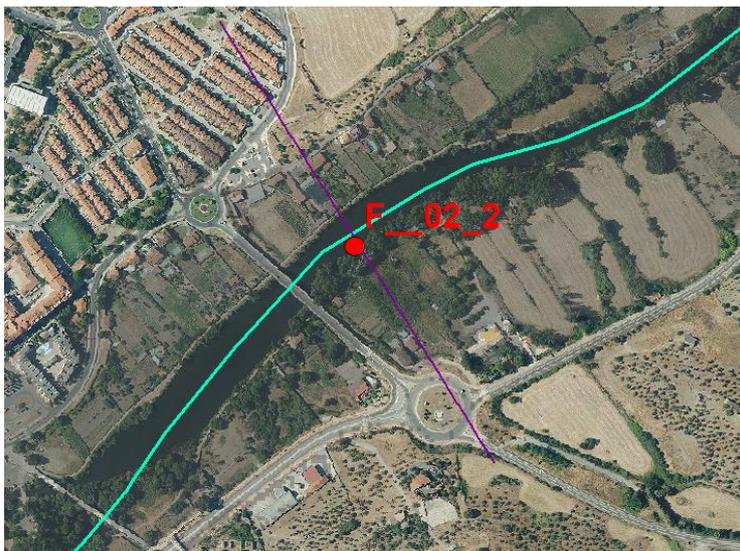


Figura 43. Sección transversal sobre la parcela F__02_2 donde se aprecia que corta a las carreteras a ambos lados del cauce. La sombra representa el alcance de la lámina de agua para un periodo de retorno de 100 años.

Dos de ellas (F__02_2 y F__02_3) están aún más encajonadas debido a otro par de motas más que separan el cauce de los cultivos agrícolas o la ciudad de Plasencia. Estas motas sirven de protección frente a inundaciones, pero no siempre son fiables. Por ejemplo, en el caso de la parcela F__02_3 para un periodo de retorno de 100 años, el parque adyacente quedaría inundado. Aunque en la realidad es difícil que pueda suceder, ya que este tramo en concreto tiene el régimen de caudales regulado por el embalse de Plasencia.



Figura 44. Sección transversal sobre la parcela F__02_3. La sombra representa el alcance de la lámina de agua para un periodo de retorno de 100 años.

Para las tres gráficas anteriores, se observa que el periodo de retorno correlacionado con el espacio fluvial que ha sido delimitado por el hábitat E910 es el periodo de retorno de 2 años.

Este resultado es coherente dado que este hábitat se caracteriza por estar en la primera línea mas próxima al cauce y que suele requerir de un flujo de agua permanente.

5. CONCLUSIONES

- Las modelizaciones han tenido buenos resultados. Aunque, debido a la magnitud del proyecto, dichas modelizaciones se han realizado de forma sencilla, sin llegar hasta el detalle que hubiera sido deseable para sacar conclusiones específicas en algunos puntos, dada la amplitud del estudio y las limitaciones de tiempo y capacidad computacional, no siendo el objetivo principal del proyecto el cálculo hidráulico.
- Los resultados obtenidos corresponden con caudales estimados en régimen natural, sin tener en cuenta la posible regulación que se llegue a realizar en algunos de los tramos que tienen, aguas arriba, embalses importantes.
- El pixelado que se puede observar en algunos mapas, sobre todo en la zona portuguesa, se debe a que el modelo no tiene el suficiente nivel de detalle como para presentar de forma continua las variables hidráulicas. Sin embargo, se ha tenido en cuenta y no afectan a los resultados presentados.
- Las secciones transversales permiten tener una idea de la morfología del río, sin embargo, dado el detalle del MDE comentado, algunas secciones no reflejan con detalle el perfil real del cauce.

6. BIBLIOGRAFÍA

MITECORD. CAUMAX

MITECORD. (2011). Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables.

MITECORD (2024) SIOSE (Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España, integrado dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio, PNOT, cuyo objetivo es generar una base de datos de Ocupación del Suelo para toda España).

CNIG Modelo digital del terreno (MDT) con una resolución 5x5 metros (Para España).
Extraído del CNIG

CNIG. Ortofoto PNOA-máxima actualidad.

ANEXOS

ENLACES UPM-drive

Anexo Va, Mapas de inundación y perfiles transversales.

<https://drive.upm.es/index.php/s/nKJG7RDioEdweDp>

Anexo Vb, Capas para SIG de los mapas de cota de inundación y calados de agua.

<https://drive.upm.es/index.php/s/K9Ky2um187yW2Hk>

ENLACES GOOGLE-drive

Anexo Va, Mapas de inundación y perfiles transversales.

https://drive.google.com/file/d/1b5Wg0kwI91E_FsUGEQUA6I7P9QCYcp6e/view?usp=sharing

Anexo Vb, Capas para SIG de los mapas de cota de inundación y calados de agua.

https://drive.google.com/file/d/1ezlu_Xlgew2fqUIC2yLQeK2rZcXUF3tD/view?usp=sharing