



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Simulación numérica de la inyección de
sedimentos en el Delta del río Ebro

Autor/es

Guillermo Cubeles Martín

Director/es

Pilar Brufau García

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2018



**DECLARACIÓN DE
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD**

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. GUILLERMO CUBELES MARTÍN,

con nº de DNI 18454343V en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

GRADO, (Título del Trabajo)

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA INYECCIÓN DE SEDIMENTOS EN EL DELTA DEL
RÍO EBRO

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada
debidamente.

Zaragoza, 15 NOVIEMBRE 2018

Fdo: GUILLERMO CUBELES

Resumen

Los cambios en la morfología fluvial aguas abajo de la presa de Flix, en el Delta del Ebro, durante la segunda mitad del siglo XX, muestran la pérdida de áreas sedimentarias activas. La falta de sedimento, la reducción de las crecidas y la subida del nivel del mar, debida al cambio climático, amenazan la subsistencia de este ecosistema. Por ello, se han llevado a cabo pruebas piloto de inyección de sedimentos puntuales (Proyecto LIFE Ebro-Admiclim). Nuestro objetivo ha consistido en simular numéricamente, con el programa RiverFlow2D, la eficacia de esta propuesta (prueba B2 del proyecto) y lanzar otras propuestas alternativas que pudieran ser más efectivas. Se han obtenido resultados y se han comparado entre ellos para diferentes tipos de escenarios en los que se contempla una inyección de sedimentos puntual y en diferentes puntos (hasta tres), localización de la inyección (tramo superior, medio e inferior) y caudales de agua y sedimentos adecuados. Los resultados de las simulaciones indican en primer lugar que el flujo de agua es determinante en la circulación y posterior deposición de sedimentos; en segundo lugar, que la localización de la inyección de sedimentos es crucial para que ésta llegue a la zona de interés; y por último que es necesario realizar medidas para poder calibrar la herramienta de cálculo y así mejorar la precisión de los resultados antes de proceder a la inyección real de sedimentos.

Índice

1. Introducción.....	12
1.1. Planteamiento del problema	18
1.2. Objetivos.....	20
2. Procedimiento seguido para realizar las simulaciones	21
3. Análisis de resultados.....	23
4. Conclusiones y trabajo futuro.....	35
5. Bibliografía.....	37
Anexo 1. Modelo de aguas poco profundas.....	39
Anexo 2. Pre-proceso de datos	42
Anexo3. Generación de la condición inicial en el cauce	63
Anexo 4. Resultados de las simulaciones numéricas.....	65
Escenario 1: inyección de sedimentos en tres puntos (Xerta, Tortosa y Amposta).....	65
Escenario 2: inyección en un punto (Xerta)	76
Escenario 3: inyección de sedimentos en tres puntos (Xerta, Amposta y Deltebre).....	80
Escenario 3.1: inyección de caudal de agua en Xerta tras el ciclo de vertido de agua y sedimentos del escenario 3	87
Escenario 4: inyección de sedimentos en un punto (Deltebre).....	100
Escenario 5: no inyección de sedimentos.....	106

Índice de figuras

Figura 1: Producción de arroz cultivado en cada zona de España, según VEREMA.	13
Figura 2: A la izquierda, imagen de Google Maps de la zona del Delta del Ebro en la que el mar impacta con más fuerza sobre el terreno (flecha roja). A la derecha, imagen satélite de la misma zona desde otra perspectiva.	13
Figura 3: Dique de contención que se tuvo que construir con rocas para frenar el avance del mar y proteger el terreno (señalado con la flecha roja en la Figura 2) de la fuerza con la que el agua impacta.	14
Figura 4: Método de vertido de sedimentos mediante barcaza en las pruebas piloto realizadas por el IRTA sobre el cauce del río Ebro en Mora de Ebro y en Benifallet.	15
Figura 5: Imagen satélite (facilitada por el IRTA) en la que se aprecia la mancha de sedimentos en el mar Mediterráneo durante la crecida del Ebro en Abril de 2018.	17
Figura 6: A la izquierda, ubicación de los puntos donde se vertió el sedimento en las pruebas piloto realizadas por el IRTA. A la derecha, esquema de una presa indicando las zonas donde se deposita el sedimento. (Imagen sacada de “el Periódico” 24-05-2017).	18
Figura 7: Evolución de la regresión de la "punta" del Delta del Ebro desde 1957 al año 2000 (imagen obtenida de la pág. web de la iniciativa LIFE Ebro-Admiclim).	19
Figura 8: Imagen que muestra el retroceso del contorno del Delta del Ebro desde 1946 (perímetro amarillo) hasta 2015 (imagen sacada del artículo de “el Periódico” <El delta del Ebro necesita dos millones de toneladas anuales de sedimentos>).	20
Figura 9: Comparativa entre una imagen tomada con satélite de la zona de estudio (izquierda) y un ráster que conforma un MDT (derecha).	21
Figura 10: Imagen en ParaView del cauce mallado.	22
Figura 11: Ubicación sobre el MDT de todas las condiciones de contorno de entrada y salida de caudal de agua y sedimentos.	24
Figura 12: Evolución temporal del caudal de sedimentos que atraviesa la sección de medida situada en el Delta del Ebro (Figura 11), para cada una de las simulaciones en los distintos escenarios.	25
Figura 13: A la izquierda, altura de agua en el cauce (verde) sobre el MDT (gris) en el tiempo final de la simulación bajo los escenarios 2 ó 3 (resultados similares). A la derecha, caudal de sedimento (azul) sobre vectores velocidad (rojo) donde se aprecian las zonas de depósito del sedimento.	26
Figura 14: Imagen satélite de la superficie Deltaica (IGN).	27
Figura 15: Evolución temporal del caudal de sedimentos en las secciones de medida (Figuras 88 y 93), para el escenario 5 (izquierda) y para el escenario 4 (derecha).	28
Figura 16: Evolución temporal del caudal de sedimentos en la sección del Delta, en el escenario 5 (izquierda) y en el escenario 4 (derecha).	28

Figura 17: Detalle de mapa de extensión de la lámina de agua (verde) sobre MDT (gris) (arriba) y extensión de sedimentos (azul) sobre vectores de velocidad (rojo) (abajo) en el tramo de la planicie Deltaica en t=24h, para los escenarios 4 y 5.....	29
Figura 18: Ampliación del MDT, donde están situados los puntos de observación (PD1, PD2, PD3, PD4, PD5) entre Deltebre y la desembocadura.....	30
Figura 19: Altura de agua/sedimento sobre mapa de terreno tras t=10h de simulación con un Q=1400m ³ /s posterior a un ciclo de vertido de sedimento.	32
Figura 20: Evolución temporal del aumento/disminución de la altura del lecho del río, en los puntos de medida ubicados en la Figura 11.	33
Figura 21: Evolución temporal del caudal de sedimento transportado en las secciones de medida de Xerta, Amposta, Tortosa y Delta (izda.) y ampliación de la del Delta (dcha.) obtenidos de la simulación de una avenida de Q=1400m ³ /s posterior a un ciclo de vertido.	34
Figura 22: Imagen de un tramo del cauce integrado en el MDT utilizado en el presente trabajo.....	39
Figura 23: Mapa geográfico del terreno, con la ubicación del inicio y el fin del dominio de cálculo, y las ciudades o municipios con transigencia en el proyecto, por los que pasa el Ebro.....	42
Figura 24: Cuadrantes seleccionados en la cuadrícula del IGN.	42
Figura 25: Detalle del mapa de elevaciones de cada una de las cuadrículas obtenidas del IGN que conformarán el dominio de estudio.....	43
Figura 26: Combinación de los 5 rásteres iniciales para obtener uno único que contiene los datos de elevación del terreno z(m). Colores rojos indican zonas más altas, colores azules indican cotas más bajas.....	44
Figura 27: Espectro de colores del ráster ensamblado para la variable cota del terreno (z) expresada en metros.....	45
Figura 28: Espectro acotado para el dominio que conforma la malla de cálculo (desde la cota -7m hasta 88 m).....	45
Figura 29: Sección transversal del cauce del Ebro a su paso por Tortosa.	46
Figura 30: Ubicación de las secciones guía sobre el ráster, representadas con los puntos en color verde.	47
Figura 31: Ubicación de las 64 secciones transversales que definen el cauce del río en el tramo de estudio.	48
Figura 32: Ejemplo de fichero .dat que recoge los datos (x, y ,z) de todos los puntos que forman todas las secciones transversales que definen el cauce del río en el tramo de estudio.	49
Figura 33: Ejemplo gráfico de puntos con cota de elevación de terreno de una de las secciones transversales que definen el cauce del río.....	49

Figura 34: Delimitación de las orillas del río Ebro en el tramo de estudio sobre el ráster inicial. De color amarillo aparece marcada la orilla derecha (según está orientada la imagen en planta) y de color rojo aparece de la orilla izquierda.	50
Figura 35: Ráster del cauce reconstruido, representado por el valor de sus cotas en metros.	51
Figura 36: Capa "Cauce", en color amarillo, generada en QGIS sobre el ráster del cauce reconstruido, delimitando toda la superficie del cauce. Permite la división del ráster del cauce en 2 partes: vertical y horizontal.	52
Figura 37: Rásteres generados a partir de los polígonos del cauce reconstruido del río Ebro en el tramo de estudio.	52
Figura 38: Capas sobre el ráster inicial correspondientes a ambas márgenes del tramo de estudio del río Ebro. En color morado a la izquierda la margen derecha y a la derecha en color cian la margen izquierda.	53
Figura 39: Ráster combinación de ambas márgenes del tramo en estudio.	54
Figura 40: Ráster final del dominio a modelizar.	54
Figura 41: Detalles de pixeles en blanco a lo largo de las orillas del río, justo en las partes donde se solapan los rásteres de las márgenes con los del cauce.	55
Figura 42: Iconos del complemento SERVVAL del programa QGIS.	55
Figura 43: Dominio acotado sobre el ráster que conforma el MDT.	56
Figura 44: Sobre el MDT, línea de color amarillo que marca la zona en la que se va a refinar la malla de cálculo. Arriba y abajo, detalle de dos zonas del cauce en las que se va a refinar que corresponden a zonas de vertido de sedimentos.	58
Figura 45: Detalles de la malla de cálculo en dos zonas del dominio, donde se puede apreciar el refinamiento de la malla en el cauce (tamaño de celda de 15m) frente al resto del dominio (tamaño de celda 75m).	58
Figura 46: Diferentes perspectivas de la malla sobre el cauce, donde se puede apreciar el tamaño de las celdas del cauce.	59
Figura 48: Superficie sobre la que se aplica un coeficiente de rozamiento de Manning $n = 0.025$, delimitada por el contorno en color verde.	60
Figura 47: Capa en QGIS, que representa la zona del dominio donde, el terreno es erosionable hasta 0.5 m.	60
Figura 49: Arriba, ubicación de las condiciones de contorno sobre el ráster del MDT y sobre una imagen satélite del terreno real (aguas arriba en Xerta y aguas abajo en Desembocadura). En la parte inferior, polígonos que delimitan dónde se encuentran las condiciones de contorno y las zonas de inyección de sedimento a lo largo del cauce.	61
Figura 50: Localización de los puntos de observación y secciones transversales de medida iniciales.	62

Figura 51: Evolución temporal de la altura de agua sobre el dominio de cálculo para generar la condición inicial.	64
Figura 52: Ubicación de los puntos de inyección de sedimentos sobre el ráster (1, 2 y 3) y condición de contorno de salida libre (4, en el escenario 1).....	65
Figura 53: Valores de los parámetros usados en la modelización del transporte de carga de fondo y en suspensión de sedimentos en el programa RiverFlow2D.....	67
Figura 54: Vectores de velocidad sobre el mapa de alturas de agua del dominio para cada una de las tres condiciones de contorno de entrada.	68
Figura 55: Imagen de satélite de la superficie Deltaica (IGN).....	69
Figura 56: Extensión de la superficie del agua simulada sobre el terreno en t=0, 8, 16 y 20h en la zona del Delta del Ebro.	70
Figura 57: Mapas 2D de módulo y vectores de velocidad simulados en la llanura Deltaica en t=2, 12 y 20h.	71
Figura 58: Hidrogramas de agua y caudal de sedimento introducidos en el cauce, en las diferentes condiciones de contorno detalladas en la Figura 52, durante las 20h de simulación.	72
Figura 59: Evolución temporal de la variación de la profundidad del lecho, medida en los puntos de observación P1, P2, P3 P4 (ubicados en la Figura 52).	72
Figura 60: Evolución temporal de la cantidad de sedimentos en los puntos 1, 2 y 3 de la Figura 52.	74
Figura 61: Hidrograma desde el 1/1/2018 hasta el 21/10/2018, obtenido en la web del SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica) en la estación de aforo de Tortosa. 75	75
Figura 62: Localización de las 4 secciones transversales de medida, (Flix, Tortosa, Amposta, Delta), de los 4 puntos de observación (P1, P2, P3, P4), de la condición de contorno de entrada (Entrada inicio) y de la condición de contorno de salida (Salida) sobre el MDT en el escenario 1.....	76
Figura 63: A la izquierda, progresión de la sedimentación/erosión del lecho del cauce en los 4 puntos de observación (P1, P2, P3 y P4 de la Figura 62) . A la derecha, progresión del calado en los mismos puntos durante el periodo de simulación.	77
Figura 64: Mapa de evolución de la extensión de agua sobre el MDT en t=0, 8, 16 y 24h en el escenario 2.....	78
Figura 65: Detalle de mapa de extensión de la lámina de agua (verde) sobre MDT (gris) y extensión de sedimentos (azul) sobre vectores de velocidad (rojo) en el tramo P2-P3 (Tortosa-Amposta) en t=6h (izquierda) y t=24h (derecha).	79
Figura 66: Detalle de mapa de extensión de la lámina de agua (verde) sobre MDT (gris) (arriba) y extensión de sedimentos (azul) sobre vectores de velocidad (rojo) (abajo) en el tramo de la planicie Deltaica en t=24h.....	79
Figura 67: Localización de las 4 secciones transversales de medida (Flix, Tortosa, Amposta, Delta), de los 4 puntos de observación (P1, P2, P3, P4), de las condiciones de	

contorno de entrada (Entrada Inicio, Entrada de Amposta y Entrada de Deltebre) y de la condición de contorno de salida (Salida) sobre el MDT en el escenario 3.	81
Figura 68: Evolución temporal de los caudales de agua (derecha) y sedimentos (izquierda) que atraviesan las 4 secciones de medida en el escenario 3.	82
Figura 69: Detalle de mapa de extensión de la lámina de agua (verde) sobre MDT (gris) a la izquierda, mapa de velocidades en el centro y extensión de sedimentos (azul) a la derecha en el tramo P1-P2 (Xerta-Tortosa) en t=8h (arriba) y t=18h (abajo), en el escenario 3.	83
Figura 70: Imagen satélite del IGN en la que se muestra la bifurcación del cauce.	84
Figura 71: Evolución temporal de la altura de sedimento en los 4 puntos de observación (P1, P2, P3 y P4 de la Figura 67), en el escenario 3.	85
Figura 72: Evolución temporal del caudal de sedimentos en la sección de medida de la desembocadura en el escenario 3.	86
Figura 73: Localización de las 4 secciones transversales de medida (Flix, Tortosa, Amposta, Delta), de los 4 puntos de observación (P1, P2, P3, P4), de la condición de contorno de entrada (Entrada inicio) y de la condición de contorno de salida (Salida) sobre el MDT en el escenario 3.1.	87
Figura 74: Representación de la altura de la lámina de agua sobre el terreno en t=0h, t=4h, t=8h y t=10h para una entrada de caudal de $Q_w=1400\text{m}^3/\text{s}$ posterior al ciclo de vertido del escenario 3.	88
Figura 75: Representación de la velocidad del flujo sobre el cauce en t=2h, t=4h, t=8h y t=10h para un caudal de $Q=1400\text{m}^3/\text{s}$ posterior al ciclo de vertido del escenario 3.	89
Figura 76: Ampliación sobre el MDT de la planicie Deltaica en la que se aprecia donde se deposita el sedimento para el estado t=10 h, escenario 3.1.	90
Figura 77: Ampliación sobre el MDT de la planicie Deltaica complementaria a la Figura 76, en la que se aprecia el calado del cauce para el estado t=10 h, en el escenario 3.1.	90
Figura 78: Imagen de satélite de la zona de estudio donde en color amarillo se señalan las zonas en las que se produce desbordamiento de agua y acumulación de sedimento.	91
Figura 79: Evolución temporal del caudal de sedimento transportado en las secciones de medida de Xerta, Amposta, Tortosa y Delta (izda.) y ampliación de la del Delta (dcha.) obtenidos de la simulación de una avenida de $Q=1400\text{m}^3/\text{s}$ posterior a un ciclo de vertido.	91
Figura 80: Evolución temporal de la altura del lecho en el punto de observación situado en el Delta, en el escenario 3.1.	92
Figura 81: Evolución de la sección del Delta (cota de terreno) tras t=10h de simulación con un caudal $Q=1400\text{m}^3/\text{s}$ posterior a un ciclo de vertido.	93
Figura 82: Altura de agua sobre mapa de terreno tras t=10h de simulación con un $Q=1400\text{m}^3/\text{s}$ posterior a un ciclo de vertido. El sedimento depositado aparece representado con puntos rojos.	94

Figura 83: Vectores de velocidad sobre mapa de terreno y altura de agua tras t=10h de simulación con un Q=1400m ³ /s posterior a un ciclo de vertido.....	95
Figura 84: Detalle cualitativo del sedimento depositado sobre mapa de terreno tras t=10h de simulación con un Q=1400m ³ /s posterior a un ciclo de vertido en las zonas a), b) y c) de la Figura 82.....	96
Figura 85: Imágenes de satélite del IGN de las zonas detalladas de la Figura 83 a), b) y c). Localización de zonas de acumulación de sedimento con flechas rojas.....	97
Figura 86: Detalle del sedimento depositado sobre mapa de terreno tras t=10h de simulación con un Q=1400m ³ /s posterior a un ciclo de vertido en la zona d) de la Figura 82 (izda.) e imagen de satélite de esta misma zona (dcha.).....	98
Figura 87: Imagen satélite (facilitada por el IRTA) en la que se aprecia la mancha de sedimentos en el mar Mediterráneo durante la crecida del Ebro en Abril de 2018.....	99
Figura 88: Localización de las secciones transversales de medida (Flix, Tortosa, Amposta, Delta, DTL1, DTL2 y DTL3), de los puntos de observación (PD1, PD2, PD3, PD4 y PD5), de las condiciones de contorno de entrada (Entrada Inicio y Entrada de Deltebre) y de la condición de contorno de salida (Salida) sobre el MDT en el escenario 4.....	100
Figura 89: Evolución temporal del caudal de sedimentos medido en todas las secciones de medida (Figura 88), para el escenario 4.....	102
Figura 90: Evolución temporal del caudal de agua (derecha) y sedimentos (izquierda) en la sección de medida situada en la desembocadura en el escenario 4.....	102
Figura 91: Evolución temporal del caudal de agua y sedimentos en la sección de medida situada en la desembocadura en el escenario 4.....	103
Figura 92: A la izquierda la sección del cauce en el Delta, a la derecha caudal de sedimentos por unidad de superficie m ² /s en función de la coordenada “y” de la sección.....	104
Figura 93: Localización de las secciones transversales de medida (Flix, Tortosa, Amposta, Delta, DTL1 (coincidente con el PD1), DTL2 y DTL3), de los puntos de observación (PD1, PD2, PD3, PD4 y PD5), de las condiciones de contorno de entrada (Entrada Inicio) y de la condición de contorno de salida (Salida) sobre el MDT en el escenario 5.....	106
Figura 94: Evolución temporal del caudal de sedimentos en las secciones transversales de medida en el escenario 5.....	107
Figura 95: Evolución de la altura del fondo del cauce en los 5 puntos de observación situados entre Deltebre y el propio Delta (Figura 93) bajo el escenario 5.....	108
Figura 96: Ampliación de la evolución de la altura del lecho del río en el punto de observación PD5 (izquierda) y del caudal de sedimentos en la sección de medida del Delta (derecha) en el escenario 5.....	109
Figura 97: Calado en el cauce (parte superior) y velocidad del flujo (parte inferior) en t=24h bajo el escenario 5.....	110

Índice de tablas

Tabla 1: Datos de caudales de agua y sedimentos en cada condición de contorno de entrada y medidos en la sección transversal situada en el Delta, para los escenarios más relevantes. 24

Tabla 2: Evolución de la altura del fondo del cauce (carga de fondo), en los 5 puntos de observación situados entre Deltebre y el propio Delta (figura), a lo largo de la simulación realizada sobre el escenario 4 y 5. 31

Tabla 3: Pendientes de los tres tramos que consolidan el cauce. 48

1. Introducción

Merece la pena comenzar este estudio remontándose a una duda existencial que a toda persona le ha surgido en algún momento de su vida:

¿El agua de los ríos se malgasta/derrocha en los mares?

En este caso la pregunta se traslada al río Ebro y a su desembocadura en el mar Mediterráneo. La respuesta es sencilla, obviamente no, es fundamental y obligatorio que el agua de los ríos desemboque en los mares, y que además lo haga con un caudal abundante; en el caso contrario este estudio carecería de sentido.

El agua del río Ebro es totalmente necesaria para la consolidación de las playas de arena que tiene el Delta en todo su contorno, gracias a la cantidad de sedimentos que el agua del Ebro deposita en el propio Delta. De la misma manera que todos los líquenes y microorganismos de origen vegetal y animal que transporta el agua del Ebro permiten que todas las plantaciones de moluscos que existen en la zona puedan prosperar, así como todas las especies de peces tanto de agua dulce como salada que coexisten en el hábitat del Delta del Ebro.

En el párrafo anterior, aparece por primera vez el término sedimentos, el cual se define por la RAE **[1]** como: *“materia que, habiendo estado suspensa en un líquido, se posa en el fondo por su mayor densidad: siendo la sedimentación la acumulación de estos sedimentos de diversa procedencia, realizada por diversos agentes geológicos externos”*.

El tránsito de sedimentos aguas abajo, a lo largo de un río, permite el fenómeno de la sedimentación en las zonas de estuarios o Deltas, donde la velocidad del flujo es lo suficientemente lenta como para que el sedimento caiga por gravedad al fondo y se deposite en él. Este va a ser el eje central sobre el que se va a basar la parte de simulación de este proyecto.

Dentro del entorno del Delta del Ebro tenemos dos sectores muy diferenciados que son los que más rédito sacan de la explotación de esta reserva natural.

El sector del ocio y turismo: el cual se consolida año tras año ofreciendo un gran abanico de opciones de ocio a sus visitantes, visitas en barco a la parte final del río y la desembocadura, la pesca tanto en agua dulce como agua salada, kayak, esquí acuático, y otras actividades acuáticas para las cuales la desembocadura del río Ebro es un escenario idóneo.

La agricultura es la otra gran fuente de ingresos que genera la explotación de los recursos del entorno natural, ya que la zona del Delta del Ebro es una de las mayores productoras de arroz de toda la península. Según un artículo de EUROPAPRESS **[2]**, aproximadamente el 65% de la superficie del Delta del Ebro está dedicada al cultivo del arroz, según AGROMAS **[3]** unas 15.600 hectáreas.

Pero la gran capacidad productora de arroz del delta del Ebro, no solo tiene importancia a nivel regional. Según VEREMA **[4]**, en España se producen al año más de 720.000 toneladas de arroz, concentradas en tres zonas productoras principales, tal y como se muestra en la **Figura 1**. Es decir, en el Delta del Ebro se vienen a producir unas 110.000 toneladas de arroz anuales.

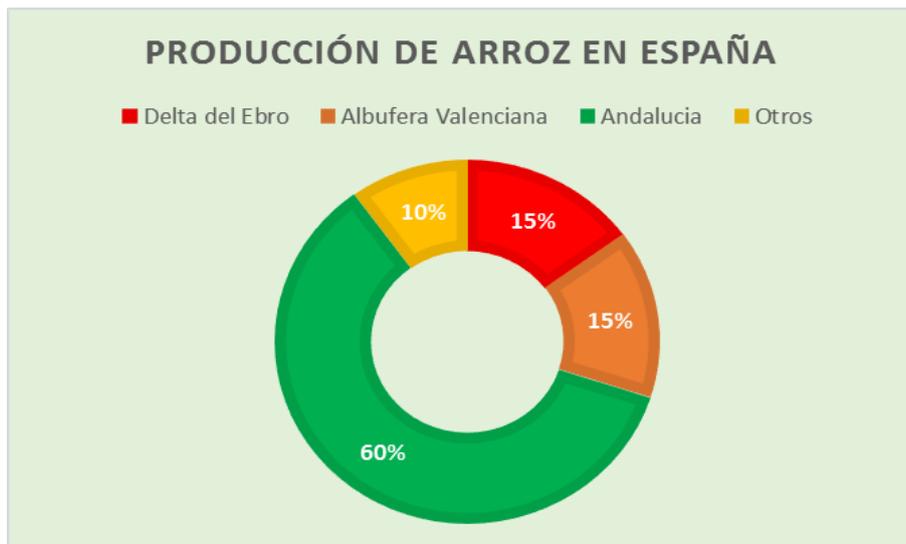


Figura 1: Producción de arroz cultivado en cada zona de España, según VEREMA.

En el mismo artículo de EUROPAPRESS [2], y según las previsiones del modelo creado con el proyecto “Rises-AM” y financiado por la UE, se prevé que a finales de siglo el nivel del mar habrá subido 73 centímetros (con una probabilidad del 66%). Esto provocaría que de cara al año 2100, el 50% del terreno del Delta del Ebro quedase inundado, perdiendo de esta manera, el 30% de la producción anual [5]. En la **Figura 2** se muestra una imagen de satélite de la zona del Delta del Ebro que se ve más afectada por el impacto del mar.

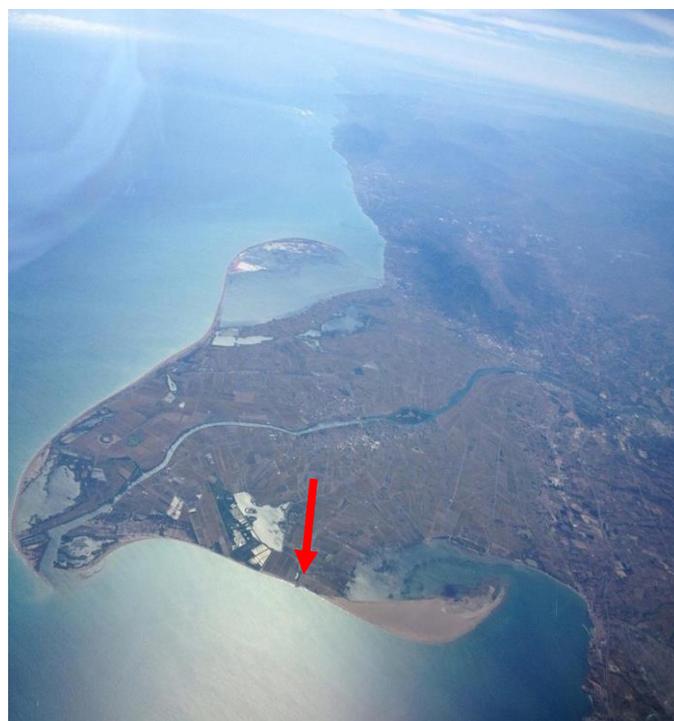
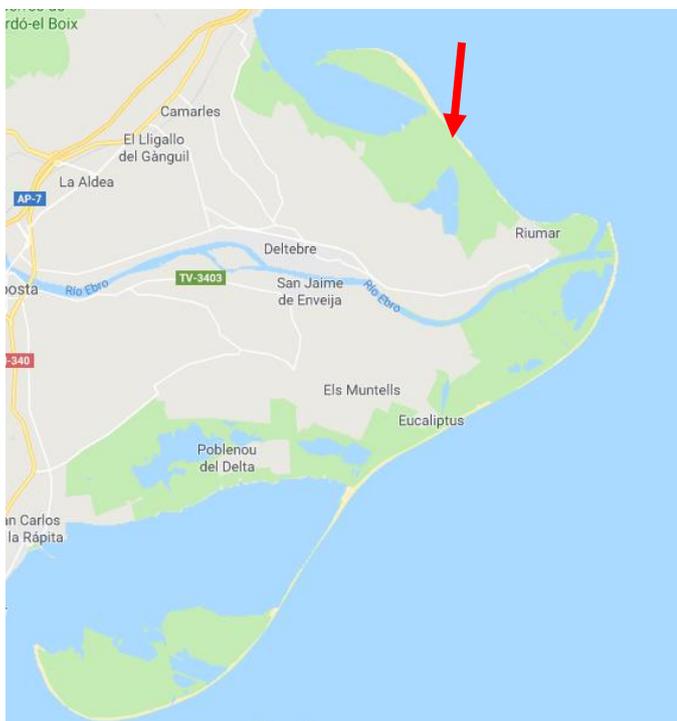


Figura 2: A la izquierda, imagen de Google Maps de la zona del Delta del Ebro en la que el mar impacta con más fuerza sobre el terreno (flecha roja). A la derecha, imagen satélite de la misma zona desde otra perspectiva.

No es necesario esperar al transcurso de los próximos 80 años para darse cuenta de que la llegada del agua del mar a los arrozales es inminente. Durante el temporal más importante que ha sufrido el Delta del Ebro en los diez últimos años, a finales de enero de 2017, y según lo publicado por “el Periódico” [5], el temporal provocó que el mar llegase hasta los arrozales, destrozando caminos, inundando fincas y tragándose casi por entero playas salvajes, sobre todo en las localidades de Deltebre y Les Cases d'Alcanar.

En la **Figura 3** se pueden apreciar las medidas que se tuvieron que emplear para frenar el avance del mar tierra adentro. No quedó otra opción, más que trasladar tierra y rocas para construir un dique que permitiese frenar la fuerza con la que las olas incidían contra el terreno que conforma el contorno del Delta del Ebro (ver **Figura 2 y 3**).



Figura 3: Dique de contención que se tuvo que construir con rocas para frenar el avance del mar y proteger el terreno (señalado con la flecha roja en la Figura 2) de la fuerza con la que el agua impacta.

La opción de construir un dique permanente para mitigar las posibles acciones que conlleva la subida del nivel del mar es algo que las autoridades de la zona vienen pidiendo desde hace tiempo.

De momento, las medidas se limitan a construir un cordón de arena que permita proteger la zona que conforma los Calaixos, terreno que forma “la punta” del Delta del Ebro. Según lo publicado en “el Periódico de Aragón” [6], en junio de 2018 comenzaron las obras con un aporte de 20.000 metros cúbicos de arena, las cuales se vieron interrumpidas por el impacto en el ecosistema y por la incompatibilidad con los turistas que vienen a conocer las playas del Delta del Ebro.

En este momento es cuando comienza el debate en cuanto a qué medidas son las adecuadas para mitigar el problema. Si a ello se le suma, que la construcción de un dique no asegura la salvación del ecosistema del Delta del Ebro, es cuando coge fuerza el proyecto Ebro-Admiclim LIFE, promovido por el IRTA (Instituto de Investigación y Tecnologías Alimentarias, ecosistemas acuáticos, de la Generalitat de Catalunya).

En el artículo [6] citan, palabras textuales de Carles Ibáñez (jefe de la Unidad de Ecosistemas Acuáticos del IRTA): «Los estudios demuestran que la única solución sostenible y buena es transportar aguas abajo sedimentos, cosa que se hace en muchos países; no está claro que los espigones funcionaran; podrían hundirse en la arena».

Según lo enunciado en la presentación del proyecto en la web [7], la iniciativa europea LIFE Ebro-Admiclim (ENV/ES/001182): “plantea acciones piloto de mitigación y adaptación al cambio climático en el Delta del Ebro (Cataluña, España), una zona muy vulnerable a la subida del nivel del mar y la subsidencia. Se plantea un enfoque de gestión integrada del agua, del sedimento y de los hábitats (arrozales y zonas húmedas), con el objetivo múltiple de optimizar la elevación del suelo (mediante los aportes de sedimento inorgánico y de materia orgánica), reducir la erosión costera, aumentar la acumulación (secuestro) de carbono en el suelo, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y mejorar la calidad del agua. Este tipo de enfoque no se ha aplicado hasta el momento en la Unión Europea, y es claramente innovador a escala internacional.”

Según la información facilitada por Albert Rovira, coordinador del proyecto LIFE Ebro-Admiclim, quien se encargó de coordinar las pruebas piloto para las inyecciones de sedimentos el pasado mes de mayo, se realizaron dos pruebas piloto en el cauce. La primera se realizó en el paso del cauce por la localidad de Mora de Ebro y la otra por la localidad de Benifallet. En la **Figura 6** aparecen ubicadas estas poblaciones en la trayectoria del cauce del Ebro donde se realizaron las inyecciones piloto de sedimentos.

En la prueba realizada en Mora de Ebro, cuando por el río bajaba un caudal aproximado de 600 m³/s, se vertió durante 4 minutos un volumen de sedimentos de entre 20 y 25 m³, conformados por arenas de cantera con un diámetro de grano de 0.125 mm. Se esperó durante 45 minutos, y se volvió a verter la misma cantidad de sedimento durante otro intervalo de 4 minutos de tiempo.



Figura 4: Método de vertido de sedimentos mediante barcaza en las pruebas piloto realizadas por el IRTA sobre el cauce del río Ebro en Mora de Ebro y en Benifallet.

La prueba en Benifallet se realizó al día siguiente, con una mecánica totalmente similar. Como se puede ver en la **Figura 4**, los vertidos se realizaron mediante una barcaza situada en el centro del cauce, a la que se le había anclado un contenedor. Previamente, desde la orilla, se había rellenado el contenedor con la arena de cantera.

El método de vertido de sedimentos (no inyección), consistió en bombear agua del río al contenedor con la arena, mediante una bomba situada en la propia barcaza, y en el momento en que el flujo de agua y arena podía empezar a fluir, se abrió una trampilla en la parte inferior del contenedor, que permitía que el flujo cayera al río.

La iniciativa que llevó a cabo el IRTA, a través del proyecto LIFE Ebro-Admiclim, fue el punto de partida para el planteamiento de este trabajo de fin de grado de Ingeniería Mecánica. A raíz de contemplar la solución de verter sedimentos mediante una barcaza para que éstos descendieran aguas abajo por el cauce del río Ebro desde las localidades de Mora de Ebro y Benifallet y visto que los resultados no fueron determinantes; se pensó en ayudar con la simulación numérica. El coste que conlleva realizar el vertido de sedimentos del proyecto no es comparable con el coste de realizar simulaciones numéricas y estas últimas pueden establecer escenarios óptimos de vertido de sedimentos que den los resultados que se desean.

A partir de la medida propuesta por el IRTA, se decidió plantear un estudio basado en la inyección de sedimentos aguas abajo de la última presa con la que cuenta el río Ebro antes de su desembocadura en el Delta del Ebro, la presa de Flix.

De esta manera, durante la evolución del proyecto se han realizado varias simulaciones en las que se varían los flujos de caudal circulante por el Ebro y las cantidades de sedimentos inyectados, así como la ubicación de los puntos donde inyectar dichos sedimentos. Todo ello, con el fin de comprobar si el sedimento es capaz de llegar mar adentro, simplemente gracias al empuje que realiza la fuerza del agua que desciende por el cauce del río; y así lograr un fenómeno parecido al que se aprecia en la **Figura 5**; que se produjo durante la última crecida del Ebro en abril del 2018; y en la que claramente se observa como ésta transportó un gran volumen de sedimentos en su arrastre depositándolos finalmente en el mar.

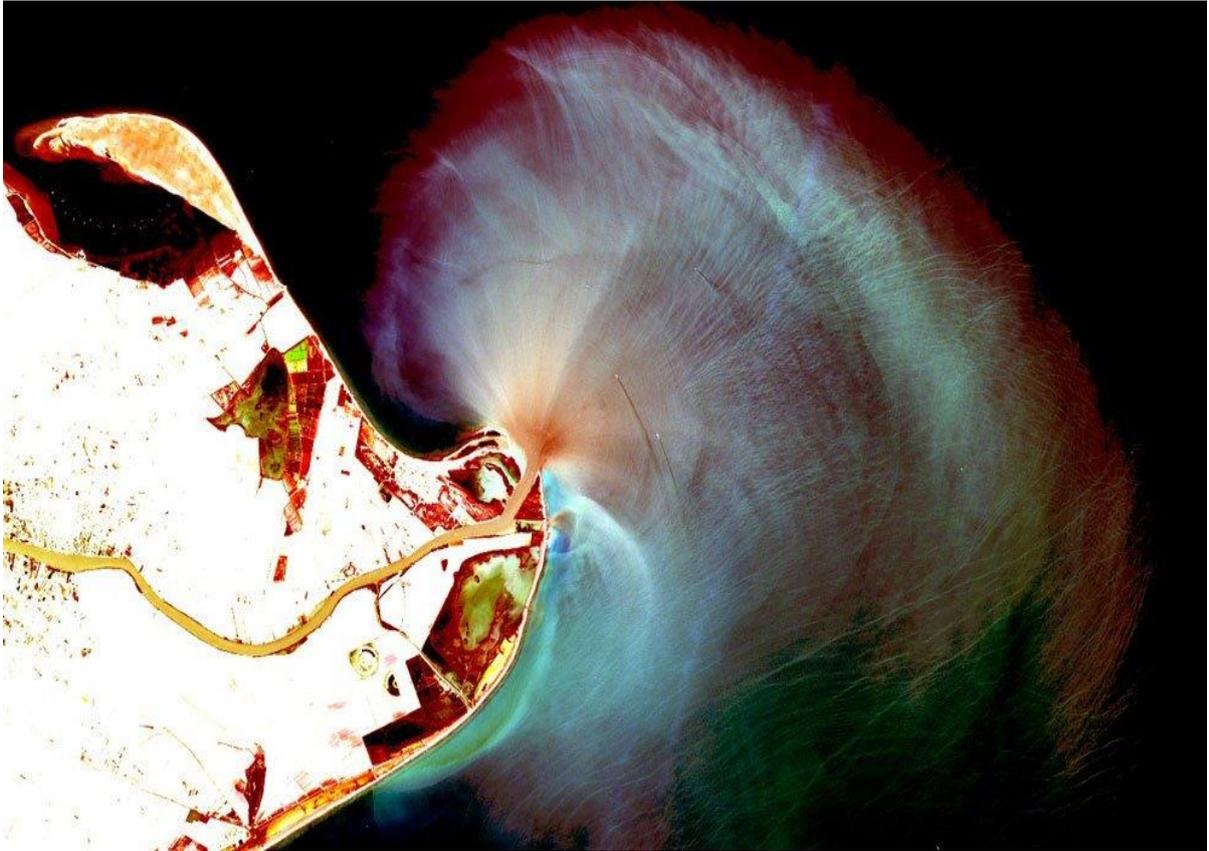


Figura 5: Imagen satélite (facilitada por el IRTA) en la que se aprecia la mancha de sedimentos en el mar Mediterráneo durante la crecida del Ebro en Abril de 2018.

1.1. Planteamiento del problema

A la hora de abordar los objetivos de este proyecto, es necesario presentar las dos causas que hacen necesario este estudio de simulación numérica de inyección de sedimentos en el Delta del río Ebro:

- El gran número de presas que existe en la cuenca del río Ebro, especialmente las que se encuentran en el último tramo antes de llegar a su Delta (Mequinenza, Ribarroja y Flix), las cuales han modificado intensamente el régimen natural del cauce y la carga de sedimentos. Esto conlleva la escasez de los mismos en la desembocadura del Ebro en su Delta.
- El aumento inminente del nivel del mar, consecuencia del aumento de la temperatura provocado por el calentamiento global que sufre el planeta.

Según el artículo de “el Periódico” [5], antes de la existencia de estas presas, llegaban al Delta entre 20 y 30 millones de toneladas anuales de sedimentos, cantidad que en la actualidad se ve reducida a 100.000 toneladas anuales, un 99% menos de su volumen natural; mientras que se estima que serían necesarios un mínimo de 1-2 millones de toneladas anuales para mantener la morfología y el emplazamiento actual del Delta.

La retención de sedimentos en las presas que contienen los pantanos y embalses constituyen lo que se conoce como carga de fondo. Esto provoca que, lógicamente, la capacidad de los pantanos disminuya ya que los sedimentos ocupan un cierto volumen que no puede ser ocupado por agua. Para evitar este problema deberían abrirse las compuertas inferiores de las presas,



Figura 6: A la izquierda, ubicación de los puntos donde se vertió el sedimento en las pruebas piloto realizadas por el IRTA. A la derecha, esquema de una presa indicando las zonas donde se deposita el sedimento. (Imagen sacada de “el Periódico” 24-05-2017).

permitiendo que salga un caudal de agua con la suficiente velocidad, como para que la fuerza que ejerza éste sobre los sedimentos, permita arrastrarlos aguas abajo de la presa.

El problema aparece cuando las empresas que gestionan los recursos hídricos de los pantanos se niegan a realizar vertidos de agua, si no es de carácter obligatorio, ya que para ellos es energía eléctrica que se pierde, lo que acaba traduciéndose en pérdidas económicas, que obviamente no quieren asumir. Es aquí donde aparece el primer escollo o conflicto de intereses a la hora de explotar los recursos hídricos del Ebro en la zona de su Delta.

Este hecho provoca que tanto en la presa de Mequinenza como en la presa de Ribarroja nunca se hayan abierto las compuertas inferiores [5]. Actualmente es imposible abrirlas sin realizar labores de reparación y restauración, debido a la gran cantidad de material que hay acumulado en el fondo y al deterioro de los sistemas y mecanismos que permiten dicha operación.

A esta escasez de tránsito de sedimentos en la parte final del río Ebro, hay que sumarle la causa impuesta por la naturaleza, la cual según IAGUA [8], provoca que la costa retroceda hacia la tierra a razón de 10 metros por año en la zona de la desembocadura; donde ya se perdieron 150 hectáreas en la zona de humedales entre los años 1957 y 2000 (ver **Figura 7**).

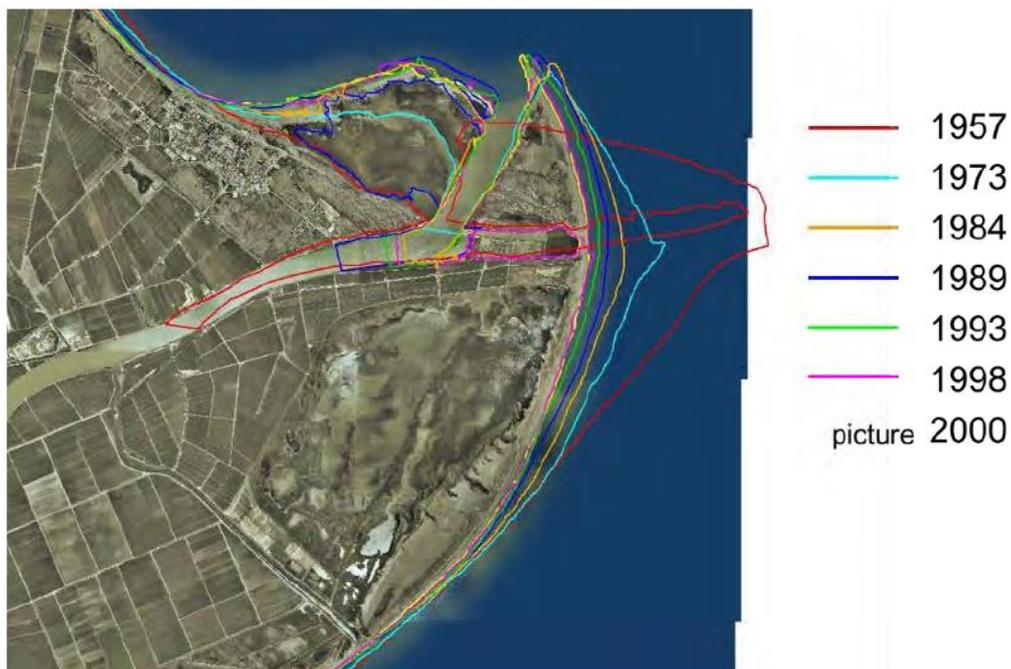


Figura 7: Evolución de la regresión de la "punta" del Delta del Ebro desde 1957 al año 2000 (imagen obtenida de la pág. web de la iniciativa LIFE Ebro-Admiclim).

En la **Figura 8**, se muestra en una imagen más actual, el notable efecto de la regresión en la parte más saliente del Delta; Haciendo evidente que la falta de sedimentos en el flujo de agua que circula por el río Ebro, impide la conservación de la barrera de arena que actúa como coraza previa al perímetro fronterizo entre el mar Mediterráneo y el terreno que conforma el Delta del Ebro. Sin este escudo natural y dada la evolución creciente del nivel del mar, el agua no se encuentra con ningún obstáculo que le impida avanzar tierra adentro.



Figura 8: Imagen que muestra el retroceso del contorno del Delta del Ebro desde 1946 (perímetro amarillo) hasta 2015 (imagen sacada del artículo de “el Periódico” <El delta del Ebro necesita dos millones de toneladas anuales de sedimentos>).

1.2. Objetivos

Con los antecedentes planteados en los apartados anteriores, los objetivos a los que aspira este proyecto se basan en dos aspectos fundamentales para evaluar la viabilidad de la iniciativa del IRTA:

Por un lado, está el análisis del comportamiento que tiene el sedimento vertido en el proyecto LIFE a lo largo de su trayectoria por el cauce del tramo del río Ebro elegido.

Pero, obviamente, el objetivo primordial del proyecto es comprobar mediante el cálculo con métodos numéricos si la cantidad de sedimentos que consiguen alcanzar el Delta del Ebro, dependiendo del escenario de simulación planteado, es suficiente para crear la barrera natural, que se supone contendría la subida del nivel del mar durante los próximos años.

2. Procedimiento seguido para realizar las simulaciones

Al tratarse de un modelo de simulación numérica, se busca en todo momento que el escenario sobre el que se van a lanzar las simulaciones sea lo más semejante posible al escenario real.

En este caso es necesario recrear los perfiles orográficos del río Ebro y su entorno, desde su último azud (situado a la altura de la localidad de Xerta) hasta el mismo Delta del Ebro, con la mayor semejanza posible, así como el valor de los caudales empleados tanto de fluido como de sedimento y las características morfológicas del lecho del río.

Para obtener el dominio o escenario sobre el que lanzar las simulaciones, es necesario seguir una secuencia de pasos que implican a su vez el uso de distintos programas informáticos.

Se parte de la imagen satelital de la zona de estudio (**Figura 9** izquierda). A continuación, se localizan en el IGN los MDT de 5mx5m de la zona, definidos en formato ráster, y con el programa **QGIS** se ensamblan estos rásteres* de las elevaciones del terreno para tener uno único (**Figura 9** derecha). A partir de secciones transversales de medida del cauce se genera el ráster del cauce. Se recorta el ráster de la orilla derecha, orilla izquierda y finalmente se ensamblan ambas orillas con el cauce para crear el ráster definitivo. Una vez que se tiene el ráster, se define el dominio de cálculo y se crea la malla de celdas triangulares no estructuradas adaptadas al terreno donde se almacenarán las variables (ver **Figura 10**).

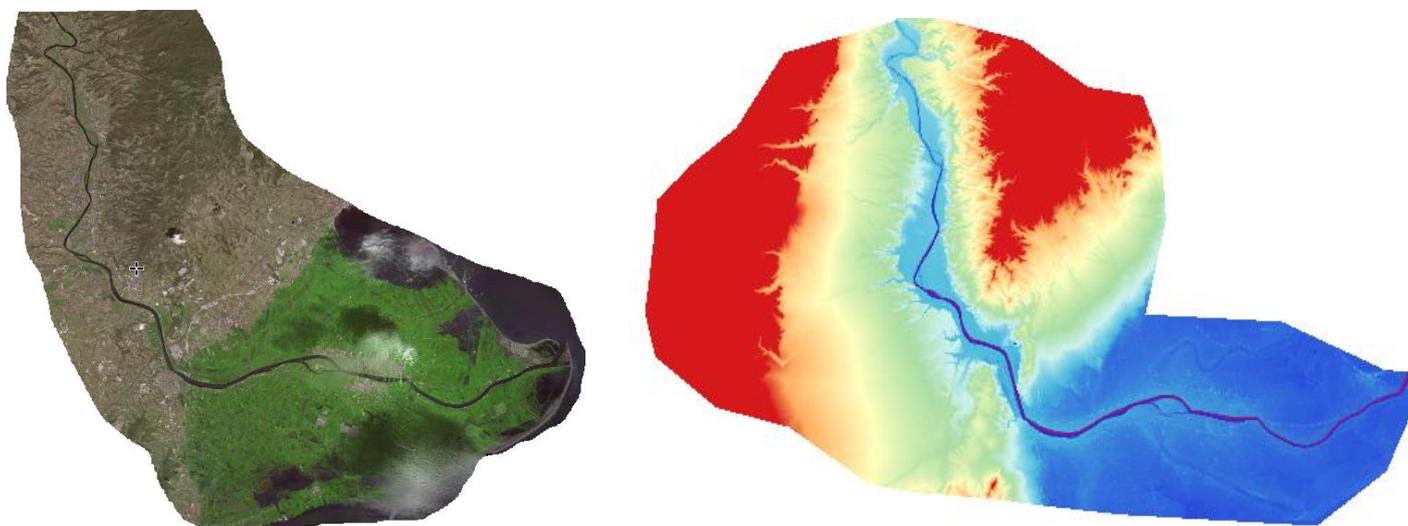


Figura 9: Comparativa entre una imagen tomada con satélite de la zona de estudio (izquierda) y un ráster que conforma un MDT (derecha).

*Según la definición del **Cambridge Dictionary**, el anglicismo ráster, en inglés raster: “a type of computer image that is based on a rectangular grid (= pattern of lines and columns) of pixels (= small dots).”

Según **ArcMap**: “En su forma más simple, un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la cota del terreno. Los rásteres son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados.”

La generación de la malla se realiza con el programa **GMSH**. Posteriormente se asigna un valor de rozamiento según los usos del suelo a todo el dominio computacional y se establece el valor de erosión máxima del suelo. Por último, se delimitan las celdas que formarán parte de las condiciones de contorno y se colocan puntos y secciones de observación en los que se obtendrán resultados detallados, además de los mapas de evolución temporal de todo el dominio.

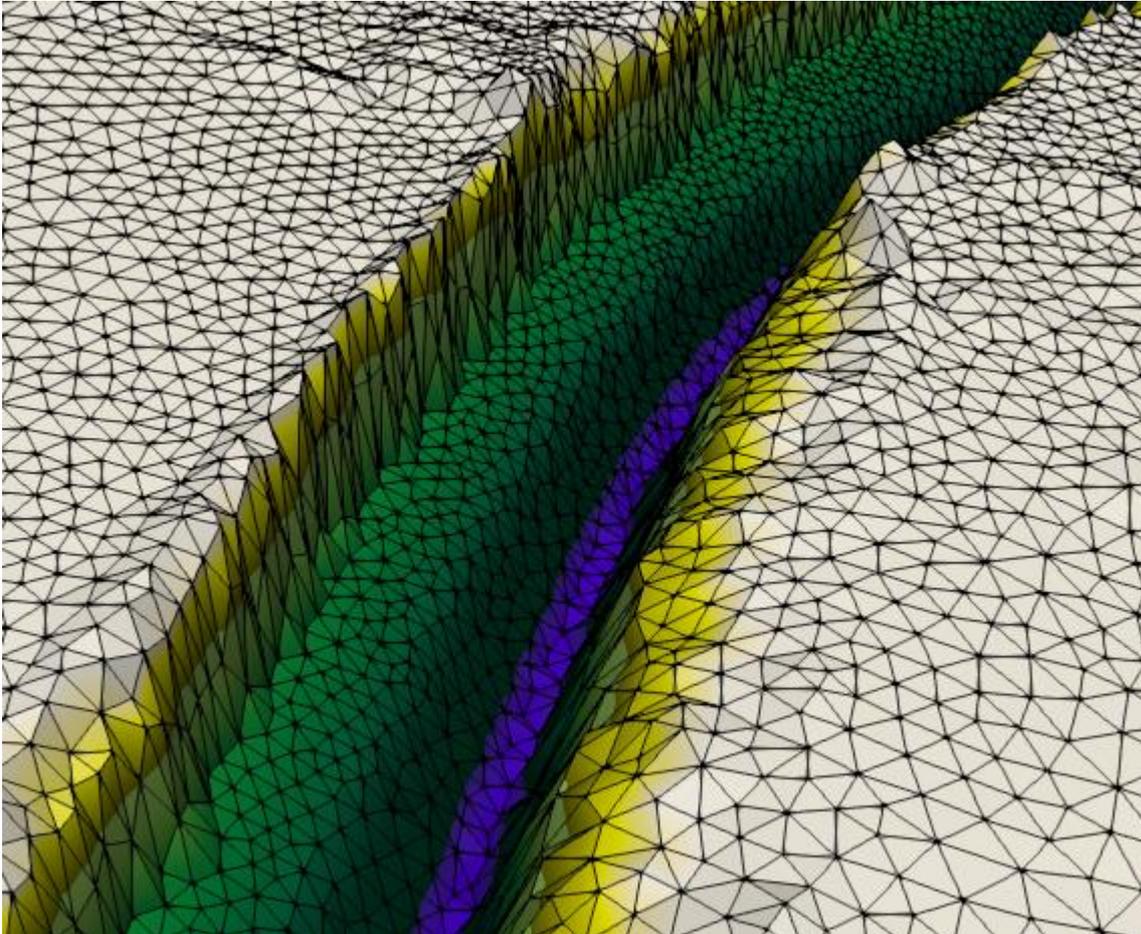


Figura 10: Imagen en ParaView del cauce mallado.

Tras crear el modelo con las condiciones y restricciones requeridas, ya se puede proceder al volcado del mismo al programa **RiverFlow2D** para realizar la consiguiente simulación. En el programa de cálculo se definen parámetros numéricos necesarios para realizar el cálculo.

Los resultados se almacenan en archivos de salida con extensión “.vtk” que se visualizan con el programa **ParaView**. Las variables que se analizan y representan son: *módulo y vector velocidad, calado, elevación del lecho de río, cota del terreno...*

Es necesario contrastar la representación gráfica de ParaView con los datos numéricos que se obtienen de los diferentes puntos de medida y de las secciones, para poder alcanzar unas conclusiones finales con el criterio que el proyecto merece.

3. Análisis de resultados

Para lograr los objetivos enunciados anteriormente se plantean diferentes escenarios de simulación.

Durante las simulaciones realizadas sobre los diferentes escenarios se obtienen parámetros como: altura de agua, velocidad del flujo, caudal de agua, caudal de sedimentos, diferencia de cota en el lecho del cauce, caudal de sedimento por unidad de superficie en ejes “x” e “y”, entre otras.

Con el fin de analizar las relaciones entre estos parámetros y averiguar los factores que influyen en que el sedimento consiga alcanzar la desembocadura del río Ebro, se han planteado los siguientes escenarios:

1. *Inyección de sedimentos en tres puntos (Xerta, Tortosa y Amposta).*
2. *Inyección de sedimentos en un punto (Xerta).*
3. *Inyección de sedimentos en tres puntos (Xerta, Amposta y Deltebre).*
 - 3.1 *Inyección de caudal de agua en Xerta tras el ciclo de vertido de agua y sedimentos del escenario3.*
4. *Inyección de sedimentos en un punto (Deltebre).*
5. *No inyección de sedimentos.*

Todas las características de los escenarios simulados aparecen descritas más en detalle en el Anexo3.

Básicamente, los escenarios se diferencian en las condiciones de contorno (**BC**) de entrada y la cantidad de caudal de agua (**Qw**) y sedimento (**Qs**) que se introduce por cada una de ellas. La condición de contorno de salida permanece invariable en todos los escenarios. Todas las posibles condiciones de contorno de entrada y la de salida aparecen ubicadas en el MDT en la **Figura 11**.

Analizando las simulaciones correspondientes con cada uno de los escenarios planteados, son tres los aspectos o factores que hay que observar detenidamente, en el momento de analizar los resultados:

- Ubicación/es y cantidad de caudal/es de sedimentos inyectado/s mediante cualquiera condición/es de contorno de entrada.
- Cantidad de caudal de agua (**Qw**) entrante por la condición de contorno de entrada al inicio del cauce.
- Tiempo de simulación.

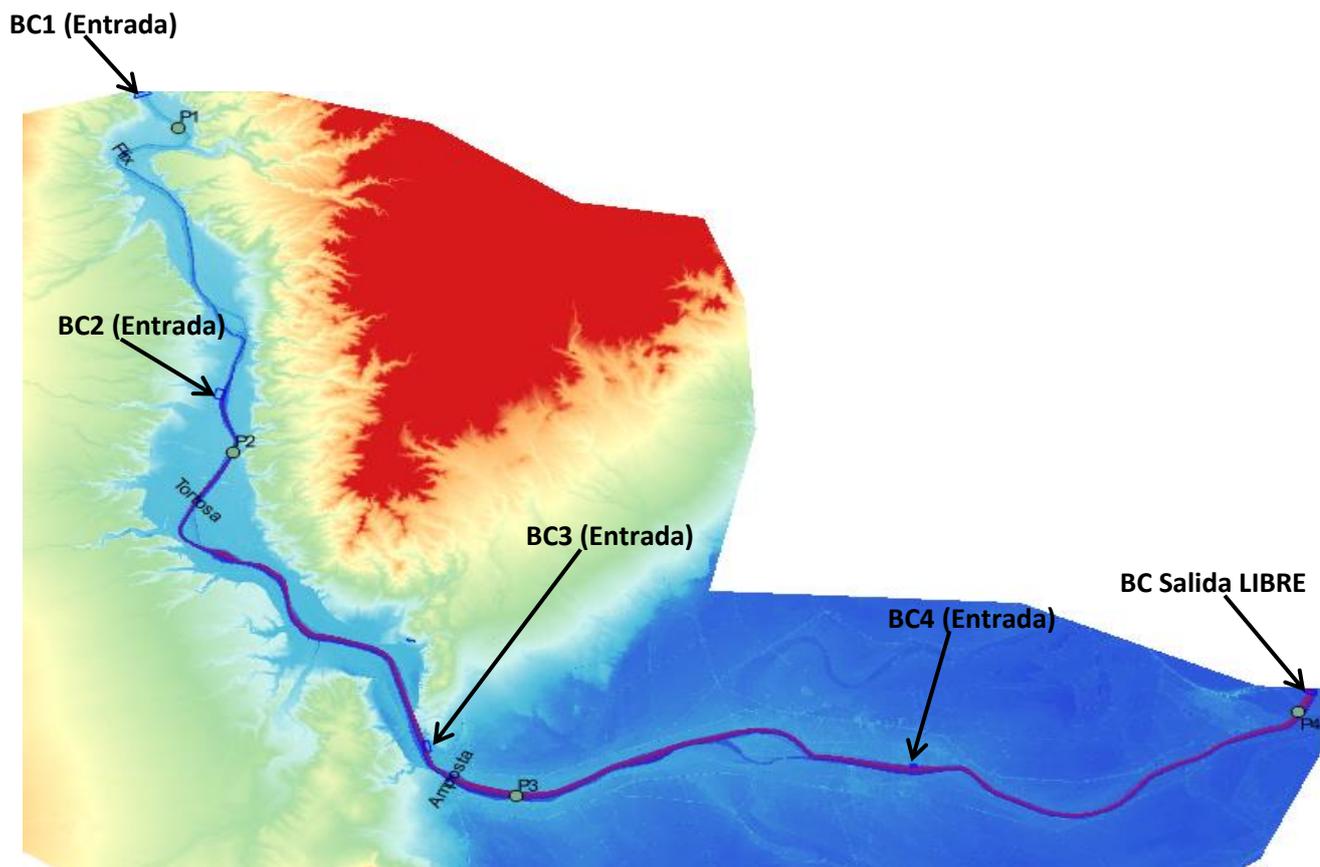


Figura 11: Ubicación sobre el MDT de todas las condiciones de contorno de entrada y salida de caudal de agua y sedimentos.

A priori parece lógico afirmar que cuanto mayor sea la cantidad de sedimentos inyectados en el cauce, más cantidad de sedimentos lograrán llegar a la desembocadura del Ebro, sin depender del flujo de agua que circule por el cauce.

Tabla 1	BC1 (Xerta)		BC2 (Tortosa)		BC3 (Amposta)		BC4 (Deltebre)		Sección de medida de la desembocadura (Delta)	
	Qw(m ³ /s)	Qs(m ³ /s)	Qw(m ³ /s)	Qs(m ³ /s)						
2	600	0.1	0	0	0	0	0	0	590	0.04
3	500	0.09	0	0	50	0.01	50	0.01	577	0.062
3.1	1400	0	0	0	0	0	0	0	873	2.671
4	600	0	0	0	0	0	50	0.1	648	0.141
5	600	0	0	0	0	0	0	0	632	0.118

Tabla 1: Datos de caudales de agua y sedimentos en cada condición de contorno de entrada y medidos en la sección transversal situada en el Delta, para los escenarios más relevantes.

En la **Tabla 1** se indica, para la simulación de los 4 escenarios seleccionados, el caudal de agua y de sedimentos introducido en la condición de contorno de entrada al inicio del cauce (BC1 en la **Figura 11**) y en cada una de las condiciones de contorno de entrada dispuestas para la inyección de sedimentos (BC2, BC3, BC4); y los medidos en la sección transversal del Delta en el tiempo final de las simulaciones seleccionadas.

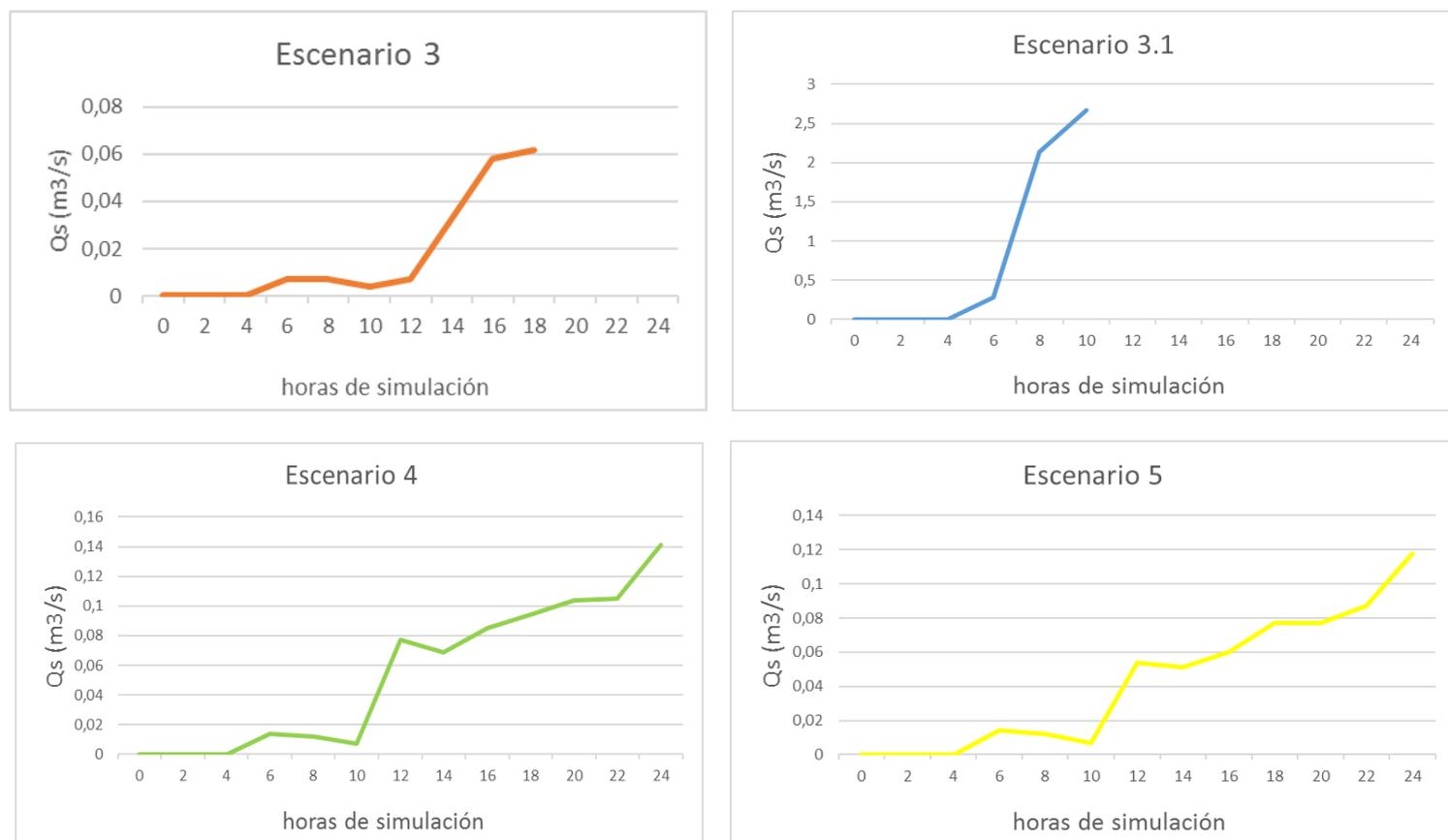


Figura 12: Evolución temporal del caudal de sedimentos que atraviesa la sección de medida situada en el Delta del Ebro (Figura 11), para cada una de las simulaciones en los distintos escenarios.

Posteriormente, al comparar los resultados de todas las simulaciones (ver **Figura 12**) con la tabla de caudales, parece notable que la cantidad de sedimentos en suspensión que puede llegar al Delta del Ebro depende más del caudal de agua que circula por dicha sección, que de la cantidad de sedimentos inyectada en el cauce. Dicho caudal de agua es el que se encarga de arrastrar todo el sedimento aguas abajo, desde el inicio del cauce. Cuanto mayor sea el volumen de agua, mayor será la fuerza de arrastre que ejerza el flujo sobre la carga de fondo posada en el lecho del cauce.

Comparando los resultados obtenidos en las simulaciones de los escenarios 3 y 5, se puede apreciar que en el escenario 5, donde no se inyecta sedimento al cauce, llega más caudal de sedimentos a la desembocadura (durante toda la simulación) que en el escenario 3; pese a que en el escenario 3 se inyectan unos caudales de sedimentos: $Q_s=0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ en BC1 y un $Q_s=0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ en BC3 y BC4. La diferencia entre ambos escenarios está en que en el escenario 3 se

introduce un $Q_w=500 \text{ m}^3/\text{s}$ en BC1, mientras que en el escenario 5 se introduce un caudal de agua $Q_w=600 \text{ m}^3/\text{s}$ en BC1.

De esta manera, se comienzan a apreciar dos características del comportamiento del flujo de sedimentos dentro del cauce:

- Los sedimentos avanzan más aguas abajo cuanto mayor sea el caudal de agua introducido en el inicio del cauce (BC1).
- El sedimento inyectado en el inicio del cauce tiene que depositarse en el primer tramo del cauce, porque a la desembocadura no llega más que el sedimento que ha sido arrastrado de la carga de fondo durante la trayectoria del flujo por la planicie Deltaica.

Analizando dos imágenes de los resultados (ver **Figura 13**) obtenidos en las simulaciones de los escenarios 2 y 3, que son los únicos en los que se inyecta un caudal de sedimentos en la primera parte del tramo del río Ebro estudiado, se aprecia como el sedimento se deposita en las zonas que son anegadas por el caudal que baja por el cauce del río, cuando este desborda. Estas zonas quedan cubiertas por una pequeña altura de agua, lo que provoca que el flujo de agua y sedimentos se estanque allí y el sedimento se deposite en el terreno, ya que el flujo no cuenta con la velocidad necesaria para seguir avanzando.

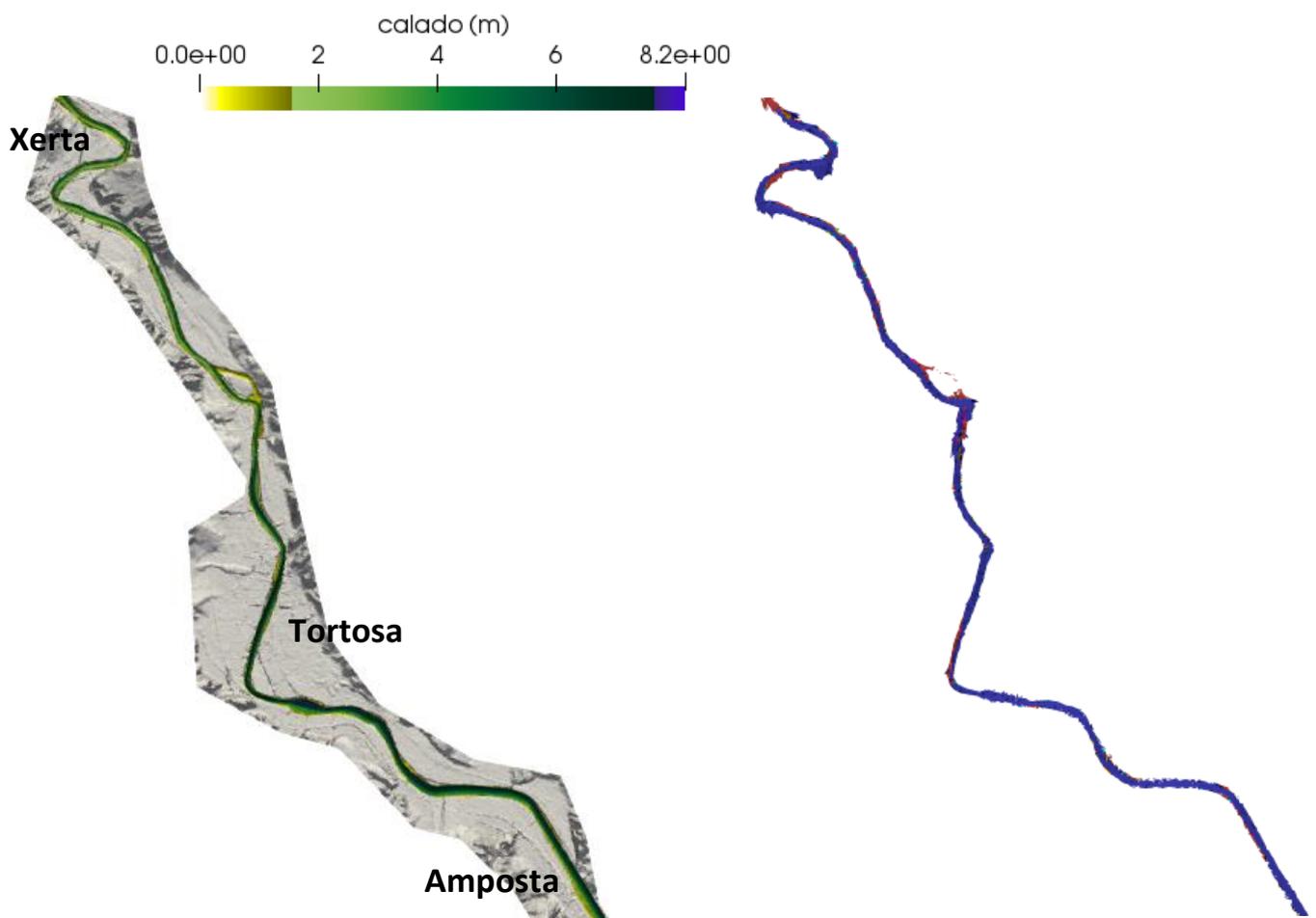


Figura 13: A la izquierda, altura de agua en el cauce (verde) sobre el MDT (gris) en el tiempo final de la simulación bajo los escenarios 2 ó 3 (resultados similares). A la derecha, caudal de sedimento (azul) sobre vectores velocidad (rojo) donde se aprecian las zonas de depósito del sedimento.



Figura 14: Imagen satélite de la superficie Deltaica (IGN).

Visto cómo se comporta el sedimento en la primera parte del cauce, donde se queda estancado en distintas cavidades del terreno cercano al cauce, o retenido por la flora que coexiste junto al cauce en el hábitat del propio río, queda clara que la mejor manera de conseguir que el sedimento consiga llegar hasta la desembocadura, es verterlo en la propia planicie deltaica; **Figura 14**, cuyo tramo del cauce transcurre desde la localidad de Amposta hasta la propia desembocadura en el mar Mediterráneo, pasando por la localidad de Deltebre.

Es momento de analizar y comparar (en la **Figura 15**) las simulaciones sobre los escenarios 4 y 5 (en ambos se tiene un caudal de entrada en BC1 $Q_w=600 \text{ m}^3/\text{s}$, ver en Tabla 1), en los que básicamente se comprueba si realmente la cantidad de sedimentos que llega a la desembocadura del río Ebro es gracias a la inyección o simplemente es que la fuerza del caudal de agua que circula por el río permite arrastrar la carga de fondo y ésta llega a la desembocadura como sedimento en suspensión.

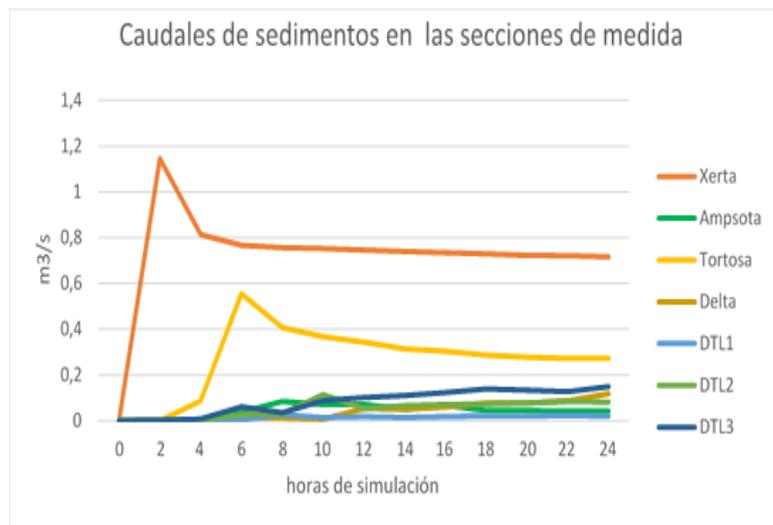
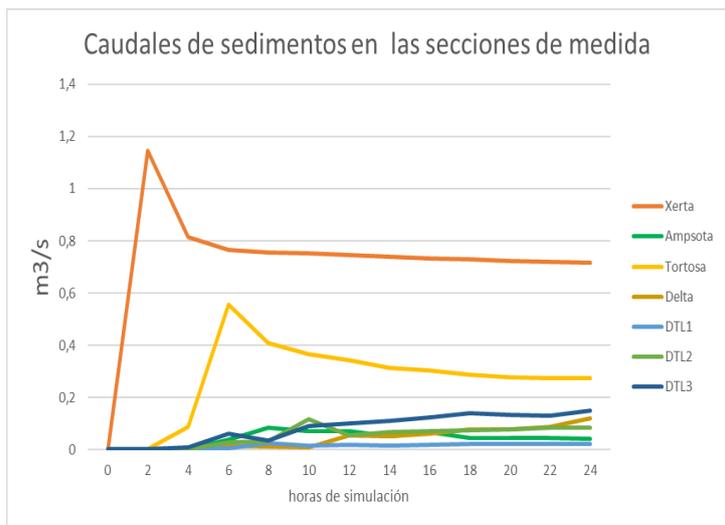


Figura 15: Evolución temporal del caudal de sedimentos en las secciones de medida (Figuras 88 y 93), para el escenario 5 (izquierda) y para el escenario 4 (derecha).

El caudal del sedimento es similar en las secciones de medida; es en la sección del Delta donde a partir de $t=12h$ comienza a existir una diferencia en el caudal de sedimentos que consigue alcanzar la desembocadura. Esto es debido a que en el escenario 4, a partir de $t=10 h$ se comienza a inyectar un $Q_s=0.1 m^3/s$ en BC4 situada a la altura de Deltebre. En la **Figura 16** que aparece a continuación se puede apreciar la ligera variación en los valores de Q_s .

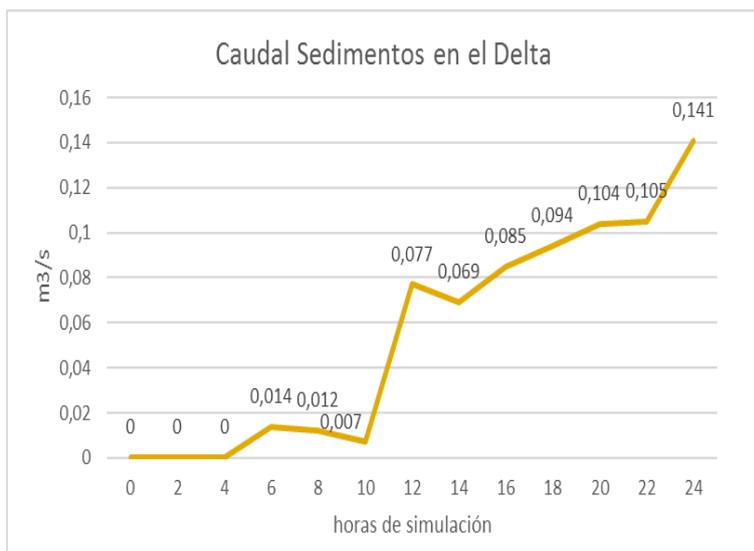
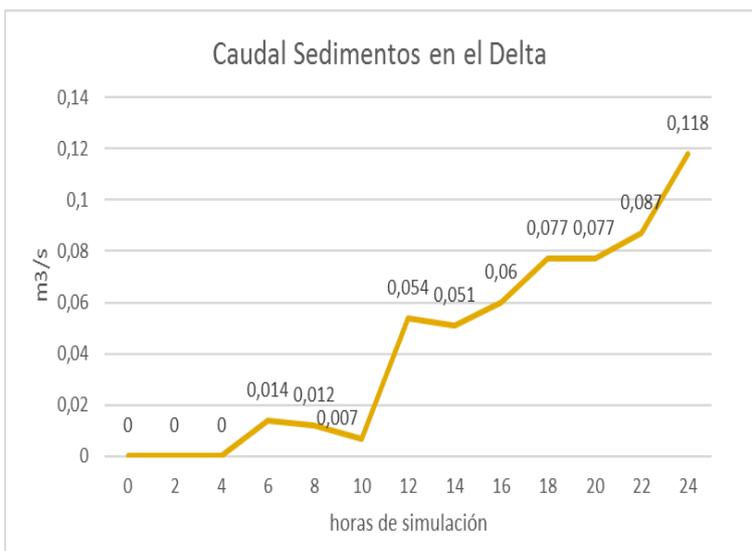


Figura 16: Evolución temporal del caudal de sedimentos en la sección del Delta, en el escenario 5 (izquierda) y en el escenario 4 (derecha).

La pequeña diferencia que se aprecia entre los caudales de sedimentos a partir del momento en el que en el escenario 4 se comienza a inyectar sedimento ($t=12$ h), es debida al efecto de la propia inyección. Es decir, inyectando un $Q_s=0.1$ m³/s en la localidad de Deltebre (ver **Figura 14**), la diferencia de Q_s con el escenario 5 (en el que no se inyecta nada de sedimento, Tabla 1), medida en la sección del Delta, es de 0.023 m³/s; con lo cual, descendiendo el sedimento apenas 15 km río abajo, se queda depositado por el camino el 80% del caudal de sedimento inyectado.

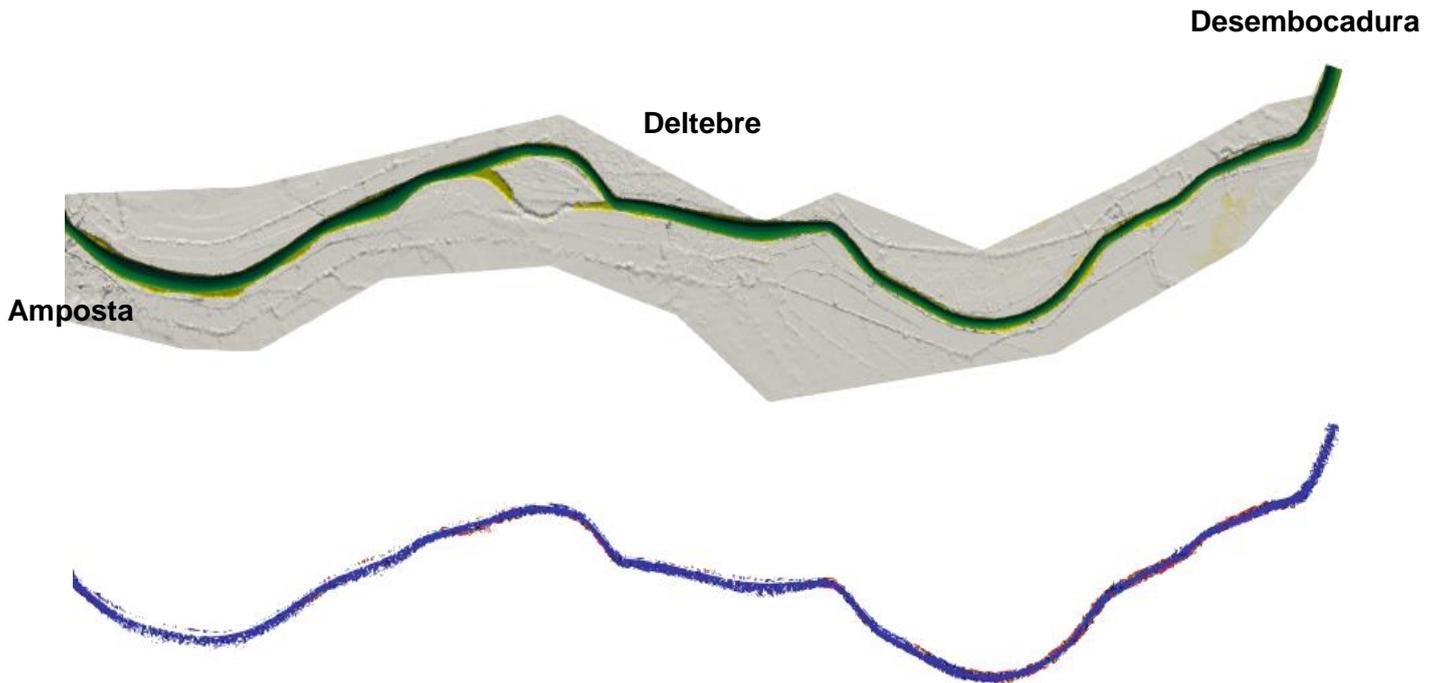


Figura 17: Detalle de mapa de extensión de la lámina de agua (verde) sobre MDT (gris) (arriba) y extensión de sedimentos (azul) sobre vectores de velocidad (rojo) (abajo) en el tramo de la planicie Deltaica en $t=24$ h, para los escenarios 4 y 5.

Gracias a la **Figura 17** (imagen inferior), en la que el sedimento depositado aparece representado con puntos rojos sobre los azules que representan la trayectoria del flujo, se puede tener una idea orientativa de las zonas donde el sedimento se deposita a lo largo del tramo de cauce entre Deltebre y la desembocadura.

Dado que gran parte de los sedimentos inyectados se depositan, es conveniente saber en qué zona del terreno lo hacen. Para ello se ubican sobre el MDT los puntos de medida señalados con puntos verdes en la **Figura 18**.

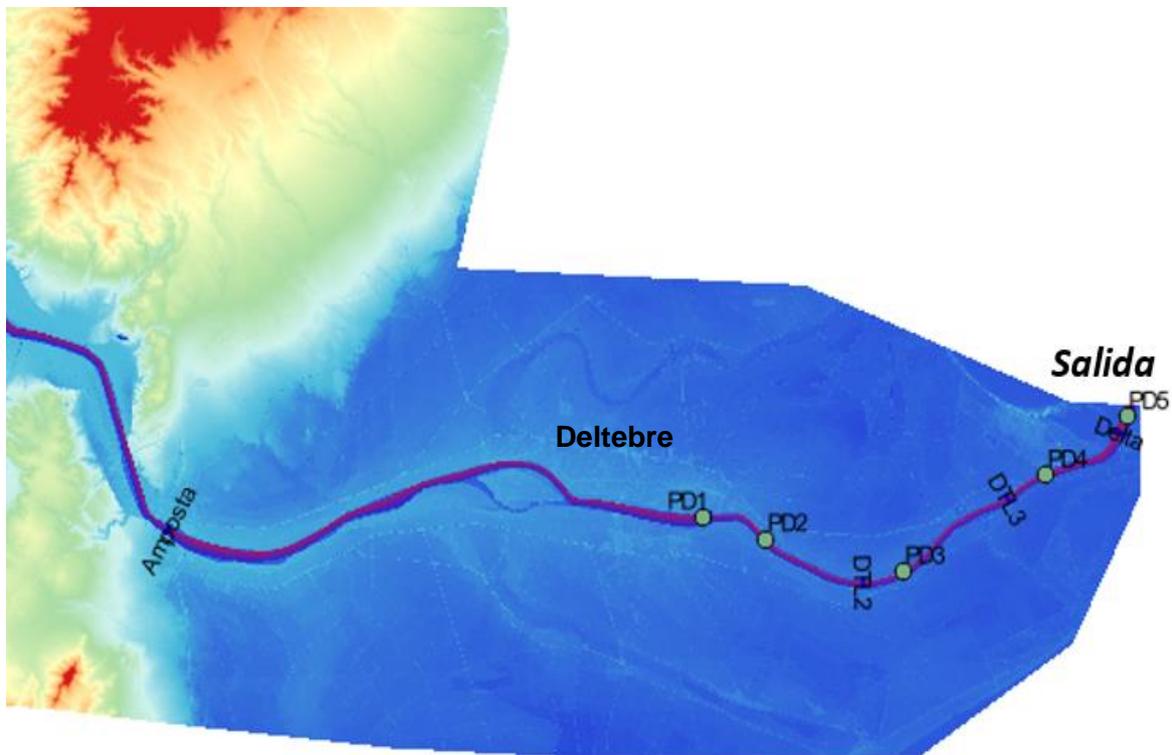


Figura 18: Ampliación del MDT, donde están situados los puntos de observación (PD1, PD2, PD3, PD4, PD5) entre Deltebre y la desembocadura.

Tras las simulaciones sobre los escenarios 4 y 5 los valores de profundidad del lecho obtenidos en los 5 puntos de observación son similares. En la Tabla 3, se puede ver que la tendencia de los valores de los puntos de medida “PD2” y “PD3” es decreciente, lo que quiere decir que el cauce gana profundidad porque se erosiona el lecho compuesto por la carga de fondo. El “PD1” permanece con valores constantes, lo cual quiere decir que el sedimento no se deposita en ese punto, y que el flujo tampoco tiene la fuerza suficiente para erosionar el cauce. Por último, en los puntos “PD4” y “PD5” la tendencia es ascendente, lo que quiere decir que el lecho gana altura, gracias a que el sedimento en suspensión se deposita en esos puntos.

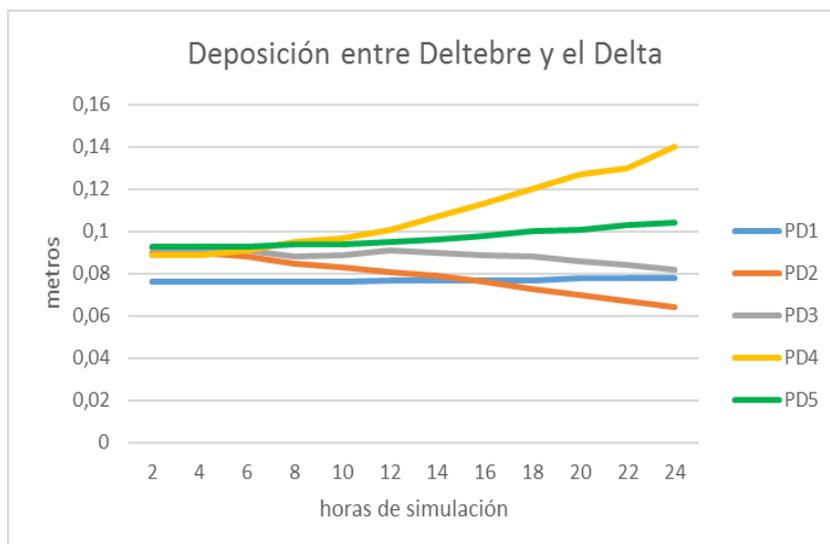


Tabla 2: Evolución de la altura del fondo del cauce (carga de fondo), en los 5 puntos de observación situados entre Deltebre y el propio Delta (figura), a lo largo de la simulación realizada sobre el escenario 4 y 5.

De manera complementaria a los escenarios planteados y simulaciones realizadas, se decidió plantear un caso, **escenario 3.1**, en el que se introdujese un caudal de entrada en el inicio del cauce (BC1) similar al que puede circular por el Ebro en una crecida. Para ello, se tomaron los valores reales de la última crecida que sufrió el Ebro en abril de 2018, y se hizo una media de los caudales durante todos los días que duró la crecida, fijando el caudal de entrada $Q_w = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$.

El objetivo de esta simulación es comprobar la cantidad de sedimento que sería capaz de arrastrar el caudal circulante por el río Ebro si viniese una crecida importante, tras un ciclo de inyección de sedimentos.

En este escenario, complementario al 3, se toma como estado inicial, el estado final en el que ha quedado el cauce tras la simulación 3. Es decir, el cauce cuenta con una cierta cantidad de sedimento depositado en el tramo que discurre desde Xerta hasta Amposta, el cual se supone que será arrastrado por la fuerza del flujo entrante y conseguirá llegar hasta la desembocadura.

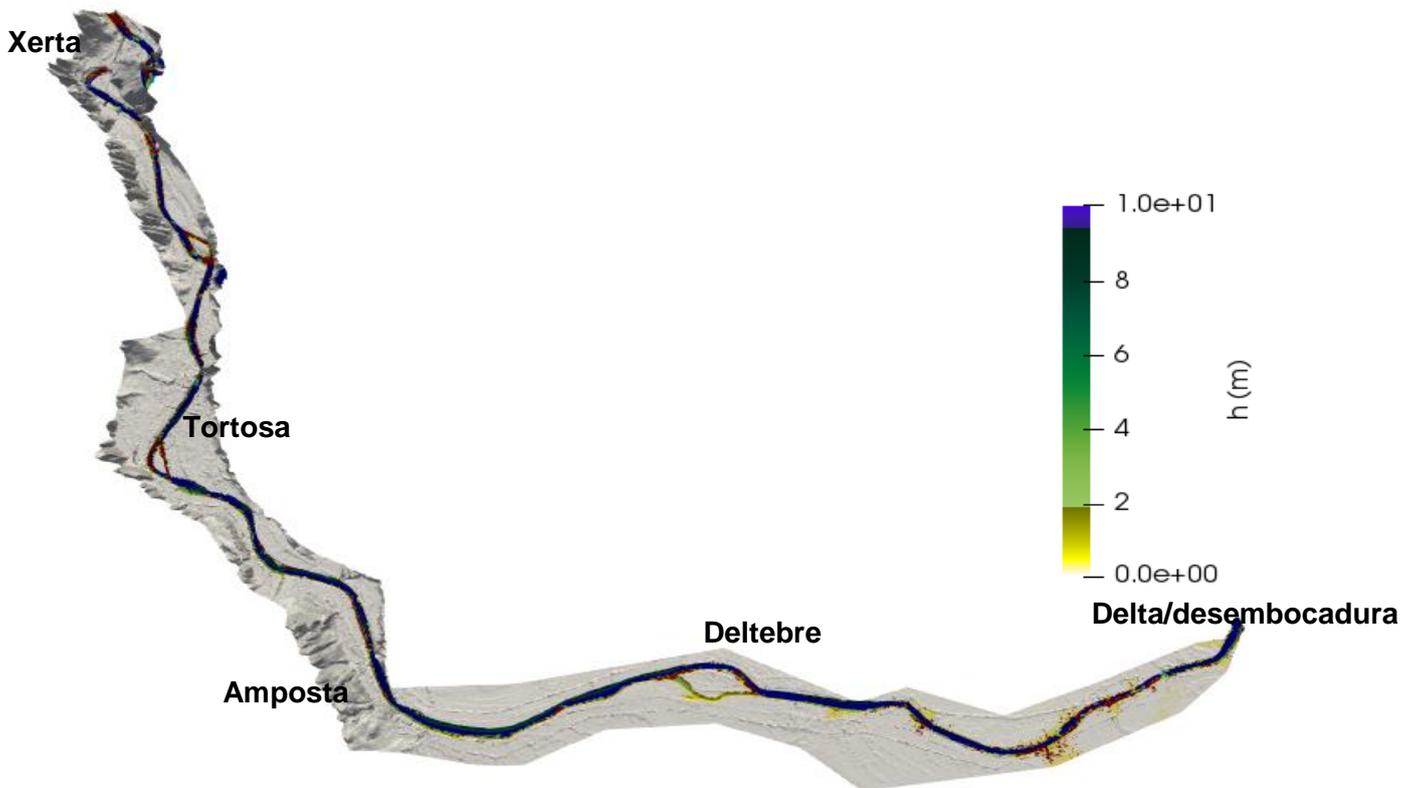


Figura 19: Altura de agua/sedimento sobre mapa de terreno tras $t=10h$ de simulación con un $Q=1400m^3/s$ posterior a un ciclo de vertido de sedimento.

Como se puede apreciar en la **Figura 19**, el sedimento (representado por los puntos rojos sobre el MDT) se deposita en las zonas donde el río desborda en la planicie Deltaica. Estas zonas aparecen sombreadas en color amarillo, ya que cuentan con menos de 2 metros de altura de agua (h).

Complementariamente a la **Figura 19**, la cual sirve para tener una idea aproximada de donde se localizan geográficamente las zonas donde el sedimento se deposita, la gráfica mostrada en la **Figura 20**, permite conocer la evolución temporal del sedimento depositado en los puntos de medida ubicados en el cauce en la posición que aparecen en la **Figura 11**.

La tendencia negativa que siguen los valores de la altura del lecho en el punto de observación situado en el cauce a la altura de Xerta (**Figura 20** color azul) indica que el flujo erosiona cada vez con mayor intensidad el cauce, a medida que avanza la simulación. Sin embargo, la tendencia positiva del punto de observación ubicado en el cauce a la altura de Tortosa (**Figura 20** color naranja) indica que el lecho gana altura al depositarse sedimento. Al observar el tramo Xerta-Tortosa, en la **Figura 19**, se aprecia que efectivamente, el sedimento se deposita en 3 o 4 puntos del cauce entre ambas localidades.

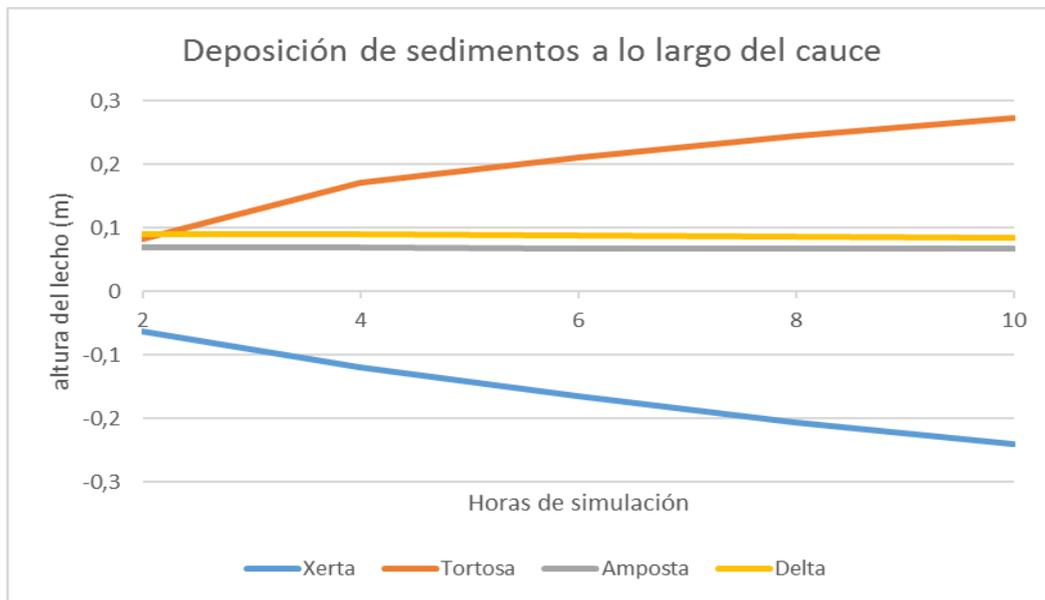


Figura 20: Evolución temporal del aumento/disminución de la altura del lecho del río, en los puntos de medida ubicados en la **Figura 11**.

Las rectas que unen los valores de los puntos de observación situados a la altura de Amposta y del propio Delta carecen de pendiente. Esto implica que el sedimento no se deposita en la planicie Deltaica, pero tampoco se erosiona el cauce. Por lo que parece, el flujo de sedimentos fluye por la zona del cauce correspondiente sin que se deposite material sólido en el fondo.

Como se observa en la **Figura 21**, el caudal de sedimentos en el Delta crece conforme el flujo de agua y material sólido va avanzando aguas abajo (desde el inicio del cauce del MDT), a medida que avanza el tiempo de simulación. Por ello los valores de Q_s de las secciones de medida que están situadas en los primeros tramos del cauce tienen sus máximos al principio y después tienden a estabilizarse. Al contrario que ocurre en la sección de medida situada en el Delta, donde es a partir de la hora 4 de simulación, cuando comienza a llegar el flujo de sedimentos

procedente de aguas arriba. Durante las 2 horas siguientes el caudal de sedimentos sufre un crecimiento exponencial, el cual continúa hasta el final de la simulación.

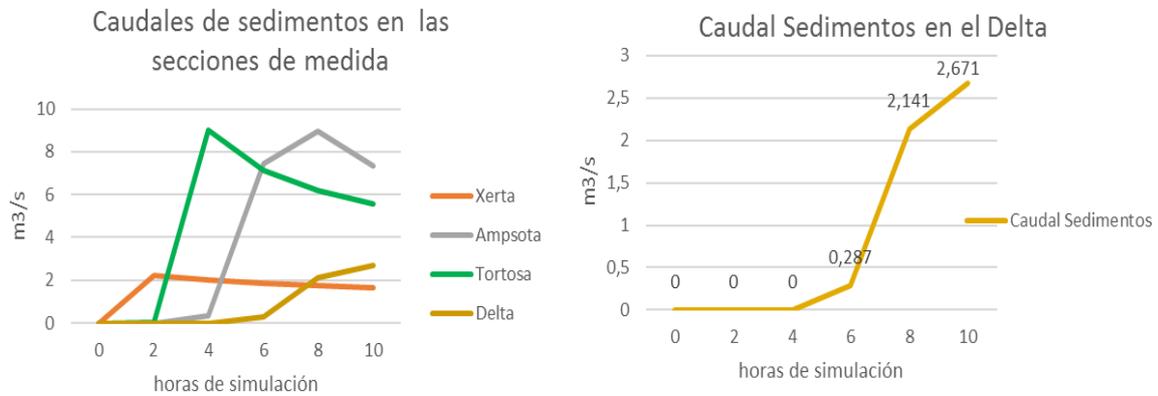


Figura 21: Evolución temporal del caudal de sedimento transportado en las secciones de medida de Xerta, Amposta, Tortosa y Delta (izda.) y ampliación de la del Delta (dcha.) obtenidos de la simulación de una avenida de $Q=1400\text{m}^3/\text{s}$ posterior a un ciclo de vertido.

El objetivo hubiese sido alcanzar un estado estacionario, en cuanto al flujo de sedimentos se refiere, a lo largo de todas las secciones de medida situadas a lo largo del cauce; para comprobar cuanto tiempo tardaría el cauce del Ebro en adquirir un caudal constante de sedimentos que recorriese toda la planicie Deltaica, desde Amposta hasta la desembocadura.

En referencia al factor del tiempo de simulación empleado para simular los distintos escenarios, enunciado al inicio de este capítulo, observando la tendencia positiva de todas las gráficas que componen la **Figura 11**, en la que se representan los caudales de sedimentos medidos en la sección del Delta en el último periodo de simulación, hace pensar que todos los tiempos de simulación se quedan cortos.

Para obtener unos resultados más ampliados, que permitan contrastar mejor los resultados ya obtenidos, sería necesario ampliar el tiempo de todas las simulaciones y estandarizarlo en unas 48 horas; tiempo suficiente para que tanto el flujo de agua, como el flujo de sedimentos llegasen a alcanzar un valor estacionario a lo largo de la planicie Deltaica.

4. Conclusiones y trabajo futuro

Analizando todo el proceso realizado para la conformación del presente trabajo: “*Simulación numérica de la inyección de sedimentos en el Delta del río Ebro*”, es consecuente destacar tanto los aspectos que han permitido realizar las simulaciones como los resultados que se han obtenido al realizar dichas simulaciones.

Al tratarse de un proyecto que se basa en analizar mediante simulación numérica el comportamiento de un flujo de agua y sedimentos que circula dentro de un cauce; es de vital importancia que el modelo digital de terreno (MDT) sobre el que se simula cuente con un cauce lo más semejante posible al real. Para la conformación del MDT empleado en el presente proyecto fue necesario reconstruir el cauce del río Ebro desde la presa de Flix hasta su desembocadura en el mar Mediterráneo. Dado que fue imposible conseguir información sobre la batimetría de las secciones del tramo de cauce seleccionado, a partir de una única sección medida por agentes de la CHE en Tortosa, se reconstruyó el cauce de forma numérica.

Es por ello por lo que el cauce que conforma el MDT tiene una sección constante durante toda su trayectoria (que se va adaptando a la anchura del cauce en cada punto, codo, curva...) que distará de la sección real del río Ebro en muchos tramos del cauce. Esto hay que tenerlo en cuenta a la hora de la toma de decisiones a raíz de los resultados obtenidos. De esta forma surge la necesidad de realizar medidas de secciones transversales en el tramo bajo del río Ebro; ya que hasta ahora se cuentan con medidas en el tramo medio, pero no en esta zona.

En cuanto a la utilización del módulo de sedimentos en RiverFlow2D, al inicio fue costoso encontrar la forma de que el programa ejecutase de manera correcta las simulaciones sobre el escenario que se planteaba en QGIS. A base de afinar la malla de cálculo en la parte del cauce, pero, sobre todo, en las zonas de las condiciones de contorno de entrada (por donde se introducía en el cauce el flujo de agua y sedimentos), se consiguieron afinar los resultados obtenidos de las simulaciones. A la vez que se afinaba la malla en esas zonas, se probaba con caudales de sedimentos lo más parecidos a los utilizados por el IRTA en sus pruebas piloto, de manera que las simulaciones empezaban a salir sin problemas ni anomalías.

En cuanto a la precisión de resultados hay que hacer notar que se necesitan medidas experimentales para poder calibrar el módulo de cálculo de transporte de sedimentos en Riverflow2D. Hasta el momento no se dispone de las medidas tomadas del proyecto LIFE después de haber vertido los sedimentos y por tanto no podemos comparar los resultados de las simulaciones. En el caso de que en algún momento se tengan estas medidas, se debería hacer la comparación porque es posible que se deba ajustar la velocidad de sedimentación modelizada con Riverflow2D.

Conforme al tiempo de simulación, sí que fue excesivamente lento, ya que, hasta el momento, el módulo de sedimentos de RiverFlow2D solo se puede ejecutar en CPU. El tiempo medio para correr 24 horas de simulación era solo de 4 días. Se intentaron simular escenarios en los que se introducían caudales de agua cercanos a los 2000 m³/s, pero el programa ralentizaba tanto el cálculo que a los 5 días paraba de calcular. Esto se debía a la gran cantidad de celdas mojadas en la malla. De aquí surge la necesidad de programar el módulo de transporte de sedimentos en Riverflow2D sobre GPU y poder así realizar los cálculos de forma más rápida. Si se tienen que obtener resultados con un corto margen de tiempo acerca del comportamiento de sedimentos en un flujo, el programa no cuenta con la capacidad necesaria.

Tras analizar las simulaciones realizadas en los distintos escenarios planteados, con las condiciones elegidas para el comportamiento del sedimento en suspensión circulante en el flujo del río Ebro, queda claro que el sedimento tiende a depositarse en la parte del cauce entre las localidades de Xerta y Amposta, mientras que por la planicie Deltaica apenas varía el caudal de sedimentos. Al comparar resultados obtenidos de simulaciones en escenarios en los que prima el caudal de agua frente al de sedimentos y viceversa, queda patente que es necesario un abundante caudal de agua que circule por el tramo final del cauce del río Ebro para lograr que llegue un volumen de sedimentos abundante a la desembocadura.

Visto cómo se comporta el flujo de sedimentos en los escenarios que integra el presente proyecto hace pensar que introducir caudales superiores a 1500 m³/s es la única manera de conseguir que la cantidad de sedimentos que llegan al Delta del Ebro sea suficiente como para crear una barrera natural que impida la intrusión del agua del mar en la tierra.

5. Bibliografía

- [1] <http://dle.rae.es/?id=XRb5ksO>
- [2] <https://www.elperiodico.com/es/medio-ambiente/20170520/delta-del-ebro-necesita-sedimentos-admiclim-freno-embalses-6044429>
- [3] <http://www.mutuaarrocera.com/?p=159>
- [4] <https://www.verema.com/blog/productos-gastronomicos/1358454-arroz-espana-principales-cultivos-usos-culinarios>
- [5] <http://www.elperiodico.com/es/medio-ambiente/20170123/temporal-agrava-efectos-regresion-delta-ebro-5760504>
- [6] https://www.elperiodicodearagon.com/noticias/sociedad/sos-delta-ebro_1309628.html
- [7] <http://www.lifeebroadmiclim.eu/es/>
- [8] <https://www.iagua.es/noticias/agencia-catalana-agua/ebro-aporta-12-y-35-millones-toneladas-mas-sedimentos-frenar>
- [9] Daniel Caviedes-Voulliéme, Mario Morales-Hernández, Ibai Lopez-Marijuan y Pilar García-Navarro (2014). *“Reconstruction of 2D river beds by appropriate interpolation of 1D cross-sectional information for flood simulation”*. Environmental Modelling & Software, vol. 61, pp: 206-228.
- [10] Javier Murillo y P. García-Navarro (2010). *“An exner-based coupled model for two-dimensional transient flow over erodible bed”*. Journal of Computational Physics, vol. 229, iss. 23, pp. 8704-8732.
- [11] Juan P. Martín Vide (2002). *“Ingeniería de ríos”*. Ediciones UPC 2002. ISBN: 978-84-8301-900-9.
- [12] Ramón J. Batalla, Damiá Vericat y Antoni Palau (2006). *“Sediment transport during a flushing flow in the lower Ebro River”*. Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems (Proceedings of a symposium held in Dundee, UK, July 2006). IAHS Publ. 306.
- [13] Pilar Brufau y Pilar García Navarro (2001). *“Conceptos básicos de Hidrología Superficial”*. Universidad de Zaragoza.
- [14] Albert Rovira y Carles Ibáñez (2007). *“Sediment Management Options for the Lower Ebro River and its Delta”*. J Soils Sediments, vol. 7 (5), pp: 285-295.
- [15] Ramón J. Batalla (2003). *“Sediment deficit in rivers caused by dams and instream gravel mining. A review with examples from NE Spain”*. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias de la Universidad de Lleida. ISSN: 0214-1744.

- [16] <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- [17] Ven Te Chow (1959). *“Open-channel hydraulics”*. McGraw-Hill Civil Engineering Series.
- [18] Meyer-Peter, E y Müller, R. (1948). *“Formulas for Bed-Load transport”*. Hydraulic Engineering Reports, IAHSR 2nd meeting Stockholm, appendix 2.
- [19] Leo C. van Rijn (1948). *“Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport”*. J. Hydraul. Eng., vol. 110(11) pp: 1613-1641.
- [20] Humberto Salinas Tapia y Juan Antonio García Aragón (2011). *“Fórmula experimental para la velocidad de caída de sedimentos en flujo transversal”*. Nota técnica, Tecnología y Ciencias del Agua, vol. 2 nº 2, pp: 175-182. Universidad Autónoma del Estado de México.
- [21] Paolo Cinat (2012). "Sediment transport models for Shallow Water equations", Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Università degli studi di Pisa (Italia).

Anexo 1. Modelo de aguas poco profundas

Dado que, en el presente trabajo, las simulaciones se realizan sobre el cauce de un río (ver **Figura 22**), es lógico emplear el modelo de aguas poco profundas como representación física del fenómeno, puesto que, en el tramo de río a analizar, la longitud del cauce es mucho mayor que su calado $L \gg h$.

Se trata de un fluido incompresible, que circula dentro de una superficie libre, en un estado transitorio. Al haber tenido que reconstruir el cauce a partir de una única sección, a éste se le ha dado una pendiente constante en los diferentes tramos que lo componen. De esta manera, se puede interpretar que el flujo es uniforme, ya que la profundidad de agua es prácticamente la misma en todas las secciones. Además, la presión puede considerarse hidrostática y el rozamiento como si se tratase de un flujo estacionario.

Al tratarse de un modelo de aguas poco profundas, las ondas que se propagan a través del fluido, lo hacen de tal manera; que la tensión superficial no afecta en su comportamiento **[13]**.

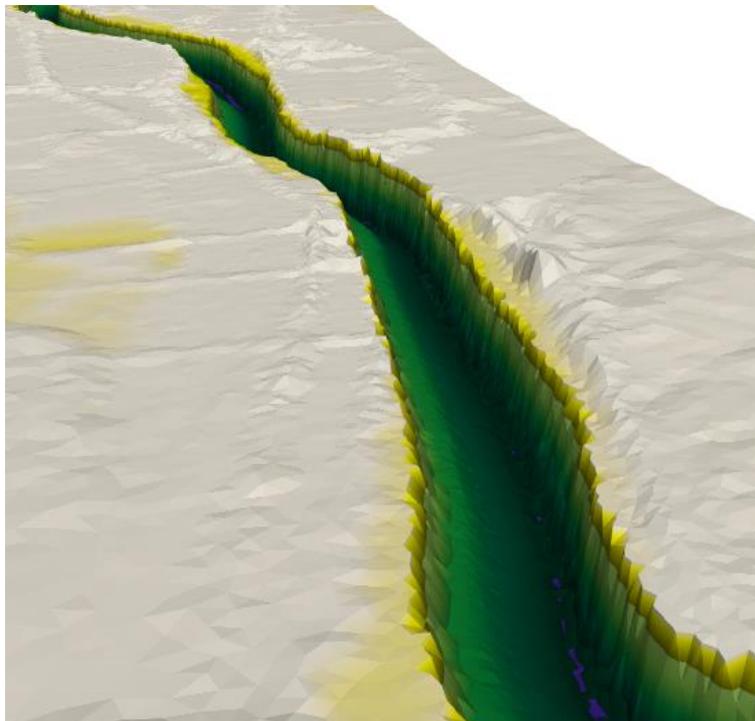


Figura 22: Imagen de un tramo del cauce integrado en el MDT utilizado en el presente trabajo.

Como el flujo va a ser canalizado a través del cauce reconstruido del río Ebro, es necesario modelizar el comportamiento del flujo de agua y sedimentos dentro de dicho cauce. Para ello se deben aplicar una serie de condiciones de contorno sobre el MDT. Estas condiciones de contorno que actúan sobre el flujo y sobre el sedimento, no son más que unas restricciones que permiten: introducir el flujo dentro del cauce (Condición de Contorno de Entrada); guiarlo a través de él (Paredes Sólidas, lo suficientemente alejadas del cauce, para permitir que el agua desborde del cauce y ver qué terrenos anega); y permitirle abandonar el cauce (Condición de Contorno de Salida).

La representación matemática del modelo de aguas poco profundas se reduce a un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, que no son más que las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento. El sistema de ecuaciones en forma compacta se puede escribir como [10]:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} = \mathbf{S}(\mathbf{U}, x, y) \quad [E. 1]$$

El sistema representa la variación de las variables respecto al tiempo (\mathbf{U}) en función de los flujos (\mathbf{F} , \mathbf{G}) de las variables en la dirección "x" y en la dirección "y" y los términos fuente (\mathbf{S}).

$$\mathbf{U} = (h, q_x, q_y, z)^T \quad [E. 2]$$

El término " \mathbf{U} " corresponde con un vector de cuatro términos, en el que aparecen las variables del problema: en primer lugar, la profundidad de agua (h); seguido de la cantidad de movimiento en el eje " q_x " y en el eje " q_y "; siendo el último término la cota absoluta del terreno.

$$\mathbf{F} = \left(q_x, \frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2, \frac{q_x q_y}{h}, A_g \frac{q_x(q_x^2 + q_y^2)}{h^3} \right)^T \quad [E. 3]$$

$$\mathbf{G} = \left(q_y, \frac{q_x q_y}{h}, \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2, A_g \frac{q_y(q_x^2 + q_y^2)}{h^3} \right)^T \quad [E. 4]$$

\mathbf{F} y \mathbf{G} son los vectores de flujo de las variables conservadas, donde " g " es la aceleración de la gravedad, mientras que " A_g " es una constante de calibración, que se obtiene de forma experimental y tiene en cuenta el tamaño del grano que forma el sedimento, la viscosidad del fluido y tiene un valor pequeño cuando la interacción fluido-sedimento es débil [21].

$$|q_s| = \sqrt{q_{s,x}^2 + q_{s,y}^2} = A_g |\mathbf{u}|^3 \quad [E. 5] \quad \mathbf{u}(u, v)$$

Siendo " $q_{s,x}$ " y " $q_{s,y}$ " los caudales de sedimento en las direcciones "x" e "y". A su vez, " u " y " v " son las componentes (x, y) del vector velocidad " u ", promediado en la vertical.

El siguiente vector " \mathbf{S} " define el término fuente, el cual integra: los términos de fricción entre el fluido y el fondo del cauce " τ " en la dirección " x " e " y ", y la integral de la presión a lo largo del fondo del cauce (lecho del cauce) " p " en la dirección " x " e " y ", siendo la densidad del agua " ρ_w " [10].

$$\mathbf{S} = \left(0, \frac{p_{b,x}}{\rho_w} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho_w}, \frac{p_{b,y}}{\rho_w} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho_w}, 0 \right)^T \quad [E.6]$$

$$\mathbf{S}_s = \left(0, -\frac{\tau_{b,x}}{\rho_w}, -\frac{\tau_{b,x}}{\rho_w}, 0 \right)^T \quad [E.7] \quad \mathbf{S}_b = \left(0, \frac{p_{b,x}}{\rho_w}, \frac{p_{b,y}}{\rho_w}, 0 \right)^T \quad [E.8]$$

Anexo 2. Pre-proceso de datos

Obtención del ráster del dominio de cálculo con las elevaciones del terreno

A través de la plataforma del *Instituto Geográfico Nacional (www.ign.es)*, en la que aparece todo el territorio nacional dividido en cuadrantes, se eligieron los cuadrantes necesarios que conformaban todo el dominio de cálculo necesario para abarcar todo el tramo del río Ebro a estudiar: desde la salida de la represa de Xerta hasta la desembocadura del Ebro (ver *Figura 23*).



Figura 23: Mapa geográfico del terreno, con la ubicación del inicio y el fin del dominio de cálculo, y las ciudades o municipios con transigencia en el proyecto, por los que pasa el Ebro.

Dentro del menú inicial de la página web del IGN, se accede al “*Centro de descargas*”. Una vez ahí, se abre el menú del centro de descargas, se escoge la opción “*Modelos digitales de elevaciones*”, dentro de esta opción se elige el modelo digital del terreno con un paso de malla de 5m “*MDT05*”. Una vez elegida la opción descrita anteriormente se visualiza un mapa geográfico de España, en el que se optó por escoger la opción de visualizarlo mediante cuadrantes, exactamente la opción de “*Cuadrícula cartográfica 1:50*” la cual permite obtener un detalle de las elevaciones del terreno suficientemente bueno a la hora de generar el modelo para simular. Se seleccionaron las cuadrículas: **0496, 0497, 0521, 0522, 0523** (ver *Figura 24*).

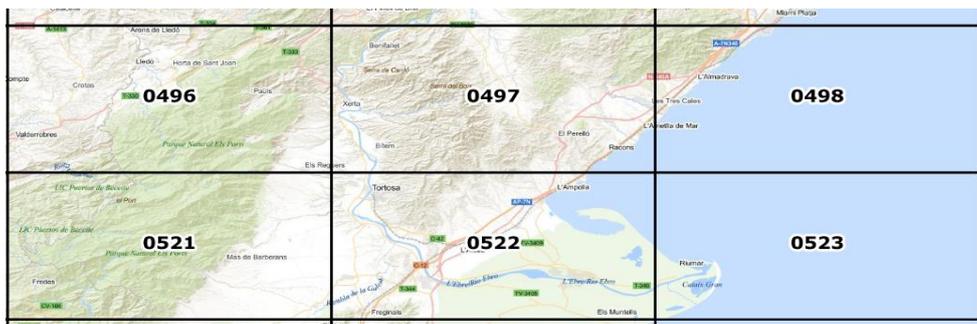
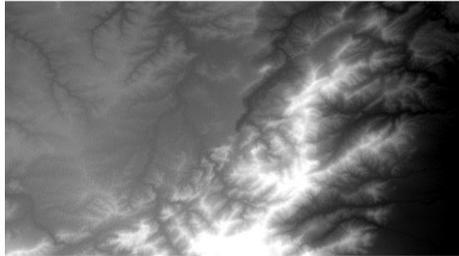
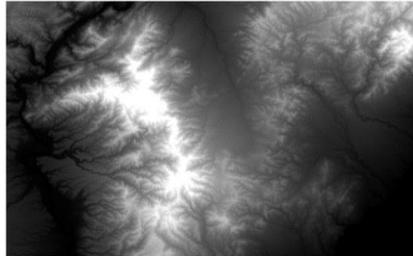


Figura 24: Cuadrantes seleccionados en la cuadrícula del IGN.

El sistema de georreferencia que se emplea es el **ETRS89/UTM zona 30N**, el cual es importante tener en cuenta en el momento de visualizar el ráster en el programa QGIS. Las 5 cuadrículas juntas conforman el mapa de elevaciones total del dominio (ver **Figura 25**) y todas ellas tienen que estar georreferenciadas con la misma posición. Si no es así, diferentes sistemas de georreferencia provocan errores a la hora de visualizar las cotas, incluso solapamiento de los distintos rásteres.



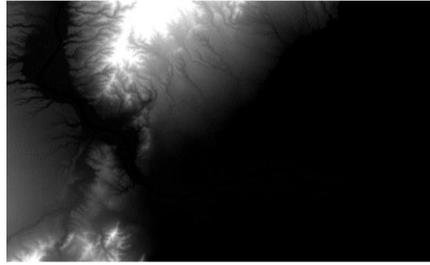
Cuadrante 0496



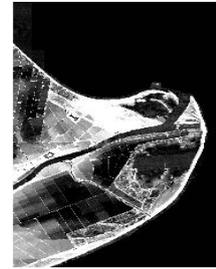
Cuadrante 0497



Cuadrante 0521



Cuadrante 0522



Cuadrante 0523

Figura 25: Detalle del mapa de elevaciones de cada una de las cuadrículas obtenidas del IGN que conformarán el dominio de estudio.

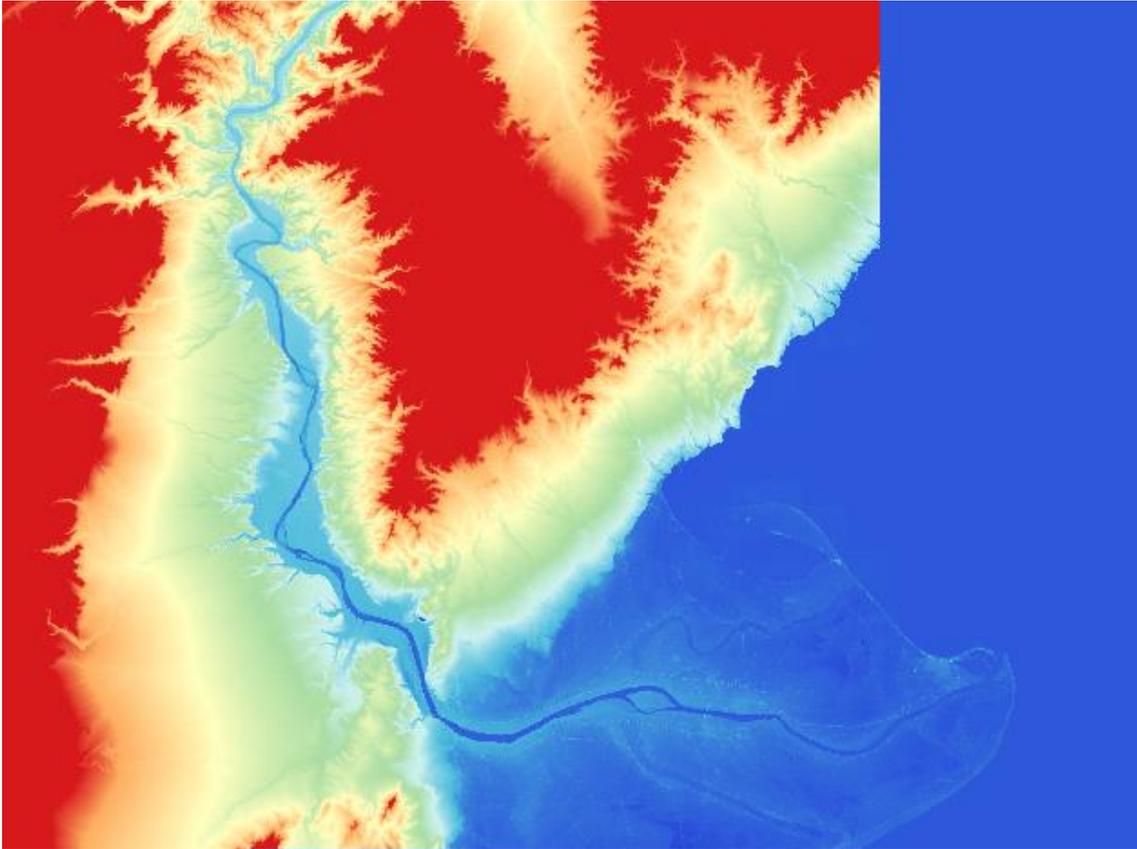


Figura 26: Combinación de los 5 rásteres iniciales para obtener uno único que contiene los datos de elevación del terreno $z(m)$. Colores rojos indican zonas más altas, colores azules indican cotas más bajas.

El programa utilizado para realizar el pre-proceso de datos antes de realizar los cálculos es un sistema de gestión de información geográfica denominado QGIS. En primer lugar, se cargan los 5 rásteres que conforman el dominio para ensamblarlos mediante la opción *Miscelánea*, seguido de *Combinar*, dentro de la herramienta *Ráster*, que aparece en el menú y de esta forma obtener un único ráster, como se ve en la **Figura 26**.

Representado el dominio dentro del ráster sobre el que se va a trabajar, es necesario determinar los ejes coordenados, para una correcta interpretación de la representación gráfica. En la **Figura 26**, el ráster está representado en el plano, orientado de manera que las coordenadas en “ x ” corresponden con el eje horizontal y las coordenadas en “ y ” corresponden con el eje vertical. La manera de visualizar las cotas del terreno que están representadas en el eje “ z ”, en perpendicular al plano del papel, es crear un espectro de colores. De esta manera cada color corresponde con una determinada altura del terreno, y permite una correcta visualización del ráster en 2D.

Para poder visualizar correctamente el dominio, como aparece en la **Figura 26**, al tratarse de un ráster cuyo rango de cotas va desde -7m a 350m (leyenda de la **Figura 27**), y la diferencia de cotas en la planicie Deltaica tiene un rango muy pequeño -7m a 20m es necesario afinar la escala para visualizar correctamente la orografía de la planicie (ver **Figura 28**).

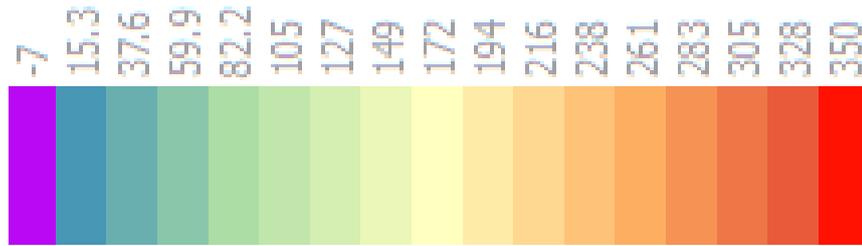


Figura 27: Espectro de colores del ráster ensamblado para la variable cota del terreno (z) expresada en metros



Figura 28: Espectro acotado para el dominio que conforma la malla de cálculo (desde la cota -7m hasta 88 m).

Una vez delimitado el terreno que va a ser mallado, se realiza un espectro de colores mucho más amplio para el rango de cotas que conformen el dominio mallado (-7m hasta 88m). Tal y como se aprecia en la **Figura 28**, existen un montón de tonos azules para poder visualizar todos los elementos orográficos que componen el terreno de la planicie Deltaica.

Cuando el espectro de colores que compone la leyenda de cotas en el ráster, permite visualizar correctamente las diferentes alturas que conforman el dominio de cálculo (componentes en el eje "z"), se guarda dicha configuración. Posteriormente es tan simple como cargarla dentro de la opción de *propiedades* de cualquier documento tipo ráster que forme parte del MDT, para visualizar correctamente el terreno.

Una vez obtenido este ráster ensamblado, aparece un problema a la hora de empezar a delimitar el dominio de cálculo y mallar, y es que el cauce del río tiene la misma cota que las orillas, es decir, el cauce en este primer ráster es inexistente. Esto se debe al método que emplea el IGN para recrear el terreno con sus cotas, el cual se basa en lanzar una serie de ondas, desde un satélite, las cuales rebotan cuando inciden contra una superficie con mayor densidad que el aire. De esta manera cuando el receptor recibe la onda de vuelta, éste no distingue si ha incidido contra un fluido como el agua o contra terreno sólido. Por esta razón es necesario generar un nuevo cauce, el cual se pueda después ensamblar en el conjunto orográfico creado anteriormente.

Hay que apuntar, que en el MDT empleado, el IGN elimina las cotas de elementos externos a la orografía natural, como: casas, árboles, carreteras elevadas, vías puentes...

Generación del ráster del cauce

Este apartado conlleva una labor costosa en cuanto a tiempo, en lo que al total del proyecto se refiere. El proceso comienza por crear una capa en QGIS, sobre el ráster inicial, **Figura 26**, la cual albergue con la mayor exactitud posible toda la superficie (en planta) del cauce.

Por otro lado, es necesario recrear la sección del cauce en cada tramo del río. Para ello se buscó información de la topografía del cauce, pudiendo partir de la sección del cauce medida batimétricamente en la estación de aforo de Tortosa, **Figura 29** (datos facilitados por la Confederación Hidrográfica del Ebro, "CHE"). Al no contar con ninguna otra sección que permitiese aportar cualquier dato morfológico/geométrico del cauce, es muy probable que el cauce modelado y el real disten morfológicamente en algún punto y puede llevar a algún error en los resultados. Hay que tener en cuenta que los resultados que se obtendrán de la simulación están sujetos a la forma correcta y precisa del cauce del cual carecemos datos.

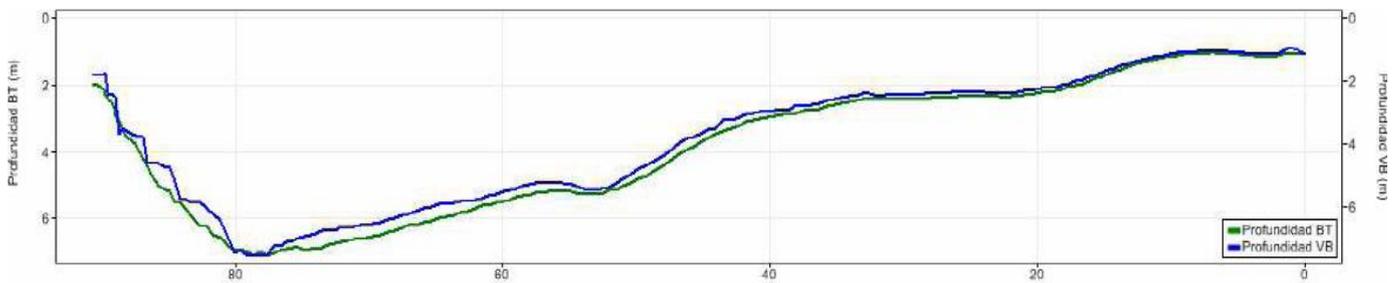


Figura 29: Sección transversal del cauce del Ebro a su paso por Tortosa.

Recreada una sección del cauce, a partir de la sección modelo facilitada por la CHE, **Figura 29**, se copia y se insertan 4 secciones transversales al cauce sobre la capa del ráster ensamblado (**Figura 26**). Estas 4 secciones representativas, se ubican en el ráster a la altura aproximada de Xerta, Tortosa, Deltebre y en la propia desembocadura dentro del Delta del Ebro.

Una vez posicionados en el ráster los puntos que componen cada una de estas 4 secciones, asignadas automáticamente unas coordenadas "x", "y", "z" para cada uno de ellos (según el sistema de referencia **ETRS89/UTM zona 30N**), se extraen a un documento de texto los valores de todas las coordenadas de los puntos y se modifica el valor de la cota absoluta "z" por el valor real que tenga la profundidad del cauce en cada punto.

Esta reasignación de cotas simplemente consiste en: restarle al valor absoluto de la cota en ese punto la profundidad que tiene el cauce en ese mismo punto. Una vez las coordenadas son las correctas, con sus cotas corregidas, se vuelve a importar a QGIS el archivo de texto con los puntos que componen las 4 secciones guía.

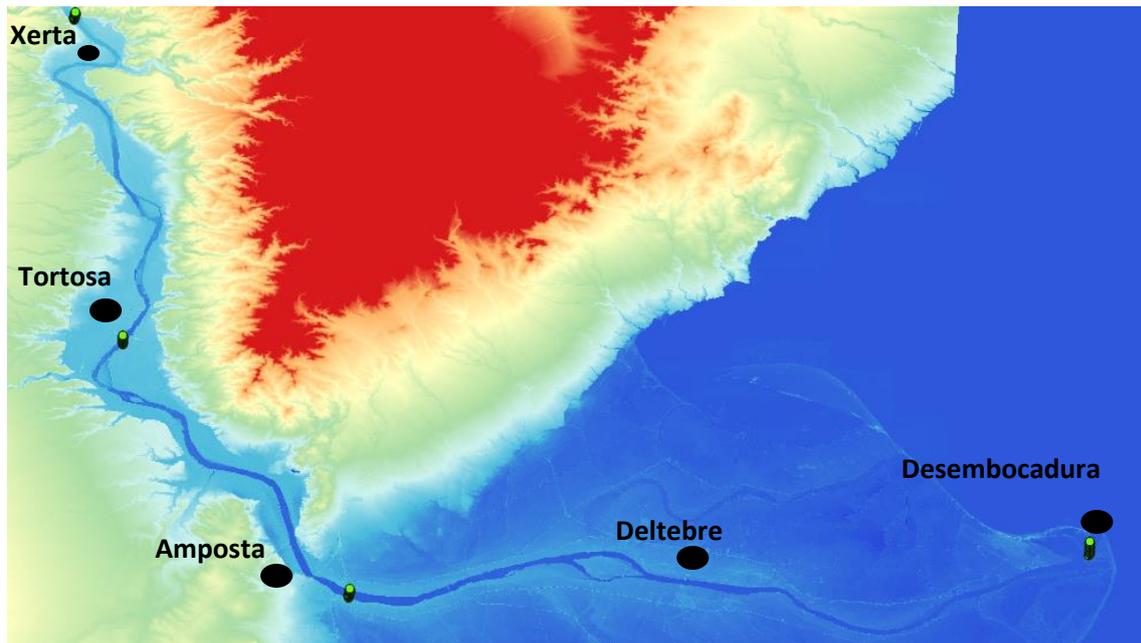


Figura 30: Ubicación de las secciones guía sobre el ráster, representadas con los puntos en color verde.

Una vez posicionadas las 4 secciones guía (**Figura 30**), se genera una capa superpuesta sobre el ráster inicial, la cual incluye las 4 secciones. Sobre esta capa se van creando/dibujando líneas que formarán secciones transversales al cauce, siempre perpendiculares.

Se necesita un número suficiente de secciones para crear un perfil del río lo más semejante posible al real. Esto implica ir variando tanto la anchura de las secciones, como la orientación de las mismas, a medida que se va avanzando aguas abajo en el río. Importante, tener siempre en cuenta la perpendicularidad, ya mencionada anteriormente. En este caso, es necesario emplear 65 secciones para trazar correctamente la trayectoria del Ebro, en su último tramo hasta la desembocadura. En la **Figura 31**, aparecen posicionadas sobre el ráster, todas las secciones que componen el trazado del cauce.

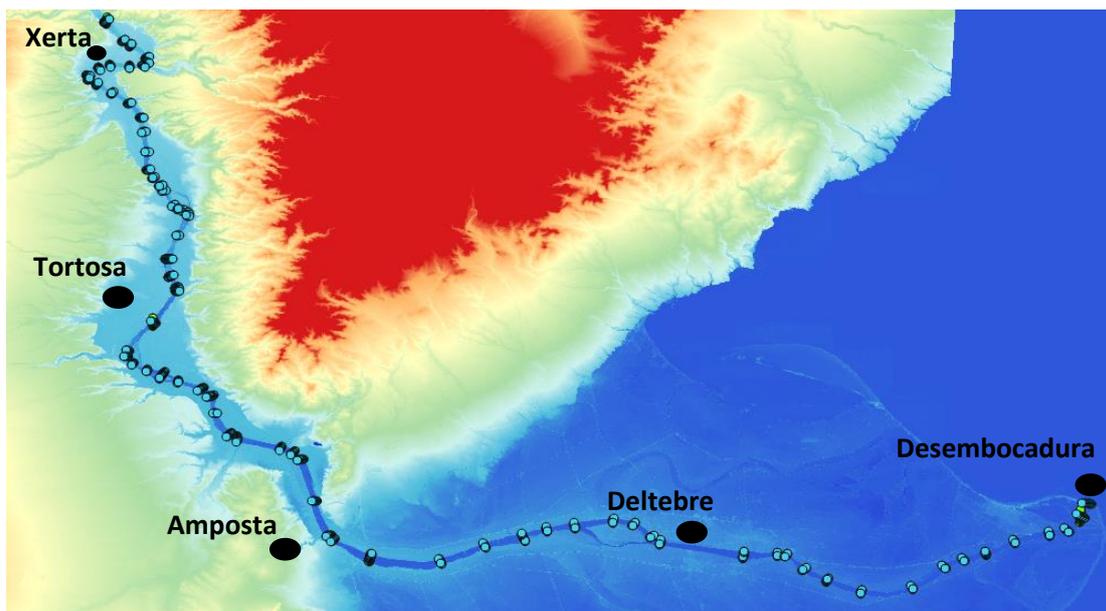


Figura 31: Ubicación de las 64 secciones transversales que definen el cauce del río en el tramo de estudio.

Para generar el cauce, se copia la sección guía que se tiene aguas arriba, en cada tramo (Xerta, Tortosa, Amposta y Delta). A la vez que se copian y se ubican, se va adaptando cada una de las 65 secciones transversales creadas (ver **Figura 31**), dándoles la orientación y la anchura correctas según la posición en la que se encuentren; añadiendo o quitando puntos, dependiendo de si el cauce es más ancho o más estrecho que en la sección guía correspondiente.

Una vez se tienen las coordenadas de los puntos que conforman las secciones transversales sobre la capa del cauce, se extraen de QGIS a una tabla Excel a través de la pestaña **tabla de atributos**, dentro de la opción de **propiedades** que aparece al hacer clic derecho en el símbolo de la capa creada, en el **panel de capas** (esquina inferior izquierda de la pantalla). En la tabla Excel, nos aparece las coordenadas “x, y, z”, de cada punto que conforma cada una de las 65 secciones, ordenadas por columnas. Las coordenadas “x” e “y” se fijan para no variar la posición en el plano de ninguna de las secciones con respecto al ráster original, en el cual aparece la localización real del cauce.

La labor a continuación consiste en ir variando la componente “z”, la cota, de cada uno de los puntos de las secciones transversales. Si se empieza en la sección aguas arriba, la cota de terreno disminuye de sección a sección con una pendiente descendente constante para cada uno de los tres tramos diferenciados en los que se divide el cauce.

Tabla 2	TRAMO	PENDIENTE (m)
TRAMO 1	Xerta-Tortosa	0.336
TRAMO 2	Tortosa-Amposta	0.184
TRAMO 3	Amposta-Desembocadura	0.080

Tabla 3: Pendientes de los tres tramos que consolidan el cauce.

Ajustadas las cotas de nivel, de cada uno de los puntos que forman las secciones, a la posición que ocupan teniendo en cuenta la pendiente del río, se procede a volcar todos los puntos que pertenecen a una misma sección a un documento con extensión “.dat”, siguiendo el formato de ordenación que se muestra en la **Figura 32**.

```

NSECTIONS 64
NPOINTS_SEC1 15
794261 4536067 9.100
794250 4536056 6.000
794240 4536045 3.600
794223 4536027 4.100
794212 4536016 4.600
794202 4536005 5.500
794192 4535994 5.750
794181 4535983 6.600
794171 4535973 7.600
794161 4535962 7.850
794150 4535951 8.500
794140 4535940 8.500
794130 4535929 8.900
794119 4535918 9.600
794109 4535908 9.600
NPOINTS_SEC2 12
794831 4535191 8.164
794821 4535180 5.014
794811 4535169 3.264
794800 4535158 4.264
794790 4535147 5.514
794780 4535136 6.664
794769 4535126 7.264
794759 4535115 7.664
794748 4535104 8.164
794738 4535093 8.164
794728 4535082 8.664
794717 4535071 9.264

```

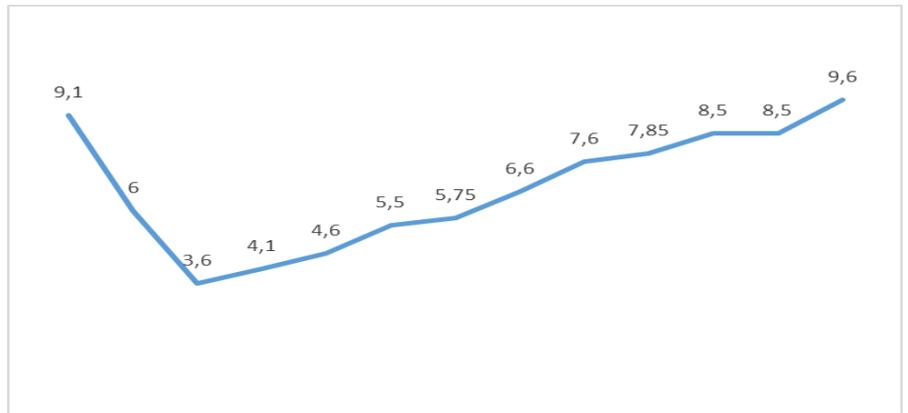


Figura 32: Ejemplo de fichero .dat que recoge los datos (x, y, z) de todos los puntos que forman todas las secciones transversales que definen el cauce del río en el tramo de estudio.

Figura 33: Ejemplo gráfico de puntos con cota de elevación de terreno de una de las secciones transversales que definen el cauce del río.

En la primera fila del fichero “.dat” que contiene las secciones ajustadas, que se muestra en la **Figura 32**, aparece el número de secciones totales (64). En la fila posterior aparece el número de sección de la que se trata (SEC1) y el número de puntos con los que cuenta dicha sección (15). En las siguientes filas, se encuentran las coordenadas de cada uno de los puntos de la sección correspondiente, ordenadas: en la primera columna “x”, en la segunda “y” y en la tercera la cota de terreno “z”.

Es recomendable comprobar gráficamente que las cotas que se van asignando a los puntos de las secciones mantienen la forma de la sección mostrada en la **Figura 33**.

Una vez generadas las secciones que conforman el cauce, es turno de delimitar el contorno del mismo, marcando las orillas reales que tiene el río Ebro en el ráster inicial. Este proceso comienza creando una nueva capa en QGIS, en la que se marcará manualmente y de manera gráfica, una de las dos orillas sobre el ráster ensamblado inicial. Repitiendo el mismo proceso para generar en otra capa la otra orilla. Activando ambas capas, el resultado obtenido tiene que ser tal y como se muestra en la **Figura 34**.

De la misma manera que para las secciones, se exporta a un documento de tipo texto las coordenadas “x” e “y” de cada uno de los puntos que conforman las orillas del río Ebro.

Con las 65 secciones transversales que definen el cauce y con las coordenadas de los puntos que componen las orillas se reconstruye el cauce del río Ebro para generar un ráster que cubra el cauce del río. Para la reconstrucción del cauce se ha usado un algoritmo propuesto por Caviedes et al [9], que genera la información perdida del cauce en el ráster a partir de los datos anteriores preservando los patrones morfológicos naturales como meandros o curso del río.

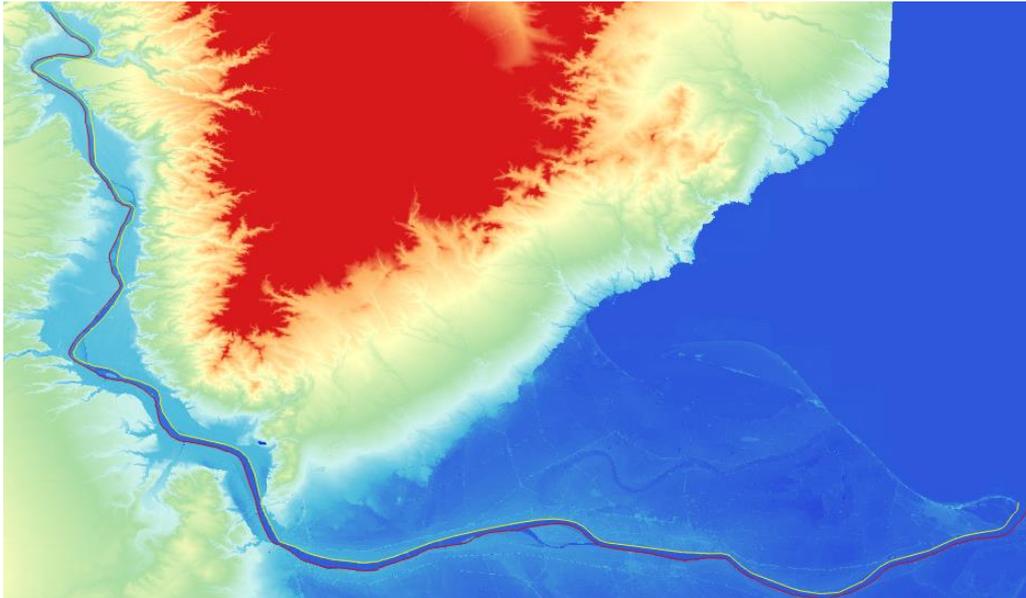


Figura 34: Delimitación de las orillas del río Ebro en el tramo de estudio sobre el ráster inicial. De color amarillo aparece marcada la orilla derecha (según está orientada la imagen en planta) y de color rojo aparece de la orilla izquierda.

Una vez se ha generado el cauce reconstruido éste se almacena en un archivo ráster. Cargado el ráster del cauce en QGIS se verifica que tiene la forma y las cotas de profundidad requeridas.

Es importante comprobar que realmente el cauce mantiene la pendiente descendiente lo más constante posible, tal y como se ajustó en los archivos de texto. Al tratarse de un terreno muy plano, como es el Delta del Ebro, el crear zonas llanas, o con pendiente positiva, daría lugar a desbordamientos en las simulaciones. De ahí la necesidad de que exista una pendiente en la planicie Deltaica, aunque sea mínima.

En la **Figura 35** se puede verificar que las cotas y el contorno del cauce reconstruido coinciden con los valores ajustados en los documentos de texto, es decir, que morfológicamente tiene la misma apariencia que el cauce acotado por las orillas, y numéricamente las cotas coinciden con las seleccionadas.

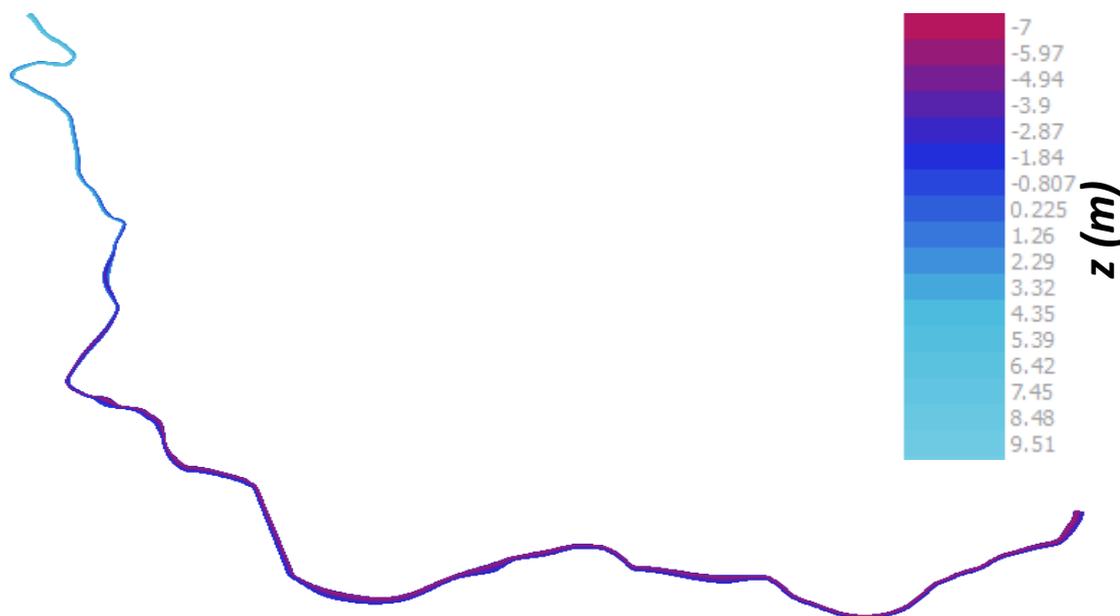


Figura 35: Ráster del cauce reconstruido, representado por el valor de sus cotas en metros.

Combinación del ráster del cauce con el ráster inicial

Este es uno de los pasos clave para poder obtener un buen dominio a la hora de simular los distintos casos. Es imprescindible que ambas partes (la parte orográfica formada por los rásteres del IGN con el cauce del río recortado y el nuevo cauce generado) casen perfectamente, sin crear huecos en el contorno de unión. Los huecos harían la función de sumideros infinitos por los que se derivarían grandes cantidades de volumen de agua, provocando simulaciones erróneas.

A continuación, se explica más al detalle lo enunciado anteriormente.

Debido a la geometría curva que tiene el cauce generado, el tamaño y la forma del cauce, resulta obligado dividir el cauce en dos tramos para poderlos combinar con las dos orillas del río. El proceso consiste en dividir, por un lado, el ráster del cauce en dos polígonos, y por otro dividir el ráster inicial en las dos márgenes del río, delimitando ambas márgenes por las orillas del río; quedando así el espacio justo entre ambas márgenes para ensamblar el cauce.

El proceso comienza creando una capa superpuesta al ráster del cauce reconstruido (ver **Figura 36**), cuya forma es exactamente la superficie en planta del cauce. Una vez generada la capa, se divide esta misma en dos polígonos, abarcando el primero de ellos la parte con orientación más “vertical” del cauce, perteneciendo al segundo polígono la parte más “horizontal”, la cual se corresponde con la zona del cauce integrada en la planicie Deltaica.

Con la capa ya dividida en dos polígonos, gracias a la opción **extracción**, dentro del menú de la herramienta **ráster**, que aparece en la barra de herramientas de QGIS, convertimos los polígonos de la capa creada en dos rásteres independientes (ver **Figura 37**), cuyas cotas se extraen del ráster del cauce reconstruido.

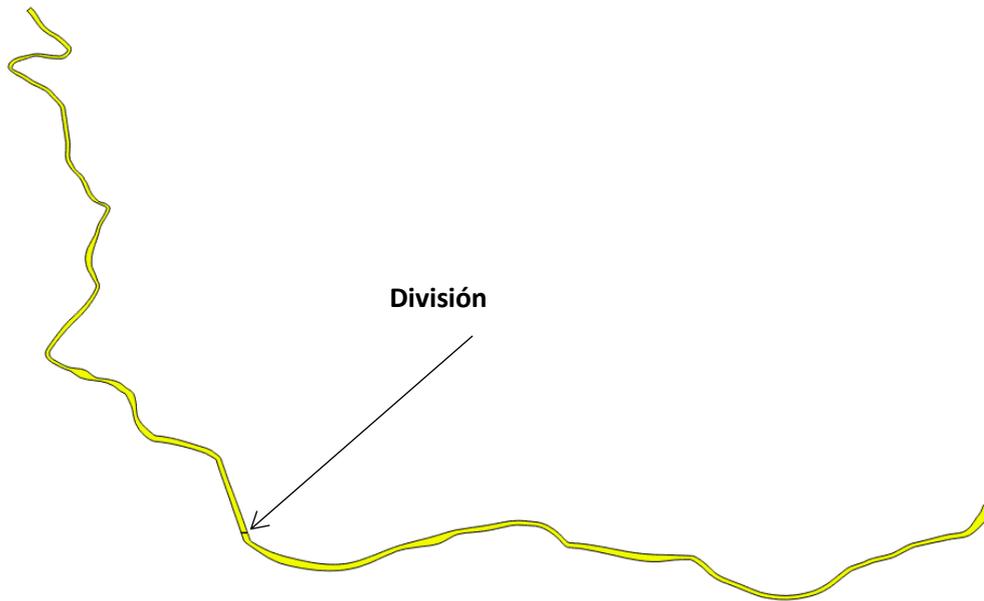


Figura 36: Capa "Cauce", en color amarillo, generada en QGIS sobre el ráster del cauce reconstruido, delimitando toda la superficie del cauce. Permite la división del ráster del cauce en 2 partes: vertical y horizontal.

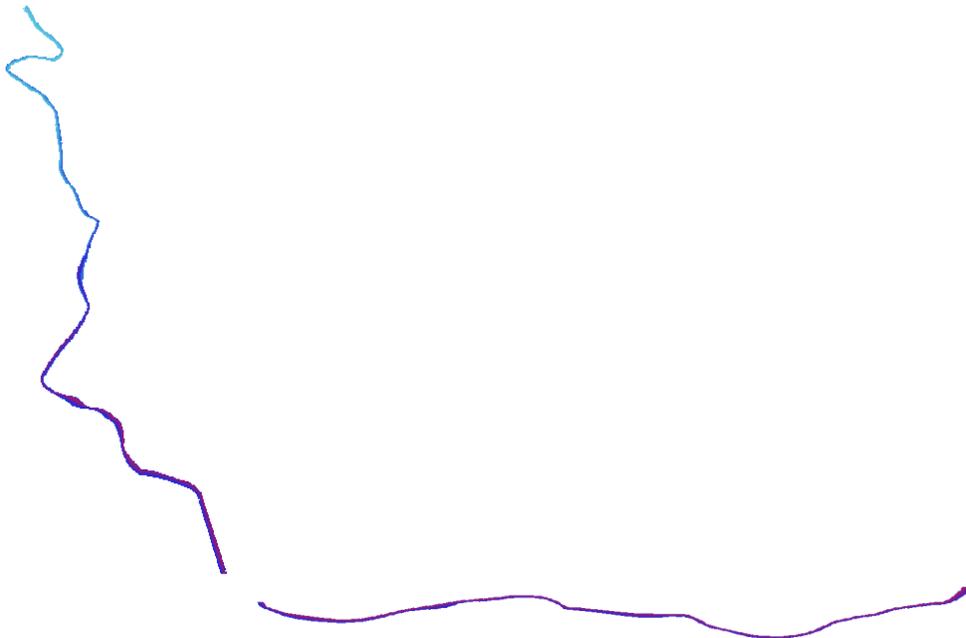


Figura 37: Rásteres generados a partir de los polígonos del cauce reconstruido del río Ebro en el tramo de estudio.

En lo que a generar las márgenes del río se refiere, el proceso es similar al empleado anteriormente para el cauce. Comienza con la creación de una capa (sobre el ráster inicial ensamblado a partir de los cuadrantes descargados del IGN), para cada una de las márgenes, sin incluir el espacio del cauce; es decir, delimitando las capas por las orillas del Ebro. La geometría de las capas, se pueden apreciar en la **Figura 38**.

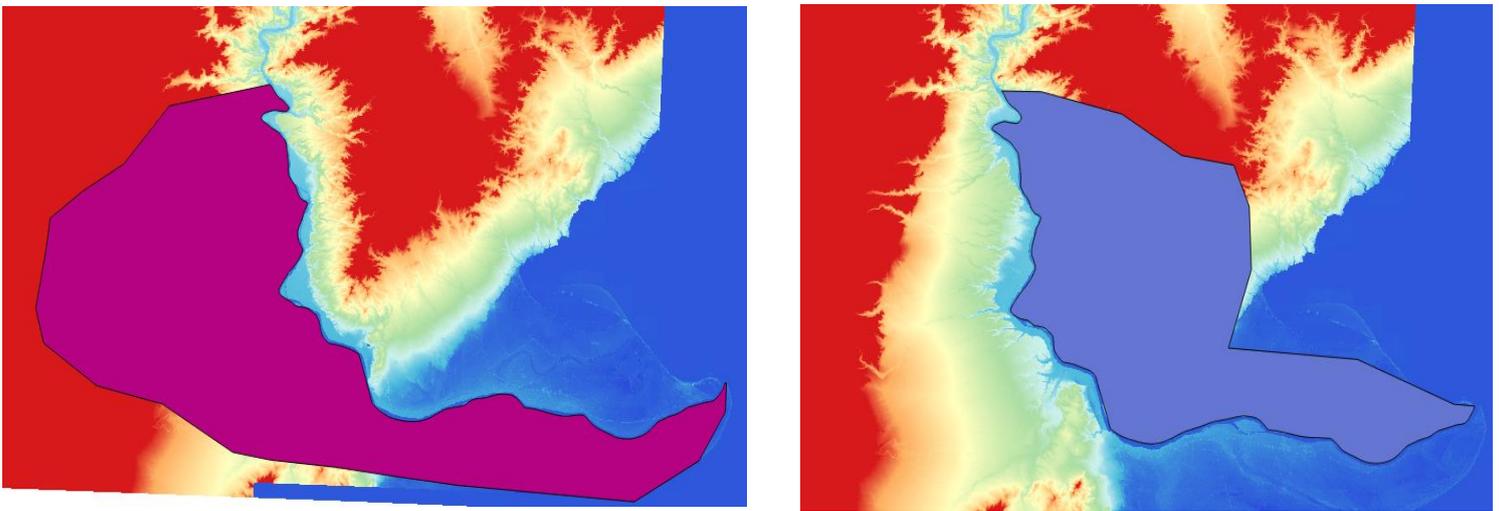


Figura 38: Capas sobre el ráster inicial correspondientes a ambas márgenes del tramo de estudio del río Ebro. En color morado a la izquierda la margen derecha y a la derecha en color cian la margen izquierda.

Una vez generadas las capas, se utiliza la misma opción de **extracción** mencionada anteriormente, permitiendo crear los dos rústers pertenecientes a ambas márgenes. Igual que en el caso del cauce, los rústers de ambas márgenes adquieren las cotas del ráster ensamblado con los cuadrantes del IGN.

La **Figura 39** muestra el ráster generado tras ensamblar los rústeres de ambas márgenes. Dicho proceso se consigue por medio de la opción **combinar**, dentro de la herramienta **rúster**, perteneciente al panel de herramientas de QGIS.

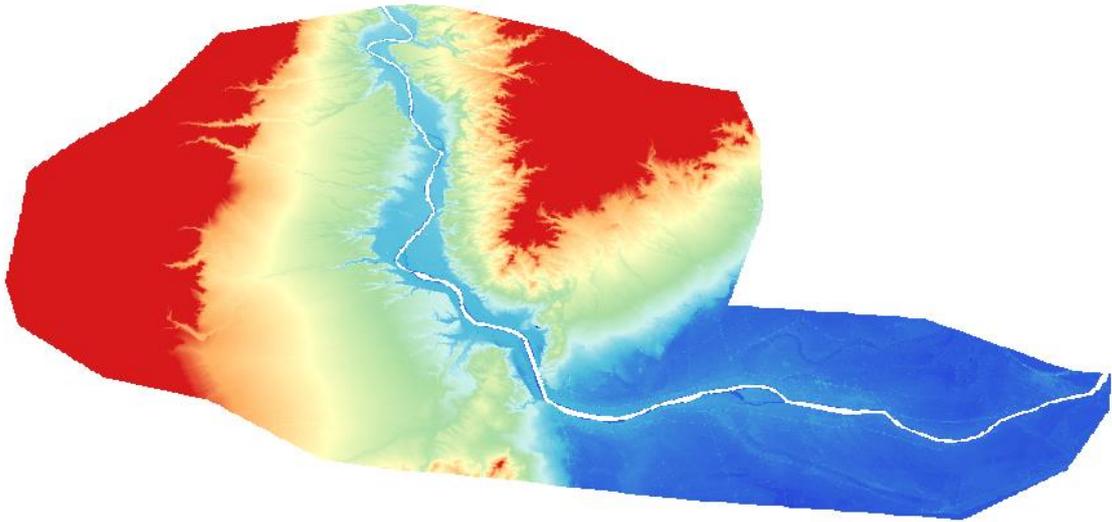


Figura 39: Rúster combinación de ambas márgenes del tramo en estudio.

Sobre el ráster que aparece en la **Figura 39**, se vuelve a emplear la opción de **combinar**, para adjuntar los dos tramos que conforman el cauce reconstruido (ver **Figura 37**) y crear el ráster final, **Figura 40**.

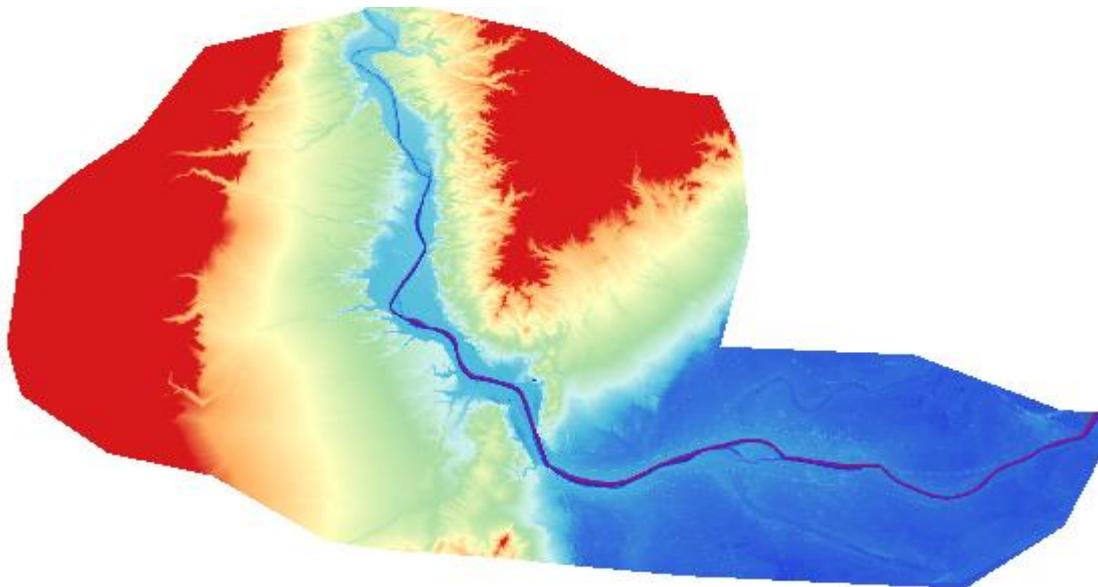


Figura 40: Rúster final del dominio a modelizar.

Como último aspecto a la hora de crear el ráster definitivo, sobre el cual ya se pueda proceder a mallar el dominio requerido y las condiciones de contorno elegidas, es necesario cerciorarse de que se hayan solapado correctamente los rásteres de las márgenes con los dos rásteres que componen todo el cauce del río; con el fin de evitar posibles puntos (píxeles) en blanco, es decir, espacios del ráster que no tienen ninguna cota asignada. Estos puntos, al no tener una cota asignada, pasan a tener por defecto de QGIS una cota de -9999 metros. Estos espacios se asemejarían a sumideros a la hora de simular, ya que por ellos se vertería gran cantidad de agua dando lugar a errores en la simulación. Un ejemplo de estos errores se puede apreciar en la **Figura 41**.



Figura 41: Detalles de píxeles en blanco a lo largo de las orillas del río, justo en las partes donde se solapan los rásteres de las márgenes con los del cauce.

Para corregir este error, es necesario añadir el complemento **serval en el programa QGIS**. Esta herramienta pertenece a la lista de complementos de QGIS, la cual se integra en el panel de herramientas de QGIS. Para emplear esta herramienta, siempre es necesario tener activado el ráster en el panel de capas de QGIS. Dentro de este complemento aparecen una serie de iconos (ver **Figura 42**). Activando la pipeta y haciendo clic en cualquier píxel del ráster, ésta guarda la cota de dicho píxel. Si a continuación se selecciona el icono del lápiz y se hace clic en cualquier píxel del ráster, este pasa a tener el valor de la cota que se haya seleccionado con la pipeta. De esta manera, para modificar los píxeles sin cota, lo que se hace es seleccionar con la pipeta la cota de un píxel colindante y otorgársela al píxel en blanco haciendo clic en él con el lápiz.



Figura 42: Iconos del complemento SERVAL del programa QGIS.

Delimitación y mallado del dominio de cálculo

Con el MDT ya listo en QGIS, es momento de delimitar el dominio más óptimo sobre el cual se simularán los distintos casos. Es necesario que el dominio abarque toda la superficie del cauce y sus orillas, pero también que contenga dentro de sus límites el terreno de la planicie Deltaica que linda con el cauce (ver **Figura 43**). Durante las simulaciones, es más que probable que el cauce tienda a desbordar en esa zona, debido a la ínfima diferencia de cotas del terreno, y el flujo de agua y sedimentos empiece a desbordar por dicho terreno.

En la **Figura 43** aparece delimitado el dominio a mallar. Debido a la dependencia del tiempo de cálculo con la resolución del dominio (refinamiento de celdas) y con la necesidad de realizar los posteriores cálculos en RiverFlow2D sobre CPU, es necesario ajustar lo máximo posible el tamaño del dominio, para minimizar este tiempo de cálculo.

El calcular en CPU implica ralentizar por diez el desarrollo de las simulaciones en comparación con el modo GPU; pero Riverflow2D aún no contempla el cálculo de sedimentos en GPU. De esta manera, si se tiene un menor número de celdas, el cálculo y obtención de resultados ante diferentes casos a simular no será tan costoso, puesto que se reduce el número de celdas a analizar cuando el fluido y sedimento avancen por ellas.

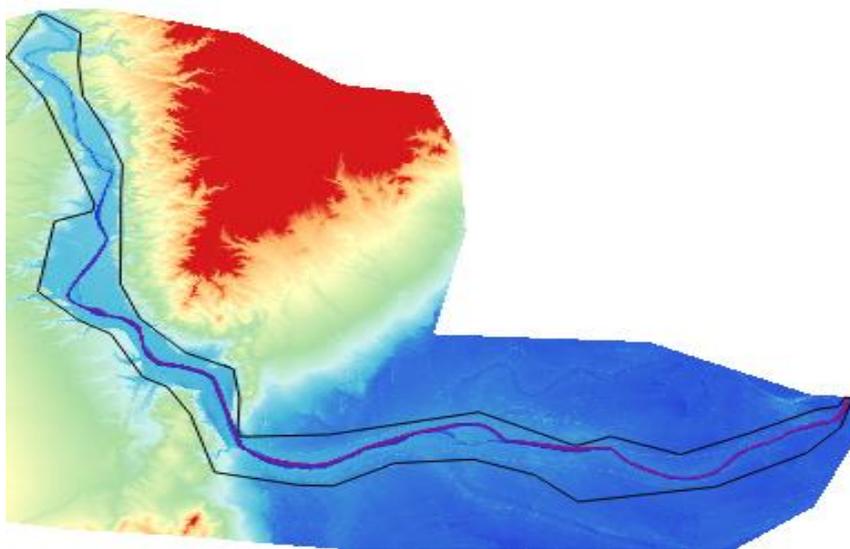


Figura 43: Dominio acotado sobre el ráster que conforma el MDT.

Tras delimitar el dominio óptimo pasaremos a generar la malla de cálculo; es decir, a dividir el dominio en pequeñas celdas en las que se almacenarán el valor de las variables de flujo y sedimento y se irán actualizando en tiempo y espacio conformando lo que llamamos una simulación numérica de la evolución de las variables en el problema a resolver. Para la elección de la geometría y el tamaño de celda idóneo es necesario realizar distintas simulaciones de prueba.

Tras la realización de distintas pruebas y ver cómo se comportaba el flujo de sedimentos dependiendo del tamaño de celda, a la hora de obtener resultados fiables, se optó por escoger **un tamaño de celda de 75m, con una geometría triangular.**

Para optimizar y mejorar los resultados del cálculo, en la parte del cauce y en aquellos puntos en los que se inyecta directamente el flujo de sedimentos, celdas de 75m resultan excesivamente grandes, por eso es necesario refinar la malla de cálculo en estas zonas; utilizando así una malla adaptada. Para ello se emplea la herramienta **MeshDensityLine** (dentro del panel de capas de QGIS), con la que, trazando una línea en la zona requerida, dentro del dominio mallado, afinamos la densidad de la malla al tamaño deseado. De esta manera las celdas que corresponden al cauce pasan a tener **un tamaño de celda de 15m**. Con todo esto resulta una malla final del dominio que contiene **382799** celdas.

Para realizar el refinamiento de la malla en la sección del cauce, se traza la línea amarilla que aparece en la parte central del cauce de la **Figura 44**, de manera que recorra axialmente la trayectoria del cauce. En la medida de lo posible, se debe trazar por el centro del cauce.

Complementariamente, y con objeto de mejorar el cálculo a la hora de integrar el flujo de sedimentos inyectado a través de las condiciones de contorno de entrada, con el flujo natural que circula por el cauce del río. También es necesario afinar la malla en las zonas donde hay condiciones de contorno de entrada; dibujando nuevas líneas para el cambio de densidad de la propia malla (líneas amarillas), que abarquen toda la superficie donde influye la inyección directa de sedimentos en el flujo regular del cauce. Tal y como se aprecia en las ampliaciones de la **Figura 44**, se marca con la línea amarilla todo el contorno cercano a la condición de contorno, por donde se inyectará el sedimento en las posteriores simulaciones.

Si no se refinase la malla en las zonas de las condiciones de contorno, los valores de entrada del flujo de agua y sedimentos fluctuarían constantemente, provocando lecturas erróneas. A su vez, el afine de la malla en estas zonas, permite que el flujo que ya circulaba por el cauce y el flujo entrante por las condiciones de contorno de entrada, confluyan perfectamente, permitiendo el aumento de velocidad del flujo cohesionado que continua aguas abajo.

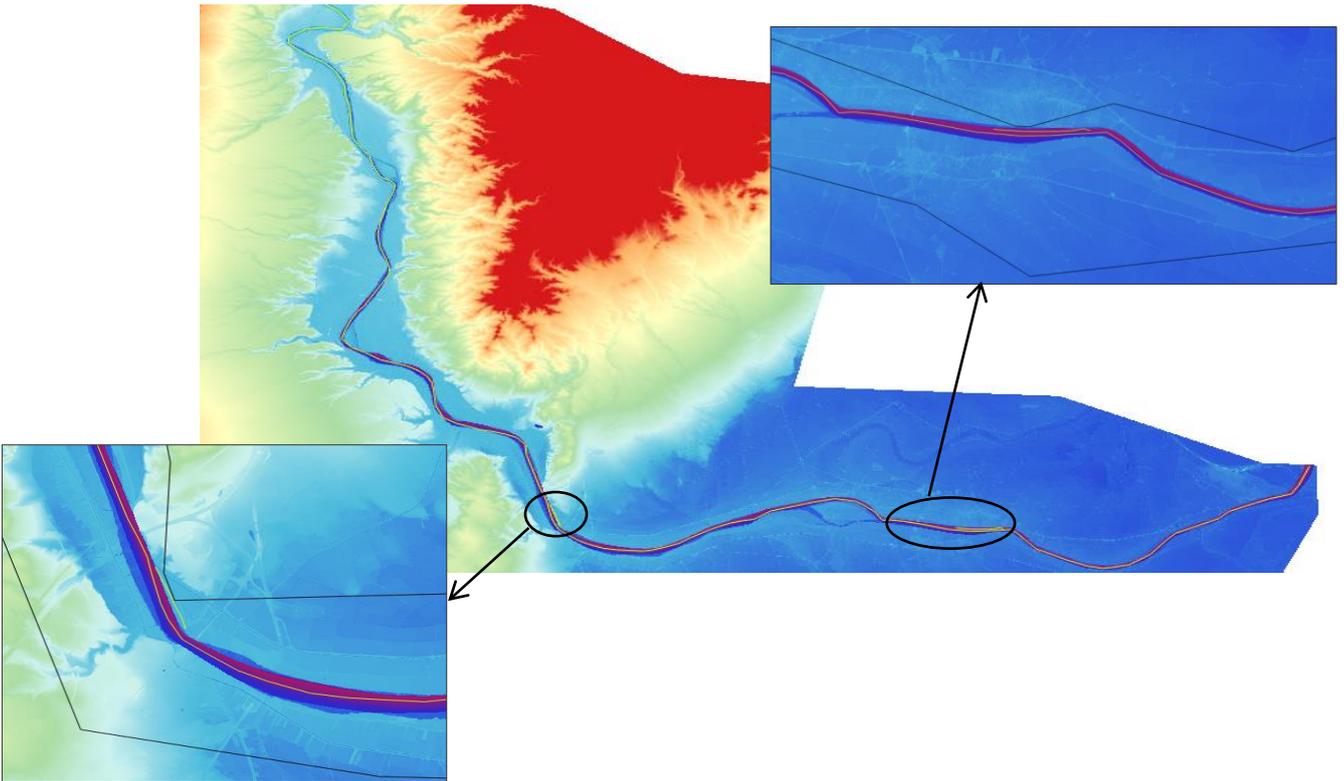


Figura 44: Sobre el MDT, línea de color amarillo que marca la zona en la que se va a refinar la malla de cálculo. Arriba y abajo, detalle de dos zonas del cauce en las que se va a refinar que corresponden a zonas de vertido de sedimentos.

Una vez delimitadas las zonas del dominio donde se quiere refinar la malla, **Figura 44**, se procede a remallar el dominio. En la **Figura 45**, se puede apreciar con detalle, dos zonas de la malla de cálculo donde se observa que el tamaño de las celdas va disminuyendo conforme el terreno del dominio se aproxima al cauce del río.

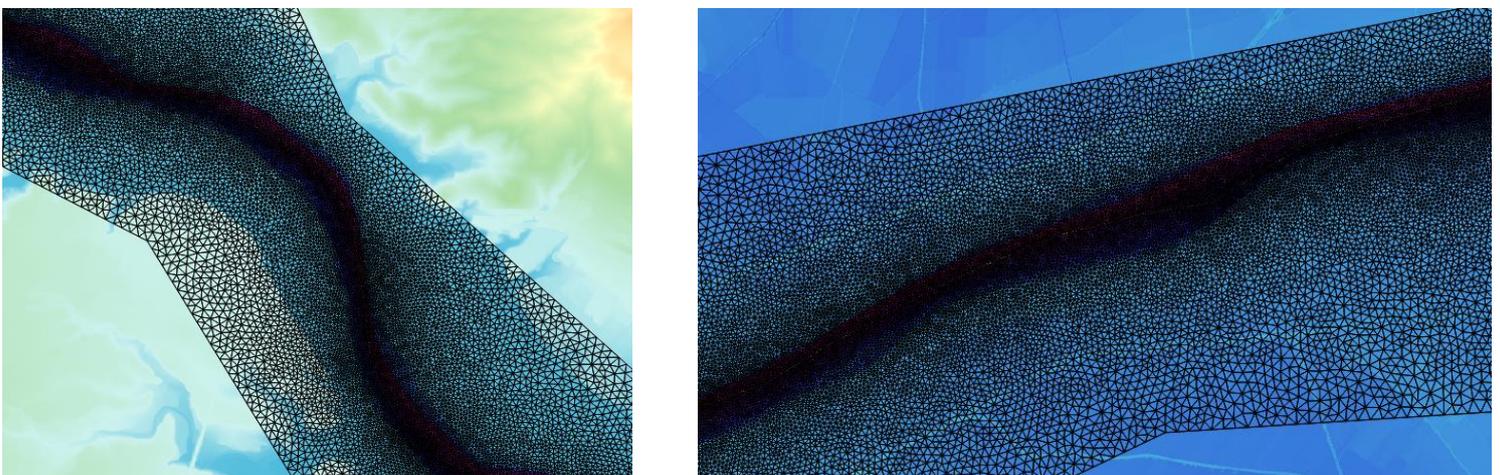


Figura 45: Detalles de la malla de cálculo en dos zonas del dominio, donde se puede apreciar el refinamiento de la malla en el cauce (tamaño de celda de 15m) frente al resto del dominio (tamaño de celda 75m).

Complementariamente al terreno mallado sobre el MDT en QGIS, en la **Figura 46** se aprecia el tamaño de las celdas de la malla correspondientes al cauce, vistas mediante ParaView. En la imagen de la izquierda se puede apreciar cómo se afina el tamaño de las celdas a medida que el terreno se acerca al cauce del río Ebro. El tamaño de las celdas que mallan el cauce, se pueden apreciar perfectamente en la imagen de la derecha, donde se ven desde una perspectiva en el interior del cauce.

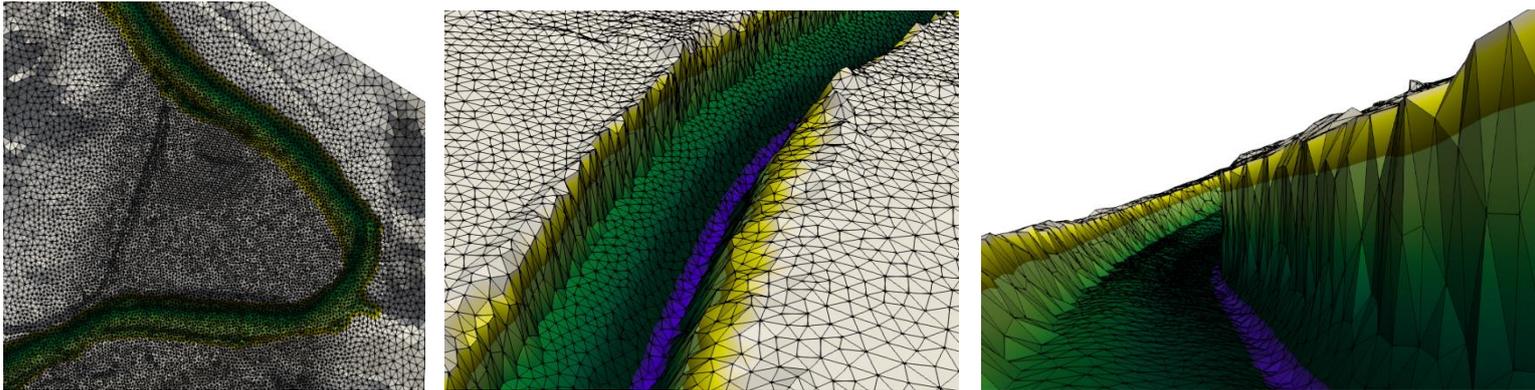


Figura 46: Diferentes perspectivas de la malla sobre el cauce, donde se puede apreciar el tamaño de las celdas del cauce.

Asignación del coeficiente de rozamiento de Manning y la máxima profundidad posible a erosionar del lecho del cauce

Al carecer de información suficiente para otorgar a cada zona del terreno que abarca el dominio un coeficiente de rozamiento de Manning diferente según los usos del suelo [17], el modelo para simular cuenta con un único valor. Estipulado conforme a las características generales del terreno, el coeficiente de rozamiento de Manning que se utiliza para simular este terreno es $n = 0.025$, atendiendo a los valores encontrados en la bibliografía de referencia.

Para delimitar la zona sobre la que se debe aplicar dicho coeficiente, se crea una nueva capa en el panel de capas de QGIS, **Manning N**. Comenzando por marcar el contorno de la capa con la herramienta correspondiente para acabar dándole el valor de 0.025 en este caso.

Tal y como se muestra en la **Figura 47**, el contorno abarca de sobras toda la superficie mallada, la cual conforma todo el dominio a la hora calcular, para evitar zonas que se queden sin un coeficiente n asignado, lo cual daría un error y no podríamos proceder a realizar la simulación.

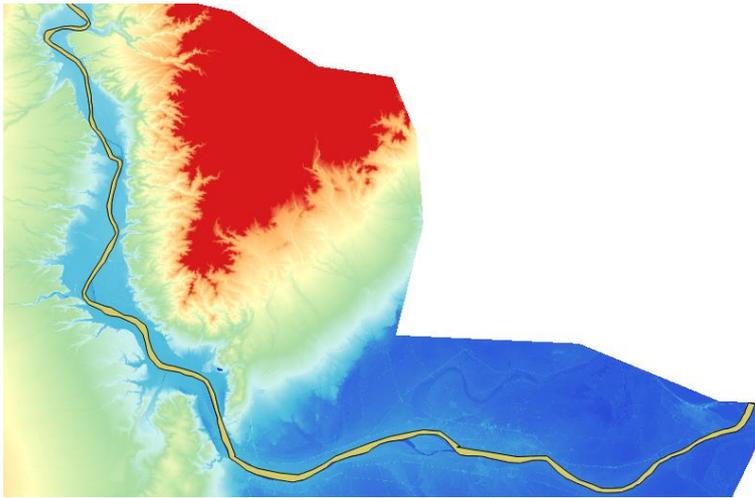


Figura 48: Capa en QGIS, que representa la zona del dominio donde, el terreno es erosionable hasta 0.5 m.

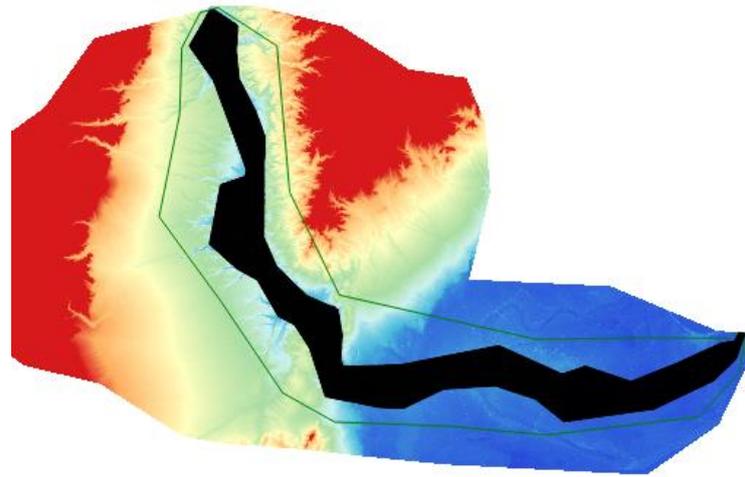


Figura 47: Superficie sobre la que se aplica un coeficiente de rozamiento de Manning $n=0.025$, delimitada por el contorno en color verde.

Al tratarse de un estudio que se basa en la simulación del transporte de sedimentos, es necesario delimitar cual es la profundidad máxima que el flujo de agua y sedimentos puede erosionar. Partiendo de la superficie inicial del lecho del río, con la que cuenta el ráster del cauce reconstruido, se crea una capa en QGIS y se le asigna una máxima profundidad para erosionar el lecho del cauce de **0.5m**. Dicha profundidad debe ser suficiente para simular los distintos casos a plantear.

En la **Figura 48**, se puede apreciar la capa *MaximumErosionDepth*, perteneciente al panel de capas de QGIS. La capa abarca con la mayor exactitud posible toda la superficie del río, sin coger terreno fuera del cauce que suponga un aporte extra de sedimentos al flujo.

Condiciones de contorno

A la hora de simular diferentes condiciones en el flujo que circula a lo largo de todo el cauce que abarca el dominio, es necesario imponer diferentes condiciones de contorno a la entrada y a la salida para que las simulaciones permitan obtener resultados lo más similares posibles a la realidad.

De esta manera, hay una entrada principal de caudal de agua (condición de contorno de entrada), con posibilidad de serlo también de sedimentos, en el inicio del dominio, aguas abajo de la represa de Xerta, a la altura de la propia localidad. Se simula mediante una entrada de caudal de agua y sedimentos, cuyos valores se pueden ajustar a los tiempos de simulación. Esta entrada representa, y pretende simular, el caudal estándar del propio río Ebro, en según qué épocas o casos concretos.

La desembocadura del río Ebro en el mar Mediterráneo se representa mediante una condición de contorno de salida libre de caudal; ya que no está implementada en el programa Riverflow2D una condición de contorno de salida tipo marea.

Debido a la disposición orográfica del terreno, y como se puede apreciar en la **Figura 49** (arriba izquierda), las zonas de inyección directa de sedimentos están dispuestas en puntos del cauce más o menos equidistantes entre sí, perteneciendo dos de estos puntos de inyección a la zona del cauce previa a la llanura Deltaica, con el objetivo de acelerar el flujo de sedimentos. Puesto que se trata de una zona del cauce donde la pendiente es mayor, y por tanto la velocidad del flujo se va incrementando conforme el fluido avanza aguas abajo por medio del cauce, hay que aprovecharla para que los sedimentos lleguen lo más aguas abajo posible. Dichos puntos están ubicados aproximadamente a la altura de las localidades de Tortosa y Amposta (ver **Figura 23**).

El último punto de inyección de sedimentos antes de la desembocadura está ubicado en la mitad de la planicie Deltaica, en la localidad de Deltebre. Con el objetivo de que los sedimentos que se puedan inyectar desde este punto lleguen a la zona de la desembocadura, o incluso si el caudal es abundante, mar adentro (ver **Figura 49**, arriba a la izquierda).

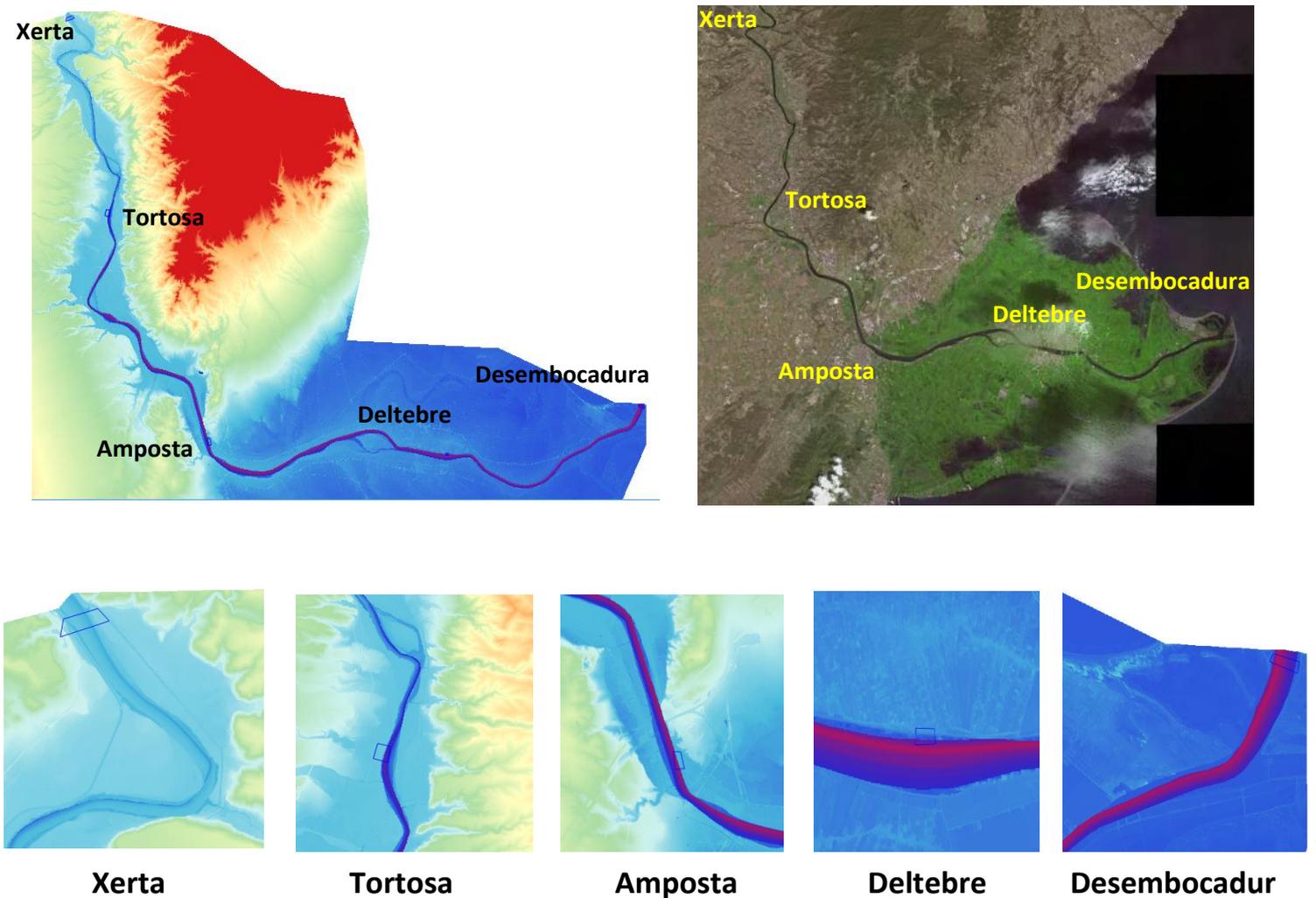


Figura 49: Arriba, ubicación de las condiciones de contorno sobre el ráster del MDT y sobre una imagen satélite del terreno real (aguas arriba en Xerta y aguas abajo en Desembocadura). En la parte inferior, polígonos que delimitan dónde se encuentran las condiciones de contorno y las zonas de inyección de sedimento a lo largo del cauce.

Puntos y secciones de medida

Con el fin de obtener resultados periódicamente con los que analizar los resultados obtenidos de las simulaciones con RiverFlow2D, es necesario ubicar a lo largo del recorrido del cauce distintos puntos de observación y secciones transversales de medida en los que registrar la evolución temporal de las variables.

Por ello, sobre el MDT es necesario ubicar una serie de puntos y secciones en posiciones estratégicas del cauce. Inicialmente, se pusieron cuatro puntos de medida, numerados del 1 al 4, y cuatro secciones cercanas a estos puntos tal y como se puede apreciar en la **Figura 50**.

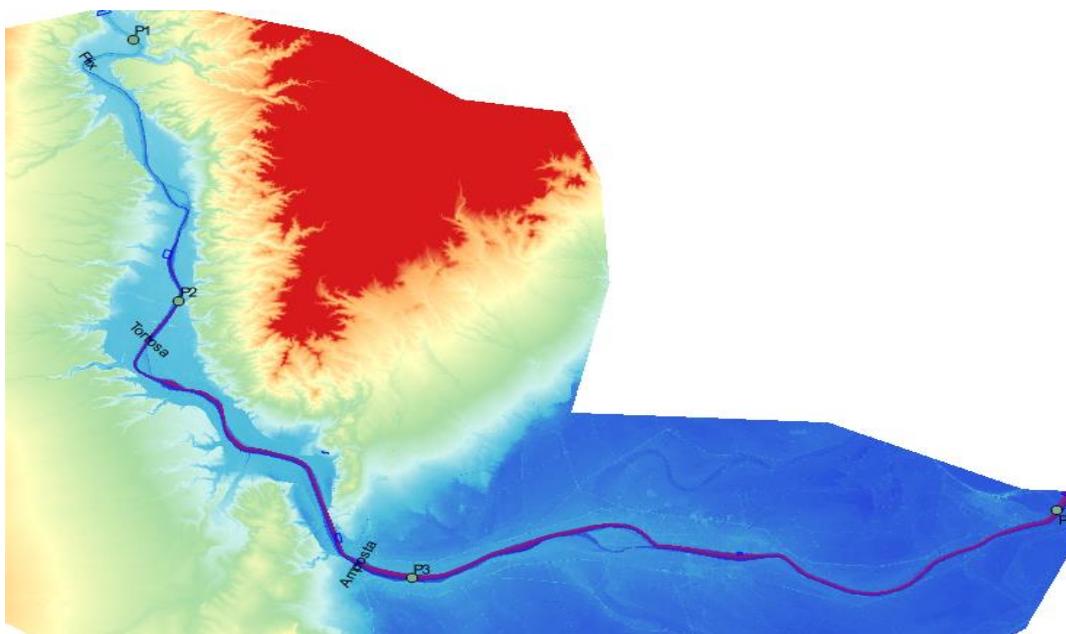


Figura 50: Localización de los puntos de observación y secciones transversales de medida iniciales.

Los puntos y secciones de medida están situados en una posición cercana y aguas abajo a cada una de las entradas de flujo de agua y sedimentos (ver **Figura 50**). De esta manera, se puede observar en las primeras simulaciones, las zonas por donde el río desborda, los puntos donde el flujo tiene zonas de remanso, las zonas del cauce donde el sedimento en suspensión se deposita, las zonas donde el flujo erosiona el lecho del cauce....

Mediante los puntos de observación se obtienen variables relevantes como: **velocidad del fluido; velocidad del sedimento** (por unidad de superficie, en m^2/s , tanto en eje x como y); **profundidad del lecho del cauce; altura de agua; etc.**

Las secciones transversales de medida aportan el dato extra del **caudal medio de agua y sedimentos**, medido en cada uno de los puntos que componen la sección que cruza transversalmente el cauce del río. Conforme avancen las simulaciones, la ubicación y el número de puntos y secciones puede ir variando y depurándose, con el fin de tomar datos realmente relevantes, de las zonas donde interese. Las ubicaciones posteriores se detallan en las explicaciones de las distintas simulaciones.

Anexo3. Generación de la condición inicial en el cauce

Preparados los datos de partida con QGIS, y con la malla sobre el MDT lista para comenzar a realizar las simulaciones numéricas; el siguiente paso necesario es generar una condición inicial. Es necesario que el cauce tenga una cierta altura de agua en estado estacionario para recrear con mayor exactitud las condiciones reales del río Ebro en su tramo final hasta el Delta en condiciones normales de flujo. Para ello se genera un archivo “. FED” con las condiciones iniciales del cauce que se necesiten, sobre las que comenzarán las distintas simulaciones que fundamentan este proyecto.

El proceso comienza lanzando una primera simulación en RiverFlow2D, con unas determinadas condiciones de contorno y con una duración lo suficientemente grande, para que, en su último estado de la simulación, el cauce cuente con el calado requerido. Con aproximadamente 4 metros de altura de agua, en la mayoría del cauce, sería suficiente para poder comenzar a simular. Contando que, en las simulaciones posteriores, el calado irá aumentando hasta valores reales, a medida que entre un caudal de agua por las condiciones de contorno de entrada constante de flujo.

Para lograr un calado de 4 metros, con un tiempo de simulación de 20 horas, debería ser suficiente para alcanzar el estacionario en todo el dominio. Se registran resultados en periodos de 5 horas, para visualizar posteriormente la progresión de la altura de agua/calado a lo largo de todo el dominio del río. Es necesario volcar en ParaView los archivos que han sido generados tras la simulación para poder visualizar el avance del flujo de agua y el aumento del calado con el paso del tiempo.

En cuanto a las condiciones de contorno en la simulación, para lograr el estacionario en todo el dominio, es suficiente con crear una única condición de contorno de entrada al inicio del cauce (justo aguas abajo de la represa de Xerta) y una condición de contorno de salida libre del flujo al final del cauce (en la desembocadura al mar). De esta manera se introduce un caudal de agua, **$Q_w=300 \text{ m}^3/\text{s}$** , al inicio del cauce. Se trata del valor medio con el que cuenta el cauce del Ebro durante gran parte del año, medido en la estación de aforo de Tortosa.

En este caso, como aún no se inyectan sedimentos, la simulación se puede correr en GPU, de manera que se obtienen los resultados de una manera mucho más rápida.

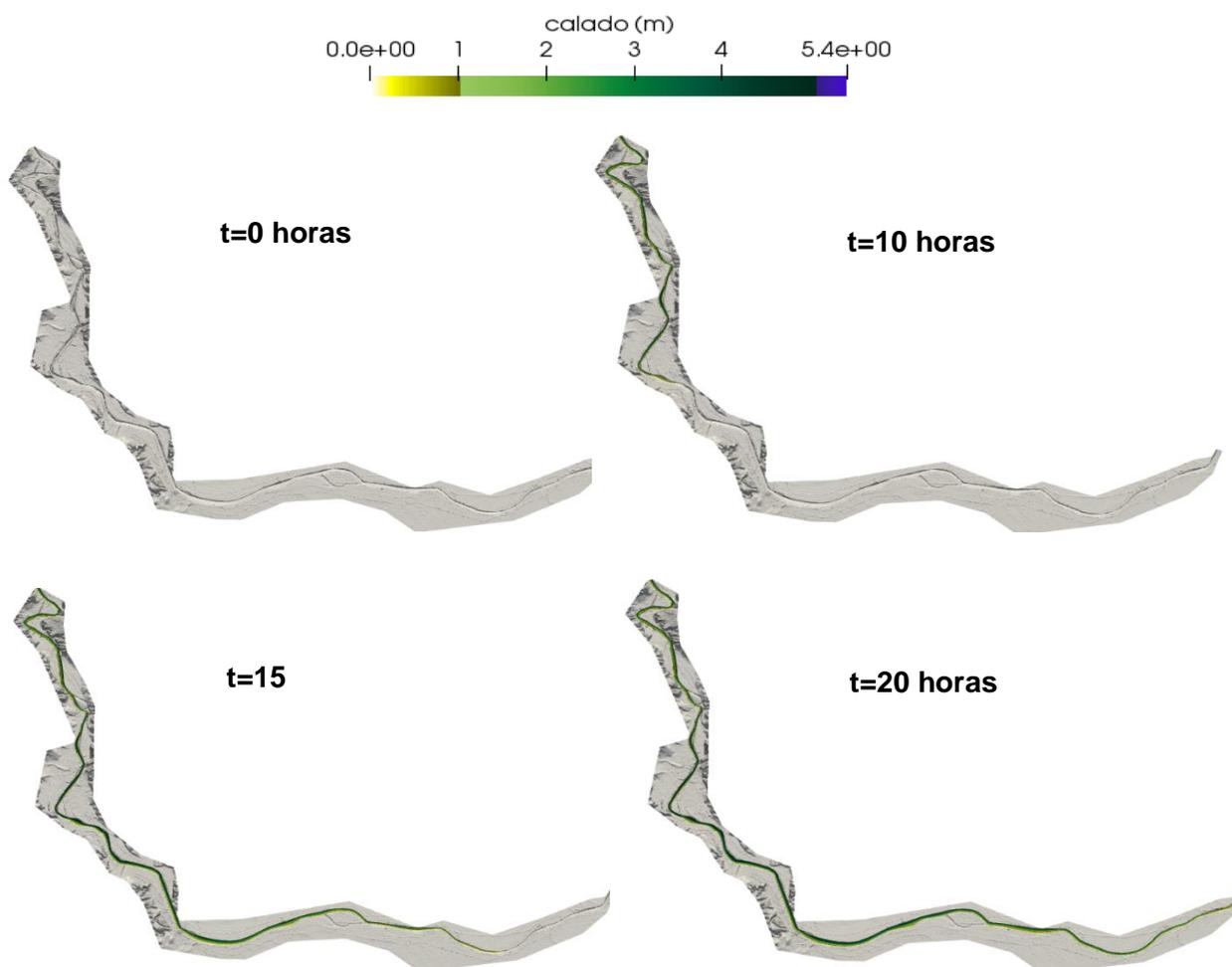


Figura 51: Evolución temporal de la altura de agua sobre el dominio de cálculo para generar la condición inicial.

En la secuencia de la **Figura 51** se puede observar cómo va aumentando el calado del río con el paso de las horas, consiguiendo al final un calado de aproximadamente 4 metros en el primer tramo del río, altura aceptable para tomarla como condición inicial en las simulaciones que se realizarán posteriormente.

Esta primera simulación también es útil para comprobar si el cauce reconstruido está perfectamente ensamblado con el resto del dominio orográfico. Es apreciable que el transcurrir del flujo de agua por el cauce es perfectamente normal, sin existencia de sumideros extraños que provocarían derivaciones repentinas de caudal.

A lo largo de las simulaciones posteriores se plantean diferentes escenarios, en los que variarán los puntos intermedios de entrada de caudal y sedimento, las cantidades tanto de caudal de agua como de sedimento, tiempos de simulación...; con el fin de llegar a una conclusión lo más contrastada posible que ayude a entender cuáles son los factores que ayudan a que el sedimento pueda depositar, ya no en la desembocadura del Ebro en el Mediterráneo, sino entre 1 y 2 kilómetros mar adentro.

Anexo 4. Resultados de las simulaciones numéricas

Escenario 1: inyección de sedimentos en tres puntos (Xerta, Tortosa y Amposta)

Sobre la altura de agua en el cauce, resultado de la simulación anterior, que nos aporta la condición inicial en la que se encuentra el río Ebro, se procede a establecer 3 puntos de inyección de sedimento que se muestran en la **Figura 52**.

Los valores de caudal de agua y sedimento a inyectar para este primer escenario de simulación con flujo de sedimentos se otorgan de una manera totalmente orientativa. Se trata de cantidades excesivas y difícilmente posibles en la realidad, pero que permitirán empezar a analizar en qué zonas y de qué manera se deposita el sedimento a lo largo de dominio.

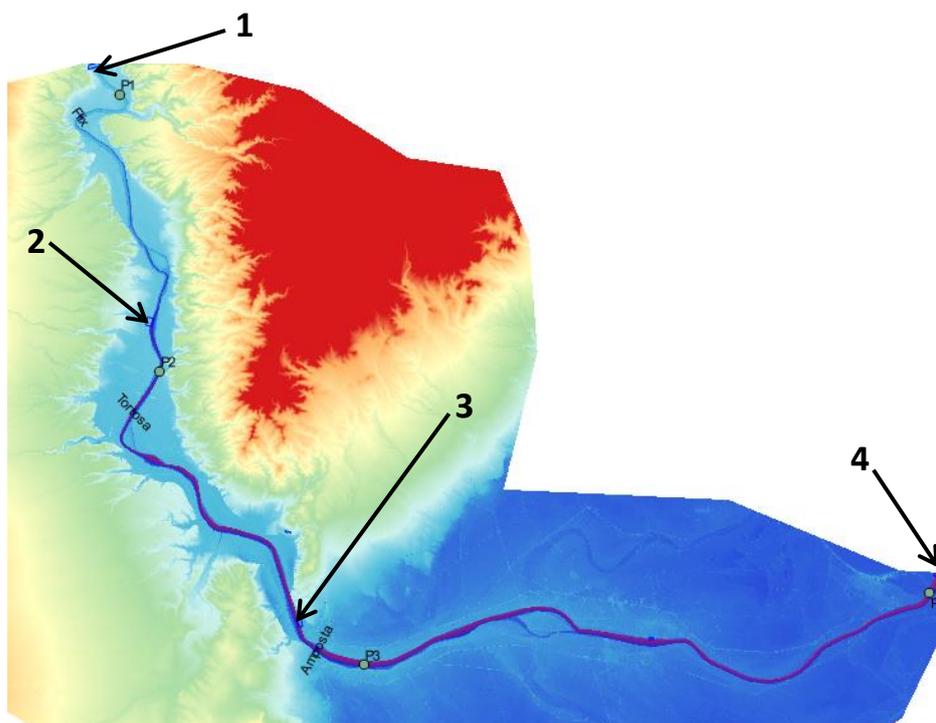


Figura 52: Ubicación de los puntos de inyección de sedimentos sobre el ráster (1, 2 y 3) y condición de contorno de salida libre (4, en el escenario 1).

- **Punto 1:** representa la entrada de caudal al cauce (situada aguas abajo de la represa de Xerta), en este caso el Q_w (caudal de agua) es de $400 \text{ m}^3/\text{s}$, y el Q_s (caudal de sedimentos) de $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$.
- **Punto 2:** este punto pretende simular un vertido de sedimento desde la orilla mediante un hipotético conducto a través del cual, y mediante la propulsión de una bomba, se pudiese impulsar sedimento junto con un caudal de líquido, con valores de $Q_w=500 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_s=0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

- **Punto 3:** este punto coincide con la llegada del río a la planicie del Delta del Ebro. Es probable que, a partir de este punto, las velocidades del flujo adquirirán valores menores que en el tramo anterior y el sedimento empezará a depositar, debido a la falta de velocidad en el flujo. Por esta razón es interesante ubicar en esta posición la tercera entrada para la inyección de sedimentos $Q_s=0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ junto con un caudal de agua $Q_w=500 \text{ m}^3/\text{s}$.
- **Punto 4:** se trata de la desembocadura del río Ebro, condición de contorno de salida en la que se deja que el flujo salga libremente. En este punto es donde interesa que llegue la mayor cantidad de sedimento posible.

También se han seleccionado sobre la malla de cálculo, mediante el programa QGIS, 4 secciones transversales al cauce, en las cuales se analizarán las distintas variables del flujo de agua y sedimentos (caudal líquido, caudal de sedimentos, calado, altura del lecho, velocidad del flujo, avance longitudinal y transversal del sedimento por unidad de superficie...). Las secciones de medida aparecen ubicadas en el cauce de la **Figura 52**, con el nombre de: Flix, Tortosa, Amposta y Delta.

Además, también se han colocado 4 puntos de observación (P1, P2, P3, P4) cerca de las secciones citadas (ver **Figura 52**), para poder analizar la evolución temporal de las variables en estos puntos concretos.

Para poder realizar la simulación del sedimento es necesario introducir unos parámetros al programa Riverflow2D que se muestran en la **Figura 53** y son: densidad, concentración, diámetro medio de tamaño de partícula, porosidad, esfuerzo de fricción y ángulo de fricción, para el transporte de carga de fondo y para el transporte en suspensión. También el programa nos permite elegir las ecuaciones para modelizar los términos de fricción de este tipo de transporte. Para el transporte de carga de fondo se ha elegido la fórmula de *Meyer-Peter-Müller* [18] y para el transporte en suspensión se ha elegido la fórmula para la concentración en equilibrio de *Bagnold* [19] y la fórmula de velocidad de sedimentación de *Rubey* [20] como se puede ver detallado en la **Figura 53**.

Open SED* Files

Save SED* Files

Sediment Transport Mode

Suspended Sediment Bed Load Sediment

Suspended Sediment Transport

Equilibrium concentration formula: Bagnold

Settling Velocity Formula: Type: Rubey Factor: 0.8

Dispersion coefficients

Longitudinal (m²/s): 0.01 Transversal (m²/s): 0.01

/variables	Frac. 1
density (kg/m ³)	2650
Initial Concentr.	0.01
Diameter (mts)	0.000125
Porosity	0.4
Shear Stress	0.047
Friction Angle	35
Factor	1

Add Suspended Sediment Fraction
Remove Selected Fraction

Bed Load Sediment Transport

Sediment Load Formula: Mayer-Peter & Muller

Coupled computation

/variables	Frac. 1
density (kg/m ³)	2650
Diameter D50 (mts)	0.001
Porosity	0.4
Shear Stress	0.047
Friction Angle	35
Factor	1

Add Bed Load Fraction
Remove Selected Fraction

Figura 53: Valores de los parámetros usados en la modelización del transporte de carga de fondo y en suspensión de sedimentos en el programa RiverFlow2D.

Una vez se obtienen resultados tras la simulación, el visualizarlos con ParaView (**Figura 54**), permite apreciar gráficamente parámetros como: altura de agua o los vectores de velocidad con su módulo (coloreados en función del valor del módulo). En este caso, la **Figura 54**, muestra las 3 condiciones de contorno de entrada de caudal de agua y sedimentos (1, 2 y 3), pertenecientes a la simulación del escenario 1, concretamente en **t= 20h**.

Estas “inyecciones” de caudal y sedimento causan en el flujo un incremento de velocidad local; que evita que el sedimento vaya depositándose en las zonas de menor velocidad (zonas de remanso) o zonas en las que el calado es ínfimo y el flujo está estancado.

El incremento de velocidad es perfectamente apreciable en las imágenes 2 y 3 de la **Figura 54**, donde se ve perfectamente que aguas abajo de las entradas externas de flujo, los vectores velocidad del flujo que ya circulaban por el cauce pasan de tener un color azul oscuro (velocidades cercanas a 1 m/s) a azul claro (velocidades cercanas a 2 m/s).

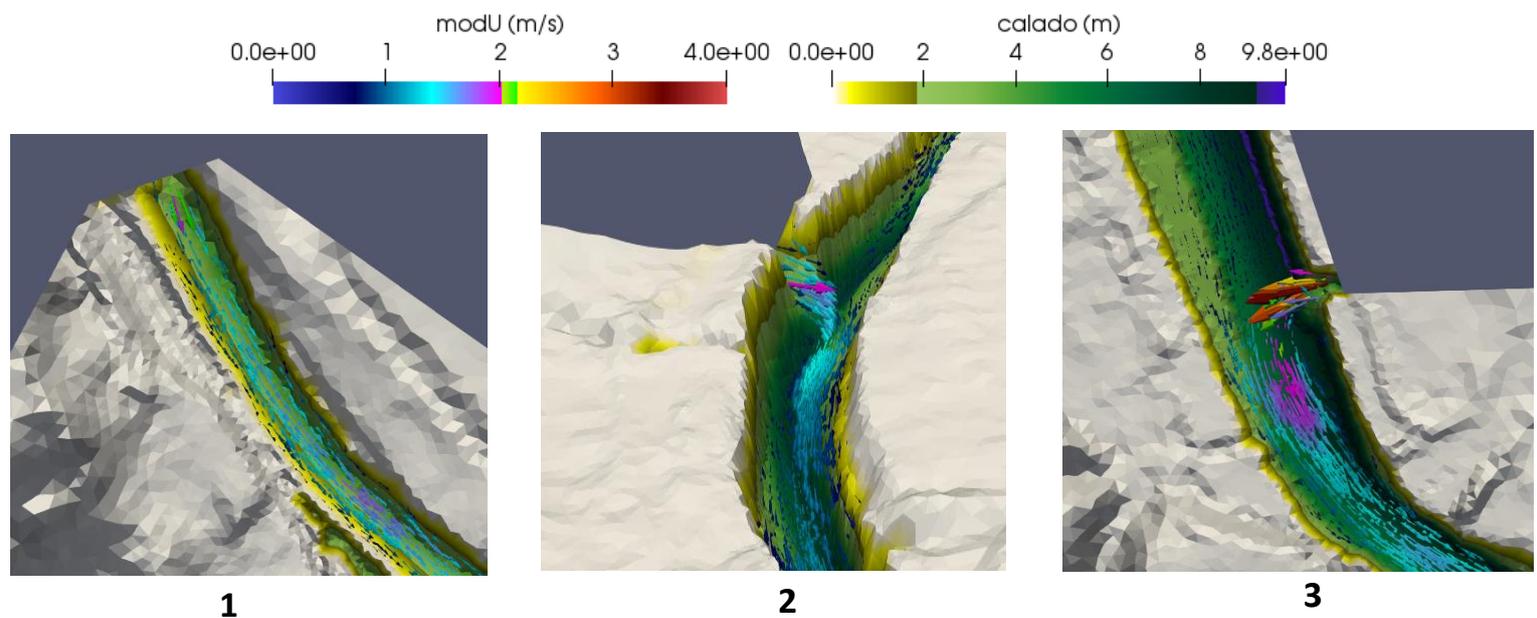


Figura 54: Vectores de velocidad sobre el mapa de alturas de agua del dominio para cada una de las tres condiciones de contorno de entrada.

El haber afinado previamente la malla del dominio de cálculo en la parte del cauce y en las zonas donde están ubicadas las condiciones de contorno de entrada, permite obtener una buena integración entre flujos (flujo que ya circulaba por el caudal y flujo inyectado desde una orilla).

Si el tamaño de las celdas, en las condiciones de contorno de entrada de flujo estacionario, no fuese lo suficientemente pequeño, el flujo no circularía correctamente por el cauce, e inundaría el terreno adyacente. Este fenómeno no se aprecia en ninguna de las imágenes de la **Figura 54**, por lo que hace pensar que el tamaño de celda es el apropiado.

Un tamaño de celda excesivo, tampoco permitiría que dos flujos distintos (como los de las imágenes 2 y 3 de la **Figura 54**) se integrasen de la manera en que lo hacen. Se darían valores extraños en la velocidad del flujo.

En las páginas siguientes se analiza más en detalle lo que ocurre en la planicie Deltaica. Comenzando por la propia ubicación, en la **Figura 55** se muestra una imagen de satélite de la zona en cuestión donde puede verse la extensión y llanura de la zona; utilizando las localidades de Amposta y Deltebre como referencia para ubicar la planicie dentro de un entorno más global, como el de la **Figura 23**.

Como se puede observar, se trata de una zona donde el cauce está totalmente rodeado por arrozales. Uno de los objetivos del proyecto es que los arrozales ganen cota respecto al nivel del mar, cosa que se consigue si se aporta sobre ellos material sólido. Por este motivo, si el cauce desborda y anega este terreno, introduciendo sedimento junto al flujo de agua, no va en decremento de los objetivos globales, pese a que a la desembocadura llegue menor volumen de sedimentos en suspensión.



Figura 55: Imagen de satélite de la superficie Deltaica (IGN).

Visualizando en ParaView los resultados de la simulación del escenario 1 (**Figura 56**), se muestra en un mapa 2D del terreno la superficie del agua junto con su calado (h), en diferentes instantes de tiempo $t=0, 8, 16$ y $20h$ en la zona en cuestión.

Apreciando la secuencia de estados de h , es perfectamente notable la presencia de terrenos anegados cercanos al cauce, a partir de $t=16h$; lo que en el terreno real (**Figura 55**) supondría la intrusión de sedimentos en los arrozales, contribuyendo al aumento de la cota “ z ” del terreno.

Complementariamente a la **Figura 56**, en la **Figura 57** aparecen los vectores velocidad junto con sus módulos, en el mismo tramo del cauce, en varios estados de tiempo de la simulación.

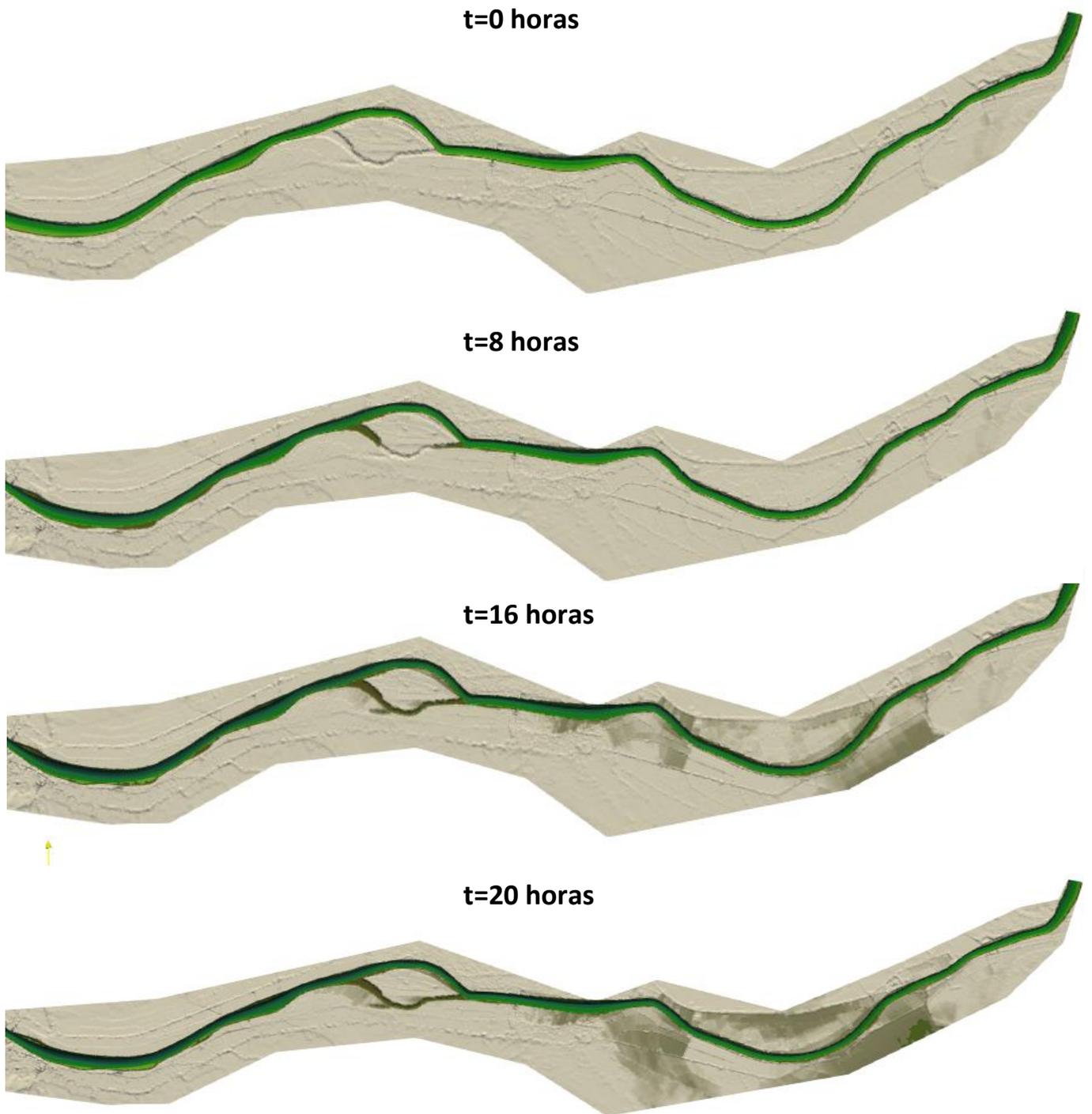
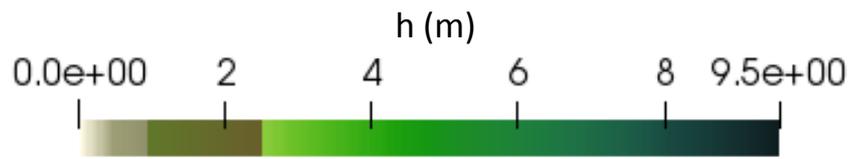


Figura 56: Extensión de la superficie del agua simulada sobre el terreno en t=0, 8, 16 y 20h en la zona del Delta del Ebro.

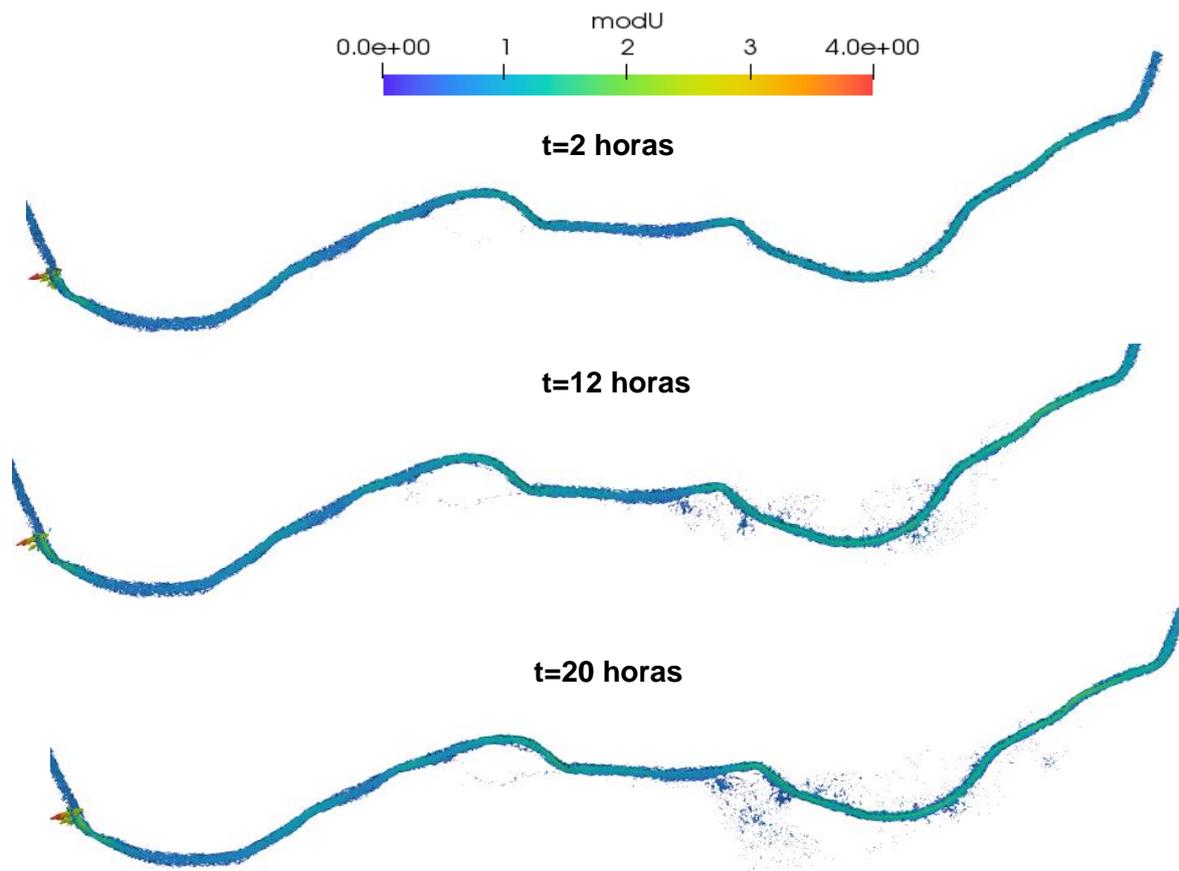


Figura 57: Mapas 2D de módulo y vectores de velocidad simulados en la llanura Deltaica en t=2, 12 y 20h.

En este primer escenario, en las condiciones de contorno de entrada a lo largo del cauce se han tomado valores de caudal de agua muy magnificados (imposible conseguir propulsar mecánicamente semejante cantidad de fluido), con el objetivo de comprobar si una gran entrada de caudal es capaz de reactivar la circulación de sedimentos en una determinada zona de remanso (planicie Deltaica), o levantar el sedimento que conforma la carga de fondo (zona del cauce entre Tortosa y Amposta), gracias a la fuerza que genera el movimiento del fluido. En la **Figura 57**, al observar la evolución temporal de los vectores velocidad en la planicie Deltaica, lo que se aprecia esencialmente es como aumenta la velocidad en las zonas cercanas al cauce, cuando este desborda y comienza a anegar el terreno colindante.

Hay que tener en cuenta que las variaciones en la altura del lecho del cauce se dan tanto por la deposición de sedimento en suspensión, como por el movimiento de la carga de fondo.

En las zonas del cauce donde la velocidad del fluido es muy alta, las arenas y lodos que conforman la carga de fondo del cauce del río Ebro se desplazan aguas abajo y provocan que la profundidad del cauce aumente hasta un máximo de 0.5m sobre el nivel inicial. Es decir, el calado del río aumenta, mientras que el material que conformaba anteriormente la carga de fondo, pasa a ser sedimento en suspensión que avanza aguas abajo por medio del flujo.

Por otro lado, en las zonas del cauce donde la velocidad del flujo desciende, el sedimento en suspensión pierde velocidad y comienza a descender por gravedad. En el momento en que entra en contacto con el material que compone el fondo del cauce, pierde aún más velocidad debido a la fricción entre ambos materiales y se acaba depositando, debido a que el sedimento, aún en suspensión, no tiene la inercia suficiente para arrastrar la carga de fondo y poder continuar aguas abajo.

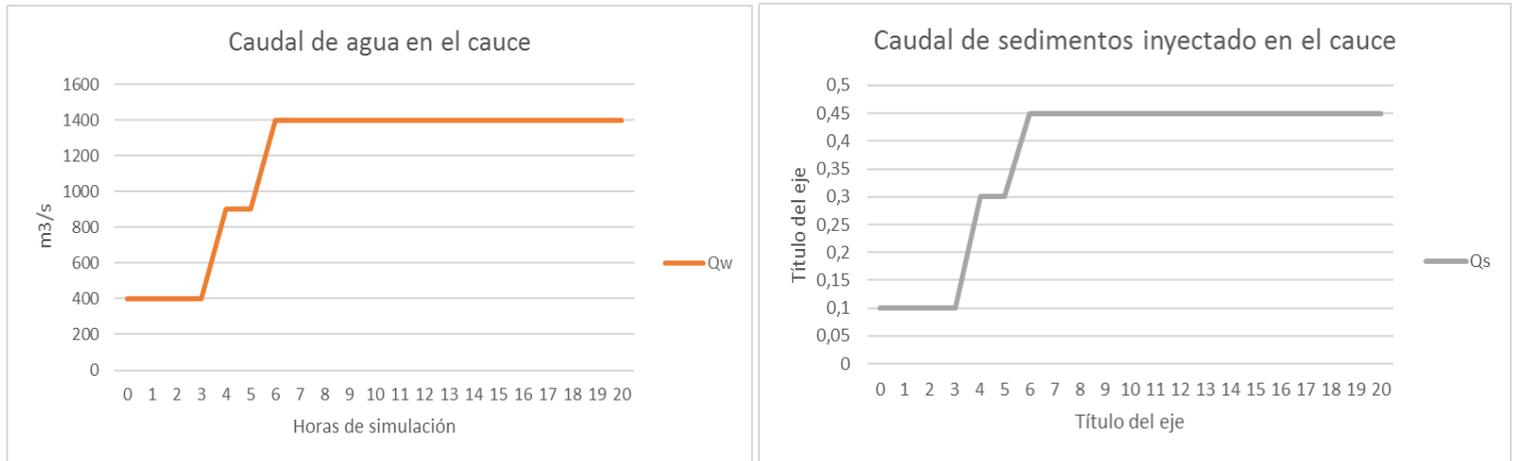


Figura 58: Hidrogramas de agua y caudal de sedimento introducidos en el cauce, en las diferentes condiciones de contorno detalladas en la Figura 52, durante las 20h de simulación.

Al comparar los gráficos que aparecen en la Figuras 58, con el gráfico de la Figura 59, comienza a observarse una relación directa entre el aumento del flujo a lo largo del cauce y la reacción del flujo de sedimentos, medida en los 4 puntos de observación (ver Figura 52).

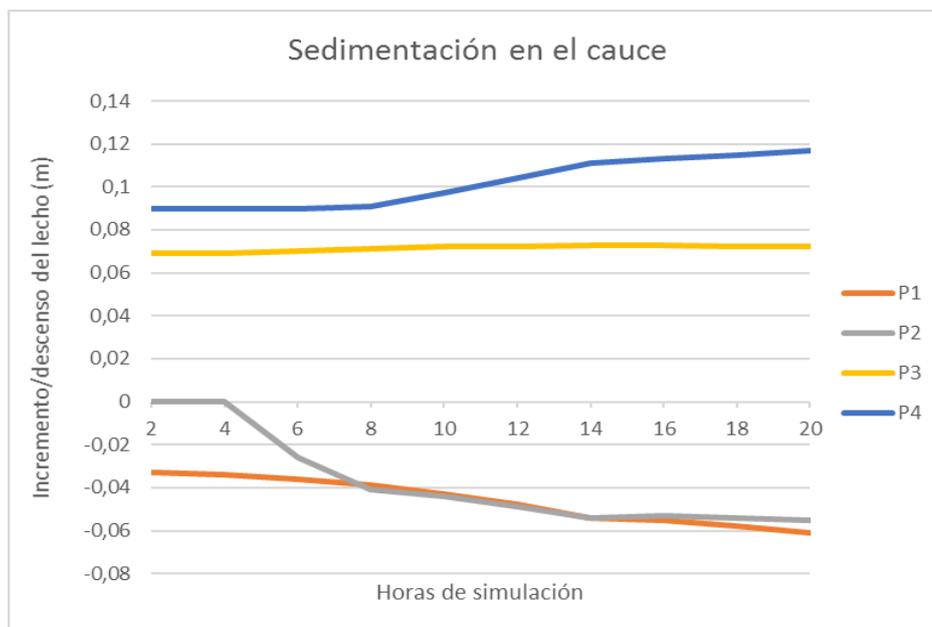


Figura 59: Evolución temporal de la variación de la profundidad del lecho, medida en los puntos de observación P1, P2, P3 P4 (ubicados en la Figura 52).

Como se puede observar en la **Figura 59**, hay dos tendencias; o la altura del lecho aumenta (sedimentación en el fondo del cauce), o disminuye (erosión del fondo del cauce).

Las líneas de color naranja y gris (pertenecientes a los puntos de observación P1 y P2 de la **Figura 52**), tienen una pendiente negativa; lo que quiere decir que el nivel de la cota del fondo desciende conforme al valor inicial, a medida que avanza el tiempo de la simulación. Es decir, el sedimento que se encontraba estacionado en el fondo del cauce, en dichos puntos de observación, pasa a estar en suspensión y avanzar aguas abajo, con el resto del flujo de agua y sedimentos.

Por otro lado, las líneas azul y amarilla (correspondientes con los puntos P3 y P4 de la **Figura 52**) tienen una tendencia positiva; por lo tanto, son puntos en el cauce en los que el sedimento comienza a depositar. Es decir, el fondo del cauce comienza a ganar cota en decremento de la altura de agua.

Lo ideal para los objetivos del proyecto sería; que sólo depositase el sedimento en el último punto de observación (P4 de la **Figura 52**), puesto que es ahí donde el mar comienza a ganarle terreno a la tierra.

Incluso, el efecto para lograr el objetivo del proyecto mejoraría si en la zona de la desembocadura (donde acaba el cauce del río Ebro y comienza el fondo de arena del mar Mediterráneo) el sedimento continuase fluyendo. Esto provocaría que la fuerza del flujo fuese capaz de seguir erosionando la parte más superficial de los lodos y arenas que componen la carga de fondo.

De esta manera, la materia sólida en suspensión acabaría depositándose 500-1000 metros mar adentro, donde las zonas de remanso lo permitiesen, formando así una barrera natural que protegería toda la superficie Deltaica ante la inminente subida del nivel del mar.

Analizando los resultados, parece que la zona sobre la que hay que actuar directamente, para cumplir con los objetivos propuestos en el párrafo anterior es en la propia **Planicie Deltaica**.

Una vez localizada la zona del cauce sobre la que actuar, para optimizar los posibles recursos disponibles (medios mecánicos para realizar la inyección y cantidad de sedimentos a inyectar); es momento de determinar las acciones y factores que mayor influencia tienen en el transporte de sedimentos hasta la desembocadura del Ebro.

Dentro de estos factores se incluirían principalmente el calado a lo largo de la planicie; la pendiente del cauce y los accidentes geográficos; por último, los elementos de la naturaleza o infraestructuras artificiales que influyan en el cauce original y en el tránsito natural del flujo circulante por el río Ebro en dicho tramo.

En cuanto a las acciones, se basan esencialmente en la cantidad de caudal de agua a verter en el inicio del cauce (caudal suministrado en la condición de contorno de entrada) y en la cantidad total de flujo inyectado. Es importante el número de condiciones de contorno de entrada de flujo de sedimentos y la ubicación en el cauce de las mismas.

Para permitir que el flujo que circula por el cauce arrastre sedimentos del fondo en el primer tramo del río, en la condición de contorno al inicio del cauce, se debe introducir como mínimo **500 m³/s**.

Si el cauce del río cuenta con menos de este caudal, el sedimento comienza a depositar en su gran mayoría antes de llegar a la altura de Amposta, donde da comienzo la planicie Deltaica. También la fuerza que ejerce el flujo para arrastrar el sedimento que conforma la carga de fondo es menor dado el menor volumen de agua y menor velocidad con la que circula el flujo de agua y sedimentos por el cauce.

En condiciones reales, este aumento en el caudal sería consecuencia de una apertura de las compuertas que regulan el flujo en la represa de Xerta, permitiendo el aumento de caudal aguas abajo.

En lo que respecta a la cantidad de sedimentos a inyectar y la ubicación dentro de la trayectoria del cauce es necesario simular con distintas configuraciones sobre el MDT y ver con cuál se obtienen unos resultados que cumplan con el objetivo en cuanto a cantidad y ubicación del sedimento en el Delta del Ebro.

De acuerdo a la **Figura 59**, comparándola con la **Figura 60**, se puede tener una idea aproximada de la influencia de la carga de sedimentos en suspensión sobre la altura del lecho en los diferentes puntos de dominio, conforme avanza el tiempo de simulación.

Hacemos notar que cada inyección de sedimento sobre el cauce va acompañada de un abundante caudal de agua: 400 m³/s para la condición de contorno de entrada en Xerta, 500 m³/s para Tortosa y 500 m³/s para Amposta.

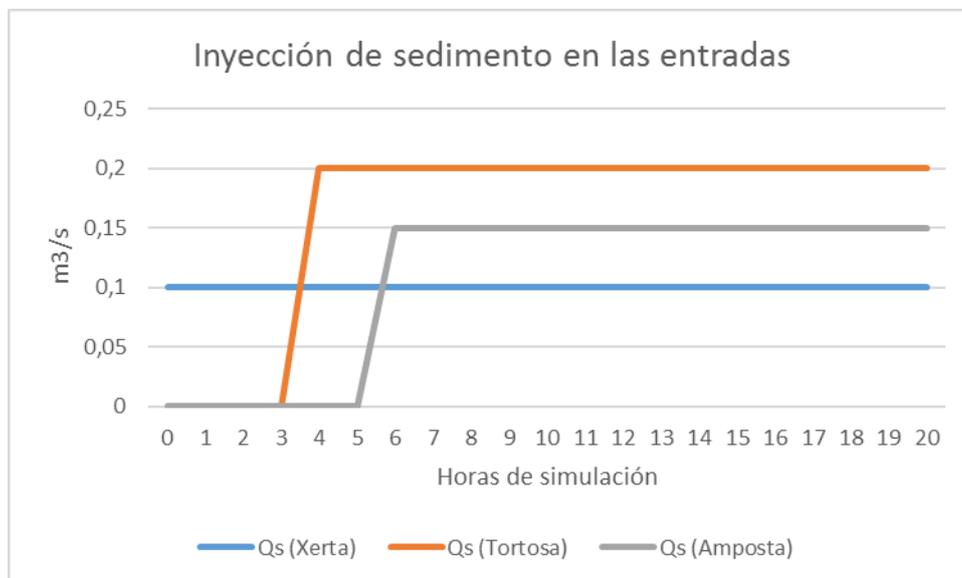


Figura 60: Evolución temporal de la cantidad de sedimentos en los puntos 1, 2 y 3 de la Figura 52.

En referencia a los valores impuestos de caudal de agua y sedimentos en las condiciones de contorno de entrada, cabe recalcar que se trata de valores de prueba, imposibles de recrear artificialmente en una posible situación real.

Observando los valores del hidrograma de la estación de aforo de Tortosa, **Figura 61**, un valor de 500 m³/s de agua es el caudal medio con el que cuenta el río Ebro de enero a abril. Se supone que ese valor de caudal se debería introducir artificialmente en el cauce en los puntos 2 y 3 de la **Figura 52**. Dichos valores son más propios de dos posibles afluentes del Ebro que desembocasen en dichos puntos. Sería inviable el presupuesto económico necesario para inyectar mediante un sistema de bombeo semejante caudal de agua, que junto con la parte sólida (sedimento) pasarían a formar parte del cauce del río.

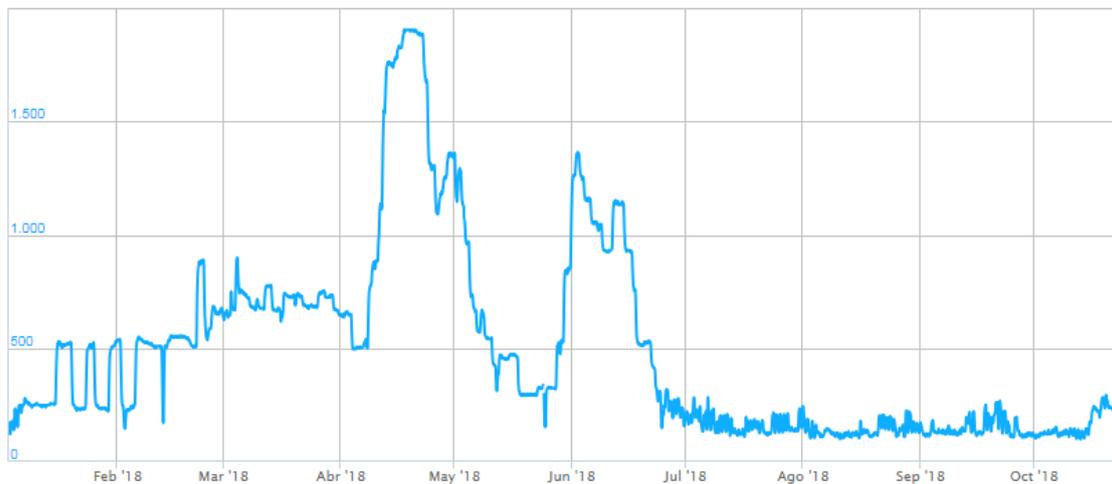


Figura 61: Hidrograma desde el 1/1/2018 hasta el 21/10/2018, obtenido en la web del SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica) en la estación de aforo de Tortosa.

En cuanto al sedimento, el volumen total de sedimentos que se acaba inyectando a lo largo de la simulación es de 22,280 m³, contando con que la densidad promedio de la arena de cantera es de 1550 kg/m³, hacen un total de 34.534 toneladas de arena inyectadas en tan solo 20h de simulación, o lo que es lo mismo, 384 camiones volquete con capacidad para 90 toneladas. Lógicamente se trata de una cantidad de material abrumadora cuyo coste y obtención serían inviables para un proyecto de estas características. Por esta razón, en las simulaciones posteriores se trabajará con volúmenes de sedimento más coherentes.

Con todo lo analizado en este capítulo, y una vez obtenidas las primeras conclusiones de cómo se comporta el flujo de sedimentos a lo largo de su transcurso por el cauce del río Ebro, se debe comenzar con las simulaciones con condiciones reales, con las que poder sacar las conclusiones finales sobre las que fundamentar el contenido de este proyecto.

Escenario 2: inyección en un punto (Xerta)

Esta simulación va a reproducir las mismas condiciones de caudal de agua y sedimento con las que se realizaron las pruebas piloto por parte del IRTA, dentro del proyecto LIFE. La prueba piloto realizada por los integrantes de dicho proyecto consistió en 2 inyecciones en días alternos de un volumen de **25 m³** de sedimento durante **4 minutos** cada una, contando con un caudal en el río Ebro de aproximadamente **600 m³/s**. En este caso sale un **Qs=0.1 m³/s**, pero la duración de la simulación es de 24h en vez de 4 minutos.

Entrada Inicio

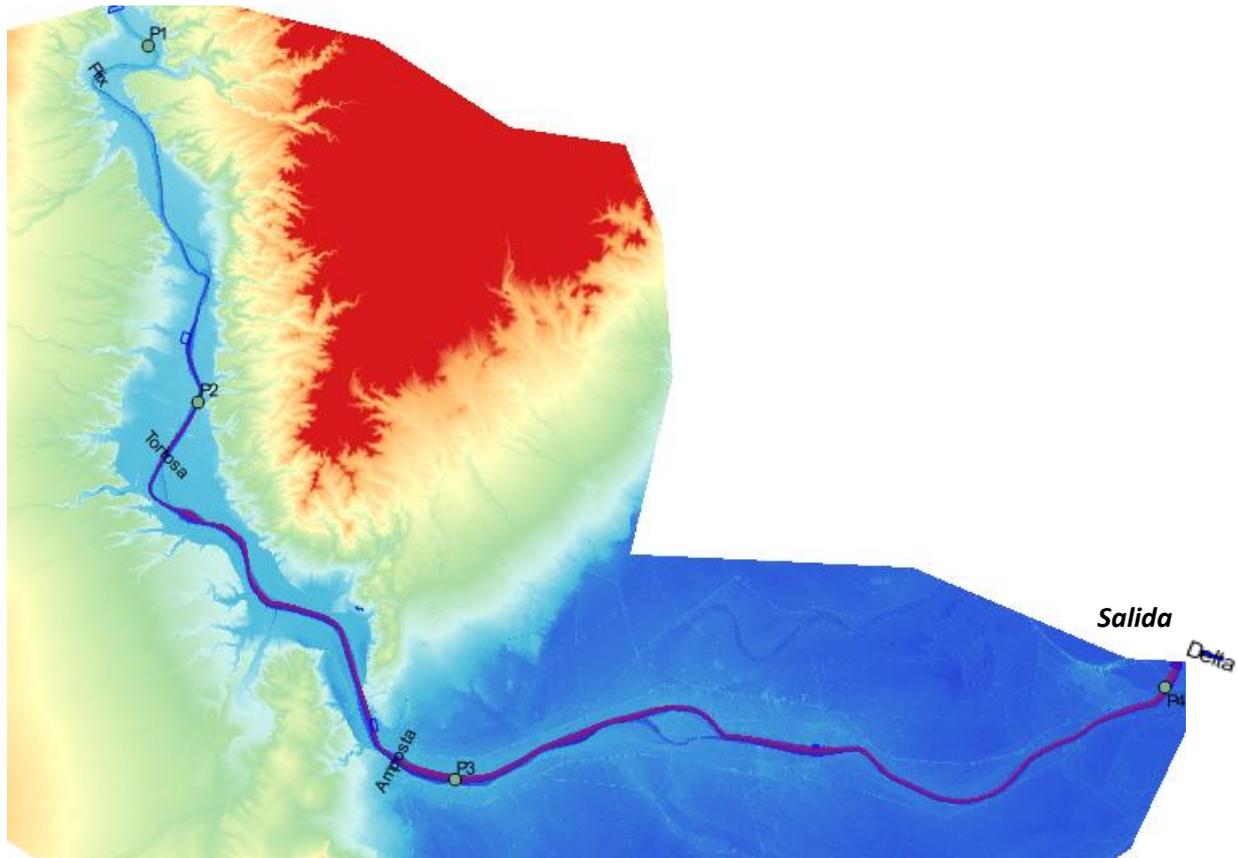


Figura 62: Localización de las 4 secciones transversales de medida, (Flix, Tortosa, Amposta, Delta), de los 4 puntos de observación (P1, P2, P3, P4), de la condición de contorno de entrada (Entrada inicio) y de la condición de contorno de salida (Salida) sobre el MDT en el escenario 1.

Para reproducir estas condiciones se cuenta con una única condición de contorno de entrada de caudal de agua y sedimentos al inicio del cauce (Entrada Inicio en **Figura 62**) y una condición de contorno de salida libre de agua en la propia desembocadura del río (**Figura 62**). El flujo, tanto de agua como de sedimentos es constante a lo largo de todo el periodo de simulación, siendo un caudal de agua **Qw=600 m³/s** y un caudal de sedimentos **Qs=0.1 m³/s** y el tiempo de simulación de **24 horas**.

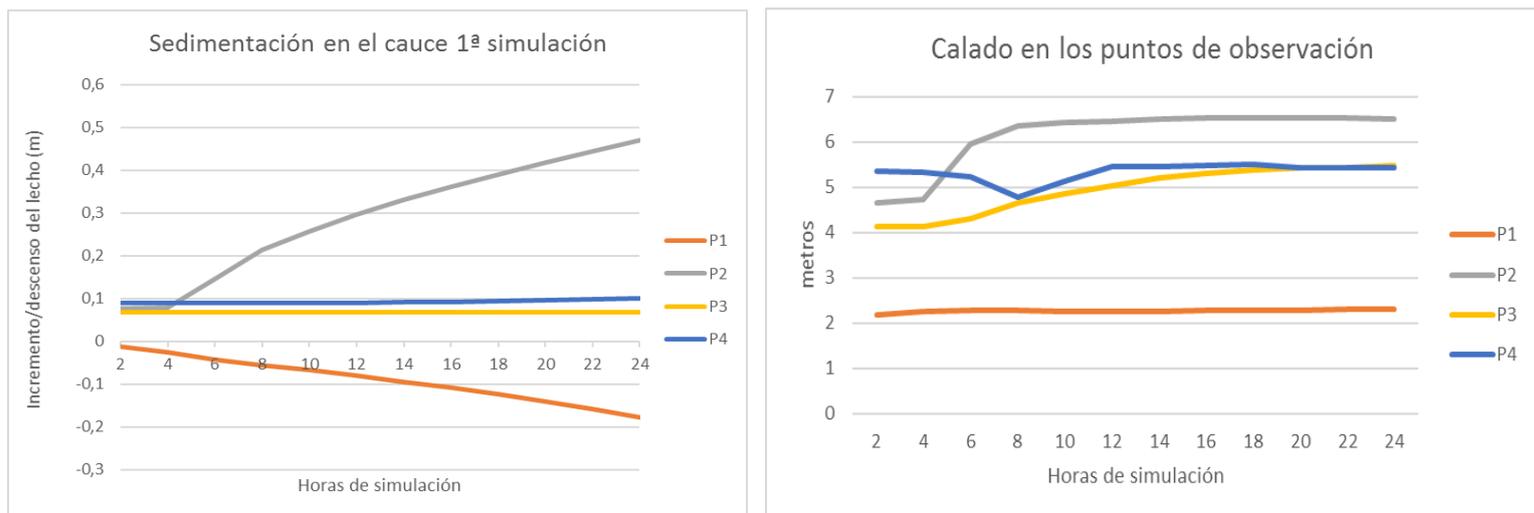


Figura 63: A la izquierda, *progresión de la sedimentación/erosión del lecho del cauce en los 4 puntos de observación (P1, P2, P3 y P4 de la Figura 62)*. A la derecha, *progresión del calado en los mismos puntos durante el periodo de simulación*.

Analizando la gráfica de la **Figura 63** (izquierda) correspondiente a la evolución de la sedimentación en los cuatro puntos de observación a lo largo del dominio, se aprecia que en **P1** (línea de color naranja) situado en el inicio del cauce, **Figura 63**, el lecho se va erosionando progresivamente conforme avanza la simulación. Comparando estos valores con la gráfica de la derecha, en los que aparece la tendencia que sigue la altura de agua en el mismo **P1** (línea de color naranja), parece claro que manteniendo el calado constante se produce erosión en el fondo.

Todo lo contrario, en cuanto al comportamiento del flujo de sedimentos, ocurre en el punto **P2** (línea de color gris en ambas gráficas), punto situado a la altura de la localidad de Tortosa, **Figura 62**. Observando la gráfica de la izquierda, se aprecia de manera notable que el sedimento comienza a depositarse alrededor de ese punto pasadas las 4 horas de simulación. Simultáneamente, a partir de ese instante, comienza a aumentar el calado, hasta conseguir una cota cercana a los 6,5 m donde parece estabilizarse durante el resto de la simulación. Aunque el calado aumenta y después se mantiene constante, la deposición va aumentando de forma lineal en este punto.

En los puntos **P3** y **P4** (líneas amarilla y azul), la variación en la altura del lecho del cauce es prácticamente nula. En **P4** no se aprecia una variación entre el calado inicial y final, mientras que en **P3** si se aprecia un aumento uniforme del calado. Este hecho es indicador de dos aspectos; el primero que el sedimento ya no llega a la zona del cauce correspondiente a la ubicación geográfica de Amposta, el sedimento inyectado ya no llega a la planicie Deltaica.

La segunda hace ver que el caudal del flujo que llega a la desembocadura es insuficiente para hacer que aumente el calado, a la vez que no cuenta con el volumen y la velocidad necesaria para erosionar la parte superficial de la carga de fondo, aparte de no permitir la continuación del flujo de sedimentos en suspensión por la planicie.

Con la secuenciación de la progresión del calado a lo largo de las 24h, en la **Figura 64** es posible apreciar las zonas del MDT anteriores a la zona del cauce en la que está ubicado el **P3**, donde la altura del fondo ya no varía.

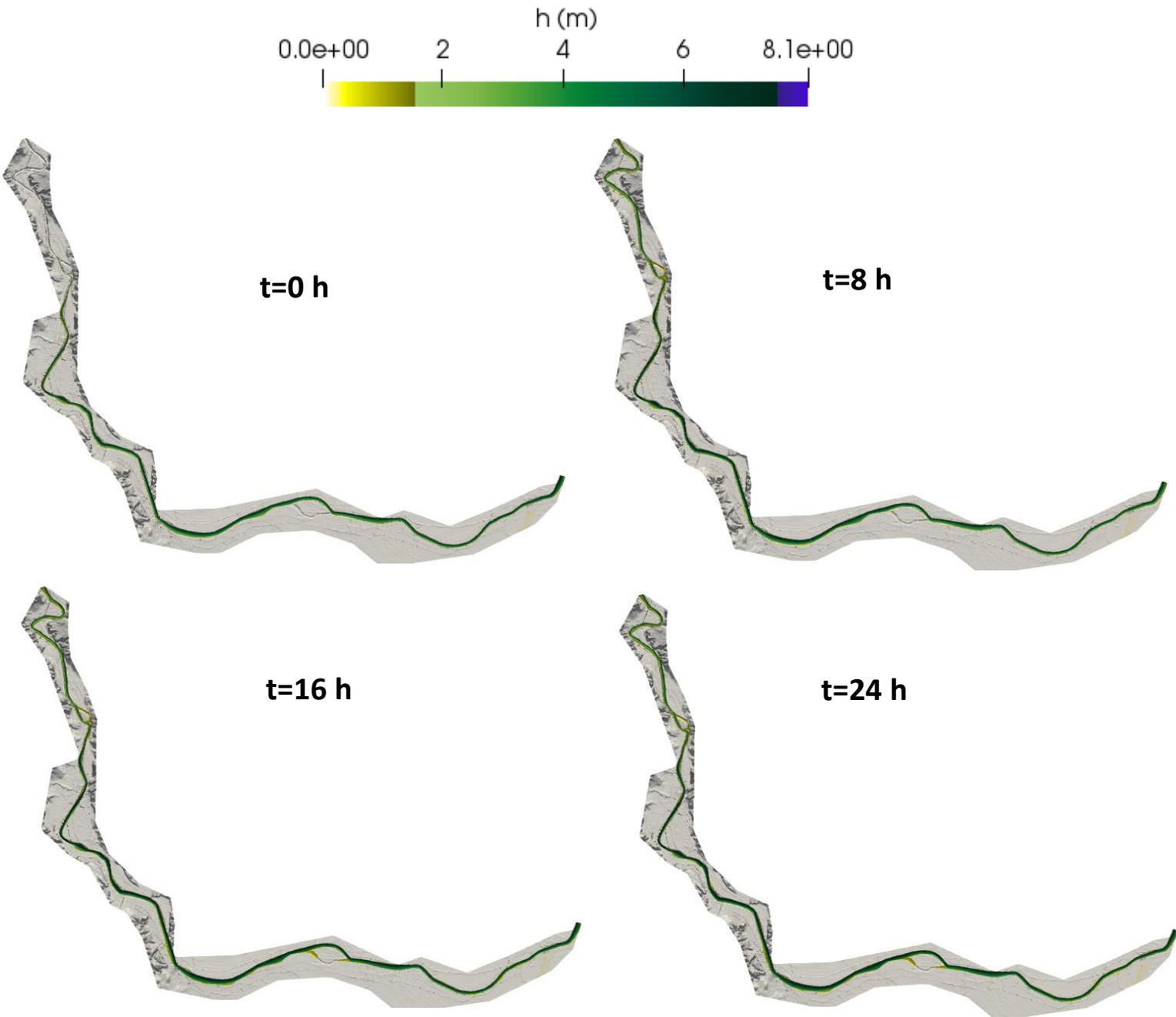


Figura 64: Mapa de evolución de la extensión de agua sobre el MDT en $t=0$, 8, 16 y 24h en el escenario 2.

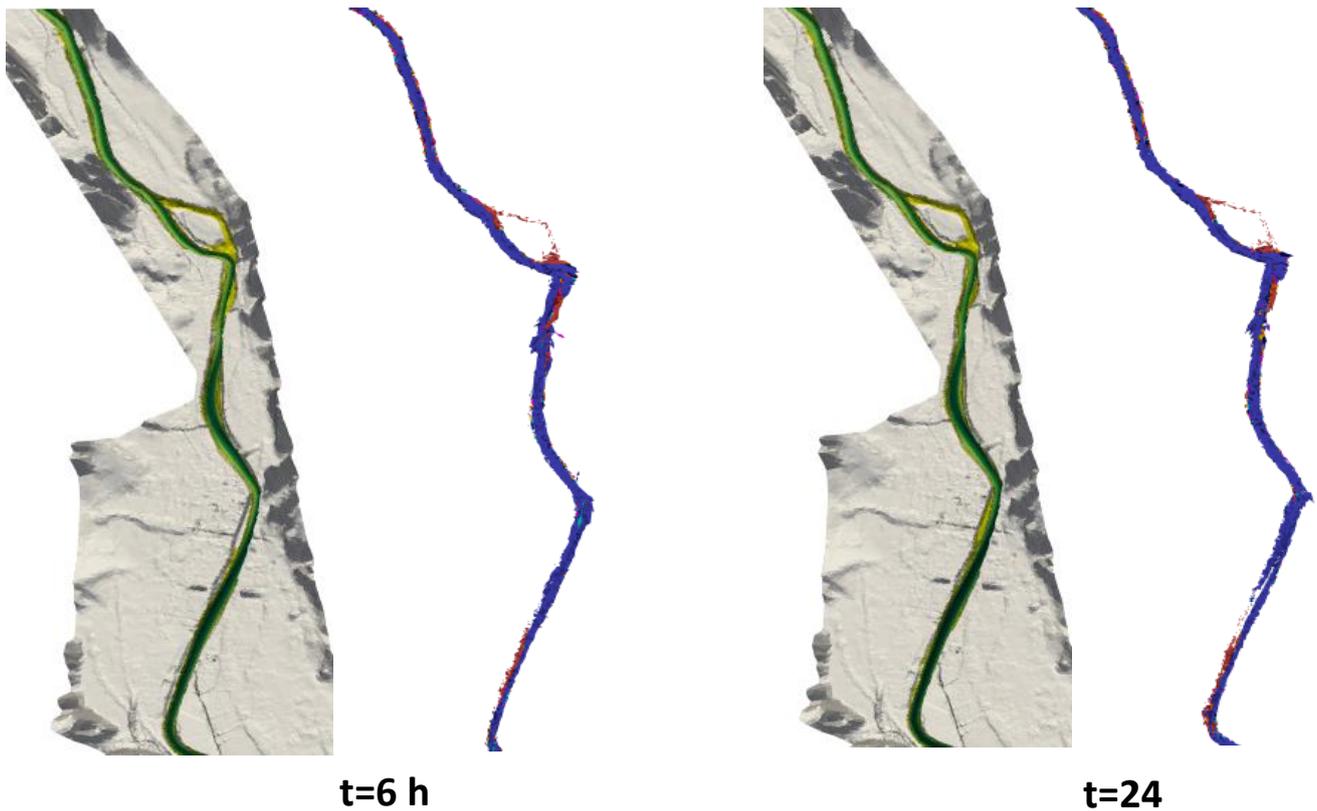


Figura 65: Detalle de mapa de extensión de la lámina de agua (verde) sobre MDT (gris) y extensión de sedimentos (azul) sobre vectores de velocidad (rojo) en el tramo P2-P3 (Tortosa-Amposta) en t=6h (izquierda) y t=24h (derecha).

Al complementar las gráficas que aparecen en la **Figura 63**, con las imágenes en detalle de la **Figura 65**, queda claro que el sedimento inyectado en el inicio del cauce como condición de contorno de entrada se deposita en este tramo del cauce.

En la línea de lo comentado y observando la cantidad prácticamente nula de sedimentos que aparecen depositados en la planicie Deltaica, **Figura 66**, queda patente que: con las condiciones propuestas en este primer escenario no es suficiente para que el flujo de sedimentos consiga llegar y empiece a depositarse en la desembocadura del río Ebro, que es nuestro objetivo.

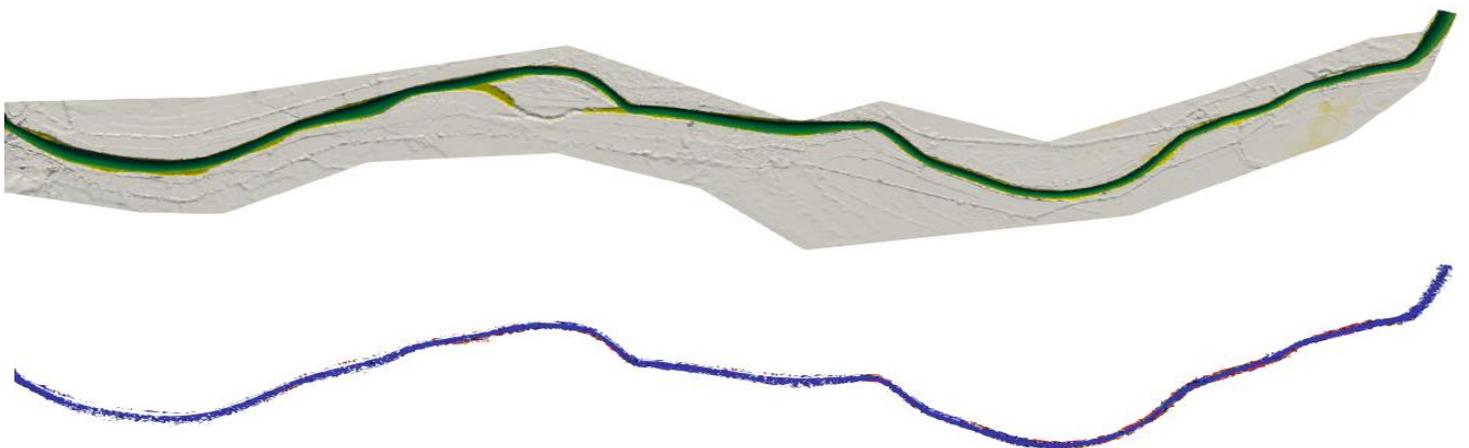


Figura 66: Detalle de mapa de extensión de la lámina de agua (verde) sobre MDT (gris) (arriba) y extensión de sedimentos (azul) sobre vectores de velocidad (rojo) (abajo) en el tramo de la planicie Deltaica en t=24h.

Escenario 3: inyección de sedimentos en tres puntos (Xerta, Amposta y Deltebre)

Visto que no es efectiva la inyección de sedimentos desde un único punto situado en el inicio del dominio, y con el fin de conseguir que llegue a la parte final un caudal de sedimentos que permita la sedimentación en la desembocadura, se plantea el siguiente escenario para simular.

En lugar de tener una única condición de contorno de entrada de caudal de agua y sedimentos al inicio del dominio como en el escenario 2, vamos a considerar tener tres entradas de caudal y sedimentos en diferentes puntos del dominio como en el escenario 1. De forma, que las condiciones de contorno en el escenario 3 quedan de la siguiente manera (**Figura 67**):

Manteniendo en la condición de contorno de entrada en Flix/Xerta un caudal de agua y sedimentos constantes, $Q_w=500 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_s=0.09 \text{ m}^3/\text{s}$, se imponen otras dos condiciones de contorno de entrada: una en un punto del cauce cercano a Amposta y otra en la mitad de la planicie Deltaica (en la localidad de Deltebre); ambas con $Q_w=50 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_s=0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ constantes en el tiempo.

Igual que en el resto de simulaciones, la condición de contorno para el final del cauce es una salida libre de flujo y sigue situada en la desembocadura.

En este caso la simulación se reduce de 24 a 18 horas, puesto que en la primera simulación a las 18 horas el caudal de agua en la salida era similar al de entrada, momento en el que se ha alcanzado de nuevo el estacionario. El objetivo de reducir el tiempo de simulación es optimizar el tiempo de cálculo puesto que se simula en CPU, lo que provoca que el proceso de simulación se ralentice en exceso.

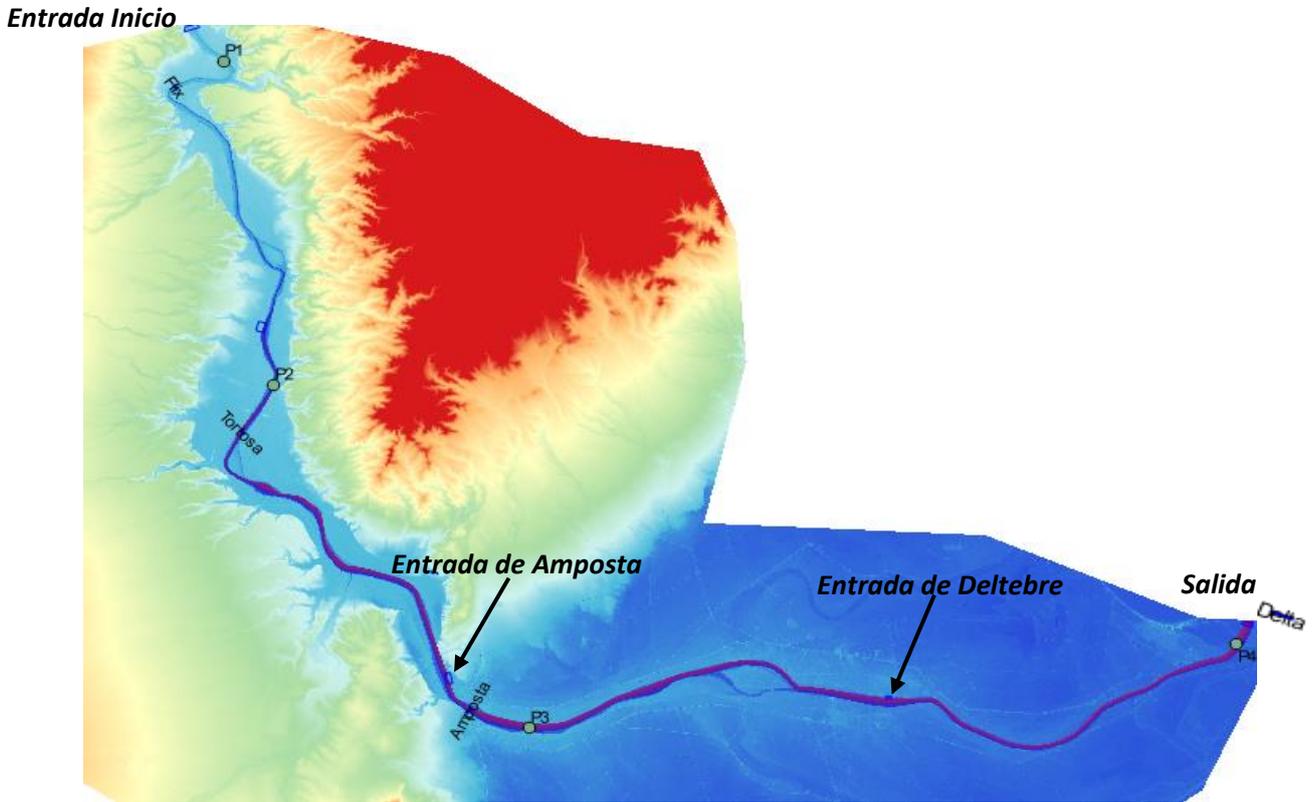


Figura 67: Localización de las 4 secciones transversales de medida (Flix, Tortosa, Amposta, Delta), de los 4 puntos de observación (P1, P2, P3, P4), de las condiciones de contorno de entrada (Entrada Inicio, Entrada de Amposta y Entrada de Deltebre) y de la condición de contorno de salida (Salida) sobre el MDT en el escenario 3.

En la **Figura 68**, se muestran los resultados obtenidos de la evolución temporal de los caudales de agua (derecha) y sedimento (izquierda) en las distintas secciones de medida. En las primeras 2 horas de simulación se aprecia una gran crecida del caudal de sedimentos en la sección de Xerta situada al principio del tramo (línea naranja de la gráfica izquierda); alcanzando el caudal de sedimentos valores cercanos a $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto se debe a la poca altura de agua que hay en ese momento, lo que permite que la fuerza que ejerce el flujo de agua junto con los sedimentos arrastre gran cantidad de la carga de fondo por este primer tramo del río, en los instantes iniciales.

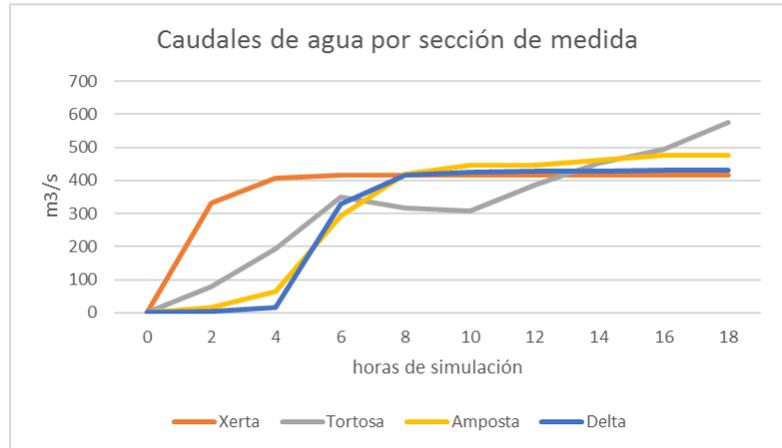
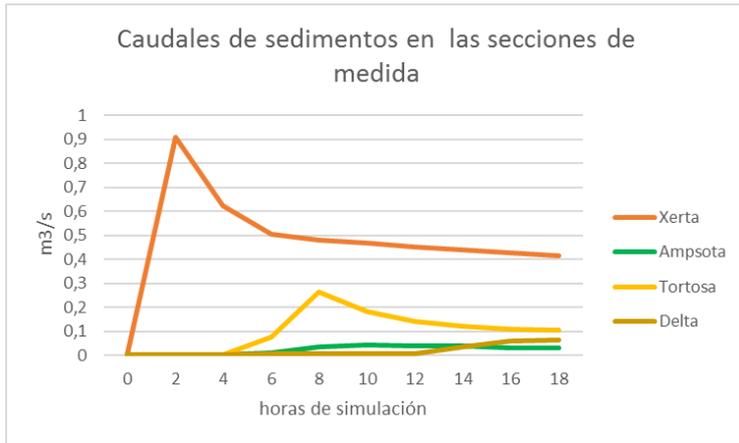


Figura 68: Evolución temporal de los caudales de agua (derecha) y sedimentos (izquierda) que atraviesan las 4 secciones de medida en el escenario 3.

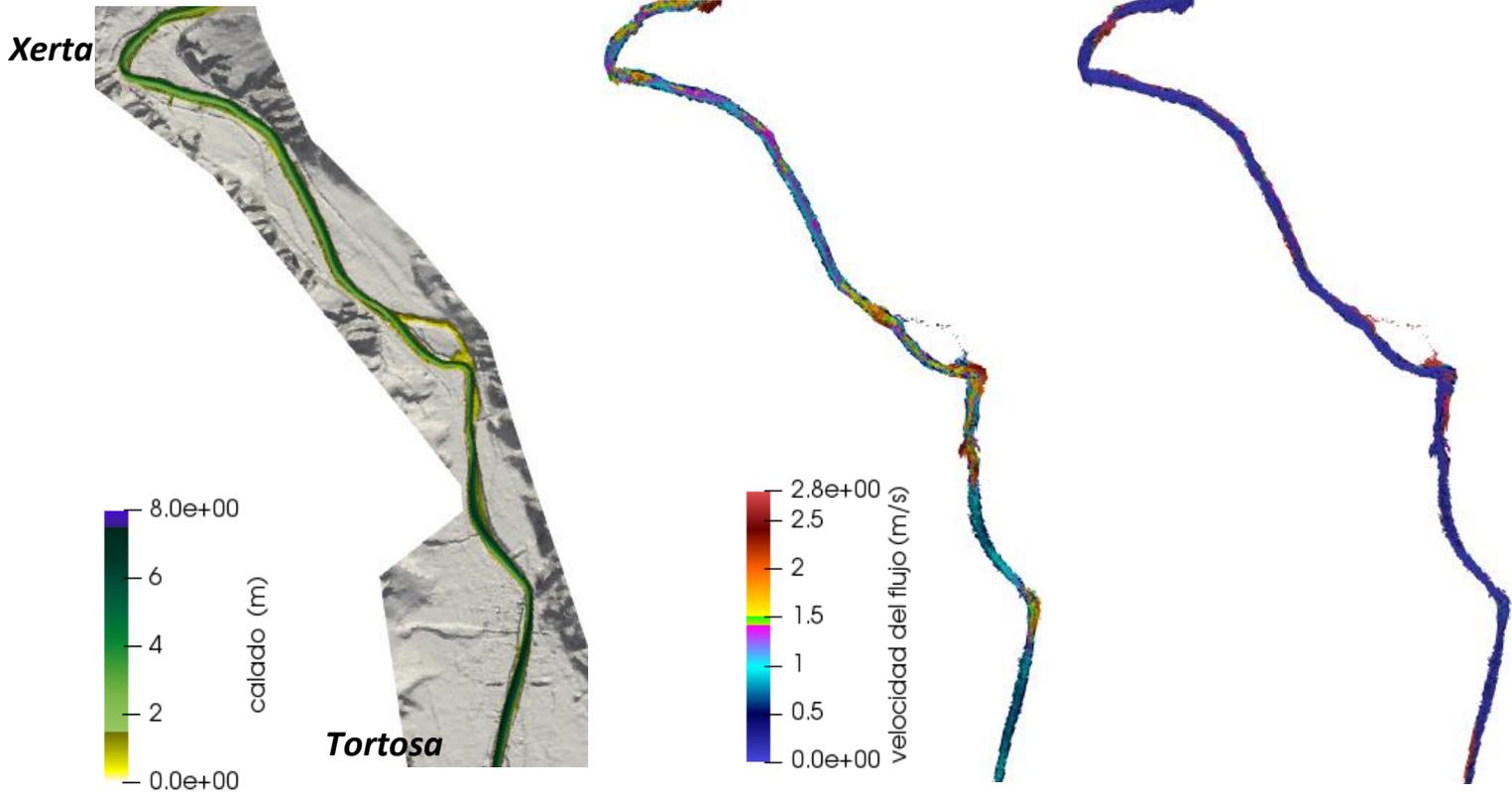
En la sección de medida de Tortosa ocurre el mismo fenómeno descrito anteriormente, de una manera más progresiva, puesto que el flujo de agua y sedimentos ya ha ido perdiendo velocidad a lo largo de su trayectoria por el cauce; lo que se traduce en una pérdida de fuerza de arrastre, sobre la superficie de la carga de fondo.

Como se puede apreciar, con un caudal de entrada en el inicio del cauce de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, el flujo de sedimentos tarda 4h en llegar a la sección de medida de Tortosa, cuando el caudal de agua que transcurre por allí en ese momento es de aproximadamente $200 \text{ m}^3/\text{s}$; siendo en la hora 8 cuando se aprecia el pico de caudal en cuanto al flujo de sedimentos en esta sección, con un valor máximo de $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$.

En el último periodo de 10h de simulación es curioso observar que, pese a que el caudal de agua que atraviesa la sección de medida asciende, el caudal de sedimentos decrece hasta alcanzar un valor constante de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$, aproximadamente igual al que se introduce en el inicio del cauce; síntoma que parece indicar, a priori, o que el sedimento comienza a depositarse en alguna zona previa del cauce, o que, al aumentar el calado en el cauce, el flujo ya no arrastra sedimento de la carga de fondo, únicamente se transporta el sedimento en suspensión inyectado en el inicio.

Con objeto de visualizar en qué zonas es posible que el sedimento se deposite, en la **Figura 69** se comparan los parámetros de: calado, velocidad del flujo y cantidad de sedimento depositado para la hora 8 y 18 de simulación.

t=8h



t=18h

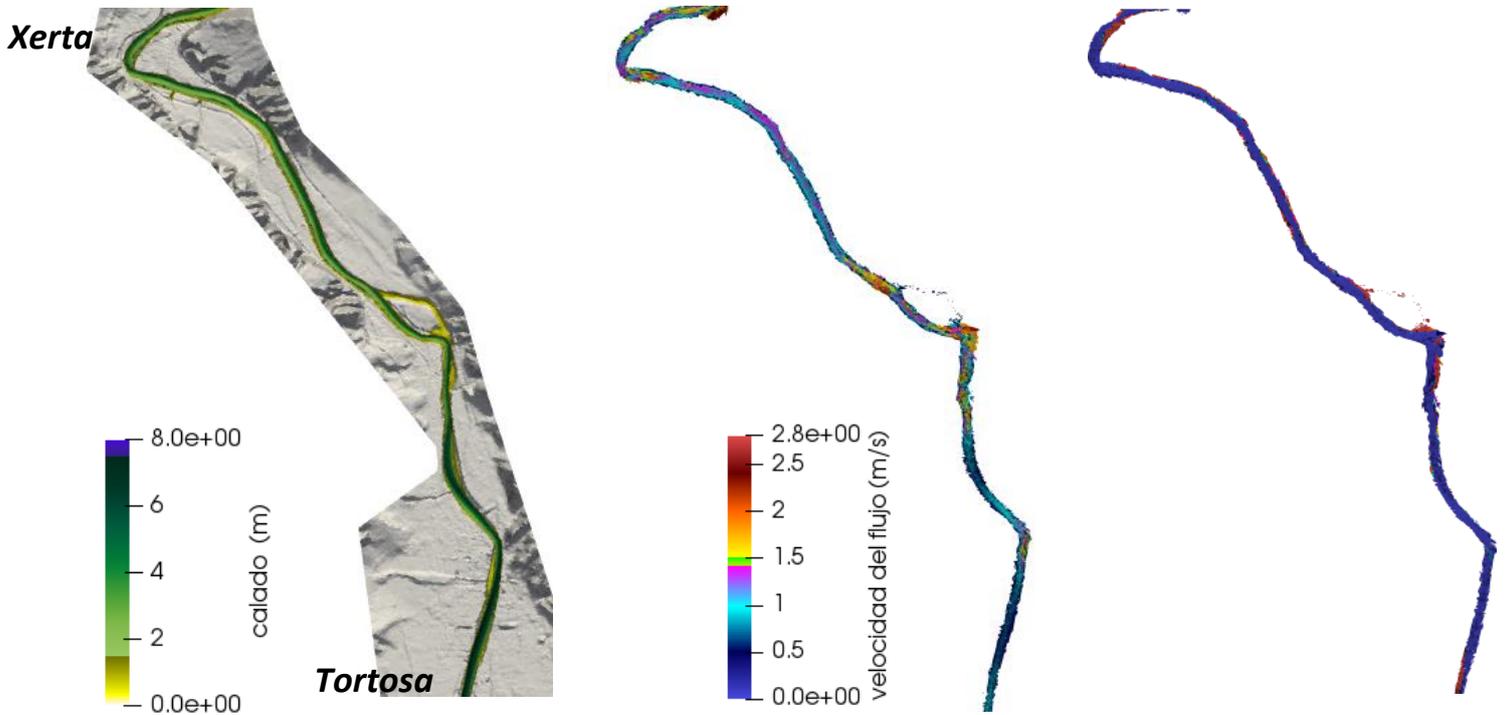


Figura 69: Detalle de mapa de extensión de la lámina de agua (verde) sobre MDT (gris) a la izquierda, mapa de velocidades en el centro y extensión de sedimentos (azul) a la derecha en el tramo P1-P2 (Xerta-Tortosa) en t=8h (arriba) y t=18h (abajo), en el escenario 3.

En esta **Figura 69**, se aprecia que el sedimento se va depositando en una bifurcación que hace el cauce en la parte central del tramo de río Xerta-Tortosa. Conforme esa zona del terreno va ganando altura de agua, mayor cantidad de sedimentos acceden y se depositan en la misma. El aumento del caudal que pasa por esa zona del cauce es el factor que permite que esa zona adquiera una altura de agua mayor. La imagen del campo de velocidades del flujo de agua y sedimentos también muestra que en la zona de la bifurcación el flujo tiene una velocidad muy baja, lo que hace que esa sea una zona de remanso, ideal para que el sedimento deposite. Al tratarse de una zona sinuosa del MDT, todas las cavidades del terreno cercanas al cauce que adquieren una altura de agua, gracias al incremento de caudal, pasan a ser zonas de remanso donde el sedimento tiende a depositarse.

En la **Figura 70**, se puede apreciar una vista aérea del terreno real, donde se aprecian las zonas en las que el sedimento deposita. Se trata de zonas de grandes depósitos de sedimento que se han hecho en el propio cauce. Estos depósitos consolidan un terreno que al tener muy poca cota, en cuanto sube el calado del cauce el agua comienza a fluir. De esta manera si la velocidad del flujo no es muy grande, el sedimento desciende por gravedad y se acaba depositando en la superficie de este terreno.

La flora que crece en los depósitos de sedimentos es otro elemento contra el que se topa el sedimento en suspensión cuando el flujo atraviesa estas zonas, y la fricción ejercida entre ambos hace que el sedimento pierda velocidad y acabe depositándose pasando a formar parte de la carga de fondo.



Figura 70: Imagen satélite del IGN en la que se muestra la bifurcación del cauce.

Al representar la altura que alcanza el sedimento al depositarse en el fondo, o la profundidad que gana el cauce si el flujo erosiona el fondo (ver **Figura 71**) vuelve a darse el mismo escenario que en la segunda simulación. En este caso, los valores tanto de profundidad erosionada en **P1** como de sedimentación en **P2 y P4** son más pequeños puesto que el caudal en la entrada pasa de **600 a 500 m³/s**.

Corroborando lo apuntado en las páginas anteriores, la pendiente positiva de la recta de color gris (**Figura 71**) que representa la altura del sedimento en P2 (ubicar en **Figura 67**), indica que el sedimento sigue depositándose en el primer tramo del río simulado.

En cuanto a los resultados obtenidos en los puntos de observación ubicados en la planicie Deltaica (**P3 y P4**, ubicar en la **Figura 67**), mirando sus líneas de tendencia en la **Figura 71**, no se aprecia ninguna variación de sus valores iniciales; síntoma de que sigue sin sedimentar material en esa zona, y a su vez el volumen y la velocidad del flujo de agua sigue siendo insuficiente para que la fuerza del mismo permita erosionar el fondo y convertir la carga de fondo en sedimento en suspensión.

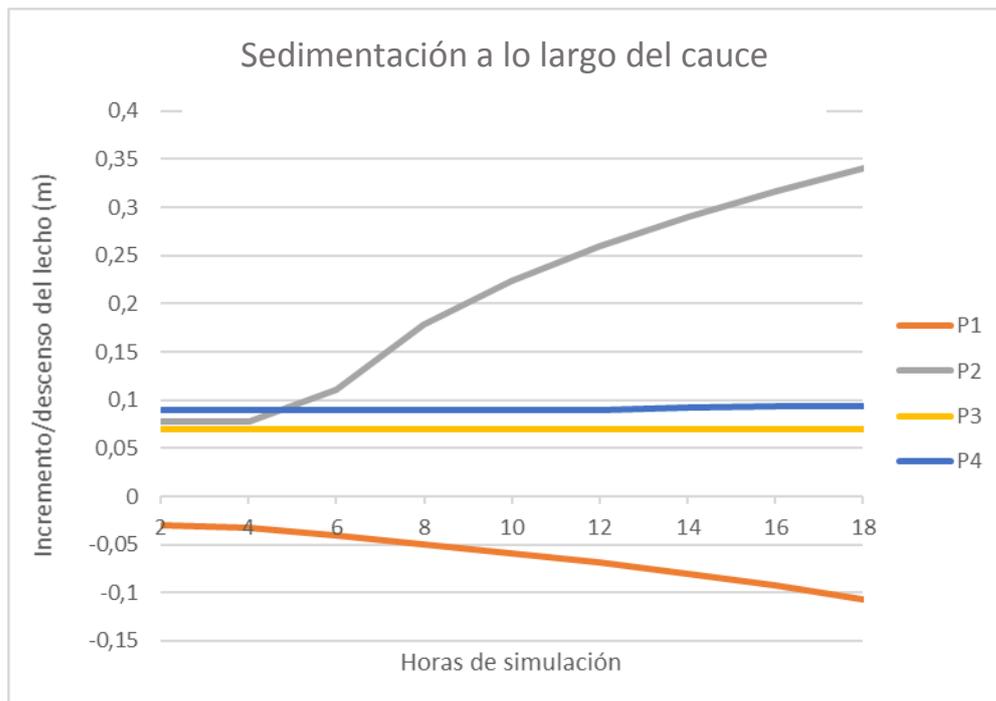


Figura 71: Evolución temporal de la altura de sedimento en los 4 puntos de observación (P1, P2, P3 y P4 de la **Figura 67**), en el escenario 3.

Sin embargo, en la **Figura 72** aparece la tendencia que sigue el caudal de sedimentos que atraviesa la sección de medida ubicada en la desembocadura; en la que sí se aprecia que existe un caudal de sedimentos; señal de que éste llega al mar.

Analizando detenidamente la **Figura 72**, a partir de la hora 12 de simulación se aprecia un aumento exponencial del caudal de sedimento coincidiendo con el momento en el que el caudal de agua en esa misma sección alcanza los **400 m³/s**, para posteriormente estabilizarse en torno a valores de **450 m³/s** durante el resto de la simulación. Por tanto, queda patente que para conseguir que el flujo de sedimentos trascurra por la planicie Deltaica es necesario un caudal mínimo en torno a los **400 m³/s**.

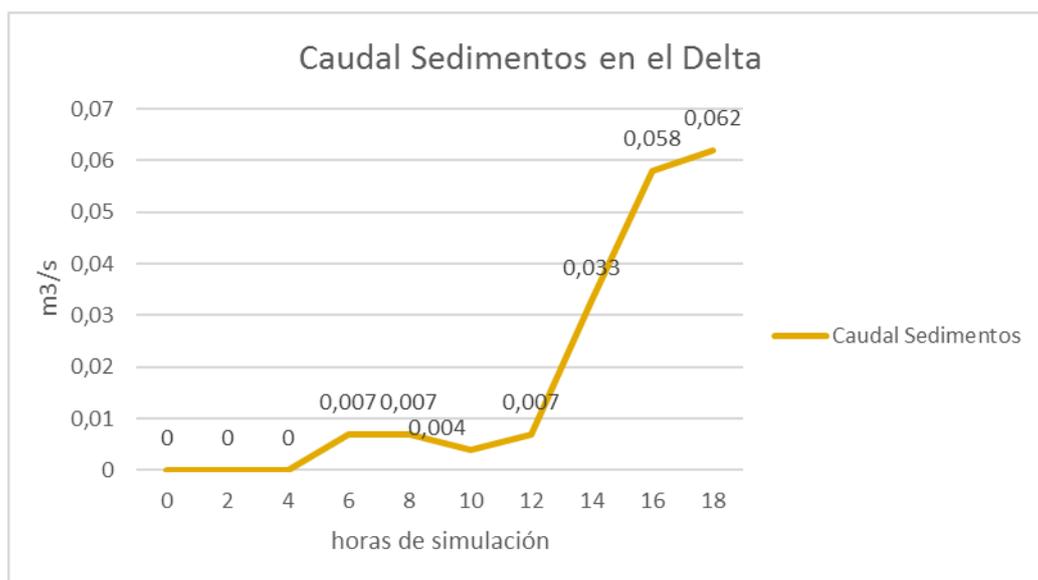


Figura 72: Evolución temporal del caudal de sedimentos en la sección de medida de la desembocadura en el escenario 3.

En cuanto al flujo de sedimentos que avanza por la desembocadura, parece que, al incluir las dos condiciones de contorno de entrada de caudal de sedimentos en la planicie Deltaica, se consigue que llegue cierto caudal de sedimentos a la desembocadura del río.

Analizando todo el contenido de esta tercera simulación, aparecen dos lecturas claras que afectan al primer tramo del cauce (Xerta-Amposta) y al tramo correspondiente a la planicie Deltaica:

1. Cotejando las gráficas de las **Figuras 71 y 72**, es posible afirmar que, en el terreno de la planicie Deltaica el sedimento se comporta de una manera óptima, ya que no se deposita en el fondo del cauce, sino que avanza en suspensión dentro del flujo de agua, sin descender de la superficie.
2. Sin embargo, en el primer tramo, al reducir el caudal de entrada, el problema de deposición de sedimentos en la zona intermedia del cauce entre Tortosa y Amposta (ver **Figura 69**) agrava más la situación que lo que ocurre bajo el escenario 2. De acuerdo con esto, la única manera de permitir que el sedimento siga avanzando aguas abajo de este tramo es introducir un caudal muy superior a los empleados hasta ahora, en la condición de contorno de entrada al inicio del cauce.

Escenario 3.1: inyección de caudal de agua en Xerta tras el ciclo de vertido de agua y sedimentos del escenario 3

Dado que, en simulaciones anteriores, cuando el flujo de sedimentos era inyectado en el primer tramo del cauce, se acumulaba entre las secciones de medida de Tortosa y Amposta; el objeto de esta simulación es comprobar la influencia de un gran aumento del caudal de agua, en el transporte de sedimentos aguas abajo de la represa de Xerta.

Se trata de analizar, si con un gran caudal de entrada en el inicio del cauce, tanto la carga de fondo como de sedimento llegan a la planicie Deltaica, sin acumularse en la misma. Es decir, que el sedimento logre llegar mar adentro.

El resultado se medirá viendo si en la última sección de medida, situada en el Delta de Ebro, el caudal de sedimentos tiene una tendencia creciente durante todo el tiempo de simulación y a su vez, aumente la profundidad del cauce en el último punto de observación (P4 en la **Figura 73**). Es decir, que el flujo erosione el cauce.

En este escenario, se parte de la condición inicial de flujo estacionario, obtenida en el último estado de la simulación 3. Se trata de un estado estacionario de caudal de agua $Q_w=600 \text{ m}^3/\text{s}$ con un caudal de sedimento de valor $Q_s= 0.11 \text{ m}^3/\text{s}$.

En cuanto a las condiciones de contorno, no se inyecta sedimento en ningún punto del cauce, únicamente hay una entrada de flujo de agua constante $Q_w=1400 \text{ m}^3/\text{s}$, en la condición de contorno de entrada al inicio del cauce (**Figura 73**). La condición de salida de agua se mantiene como en el resto de simulaciones.

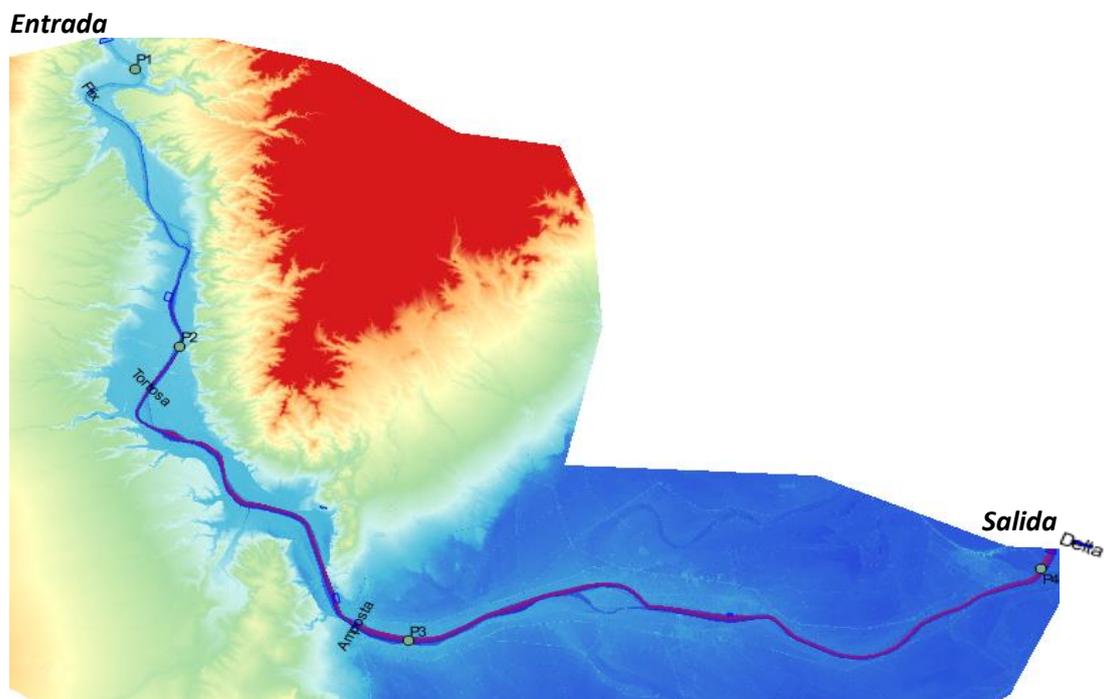


Figura 73: Localización de las 4 secciones transversales de medida (Flix, Tortosa, Amposta, Delta), de los 4 puntos de observación (P1, P2, P3, P4), de la condición de contorno de entrada (Entrada inicio) y de la condición de contorno de salida (Salida) sobre el MDT en el escenario 3.1.

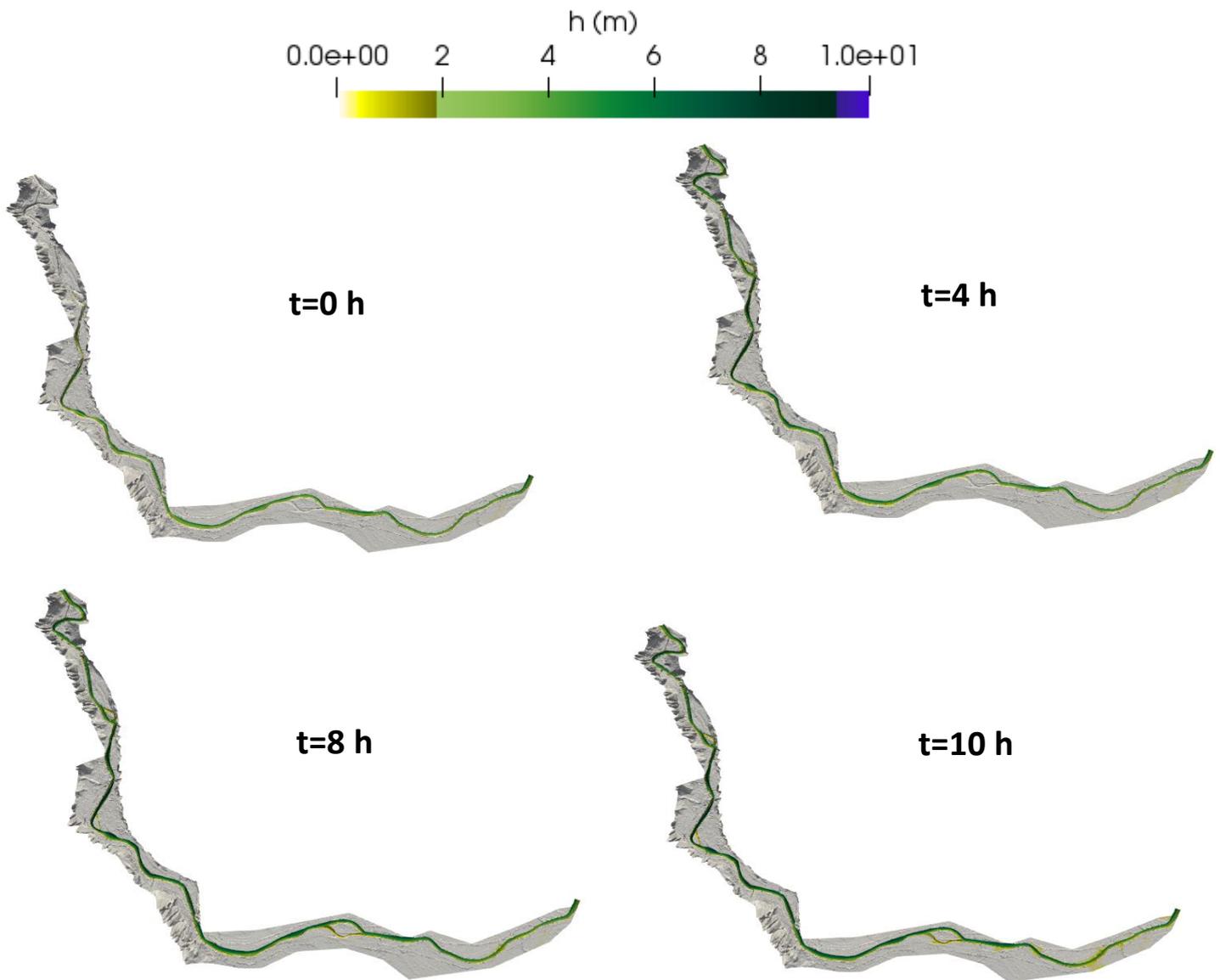


Figura 74: Representación de la altura de la lámina de agua sobre el terreno en $t=0h$, $t=4h$, $t=8h$ y $t=10h$ para una entrada de caudal de $Q_w=1400m^3/s$ posterior al ciclo de vertido del escenario 3.

En la **Figura 74** se representan los mapas vistos en planta de la extensión de la mancha de inundación sobre el terreno para diferentes instantes de tiempo. La variable representada es la altura de agua en metros sobre el fondo del terreno. Colores más claros corresponden a alturas pequeñas mientras que colores más oscuros corresponden a alturas mayores. Como se puede observar, en el instante inicial de la simulación, el flujo de agua y sedimentos comienza a descender aguas abajo desde la entrada y va inundando la zona conforme el flujo se va transportando junto al sedimento. En las zonas donde el río comienza a desbordar, el sedimento se va depositando aprovechando zonas de remanso (velocidad nula), hasta que el nivel de agua y/o la velocidad del flujo sea suficiente para ponerlo de nuevo en movimiento.

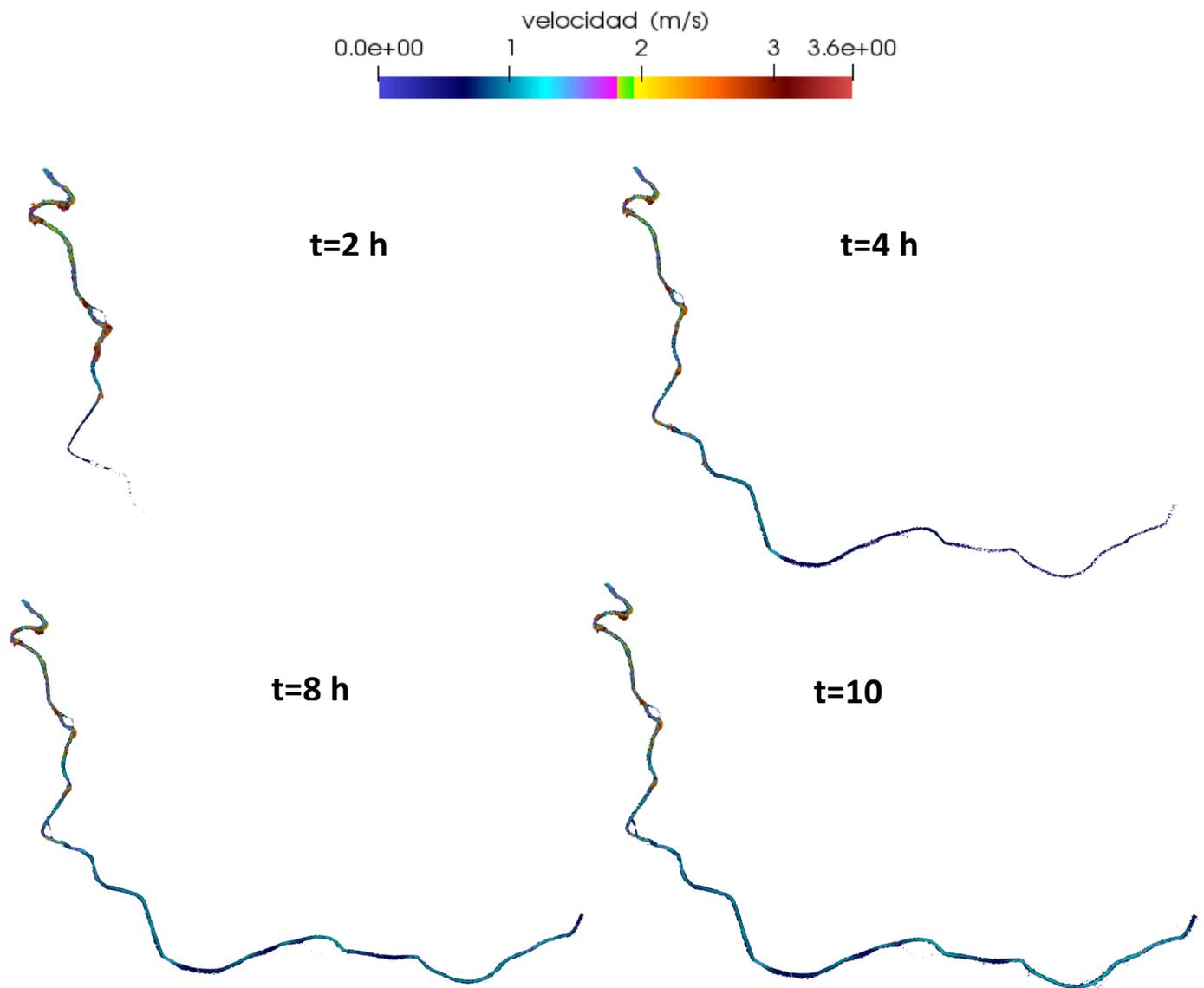


Figura 75: Representación de la velocidad del flujo sobre el cauce en t=2h, t=4h, t=8h y t=10h para un caudal de $Q=1400\text{m}^3/\text{s}$ posterior al ciclo de vertido del escenario 3.

Durante la evolución temporal de la velocidad del flujo (ver **Figura 75**) que circula por dentro del cauce del Ebro, se observa perfectamente como el flujo va avanzando río abajo durante las primeras 4 horas, a la vez que gana velocidad; alcanzando completamente el estado estacionario en la simulación, entre las horas 4 y 8. Relacionando la **Figura 74** con la **Figura 75**, se aprecia que la velocidad aumenta conforme aumenta también el calado en el cauce; hecho que provoca que, en la parte final de la planicie Deltaica, el terreno que linda con el cauce, comience a anegarse.

El terreno anegado en el MDT corresponde a los arrozales anegados en el entorno del río real (ver **Figura 78**); los cuales consiguen ganar cota con respecto al nivel creciente del mar cuando se deposita el sedimento que contiene el flujo que los anega. En la **Figura 76**, aparece la zona de ampliación, sobre el MDT, de la planicie Deltaica. De manera cualitativa se pueden apreciar, con puntitos rojos, las zonas donde deposita el sedimento en el terreno.

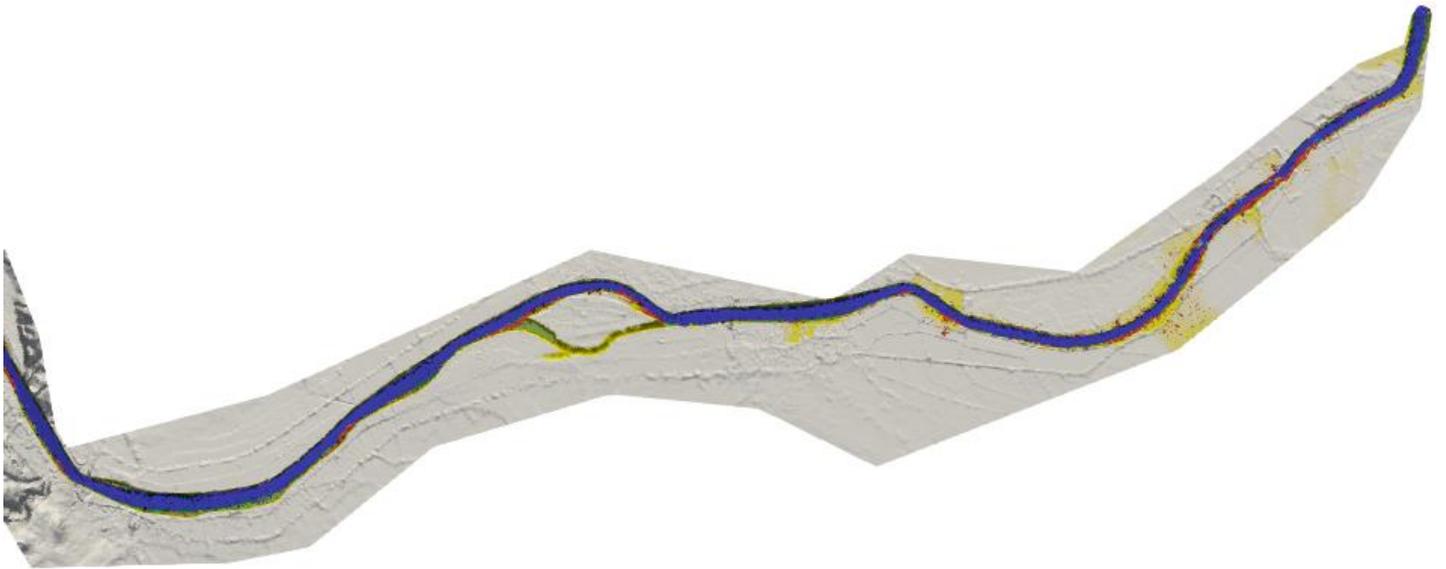


Figura 76: Ampliación sobre el MDT de la planicie Deltaica en la que se aprecia donde se deposita el sedimento para el estado $t=10$ h, escenario 3.1.

Al comparar la Figura anterior, con la **Figura 77** en la que se muestra el calado del cauce en esa misma zona y para el mismo periodo de tiempo, se aprecia perfectamente que el sedimento deposita únicamente en las zonas que han sido anegadas, las cuales cuentan con una altura de agua muy pequeña. Esto permite que el terreno anegado gane cota, pero que el caudal de sedimentos que llegue a la desembocadura sea menor.

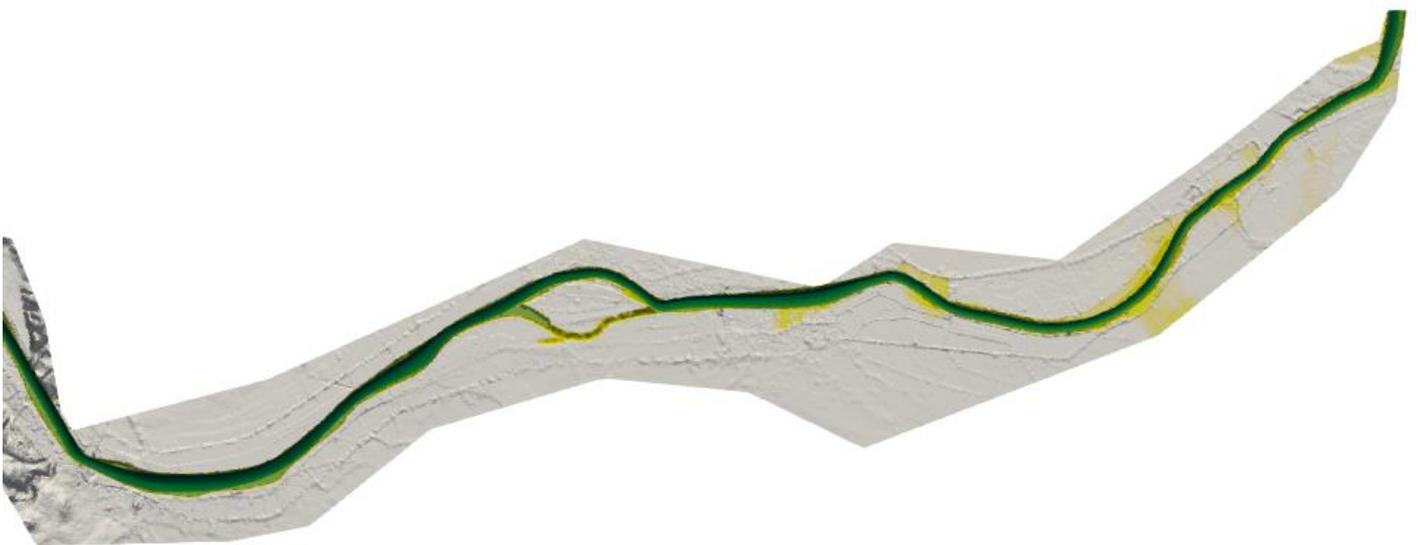


Figura 77: Ampliación sobre el MDT de la planicie Deltaica complementaria a la Figura 76, en la que se aprecia el calado del cauce para el estado $t=10$ h, en el escenario 3.1.



Figura 78: Imagen de satélite de la zona de estudio donde en color amarillo se señalan las zonas en las que se produce desbordamiento de agua y acumulación de sedimento.

En la **Figura 79** se ha representado la evolución temporal del caudal de sedimento en las secciones de medida colocadas en la simulación y un detalle de lo que ocurre en el Delta. Podemos observar que en la primera sección de medida (Xerta) el caudal de sedimento se encuentra en torno a $Q_s=2m^3/s$, muy similar al que posteriormente se obtiene en el Delta. Sin embargo, es en las estaciones intermedias de Amposta y Tortosa donde se encuentran los máximos caudales de sedimentos rozando los $9m^3/s$.

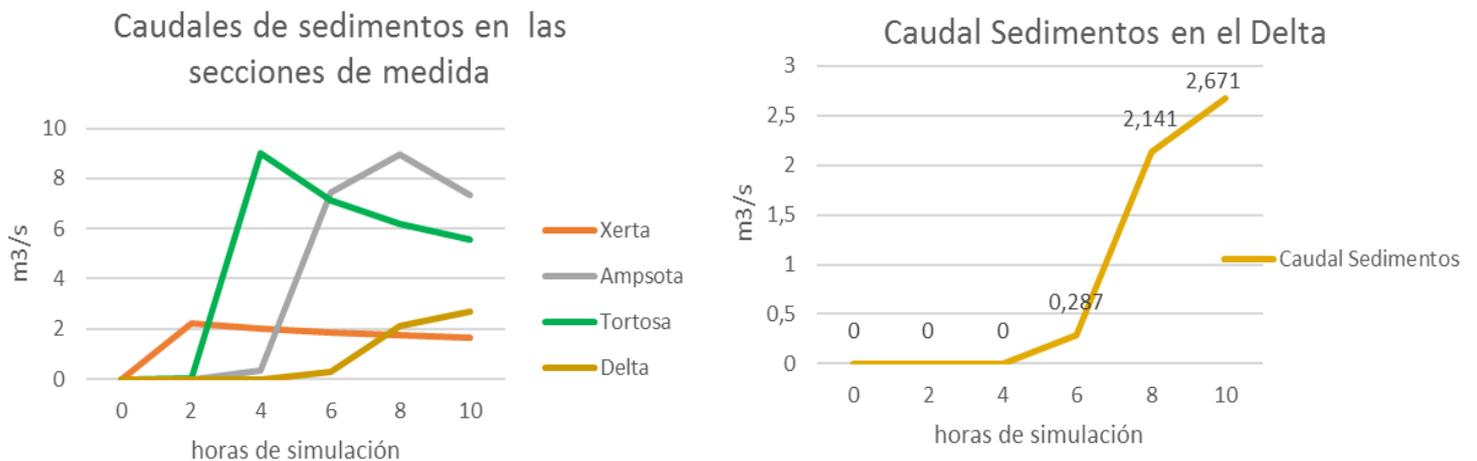


Figura 79: Evolución temporal del caudal de sedimento transportado en las secciones de medida de Xerta, Amposta, Tortosa y Delta (izda.) y ampliación de la del Delta (dcha.) obtenidos de la simulación de una avenida de $Q=1400m^3/s$ posterior a un ciclo de vertido.

Conforme a las secciones de medida, esta distribución de caudales de sedimento es totalmente diferente a la del resto de escenarios simulados. En este caso, el caudal de sedimentos no alcanza su valor máximo en la sección de medida de Flix/Xerta (ver gráfica derecha de la **Figura 79**), sino que lo hace en su tramo intermedio, entre las secciones de Tortosa y Amposta, con unos valores de caudal de sedimento 20 veces superiores a los experimentados con caudales de agua en la condición de contorno de entrada $Q_w=600 m^3/s$, al inicio del cauce.

La tendencia decreciente de caudal de sedimentos en las secciones de Tortosa y Amposta, en las últimas 2 horas de simulación, junto con el caudal estabilizado en Xerta (aguas arriba de las secciones anteriores, ver ubicación en **Figura 73**) y la tendencia creciente medida en la sección del Delta (sección situada en la desembocadura) indican que el flujo de sedimentos en suspensión se encuentra avanzando por la planicie Deltaica hacia la desembocadura, en el momento en que termina la simulación. Quizás con una simulación de 24 horas, los caudales de sedimentos circulantes por las 4 secciones alcanzarían un estado estacionario, como sucede en la sección de Flix/Xerta.

La tendencia positiva en el caudal de sedimentos medido en la sección del Delta del Ebro, durante las últimas 5 horas de simulación indica que conforme el caudal de agua aumenta en dicha sección (a la vez que va aumentando el calado y la velocidad del flujo), comienza a llegar más sedimento a la desembocadura. Este sedimento, procedente de la carga de fondo que el flujo va arrastrando durante toda su trayectoria por el cauce del río Ebro; y dada la fuerza con la que cuenta el flujo en este escenario, hace pensar que el sedimento acabará posteriormente mar adentro, de una manera similar a la **Figura 87**.

Estos datos de caudal de sedimento transportado es conveniente cotejarlos con los datos que aportan los puntos de observación en cuanto a la altura del fondo del cauce (carga de fondo), o por el contrario la altura que pierden porque erosionan.

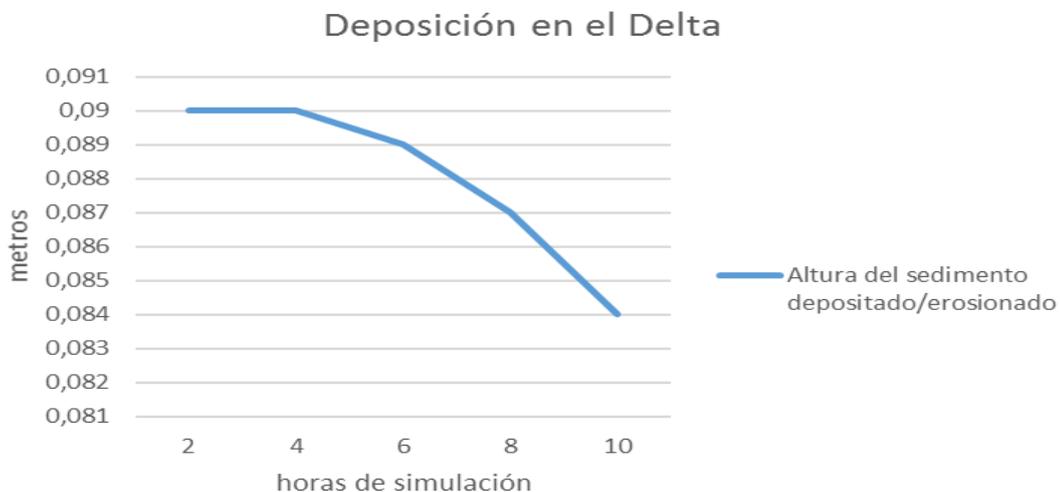


Figura 80: Evolución temporal de la altura del lecho en el punto de observación situado en el Delta, en el escenario 3.1.

La **Figura 80** muestra cómo evoluciona la altura del lecho del cauce en un punto de observación en el Delta donde se aprecia la tendencia a la **erosión**, en lugar de deposición, cobrando sentido de esta manera, que el caudal de sedimentos medido en la sección posterior (sección de medida Delta, ver en **Figura 73**) aumente con el paso del tiempo como se observa en la **Figura 79**.

Esto quiere decir que la velocidad con la que el flujo llega al Delta, es tal, que permite seguir arrastrando sedimento del fondo sin depositar nada de la carga que está en suspensión. De esta manera, el sedimento perteneciente a la carga de fondo de la planicie Deltaica acabaría en el mar en vez de continuar estático en el fondo. A su vez, toda la carga en suspensión que viene desde aguas abajo de la represa de Xerta, y que ha ido aumentando gracias a la suma de la carga de fondo del terreno anterior, no sedimenta en la planicie.

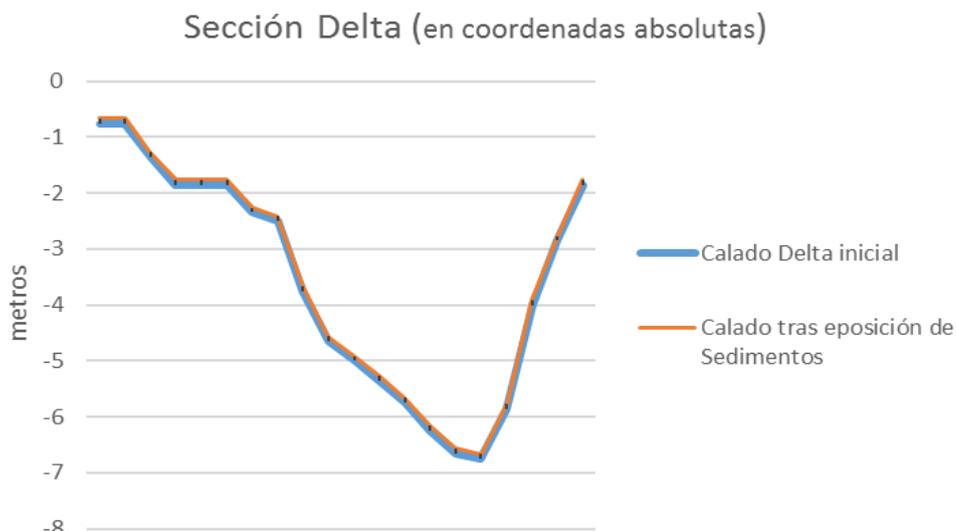


Figura 81: Evolución de la sección del Delta (cota de terreno) tras $t=10h$ de simulación con un caudal $Q=1400m^3/s$ posterior a un ciclo de vertido.

En la **Figura 81** se realiza una comparación de la cota del terreno inicial de la sección del Delta (color azul) con la cota de terreno que se alcanza tras la simulación de 10h (color naranja), una vez que se ha sedimentado el material en suspensión. Se observa que la variación de la cota de terreno es muy pequeña, pudiendo apreciarse un leve aumento en la zona de la izquierda de la imagen y prácticamente ninguna variación en la otra orilla (derecha de la imagen).

Aunque el objetivo prioritario de este estudio es la parte de la llanura Deltaica, también es necesario analizar los resultados obtenidos aguas arriba y ver en qué zonas del dominio es posible que se deposite el sedimento, impidiendo su llegada al Delta. En la **Figura 82** se muestra una imagen del dominio después de 10h de simulación de entrada de un caudal constante $Q=1400\text{m}^3/\text{s}$ posterior a un ciclo de vertido, donde se representa la altura de agua alcanzada sobre el mapa del terreno. A su vez, de manera cualitativa, el sedimento depositado sobre el terreno aparece representado con “puntos rojos”. Se han rodeado en rojo y se han denominado con las letras a), b), c) y d) a zonas del dominio más pequeñas en las que se van a mostrar los resultados en detalle más adelante para poder analizarlos.

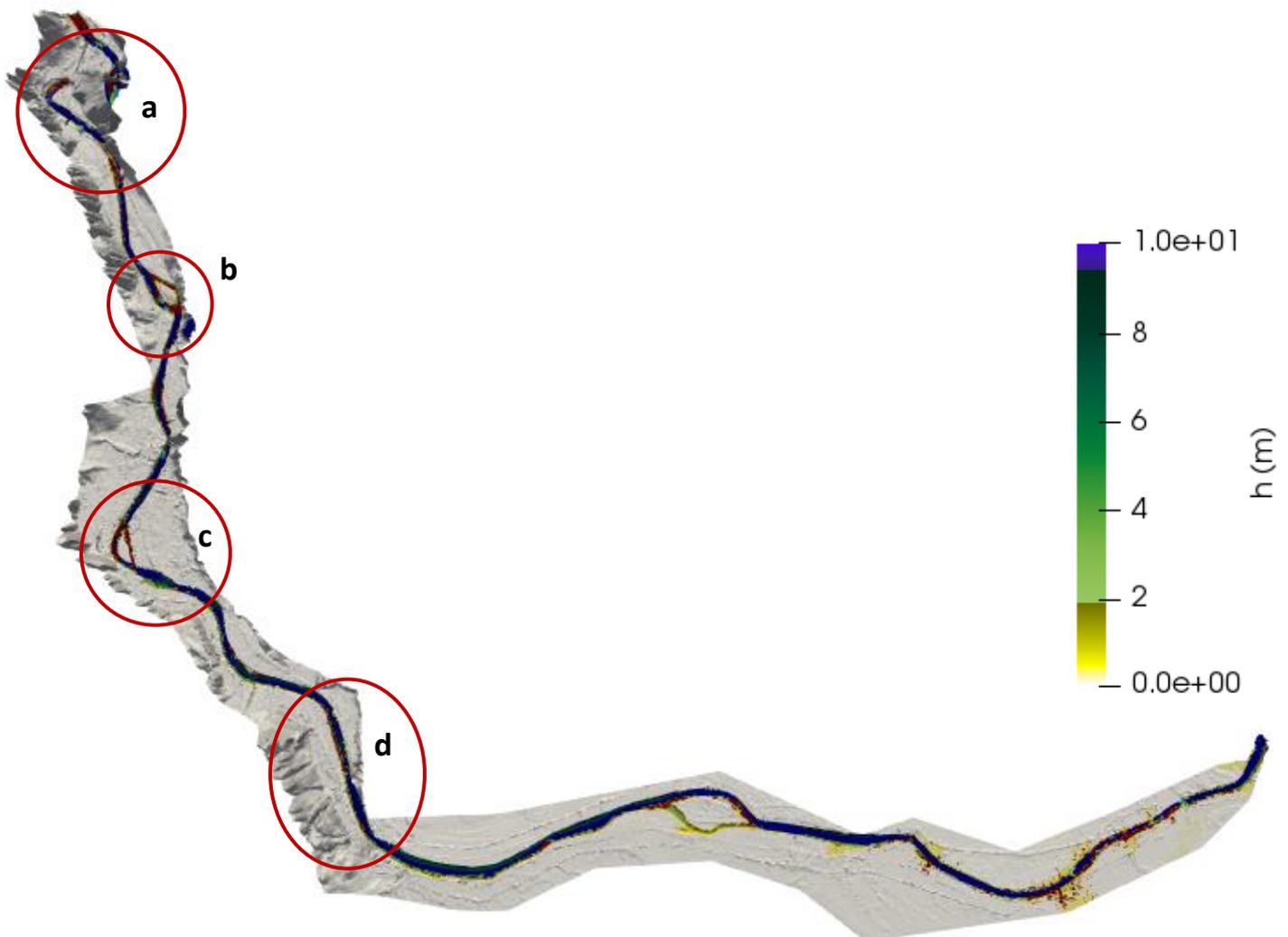


Figura 82: Altura de agua sobre mapa de terreno tras $t=10\text{h}$ de simulación con un $Q=1400\text{m}^3/\text{s}$ posterior a un ciclo de vertido. El sedimento depositado aparece representado con puntos rojos.

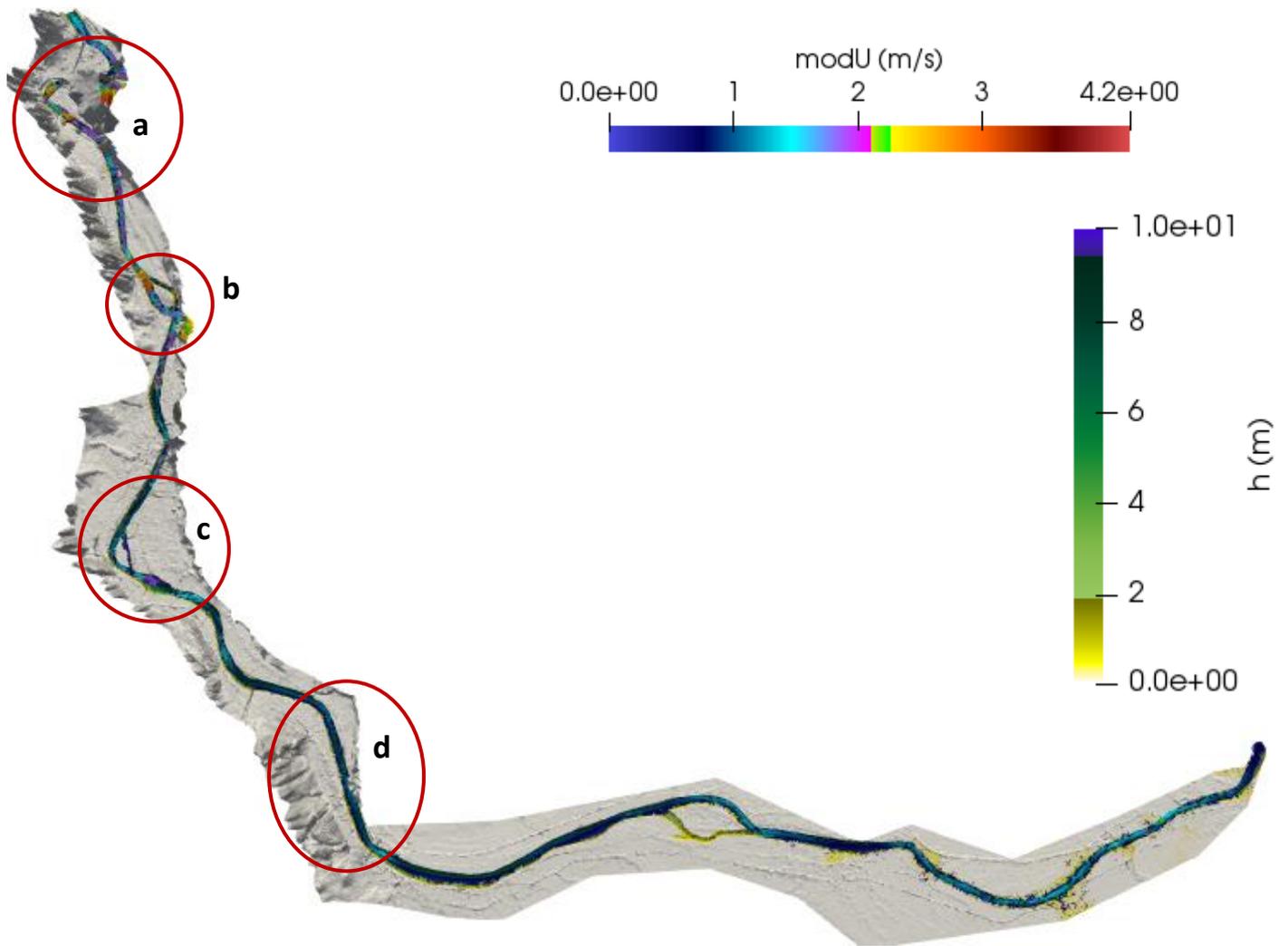


Figura 83: Vectores de velocidad sobre mapa de terreno y altura de agua tras $t=10h$ de simulación con un $Q=1400m^3/s$ posterior a un ciclo de vertido.

En la **Figura 83** se representa el mapa de velocidades obtenido tras una simulación de 10h con un caudal impuesto en la entrada de $1400m^3/s$ sobre un mapa de terreno en el que se han representado también las líneas de nivel de la altura de agua alcanzada. Se rodean en rojo las zonas que se van a estudiar en detalle más adelante, al igual que en la **Figura 82**.

Conforme se han ido analizando los resultados de las simulaciones, queda claro que éstos responden al modelo de ecuaciones que gobierna el comportamiento del flujo de agua y sedimentos, explicado en el Anexo 1.

Siguiendo el hilo de esta afirmación, si se comparan las **Figuras 82 y 83**, queda patente que en las zonas donde el calado es menor, la velocidad del fluido se reduce debido a que aumenta la fuerza de fricción en la capa límite entre el fluido y el fondo del cauce. Al aumentar esta fuerza de rozamiento o fricción entre el fluido y los distintos componentes (minerales, arenas, vegetales, lodos, arcillas) que forman la carga de fondo del cauce del río Ebro, el sedimento en suspensión avanza por el cauce junto al fluido depositándose y pasando a formar parte de la carga de fondo; provocando así el ascenso de la cota del fondo del terreno y la consiguiente disminución del calado.

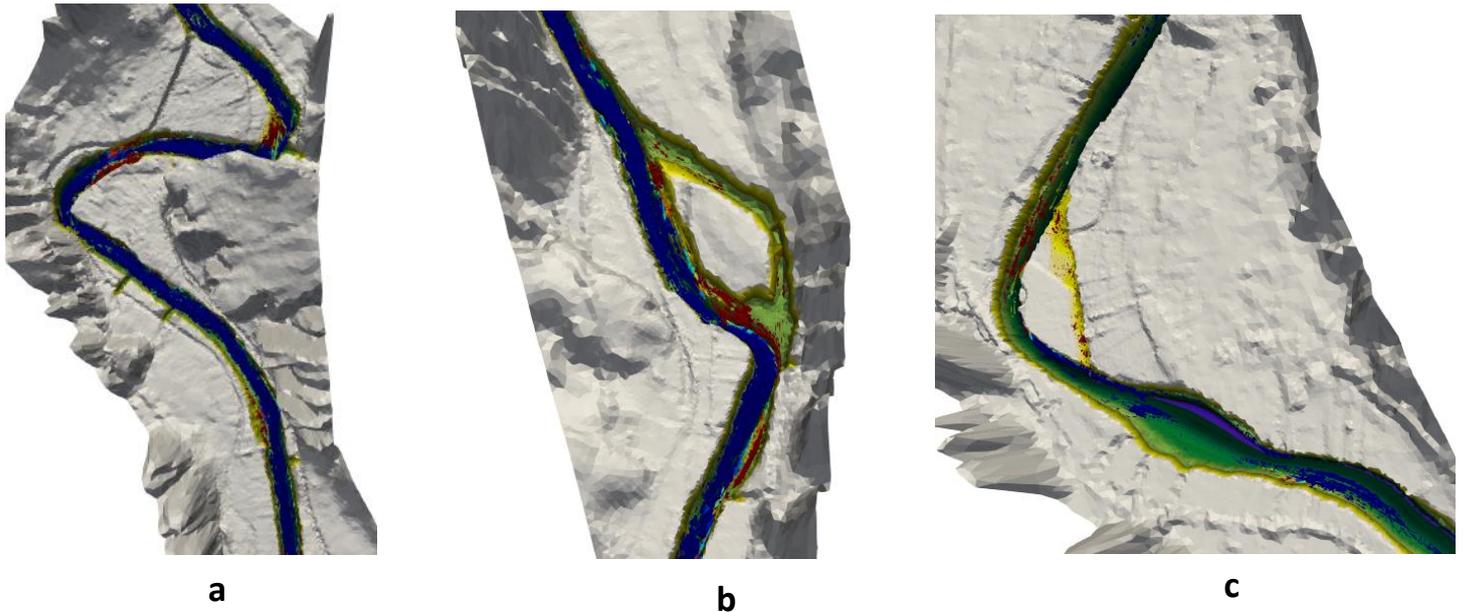


Figura 84: Detalle cualitativo del sedimento depositado sobre mapa de terreno tras $t=10h$ de simulación con un $Q=1400m^3/s$ posterior a un ciclo de vertido en las zonas a), b) y c) de la Figura 82.

En la **Figura 84** se muestra un detalle de lo que ocurre en las zonas que habíamos rodeado en la **Figura 82**. Observamos que el sedimento enseguida tiende a depositarse en cualquier concavidad o irregularidad geográfica del cauce o del terreno, que hace que descienda el calado o la velocidad del flujo que circula por el mismo. Esto es precisamente lo que se tiene que evitar o mitigar a lo largo de todo el dominio del cauce a estudiar, puesto que estos depósitos de sedimento en la zona del cauce previa a la llanura Deltaica obstruyen el flujo y provocan la disminución del caudal de sedimentos en suspensión.

A mayor superficie de sedimentos estacionados en el fondo, mayor es la fuerza de fricción que ejercen los sedimentos que circulan por el río, y la “captación” de estas partículas de arena y lodos que conforman el sedimento en suspensión mejora. Si este fenómeno se produce de una manera muy agresiva, la carga de fondo adquiere tal altura que comienza a sobresalir por encima de la altura de agua, formándose de esta manera islas en medio del cauce; fenómeno que se puede observar perfectamente en la imagen b que componen la **Figura 84**.

En el terreno real (ver **Figura 85**) se visualiza de una forma mucho más clara que el sedimento se deposita en unas zonas donde la fricción entre el fluido y el entorno sólido que conforma el cauce es mucho mayor (señaladas con flechas rojas en la **Figura 85**). En el caso de las imágenes **a y b**, se aprecian perfectamente las islas que se citan en el párrafo anterior. En estas imágenes, especialmente en la **b y c**, y comparándolas con las del MDT, se puede comprobar que en las zonas donde abunda la vegetación (especialmente los árboles con raíces de cierto calibre), el sedimento deposita y adquiere una cierta altura; lo que permite la formación de orillas en vez de taludes para delimitar el río, puesto que la mayoría de la vegetación se puede observar en las orillas del río.

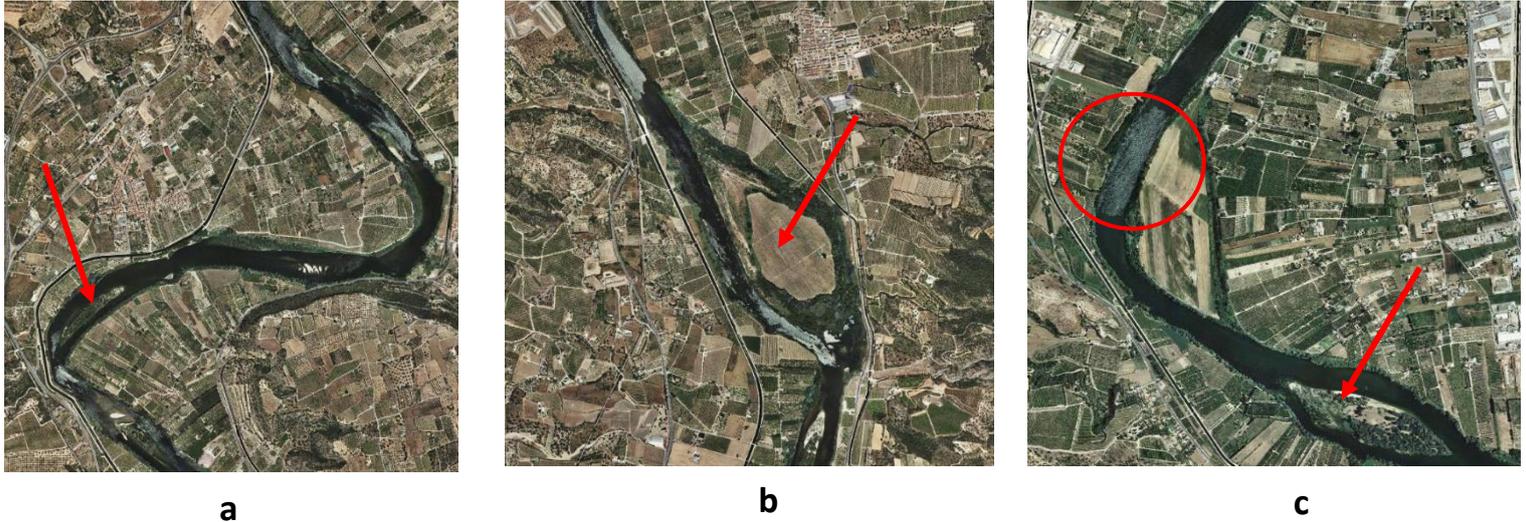


Figura 85: Imágenes de satélite del IGN de las zonas detalladas de la Figura 83 a), b) y c). Localización de zonas de acumulación de sedimento con flechas rojas.

Por otro lado, las plantas acuáticas que crecen en medio del cauce generan una disminución de la velocidad que lleva el flujo, provocada por un aumento de la fricción cuando el flujo de agua y sedimentos pasa por ellas, consiguiendo que las partículas sólidas queden atrapadas y provocando que el flujo continúe aguas abajo con menos sedimento.

Conforme el flujo avanza, tanto el caudal como la altura de agua van aumentando. En este caso, es más difícil que el sedimento que circula junto al fluido se deposite, puesto que la fuerza del flujo es muy superior a la fuerza de fricción entre los elementos que conforman el cauce y el propio fluido y sedimentos en suspensión; llegando un punto, en que si la fuerza de la corriente es suficiente, comienza a levantar la carga de fondo y la convierte en sedimento en suspensión, o incluso arranca vegetación la cual comienza a descender aguas abajo en la superficie del flujo de agua y sedimentos.

Queda patente que la manera de que lleguen más sedimentos a la planicie Deltaica, no es verter más volumen de sedimentos aguas arriba, sino conseguir un caudal superior a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$; lo cual permite que llegue sedimento a los arrozales y sobre todo a la desembocadura del río.

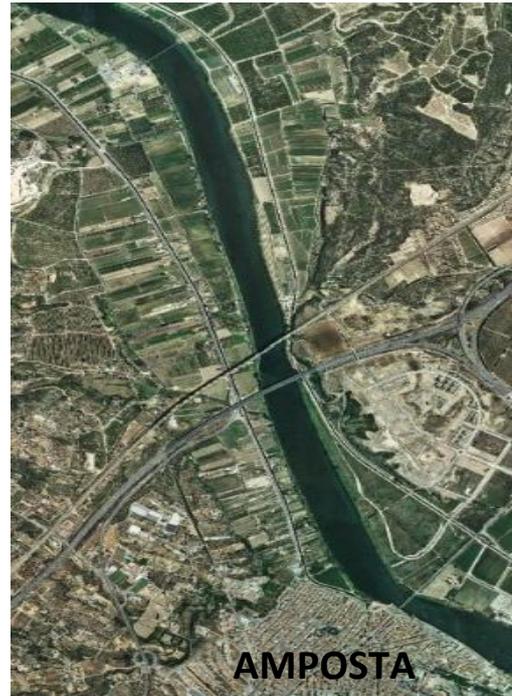
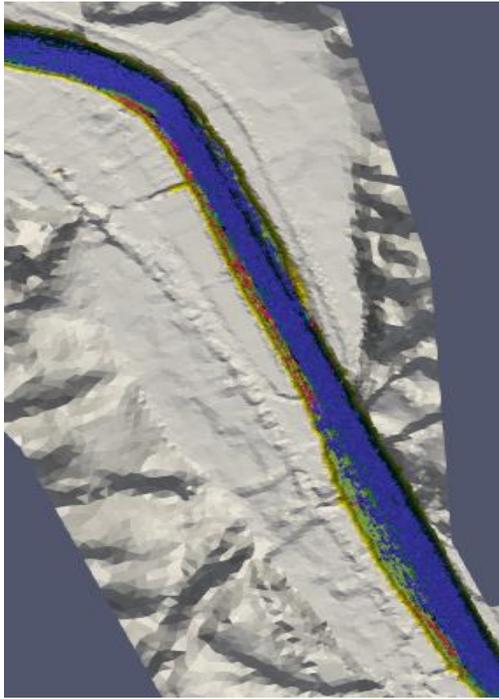


Figura 86: Detalle del sedimento depositado sobre mapa de terreno tras $t=10h$ de simulación con un $Q=1400m^3/s$ posterior a un ciclo de vertido en la zona d) de la Figura 82 (izda.) e imagen de satélite de esta misma zona (dcha.).

En la orilla izquierda del río a su paso por Amposta (**Figura 86** izquierda) se puede apreciar, que el sedimento se deposita, de manera notable, en las zonas de la orilla donde el calado es menor. Comparando estos resultados numéricos con la imagen de satélite de la zona (**Figura 86** derecha) resulta extraño ya que se trata de un tramo en el que el cauce es descendente y no hay irregularidades morfológicas/geográficas en el terreno, a priori. Una vez se compara el MDT con la imagen obtenida de satélite, se puede apreciar que en ambas orillas crecen árboles y vegetación, con lo que la deposición del sedimento es causada por las irregularidades que provocan las raíces en el terreno, lo que conlleva la creación de un flujo turbulento en el cauce del río, que favorece la sedimentación en las zonas de remanso que se encuentra a continuación.

La sedimentación en esta zona es un aspecto a evitar, ya que es el último codo o estrechamiento que forma el río Ebro, previo a su entrada en la planicie Deltaica. A partir de la ciudad de Amposta, los terrenos en ambas márgenes del río pasan a ser arrozales, zonas en las que también es necesaria la deposición de material sólido, con el fin de aumentar la cota de los campos de arroz, para que no acaben teniendo una cota negativa. El flujo del río deposita allí, gracias a los canales de riego que derivan agua del propio cauce del Ebro hasta los campos o gracias al flujo que infiltra directamente el cauce cuando éste desborda debido a una avenida.

Resumiendo, el análisis de la sedimentación en la primera mitad del cauce, podríamos decir que en las zonas en las que el flujo sufre una alteración (reducción de calado, vegetación en las orillas, curvas y codos de la propia topografía) que hace que la velocidad no sea la misma en toda la sección del cauce y el sedimento comience a depositarse. Como el objetivo es que llegue la mayor cantidad posible de sedimento a la planicie Deltaica, hay que evitar las zonas donde se crean islas o donde crece la vegetación en pleno cauce; teniendo siempre presente que no se

puede alterar el hábitat, ni a las diferentes especies animales y vegetales que se nutren y coexisten con el propio río Ebro.

En un estudio posterior, podríamos plantearnos y analizar qué soluciones permitirían generar un cauce lo más uniforme posible: dragar el cauce, limpiar las orillas de vegetación invasiva... todas ellas con la condición de alterar lo menos posible el hábitat del río.

Como documentación complementaria a lo tratado en este sub-apartado, en la **Figura 87** se muestra una imagen tomada desde un satélite de la NASA, en la que se aprecia la mancha de sedimentos que inyectó el Ebro en el mar Mediterráneo, durante su última gran crecida el 19 de abril de 2018, en la que el Ebro alcanzó un caudal pico de 1900 m³/s (medido en la estación de aforo de Tortosa).

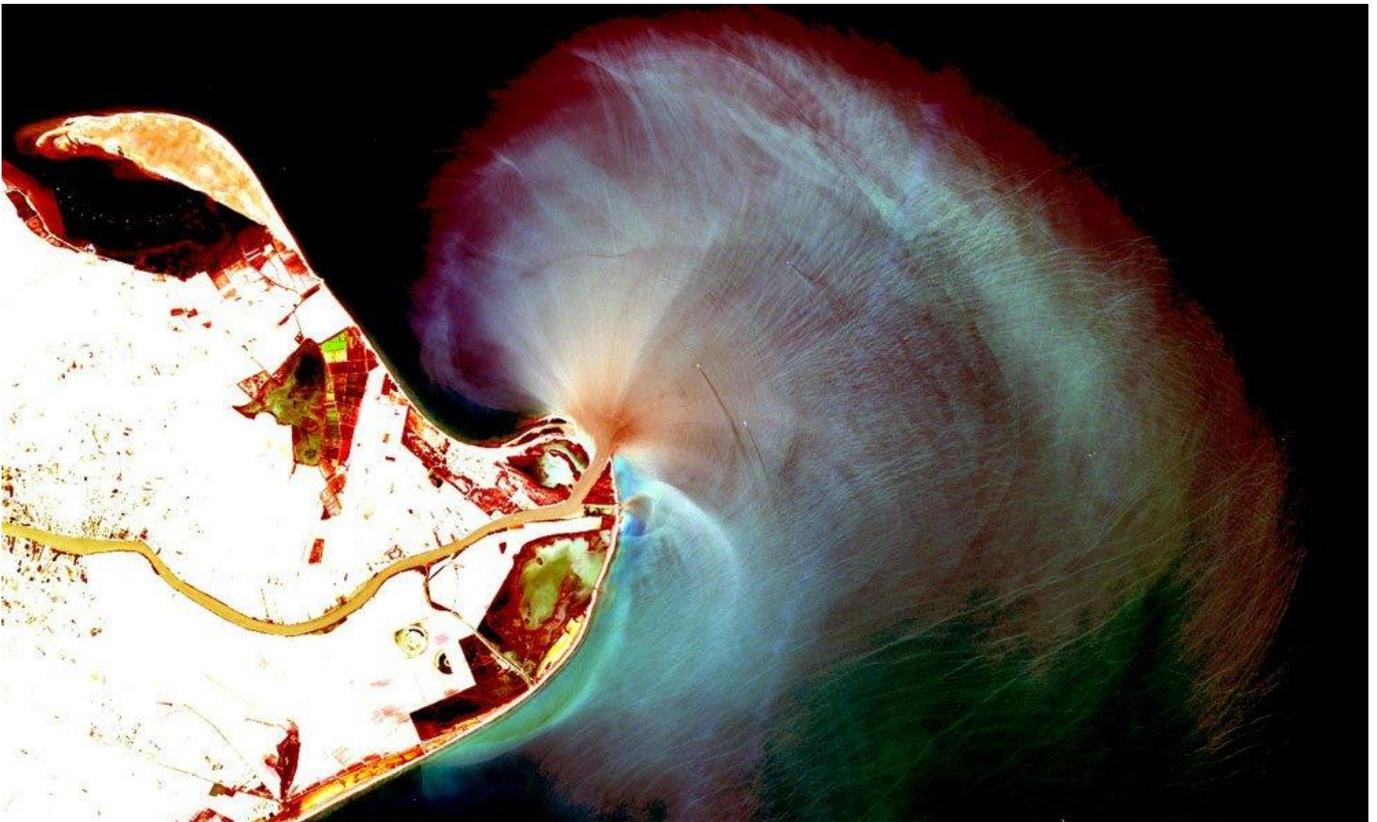


Figura 87: Imagen satélite (facilitada por el IRTA) en la que se aprecia la mancha de sedimentos en el mar Mediterráneo durante la crecida del Ebro en Abril de 2018.

Escenario 4: inyección de sedimentos en un punto (Deltebre)

Localizada la zona del cauce donde el sedimento queda retenido, **Figura 88**, y viendo que el sedimento en suspensión que logra circular por la planicie Deltaica no se deposita en el fondo del cauce a lo largo de toda su trayectoria hasta la desembocadura en el mar, se considera oportuno cambiar la localización de la inyección de sedimentos en el cauce del río.

De esta manera, en la siguiente simulación, las condiciones de contorno pasan a ser las siguientes:

En el inicio del cauce, localizado en Flix/Xerta, y mediante la condición de contorno de entrada allí situada, se pasa a introducir un caudal constante de agua $Q_w=600 \text{ m}^3/\text{s}$, sin inyección de sedimentos.

Para lograr el aumento del caudal de sedimentos en la planicie Deltaica, pasa a inyectarse mediante una única condición de contorno de entrada situada a la altura de la localidad de Deltebre, un $Q_s=0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ junto con un $Q_w=50 \text{ m}^3/\text{s}$ a partir de $t=10\text{h}$; antes de este tiempo no se produce inyección de agua ni de sedimentos.

La condición de contorno de salida sigue manteniéndose igual.

La simulación dura 24 horas, siendo $Q_w=600 \text{ m}^3/\text{s}$ constante durante las 24 horas en la condición de contorno situada en Flix/Xerta.

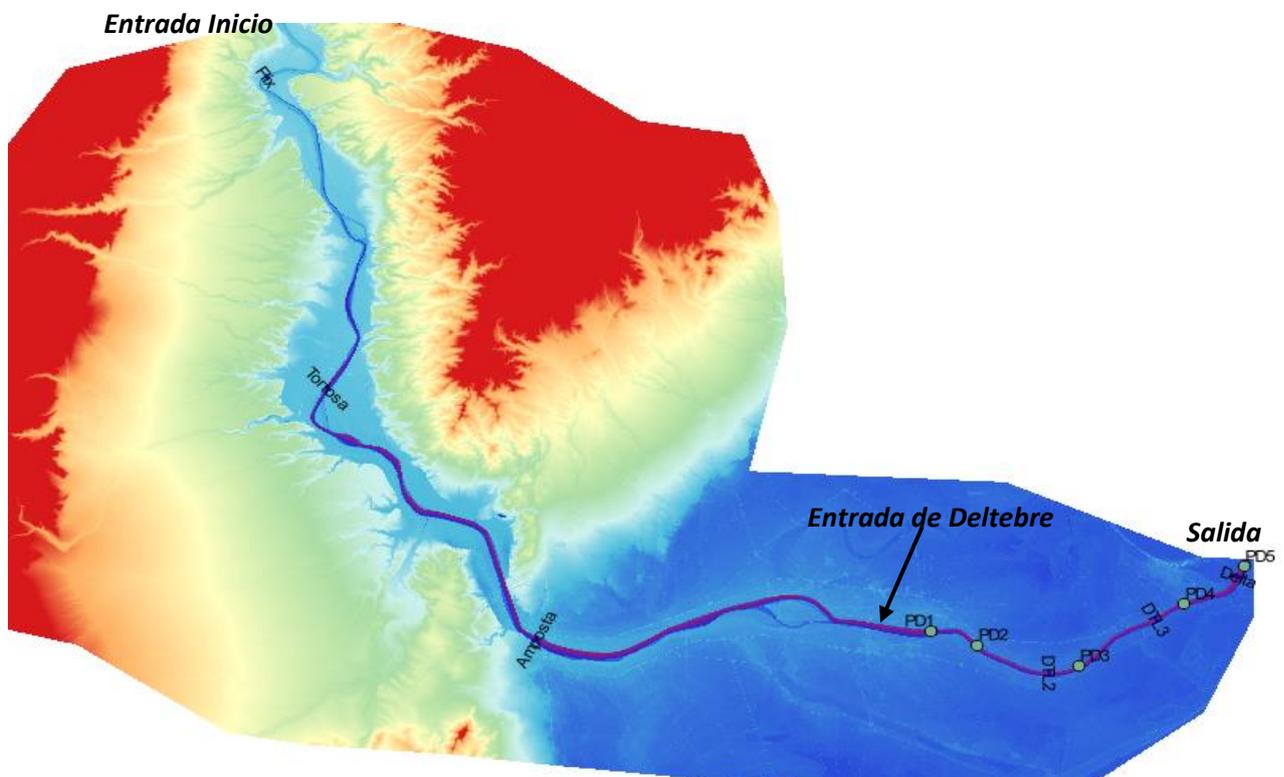


Figura 88: Localización de las secciones transversales de medida (Flix, Tortosa, Amposta, Delta, DTL1, DTL2 y DTL3), de los puntos de observación (PD1, PD2, PD3, PD4 y PD5), de las condiciones de contorno de entrada (Entrada Inicio y Entrada de Deltebre) y de la condición de contorno de salida (Salida) sobre el MDT en el escenario 4.

Volviendo a la inyección de sedimentos, es importante destacar qué, no sólo se ha cambiado su ubicación a la parte central de la planicie Deltaica, sino que también se ha cambiado la metodología de inyección.

Según los resultados observados en las **Figuras 89 y 90** (caudal de sedimento en el Delta y caudal de agua en el Delta), correspondientes al escenario 4, y viendo que el caudal de sedimentos en la sección de medida del Delta comienza a fluir con un crecimiento exponencial cuando por el cauce circulan caudales de agua superiores a $400 \text{ m}^3/\text{s}$ a partir de la hora 10 de simulación, se va a aprovechar a imponer esta condición de contorno en este tiempo de simulación.

De esta manera, cuando el sedimento entre dentro del flujo de agua que circula por el cauce, ya contará con un calado óptimo que permita al sedimento avanzar aguas abajo sin descender de la superficie (perder altura en el eje “z”), evitando su deposición en el fondo.

En cuanto a los elementos para la toma de datos sobre el cauce, como el principal objetivo es que llegue el mayor caudal posible de sedimentos a la desembocadura del río, sin que se depositen en los tramos anteriores de la planicie Deltaica, es necesario afinar la toma de resultados en el tramo final del cauce.

En esta simulación, se sustituyen en el MDT los puntos de observación anteriores (P1, P2, P3 y P4 **Figura 73**) por 5 nuevos (**PD1, PD2, PD3, PD4 y PD5**), situados estos últimos en el tramo del cauce entre Deltebre y la desembocadura (ver **Figura 88**).

El MDT también cuenta con 3 nuevas secciones transversales de medida, a parte de las ya existentes en las simulaciones anteriores, situadas en el mismo tramo del cauce que los nuevos puntos de observación (**DTL1, DTL2 y DTL3**). La localización de todos ellos se muestra en la **Figura 88**.

Modificadas las condiciones de contorno, es momento de realizar la conveniente simulación y de analizar los resultados obtenidos de la misma en el último tramo del río Ebro, antes de su desembocadura en el mar Mediterráneo.

En la **Figura 89** aparece la comparación de la evolución temporal de los caudales de sedimento registrados en las 7 secciones transversales de medida. Igual que en las anteriores simulaciones, durante las primeras horas de simulación, el caudal de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ vertido a la entrada del cauce permite mover gran cantidad de sedimento en el primer tramo del río entre Xerta y Tortosa (líneas naranja y amarilla). En la zona de la planicie Deltaica se observa un crecimiento constante del caudal de sedimento a partir de la hora 10, momento en que se comienza a inyectar el sedimento en Deltebre.

Analizando específicamente los datos del flujo de sedimento en la sección de medida situada en la misma desembocadura (nombrada como Delta en la **Figura 88**), se observan detalles que tienen que ver con el comportamiento del fluido en el cauce debido a su geometría y al terreno en el que está integrado.

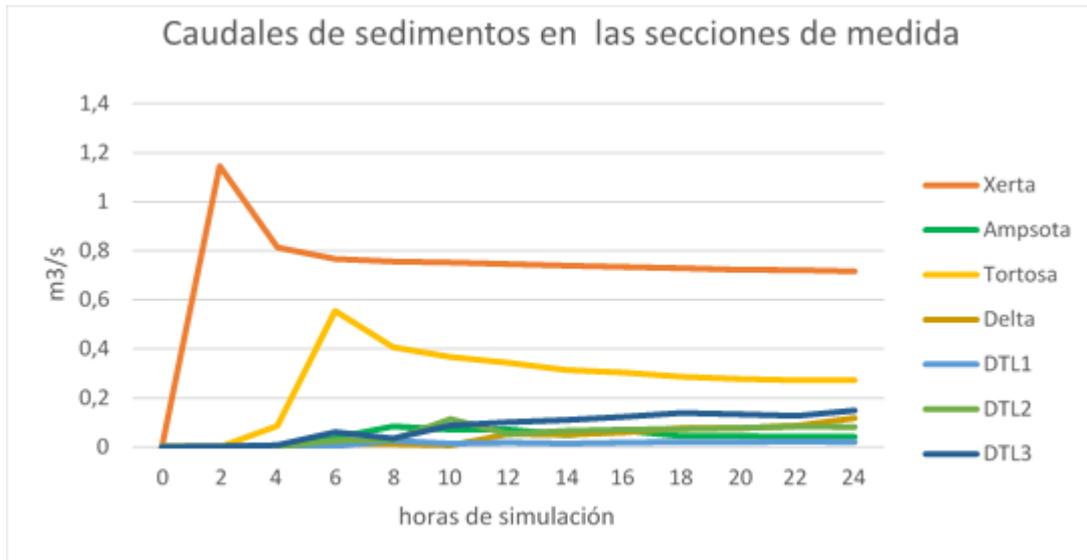


Figura 89: Evolución temporal del caudal de sedimentos medido en todas las secciones de medida (Figura 88), para el escenario 4.

En la **Figura 90** (izquierda) se muestra la evolución temporal del caudal de sedimentos en el Delta, donde aparece un descenso de este caudal entre la hora 6 y la hora 10 de simulación. Al compararlo con la **Figura 90** (derecha) en la que aparece la evolución temporal del caudal de agua en esta misma posición, también se observa un descenso del caudal de agua. Observando las imágenes de la **Figura 91**, donde se muestra el mapa de extensión de la lámina de agua sobre el MDT en $t=6h$ y en $t=12h$, se aprecia que hay zonas del terreno colindante con el cauce que ganan altura de agua.

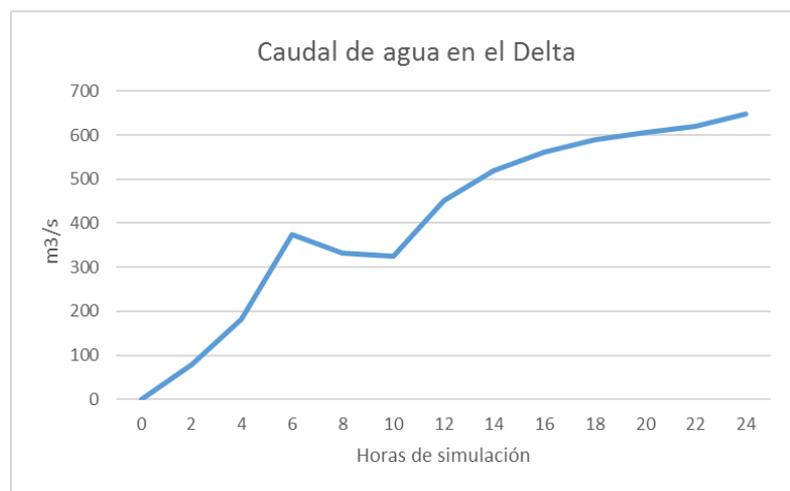
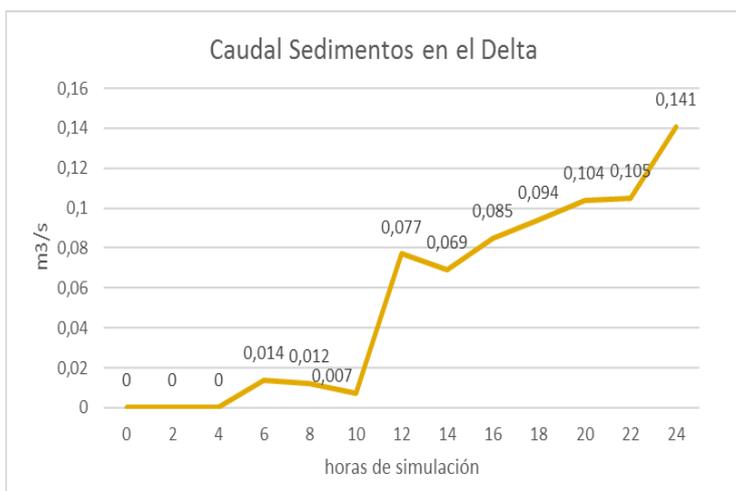


Figura 90: Evolución temporal del caudal de agua (derecha) y sedimentos (izquierda) en la sección de medida situada en la desembocadura en el escenario 4.

Seguramente se traten de cavidades del terreno, en las que el flujo de agua y sedimentos comienza a introducirse cuando el cauce cuenta con una altura de agua igual al nivel al que se encuentran estas cavidades o irregularidades del terreno. En el momento en que el fluido en las cavidades está al mismo nivel que el que circula por el cauce, el flujo en el cauce continúa creciendo.

Este fenómeno provoca que el sedimento quede estacionado en el terreno colindante con el cauce, en las zonas sombreadas de amarillo del estado $t=12$ h (ver **Figura 91**) zonas donde el calado apenas llega al medio metro y la velocidad del flujo es nula (zona de estancamiento).

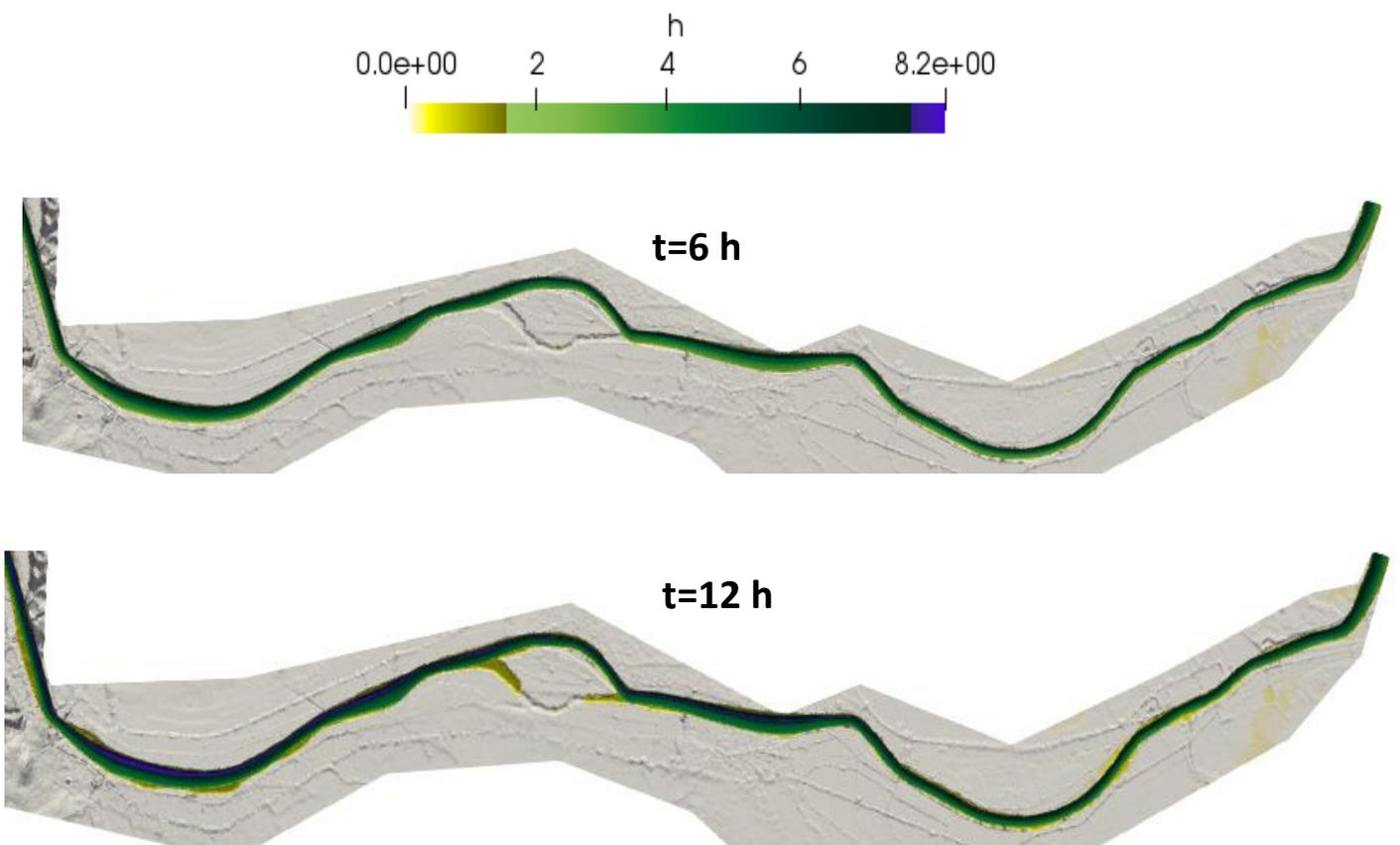


Figura 91: Evolución temporal del caudal de agua y sedimentos en la sección de medida situada en la desembocadura en el escenario 4.

En las últimas 4 horas de simulación se aprecia una crecida importante del caudal de sedimentos (ver **Figura 90**). A partir de la hora 20, la sección de medida de la desembocadura es atravesada por un caudal de sedimentos superior al que se inyecta en la condición de contorno de entrada de Deltebre, $Q_s = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Es decir, si a partir de este momento el caudal de salida es superior a $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ quiere decir que el resto es material sólido que ha sido erosionado del fondo del cauce y que circula con el resto del flujo de sedimentos en suspensión.

Viendo este crecimiento exponencial en las últimas horas de simulación, hace pensar que quizás, al incrementar en otras 10 horas la simulación, se consiguiese estabilizar el caudal de sedimentos que llega a la desembocadura en valores cercanos a los $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por otro lado, en el último periodo de simulación, desde la hora 20 a la 24, el caudal de sedimentos medido en la penúltima sección "DTL3" es mayor que el medido en la sección de la desembocadura "Delta". Esto hace pensar que, en tiempos posteriores de simulación, el sedimento erosionado del fondo que circula con el resto del flujo en suspensión aguas arriba, irá llegando progresivamente hasta la desembocadura.

En el análisis de esta simulación merece la pena analizar, no sólo como se comporta el flujo de sedimentos conforme avanza a lo largo de la planicie Deltaica, sino también como se comporta en una sección transversal en el cauce, en este caso en la sección situada en el mismo Delta del Ebro.

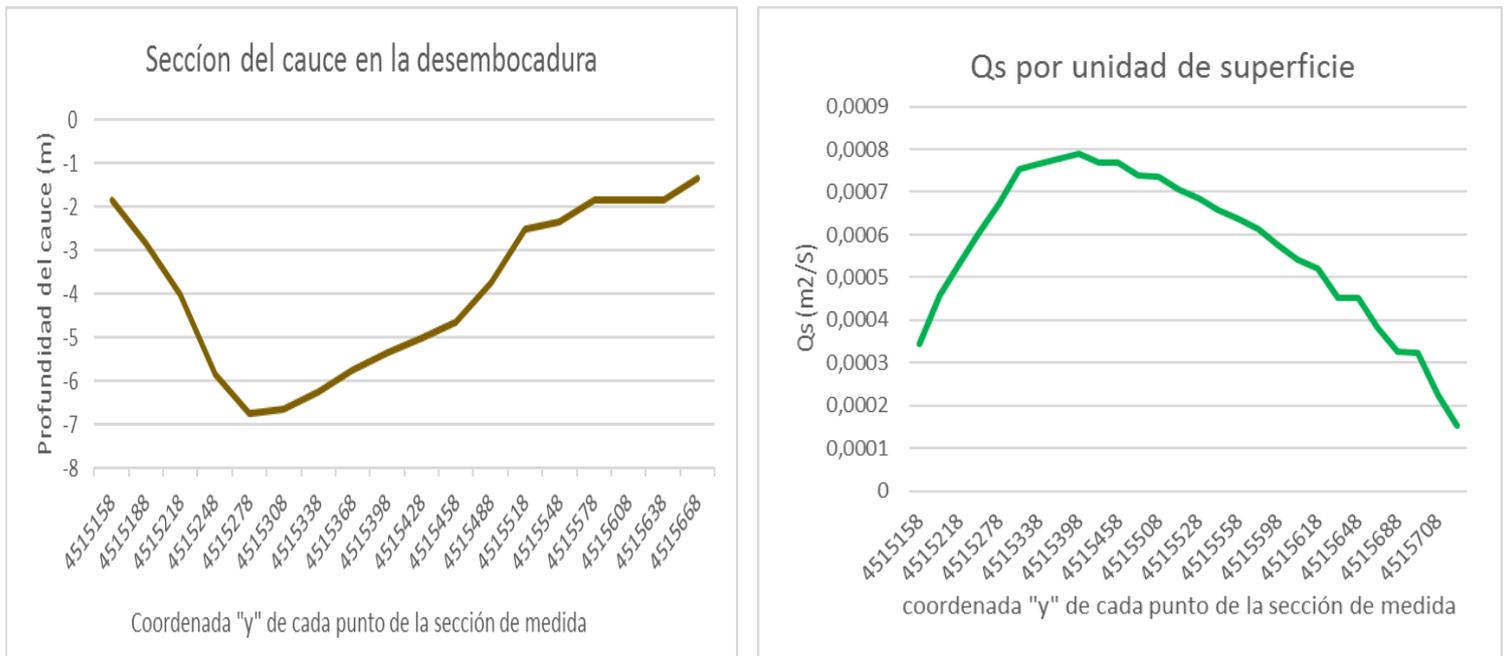


Figura 92: A la izquierda la sección del cauce en el Delta, a la derecha caudal de sedimentos por unidad de superficie m^2/s en función de la coordenada "y" de la sección.

Relacionando la información que aparece en las gráficas de la **Figura 92**, queda patente la relación obvia entre la profundidad del cauce y el flujo de sedimentos por unidad de superficie que alberga cada punto de la sección transversal de medida.

Dicho de otra manera, cuanto mayor sea el calado del cauce del río en cualquiera de sus puntos, mayor cantidad de sedimentos en suspensión pasará por allí, y más aguas abajo avanzarán en su trayectoria longitudinal (eje "x") a lo largo del cauce.

En relación al objetivo de conseguir que lleguen la mayor cantidad de sedimentos al Delta del Ebro, interesa tener siempre el cauce con sus secciones y profundidades naturales, o las mayores posibles. De otra manera, el sedimento se ve ralentizado por el aumento de la fricción entre flujo y superficie sólida, y se acaba depositando en el fondo.

Para lograr que el fondo del cauce permanezca limpio, sin que aumente la carga de fondo, se puede conseguir de una manera natural: aumentando el caudal de agua circulante para que este tenga la fuerza suficiente para erosionar el material sólido que se deposite en el fondo; o con ayuda mecánica externa, mediante el dragado del lecho, desde una barcaza que avance aguas abajo desde la represa de Xerta.

Escenario 5: no inyección de sedimentos

En este escenario lo único que se pretende comprobar es la cantidad de sedimento que es capaz de arrastrar el flujo de agua que desciende por el río, sin ninguna inyección extra de sedimentos. Es decir, ver si la fuerza que tiene el caudal, es suficiente para arrastrar y convertir en sedimento en suspensión el material del lecho del río que compone la carga de fondo.

Para este escenario, la condición de contorno de entrada es un caudal constante de flujo de agua a lo largo de toda la simulación de valor $Q_w=600 \text{ m}^3/\text{s}$, en el inicio del cauce (Flix/Xerta). La condición de contorno de salida libre, la misma que en los escenarios anteriores.

La ubicación de las condiciones de contorno, junto con los puntos de observación y las secciones de medida colocados a lo largo del cauce aparece en la **Figura 93**.

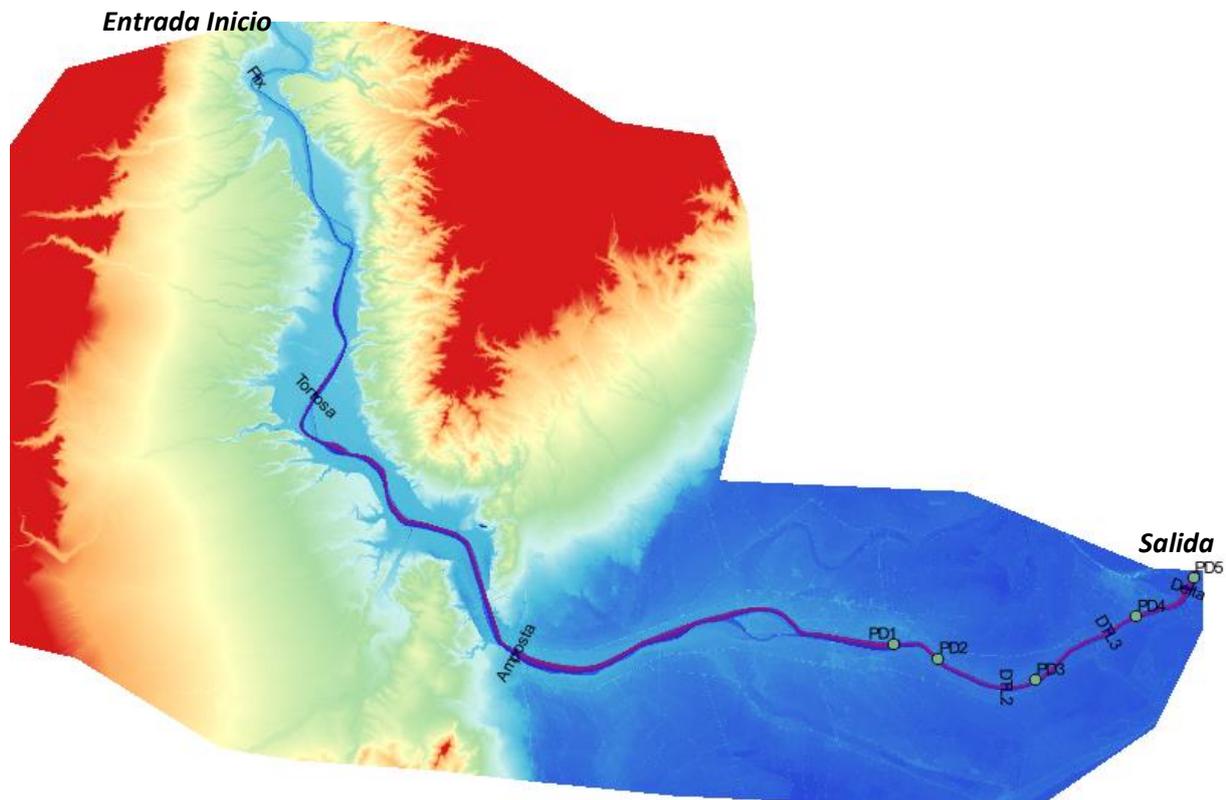


Figura 93: Localización de las secciones transversales de medida (Flix, Tortosa, Amposta, Delta, DTL1 (coincidente con el PD1), DTL2 y DTL3), de los puntos de observación (PD1, PD2, PD3, PD4 y PD5), de las condiciones de contorno de entrada (Entrada Inicio) y de la condición de contorno de salida (Salida) sobre el MDT en el escenario 5.

En la **Figura 94** se muestra la evolución temporal del caudal de sedimentos que circula por todas las secciones de medida que están situadas a lo largo del cauce que conforma el MDT.

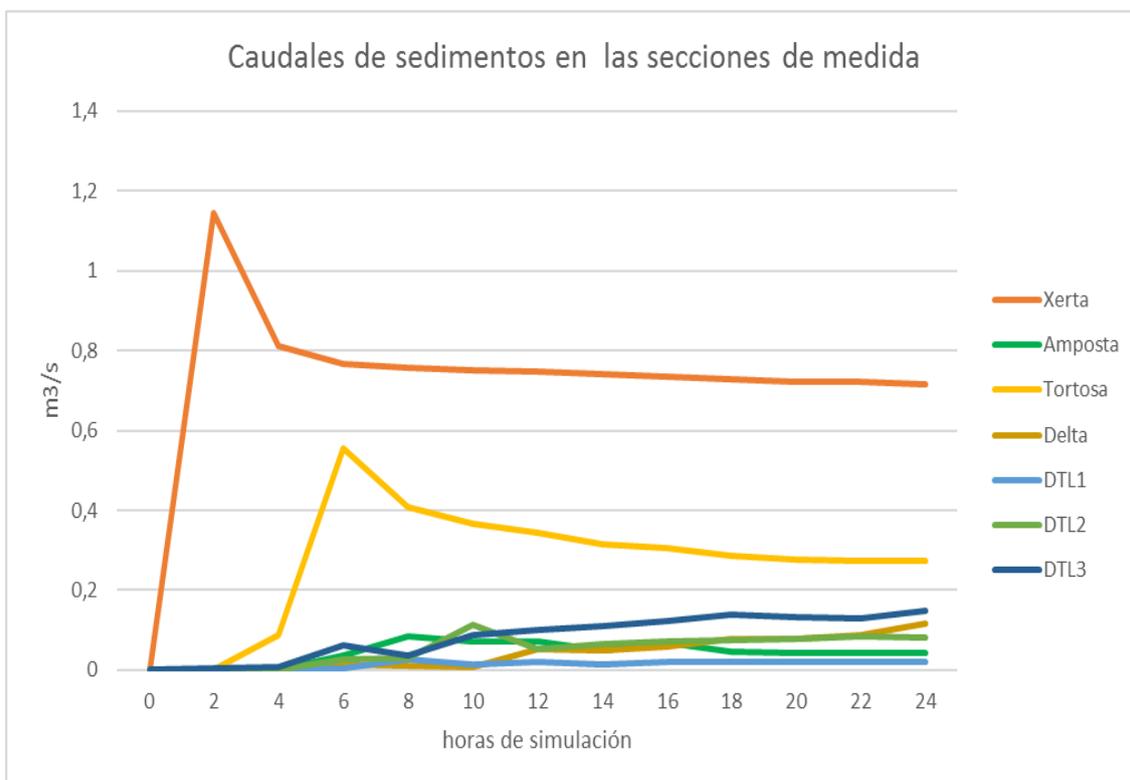


Figura 94: Evolución temporal del caudal de sedimentos en las secciones transversales de medida en el escenario 5.

Igual que en los escenarios anteriores, en las secciones de Xerta y Tortosa, se aprecia un caudal de sedimentos muy superior que en el resto de las secciones. Si los comparamos con los valores en las secciones de Amposta y DTL1, a partir de la hora 10, que es cuando empiezan a ser estables, se aprecia una diferencia de caudales de sedimento muy grande.

Esta diferencia indica que el sedimento ya comienza a depositarse de una manera notable entre Xerta y Tortosa, y continúa haciéndolo con la misma tendencia entre Tortosa y Amposta. Sin embargo, entre la sección de Amposta y la sección DTL1, el caudal de sedimentos en suspensión desciende un valor ínfimo. Por lo tanto, parece claro que el sedimento que es arrastrado de la carga de fondo al inicio del cauce, va depositándose en la primera parte del cauce, anterior a la planicie Deltaica (observar en **Figura 82**); mientras que, en la primera parte de la planicie Deltaica el caudal de sedimentos en suspensión permanece prácticamente constante, lo cual indica que no hay apenas deposición.

Comparando los valores de caudal de sedimentos en las secciones DTL2, DTL3 y Delta, se aprecia un incremento del caudal de sedimentos conforme evoluciona la simulación; con valores superiores a los de las secciones de Amposta y DTL1, durante las últimas 12 horas de simulación. Este hecho indica que, en el último segmento del río, previo a su desembocadura en el Mediterráneo, el caudal de sedimentos crece a la vez que lo hace el caudal de agua que atraviesa esa zona del cauce.

Analizando la pendiente ascendente durante las últimas 4 horas de simulación del caudal de sedimentos en la sección del Delta (línea marrón de la **Figura 95**), parece que el fluido comienza a llegar con la suficiente fuerza como para arrastrar la carga de fondo a la parte final del cauce. Durante este periodo, los valores del caudal de agua circulante por el cauce van desde $Q_w=550 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $Q_w=600 \text{ m}^3/\text{s}$, momento en el que se alcanza el estado estacionario.

Para comprobar que no sólo llega mayor caudal de sedimentos a la desembocadura, sino que éstos no se depositan en el tramo de cauce que va desde la localidad de Deltebre hasta allí; la **Figura 96** muestra la altura del lecho del cauce en los puntos de observación colocados en ese tramo del cauce (puntos ubicados en la **Figura 93**).

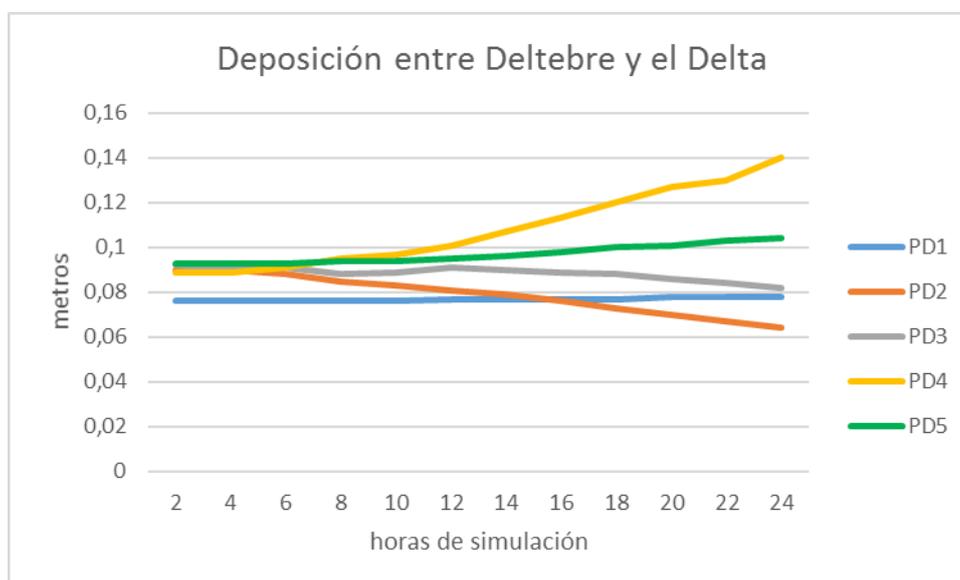


Figura 95: Evolución de la altura del fondo del cauce en los 5 puntos de observación situados entre Deltebre y el propio Delta (**Figura 93**) bajo el escenario 5.

Las líneas de tendencia negativa de los 3 primeros puntos de observación (líneas azul, naranja y gris de la **Figura 95**) indican que en esos puntos el cauce está ganando profundidad, con lo que el flujo de agua y sedimentos que viene de aguas arriba tiene la fuerza suficiente para erosionar el lecho; mientras que las de los puntos “PD4” y “PD5” situados en la parte final del cauce del río Ebro (**Figura 93**) siguen una tendencia ascendente, lo cual indica que el sedimento comienza a depositar.

De esta manera, en la parte final del Delta del Ebro, al final de la simulación de 24 horas, el caudal de sedimentos que llega tiene una tendencia a seguir creciendo hasta que alcance el valor estacionario (igual que lo hace el caudal de agua), a la vez que se sigue depositando sedimento en la zona.

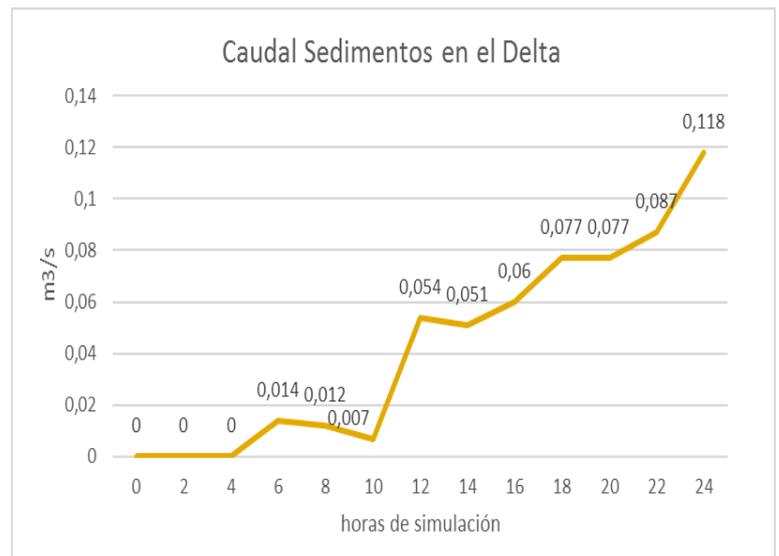
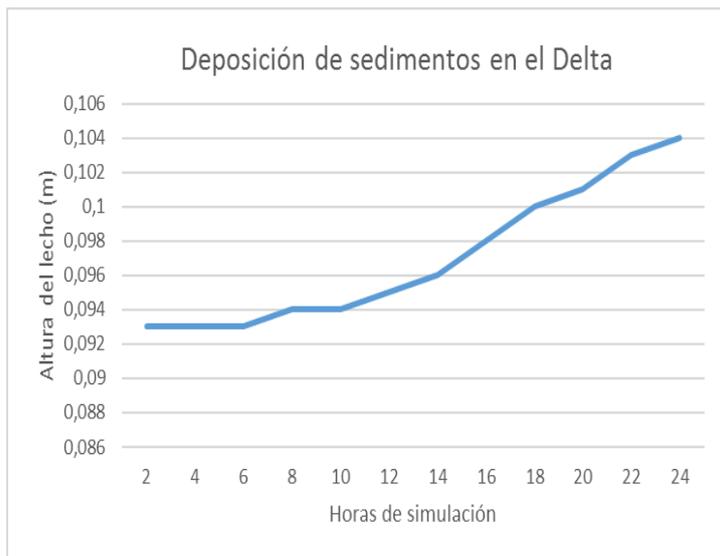


Figura 96: Ampliación de la evolución de la altura del lecho del río en el punto de observación PD5 (izquierda) y del caudal de sedimentos en la sección de medida del Delta (derecha) en el escenario 5.

Analizando la **Figura 96**, queda claro que a la desembocadura del río Ebro llega un caudal abundante de sedimento conforme el nivel del caudal de agua se aproxima al estado estacionario, lo cual permitiría que el sedimento se introdujese en el mar Mediterráneo.

Sin embargo, el aumento de la altura de la carga de fondo en la misma zona indica que el flujo no tiene la fuerza necesaria para mantener el sedimento en suspensión, ni mucho menos para erosionar el lecho de la misma.

Por lo tanto, para conseguir una situación ideal, se tendría que aumentar el caudal de agua para permitirle al flujo disponer de la fuerza suficiente para erosionar el lecho durante toda la planicie Deltaica; a la vez que se aumenta el tiempo de simulación hasta llegar a un valor constante de caudal de sedimentos en la salida.

Para apreciar de una manera más gráfica los parámetros sobre los que influye el caudal en el cauce, en la **Figura 97** se muestra el calado de agua en el cauce y la velocidad que tiene el flujo de agua y sedimentos en la hora 24 de simulación.

Si se compara la gráfica de la **Figura 95** con la imagen donde se aprecia la velocidad del flujo en la **Figura 97** (observando la parte del cauce cercana a la desembocadura), es apreciable que en las zonas donde el flujo erosiona la carga de fondo la velocidad es mayor (tono azul claro) que en las zonas donde el sedimento deposita (tono azul oscuro). Es decir, los puntos de observación (**Figura 93**) "PD1" "PD2" y "PD3", corresponden a zonas con una velocidad de flujo en torno a 1 m/s, mientras que en los puntos "PD4" y "PD5" la velocidad del flujo es de 0.5 m/s.

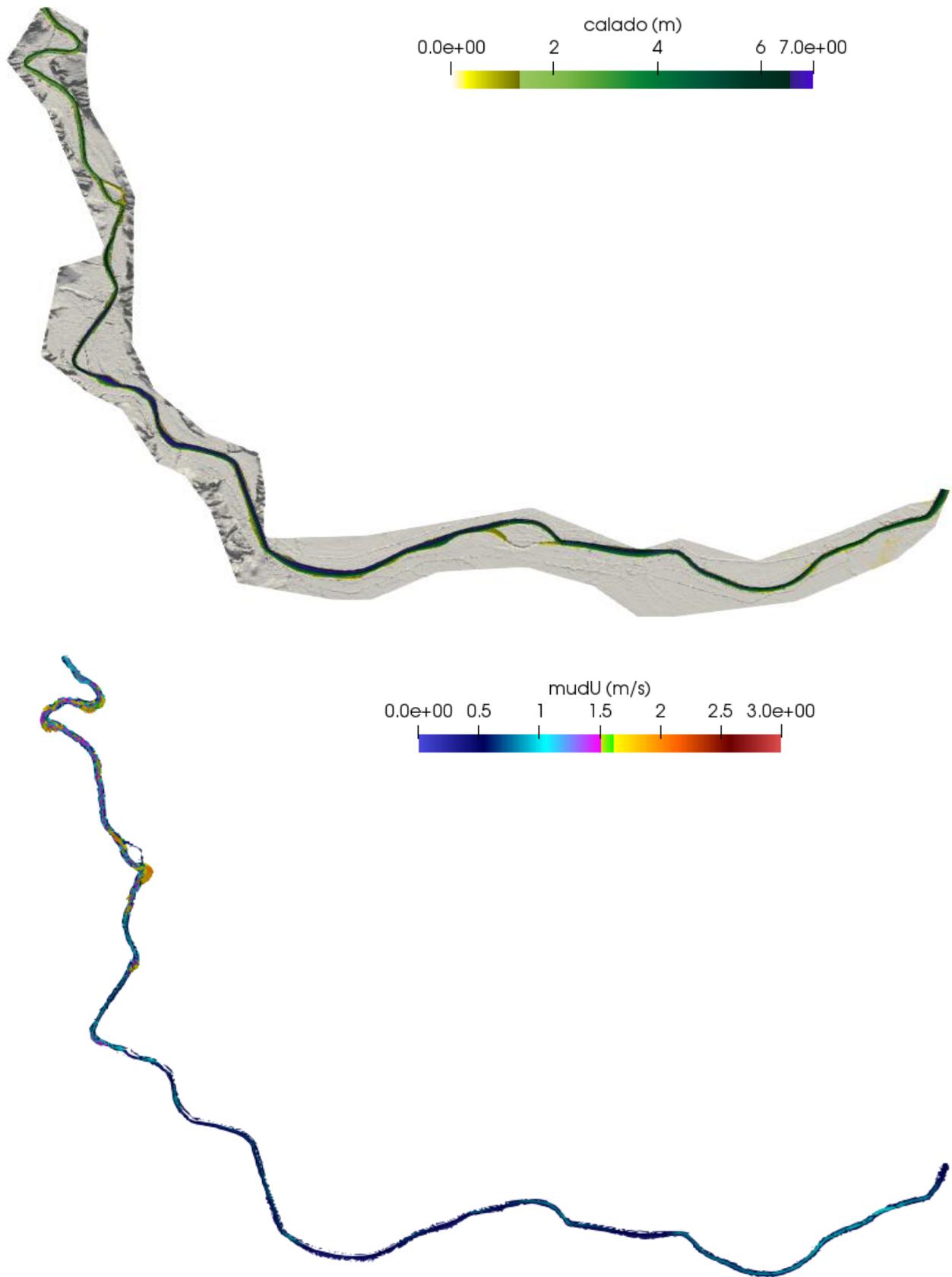


Figura 97: Calado en el cauce (parte superior) y velocidad del flujo (parte inferior) en $t=24h$ bajo el escenario 5.