

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática
y de Telecomunicación

MODELIZACIÓN DE UN TRAMO DEL CAUCE
DEL RÍO EBRO CON HEC-RAS.
UN CASO DE ESTUDIO



Grado en Ingeniería en Diseño Mecánico

Trabajo de Fin de Grado

Autora: Natalia Remón Portero

Tutora: Idoya Lacosta Gavari

Tudela: 6 de junio de 2022

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Grado en Ingeniería en Diseño Mecánico

**MODELIZACIÓN DE UN TRAMO DEL CAUCE
DEL RÍO EBRO CON HEC-RAS.
UN CASO DE ESTUDIO**

Autor:

Natalia Remón Portero

Tutora:

Idoya Lacosta Gavari

Dpto. de Ingeniería

Área de Mecánica de Fluidos

Universidad Pública de Navarra

Campus de Tudela

Tudela, 2022

Agradezco a la Universidad Pública de Navarra,
y en concreto al Campus Tudela su magnífica disposición y ayuda a la hora
de realizar este trabajo

RESUMEN

En este trabajo se ha modelizado un tramo del río Ebro con HEC-RAS para poder hacer una aproximación al fenómeno de las inundaciones. Para ello se ha elegido una zona del tramo del río en la que se producen con frecuencia estos fenómenos y se ha determinado la forma del cauce mediante simulación 1D. Después, se ha realizado una modelización 2D con un caudal de diseño y se ha simulado los diferentes momentos de la inundación, obteniéndose datos de la profundidad del agua, de su velocidad y de su altura sobre el nivel del mar. Para terminar, se ha variado el coeficiente n de Manning de las distintas áreas adyacentes al río para estudiar cómo afecta su modificación a la situación de avenida. Los resultados obtenidos animan a seguir proponiendo medidas de restauración fluvial que estén dentro del marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la Unión Europea.

Palabras clave: Inundaciones, Restauración de ríos, Coeficiente de Manning

ABSTRACT

In this work, a section of the Ebro River has been modeled with HEC-RAS to make an approximation to the phenomenon of flooding. For this, an area of the river section has been chosen in which these phenomena occur frequently, and the shape of the channel has been determined by means of 1D simulation. Afterwards, a 2D modeling with a design flow has been carried out and the different moments of the flood have been simulated, obtaining data on the depth of the water, its speed and its height above sea level. Finally, the Manning coefficient of the different areas adjacent to the river has been varied to study how its modification affects the flood situation. The results obtained encourage us to continue proposing river restoration measures that are within the framework of the Sustainable Development Goals established by the European Union.

Keywords: Flooding, River restoration, Manning's coefficient

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- OBJETIVOS DEL TRABAJO	2
3.- CONTEXTUALIZACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	2
3.1.- El tratamiento de los espacios fluviales en España.....	2
3.2.- El cambio climático	4
3.3.- El nuevo paradigma: Los ODS y la restauración fluvial.....	6
3.4.- La restauración fluvial	8
3.4.1 La formulación de una Estrategia Nacional de Restauración de Ríos.....	9
3.4.2 Buenas prácticas en restauración fluvial.....	10
3.5.- El marco legal de la restauración fluvial	14
3.5.1.- Directiva Marco del Agua (DMA).....	14
3.5.2.- Directiva de Evaluación y Gestión de riesgos de inundación.....	15
3.5.3.- Estrategia Nacional de Restauración de Ríos	16
3.5.4.- Reglamento del Dominio Público Hidráulico.....	16
4.- EL CURSO MEDIO DEL RIO EBRO	17
4.1.- El problema del Ebro.....	17
4.2.- La Confederación Hidrográfica del Ebro.....	19
4.3.- Características de la Cuenca Hidrográfica del Ebro	20
4.3.1.- Climatología	20
4.3.2.- Morfoestructura de la cuenca.....	21
4.3.3.- La litología de la zona	21
4.3.4.- Historial de inundaciones en la cuenca del Ebro	22
4.4.- Localización del tramo de estudio.....	25
4.4.1.- Población y servicios afectados por los desbordamientos del río Ebro.....	26
4.4.2.- El encauzamiento del río Ebro en la zona de estudio	27
5.- METODOLOGÍA DE TRABAJO	31
5.1.- El programa QGIS.....	31
5.2.- Descripción del HEC-RAS	31
5.3.- Coeficiente de Manning	32
5.4.- Metodología de trabajo	33
6.- RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS	39
6.1.-Comportamiento hidráulico del cauce en 1-D.....	39
6.2.-Simulación hidráulica del cauce en 2D	44
6.2.1 Resultados de la inundación con n de Manning bajos (Manning 2)	45
6.2-2.- Resultados de la inundación con n de Manning altos (Manning 11)	54
6.2.3 Resultados relativos a la comparación entre los dos valores de Manning	62
7.- CONCLUSIONES	66
8.- FUTURAS INVESTIGACIONES	70
9.- BIBLIOGRAFÍA	71

1.- INTRODUCCIÓN

Los ríos son un elemento básico para el desarrollo de la vida humana. Desde la antigüedad, muchas poblaciones se han construido cerca de los ríos. Los ríos no solo nos han proporcionado agua para beber y para desarrollar nuestras actividades, han sido también lugares de encuentro y esparcimiento y están presentes en nuestro más profundo acervo cultural.

Sin embargo, poco a poco, el ser humano ha ido ocupando el espacio natural del río y ha tenido que protegerse de las inundaciones que con frecuencia se producen.

El Ebro, que es el segundo río más largo de la Península Ibérica, no es una excepción en cuanto a las crecidas que protagoniza año tras año. Su cuenca se caracteriza por presentar un régimen pluviométrico muy variable que provoca grandes cambios en su caudal. Por todo lo dicho anteriormente, periódicamente se producen importantes pérdidas materiales e incluso humanas que generan desembolsos millonarios para el restablecimiento de los servicios y la reparación de daños. Para evitar esto se han estudiado alternativas de tipo constructivo que van desde todo tipo de diques y motas hasta espigones, compuertas, sistemas de derivación de agua, etc. Este acercamiento al control del río se ha manifestado ya en la mayoría de los casos como ineficaz e incluso perjudicial.

Los *Objetivos de Desarrollo Sostenible* (ODS) proponen un nuevo paradigma de acercamiento y control de los ríos estructurado alrededor de los conceptos de sostenibilidad y resiliencia. Dentro de este nuevo paradigma se encuentra la estrategia de restauración fluvial que pretende devolver al río su espacio natural a la vez que proporcionar a las personas un espacio de bienestar.

Hay muchas estrategias de reparación fluvial, pero una de ellas consiste en la limpieza periódica de los cauces y la sustitución de algunos cultivos o vegetación por otra que permita el paso del agua de forma más rápida en caso de avenida.

Debido a la importancia de estas nuevas estrategias, en este trabajo se va a modelizar en tramo del cauce del río Ebro a su paso por la localidad navarra de Buñuel y se variarán los coeficientes de rugosidad n de Manning de diferentes áreas para ver los potenciales beneficios que se pueden obtener en el control del río.

2.- OBJETIVOS DEL TRABAJO

Los objetivos de este trabajo han sido los siguientes:

- Modelizar un tramo del cauce del río Ebro mediante el software HEC-RAS.
- Analizar el comportamiento hidrológico río a su paso por la localidad navarra de Buñuel.
- Simular diferentes situaciones de avenida y compararlas con las situaciones reales.
- Modificar los valores del coeficiente de Manning de distintas zonas para encontrar posibles áreas de mejora en la lucha contra las inundaciones.

3.- CONTEXTUALIZACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

En este apartado se describirá de forma general el problema de las inundaciones en España y más concretamente en el curso medio del río Ebro a su paso por la localidad de Buñuel. Con ello se pretende conocer el comportamiento hidrológico de este cauce y los efectos que las inundaciones han producido en su entorno. Además, se estudiarán las diferentes actuaciones que se han llevado a cabo a lo largo de los años para intentar paliar los efectos de las avenidas que año tras año se suceden en la zona.

Previamente, se expondrán, de forma general, algunos aspectos relacionados con este trabajo con el fin contextualizar el problema y comprender mejor la dificultad que entraña la restauración fluvial.

3.1.- El tratamiento de los espacios fluviales en España

Las redes fluviales son sistemas de drenaje natural del agua caída sobre las diferentes cuencas, por lo que la función principal de un río es desaguar el agua que cae sobre la superficie de su cuenca. El funcionamiento natural de los ríos está dimensionado para un determinado caudal que, una vez superado, genera el desbordamiento del río y la posterior inundación del terreno circundante.

A medida que el ser humano ha ido aprovechando más las zonas cercanas a los ríos, ha sufrido con mayor intensidad los efectos de las inundaciones y se ha enfrentado a ellas mediante distintas estrategias [1]. Estas estrategias pueden ser

agrupadas en torno a los diferentes paradigmas que se han ido adoptando a lo largo del tiempo y que reflejan el tipo de relaciones que el ser humano mantenido con el medioambiente. En González del Tánago [2], podemos ver resumidos dichos paradigmas.

- **Paradigma de la Ingeniería hidráulica tradicional.** Es la respuesta más elemental al fenómeno de las inundaciones. El ser humano ha querido evitar las riadas mediante medidas estructurales. Estas consisten en la realización de obras de ingeniería hidráulica que bien elevan el nivel de las orillas (construcción de motas y diques) o bien aumentan la velocidad del agua (dragado de los fondos del río, rectificación de los cauces y eliminación de la vegetación en orillas o riberas). Este intento de control olvida que los ríos son sistemas que cambian continuamente, tanto temporal como espacialmente y han provocado, en la mayoría de los casos, fuertes impactos ambientales. Aunque este paradigma ha sido fuertemente criticado desde los años 70, todavía inspira muchas de las actuaciones que se llevan a cabo actualmente en los ríos españoles. En la figura 1 se pueden ver dos ejemplos



Figura 1.- Estructuras hidráulicas de desagüe. (Fuente: autora de este trabajo)

Como se ve en la figura, tradicionalmente se han instalado en los cauces de los ríos, válvulas o tuberías de desagüe para conducir el exceso de agua a otra zona del río en caso de avenida.

- **Paradigma de la aceptación y financiación del riesgo.** Una vez realizadas las actuaciones anteriores y comprobada su falta de eficacia, surge una nueva corriente de pensamiento que promueve que los dueños de los terrenos afectados asuman su riesgo individual y sean capaces de financiarlo mediante una política de seguros reforzada con medidas preventivas y de predicción de la avenida por parte de las administraciones públicas. Este nuevo enfoque ya se ha manifestado ineficaz debido al elevado coste de dichas inundaciones y a la imposibilidad de muchas compañías de seguros a hacer frente a dichos desembolsos.
- **Paradigma del desarrollo sostenible.** En la década de los 80 y coincidiendo con la organización de varias reuniones internacionales (Río de Janeiro, Agenda 21, etc.) se va instalando un nuevo enfoque que predica un desarrollo económico y social compatible con el mantenimiento de recursos naturales y el funcionamiento de los ecosistemas. Este modelo de desarrollo sostenible reconoce la necesidad de poner límites al uso y ocupación de las zonas inundables a través de una nueva ordenación del territorio. A partir de este momento se desarrollan conceptos como *espacio de libertad del río* o *territorio de movilidad fluvial*. Se trata de dar prioridad a los procesos naturales del río en las zonas más próximas a los cauces, y de establecer una graduación de usos del suelo en las zonas inundables que permita su aprovechamiento, pero minimice los daños originados por las inundaciones, reconociendo su persistencia.

3.2.- El cambio climático

Desde principios del siglo XIX se ha sospechado que la presencia en la atmósfera terrestre de un exceso de ciertos gases provoca un aumento en la temperatura de planeta. A finales de dicho siglo, los científicos ya argumentaban que las emisiones humanas podrán cambiar el clima. Desde entonces, tanto la opinión ciudadana como la de los expertos, no ha hecho más que constatar la evidencia de que la temperatura de la Tierra está aumentando y que este cambio viene determinado principalmente por el aumento de la emisión de gases de efecto invernadero originados por la actividad económica e industrial humana.

Cuando se habla de cambio climático en la actualidad, no solo nos referimos al aumento de la temperatura del planeta, sino al cambio de otras variables que definen el clima, como son la humedad ambiental, los regímenes de viento y los patrones de lluvia. Respecto a la primera variable, se sabe que la temperatura del planeta ha subido de media 1,2°C en los últimos 150 años [3].

La primera consecuencia de este aumento las encontramos en la pérdida de hielo en los glaciares y en el Ártico. En España, se han perdido ya más del 80% de los glaciares pirineicos y se prevé que para 2050 podrían desaparecer de forma irreversible. Monte Perdido ha perdido de media 5 m de grosor en las últimas décadas, aunque se sabe que en algunas zonas la pérdida alcanza hasta los 14 m. De los 52 glaciares españoles contabilizados en 1850, han desaparecido 33, la mayoría de ellos a partir de la década de los 80.

Una consecuencia directa relacionada con la pérdida anterior es la pérdida de biodiversidad debido a las alteraciones que ocurren en los diferentes hábitats. Ecosistemas tradicionales como los humedales están en riesgo de desaparecer mientras que proliferan especies invasoras más resistentes a las nuevas condiciones climáticas. En nuestros mares, se observa una disminución en la diversidad de algas y en las colonias de arrecifes de coral Mediterráneo,

Otra importante consecuencia es el aumento de los incendios lo que provoca la deforestación de extensas áreas de terreno que, entre otras muchas consecuencias negativas, trae consigo la pérdida de suelo. Esta pérdida de suelo provoca un aumento de la escorrentía durante los episodios de lluvia que incrementa de forma brusca los aportes a los ríos y por tanto sus caudales [4].

Otras consecuencias relacionadas con el cambio climático son la subida del nivel del mar y la desertización de extensas áreas de terreno [5]. Ambas traen como consecuencia una disminución de los días de lluvia y el incremento de la intensidad de esas precipitaciones. Estas consecuencias tienen un efecto importante en el problema que nos ocupa. Seguir con un incremento sostenido de las temperaturas implicaría una mayor frecuencia de lluvias torrenciales [6].

Todos estos fenómenos descritos a nivel global son también percibidos en Navarra. En las últimas décadas se observa un mayor número de precipitaciones extremas en forma de lluvias torrenciales que pueden dar lugar a fenómenos de inundaciones repentinas, además se espera que se acentúe

3.3.- El nuevo paradigma: Los ODS y la restauración fluvial

Para intentar mejorar todos los problemas medioambientales a los que hay que enfrentarse la Organización de Naciones Unidas (ONU) elaboró una serie de objetivos de desarrollo sostenible (ODS). En 2015 se realizó un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo mediante la Agenda 2030 que recoge los 17 Objetivos y las 169 metas expuestas en ellos con la aprobación de todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas. [1]

Su cumplimiento se fundamenta en políticas, planes y programas de desarrollo sostenible de los países ya que, en estos, no son jurídicamente obligatorios.

Las Naciones Unidas colaboran con las agencias creativas, la industria del entretenimiento, los medios de comunicación y las empresas que están comprometidas con el logro de los objetivos de desarrollo sostenible.

En el presente trabajo se van a tratar los siguientes objetivos:

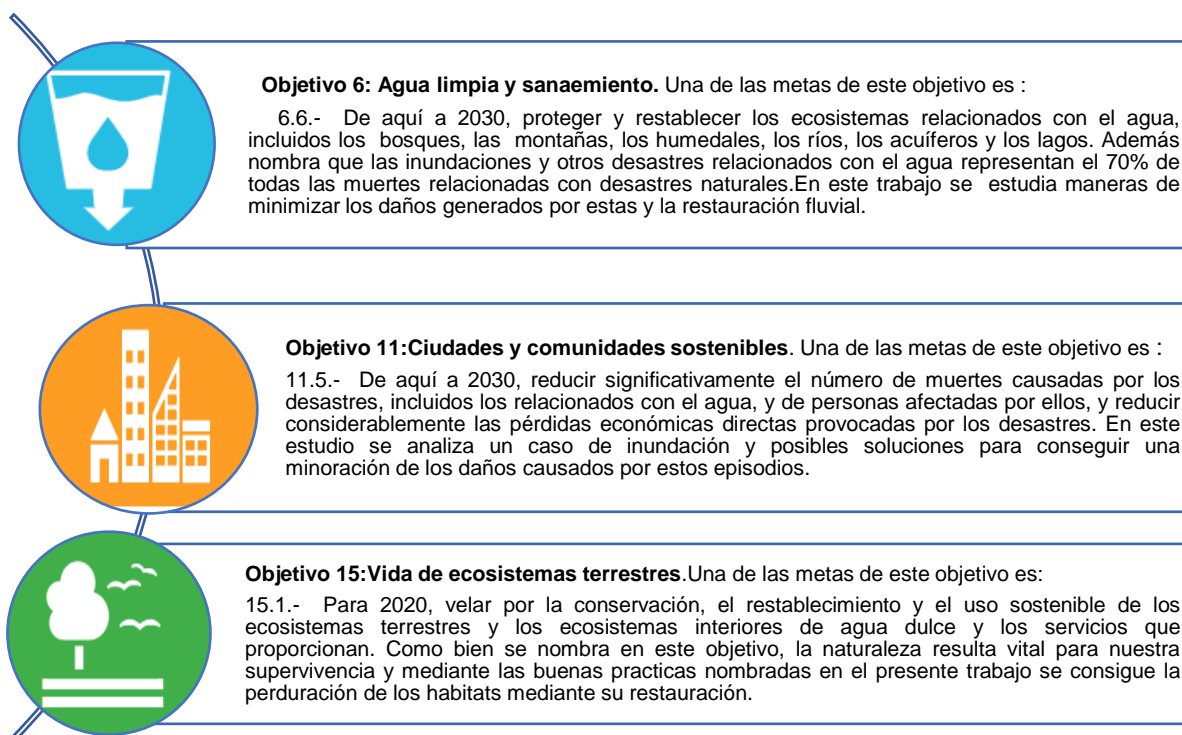


Figura 2.- Objetivos de desarrollo sostenible tratados en el trabajo (Fuente: autora de este trabajo)

Los objetivos seleccionados en la figura son los que tienen relación con este trabajo.

Ante esta situación surge un nuevo enfoque que, partiendo del paradigma del desarrollo sostenible que establece límites al uso de las zonas inundables, hace un mayor hincapié en el concepto de *buen estado ecológico de los ríos* impulsado por la *Directiva marco del agua* [7]. La creciente sensibilización ambiental de la sociedad en numerosos países europeos como consecuencia de un deterioro profundo de los sistemas naturales propicia la promulgación de esta Directiva en el año 2000 (DOUE, 2000), cuyo primer objetivo es evitar todo deterioro adicional de las masas de agua.

Este nuevo paradigma aporta sobre el anterior la necesidad no solo de limitar el uso de las zonas inundables, sino de llevar a cabo su *restauración* con el fin de recuperar gradualmente el buen estado ecológico de los ríos y sus riberas.

En la Directiva Marco se establecen varios indicadores para la evaluación del estado ecológico, entre ellos los de carácter hidromorfológico que hacen especial mención al régimen hidrológico de los caudales y al estado geomorfológico de los cauces, y se propone estimar el grado de alteración de estos indicadores a través de su diferencia con el régimen natural y con la morfología y dinámica previas a la canalización y deterioro del cauce.

De esta forma, las avenidas de los ríos y sus inundaciones periódicas pasan a ser consideradas *signos de naturalidad de los sistemas fluviales* y factores primordiales para la restauración de los bosques aluviales y el mantenimiento de las comunidades acuáticas primitivas, y la recuperación de las características del régimen natural de caudales, incluyendo crecidas ordinarias y extraordinarias, un requisito indispensable para alcanzar el buen estado ecológico de los respectivos tramos fluviales

Más recientemente, en el año 2007 se ha publicado una segunda Directiva europea relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación [8] que incide en los mismos conceptos de la Directiva Marco del Agua, obligando a la publicación de cartografías de zonas inundables y a la disposición de planes de medidas para la gestión de los daños originados por las inundaciones, en un intento de contribuir a la coordinación de dichas medidas entre los diferentes países, de especial relevancia en las cuencas intercomunitarias.

Ambas Directivas reflejan una nueva línea de pensamiento sobre la gestión de los sistemas fluviales que empieza a ser preponderante en Europa, en la que se reconoce la importancia de frenar el deterioro de los ríos y sus alteraciones

hidromorfológicas, y el interés económico y social de recuperar las funciones hidrológicas y ecológicas de las llanuras de inundación para mitigar el efecto de las inundaciones.

Las Directivas europeas mencionadas están ejerciendo un gran papel didáctico en los diferentes países y administraciones del agua, al identificar como referencia del mejor estado ecológico de los ríos la morfología primitiva de los cauces y el régimen natural de los caudales y propiciar su restauración. Al mismo tiempo, están promoviendo numerosos trabajos y estudios científicos que incluyen el análisis del papel de las inundaciones en la ecología de los ríos y su importancia en los sistemas riparios y su posible relación con el cambio climático. Los sucesivos paradigmas propuestos frente a las inundaciones han ido aportando diferentes enfoques complementarios sin que ninguno de ellos haya eliminado por completo el anterior; más bien se han ido solapando unos a otros, y hoy día se mantienen todos vigentes reconociendo que la problemática de las inundaciones se ve influida por múltiples factores y numerosas interrelaciones entre el medio natural (condiciones del clima y funcionamiento hidrológico) y el medio social (poblaciones y actividades económicas), y que dicha problemática debe ser abordada con una óptica multidisciplinar y de solidaridad y cooperación entre países y regiones.

3.4.- La restauración fluvial

La restauración fluvial es un conjunto de actuaciones con el fin de conservar y recuperar el buen estado de nuestros ríos, minimizar los riesgos de inundación, potenciar su patrimonio cultural, fomentar el uso racional del espacio fluvial e impulsar el desarrollo sostenible del medio rural [9].

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico junto a la Directiva marco del agua está desarrollando la *Estrategia de Restauración de Ríos* (ENRR). Este se inició en 2005 en el que se fijaron los objetivos de fomentar la integración de la gestión de los ecosistemas fluviales en las políticas de uso y gestión del territorio, con criterios de sostenibilidad, contribuir en la educación ambiental fluvial enfocándose en su restauración, visibilizar información y experiencias sobre la restauración de las ríos para mejorar las actuaciones y

fomentar la participación ciudadana e implicar a los colectivos sociales en la gestión de los sistemas fluviales.

3.4.1 La formulación de una Estrategia Nacional de Restauración de Ríos.

La Estrategia Nacional debe estar respaldada por un soporte técnico, científico y social que exponga los objetivos y su aceptación por parte de los ribereños y afectados. Para ello se separó en mesas de trabajo para debatir el estado ecológico de los ríos [10] con todos los agentes sociales implicados en el tema.

- La Mesa de trabajo de agricultura involucra a todos los sectores relacionados con el uso del río para fines agrarios. Es un sector importante ya que gestiona una gran superficie de zonas de regadío y de explotación de acuíferos. Los temas tratados en ella se centran en la demanda de agua, la regulación de los caudales de los ríos y el aporte de sustancias químicas que produce tanto contaminación de aguas como eutrofización. Las medidas propuestas se centran en reducir el impacto ambiental informando y obligando a los agricultores a la modernización de regadíos, fomentando el ahorro de agua e implantando un sistema integrado de gestión ambiental.
- Mesa de trabajo de urbanismo. Involucra fundamentalmente a los ayuntamientos y a la planificación urbanística y usos del suelo que gestionan. La urbanización descontrolada ha hecho perder una gran parte del patrimonio natural de muchas regiones y ha agravado el riesgo de inundación principalmente por la restricción de dinámica y movilidad del río.

La conclusión a la que llega es que se debe respetar los espacios fluviales como elementos ambientales y paisajísticos con máximo valor de conservación mejorando el microclima de la ciudad además de zona de ocio y recreo que conecta los centros urbanos con zonas verdes.

- Mesa de trabajo que estudia la alteración de los caudales de los ríos. La producción hidroeléctrica, la agricultura de regadío y la urbanización en zonas con gran escasez natural de recursos hídricos ha favorecido la construcción de presas, azudes y sistemas de trasvases. Todos estos elementos han producido una modificación del hábitat acuático y han

causado el empobrecimiento de las poblaciones piscícolas nativas, la desaparición de especies miradoras y la invasión de especies exóticas.

- Mesa de trabajo sobre las alteraciones morfológicas del río. Gran parte de la red fluvial se ha modificado como consecuencia de obras de encauzamiento y revestimiento de los cauces. Existe un desequilibrio geomorfológico debido a la menor llegada de sedimentos a ciertos tramos del río. El aumento de la cobertura vegetal debida a disminución del pastoreo y la retención de sedimentos por los embalses son los principales causantes.
- Mesa de trabajo que estudia los efectos producidos por las especies invasoras. Peligra la conservación de especies autóctona debido a la sustitución por especies exóticas y su hibridación con ellas. La flora invasora se ha visto enriquecida por la eutrofización y disminución de humedad de los ecosistemas riparios. Para resolver el problema se proponen medidas de prevención de tipo legislativo y educativo.

El Gobierno de España para llevar a cabo estas medidas de restauración ha creado el *Programa de Protección y Conservación*, el *Programa de Restauración y Adaptación al Cambio Climático*, el *Programa de Voluntariado en Ríos* y la *Estrategia Nacional de Restauración de Ríos* (ENRR).

3.4.2 Buenas prácticas en restauración fluvial

Según se expone en el libro de Alfredo Ollero [11] *restaurar consiste en restablecer los procesos de un sistema natural, como pudiera ser un río, devolviéndole su estructura original, así como su función, su territorio y sus procesos dinámicos*. Los ríos son sistemas autoequilibrados, es decir, por sí solos retornan a su dinámica natural. Por tanto, el papel de la restauración fluvial sería la de eliminar aquellos impactos que degradan el sistema fluvial y tomar las medidas que resulten necesarias para que dicho sistema alcance de nuevo su funcionamiento original, lo cual aportará beneficios sobre la sociedad.

A continuación, se nombran algunas buenas prácticas que de forma individual o combinada contribuyen a la restauración fluvial.

- Se debe comenzar favoreciendo un cambio de mentalidad en la sociedad, ya que la restauración fluvial está muchas veces alejada de los intereses de los ciudadanos. Esto no es un proceso que ocurra de repente, sino que hay que apostar por la educación ambiental tanto en la educación formal como en la informal.
- La demolición progresiva de presas, azudes, vados y otros obstáculos que dificulten el proceso geomorfológico en el cauce y en la llanura de inundación. Para el cumplimiento de la Directiva Marco del Agua, es imprescindible la eliminación de estos obstáculos muchos de ellos en desuso. Algunos obstáculos se rompen durante las crecidas elevando aún más la peligrosidad produciendo socavaciones, colapsos, flujos anárquicos y abanicos de sedimentos caóticos. Tras estos procesos se debe renaturalizar las zonas afectadas por el acceso de la maquinaria para alterar la morfología de las orillas y del cauce lo menos posible y un seguimiento durante dos años para verificar que la recuperación del ecosistema fluvial ha sido efectiva.
- Construir pasos y escalas de peces. Según la legislación estatal y autonómica vigentes, el movimiento de los peces a lo largo de los ríos debe estar garantizado y cualquier estructura que lo impida debe acondicionarse. La fauna piscícola es muy vulnerable ante los cambios y obstáculos transversales a la corriente que impiden su circulación por el río. Para conocer la eficacia de las medidas adoptadas se deben realizar muestreos periódicos con peces marcados, observando las poblaciones aguas arriba y debajo de la infraestructura.
- La devolución del espacio al río. Es el principal ejercicio de restauración fluvial. Permite al río desarrollar de forma natural sus procesos geomorfológicos con la anchura adecuada para su corredor ribereño recuperándose él sólo de los impactos que haya sufrido. Debe ser un territorio sin obstáculos antrópicos, sin defensas ni estructuras que rompan la conectividad del espacio natural dinámico. En la figura siguiente se presenta un ejemplo del proceso que se sigue en la restauración fluvial.

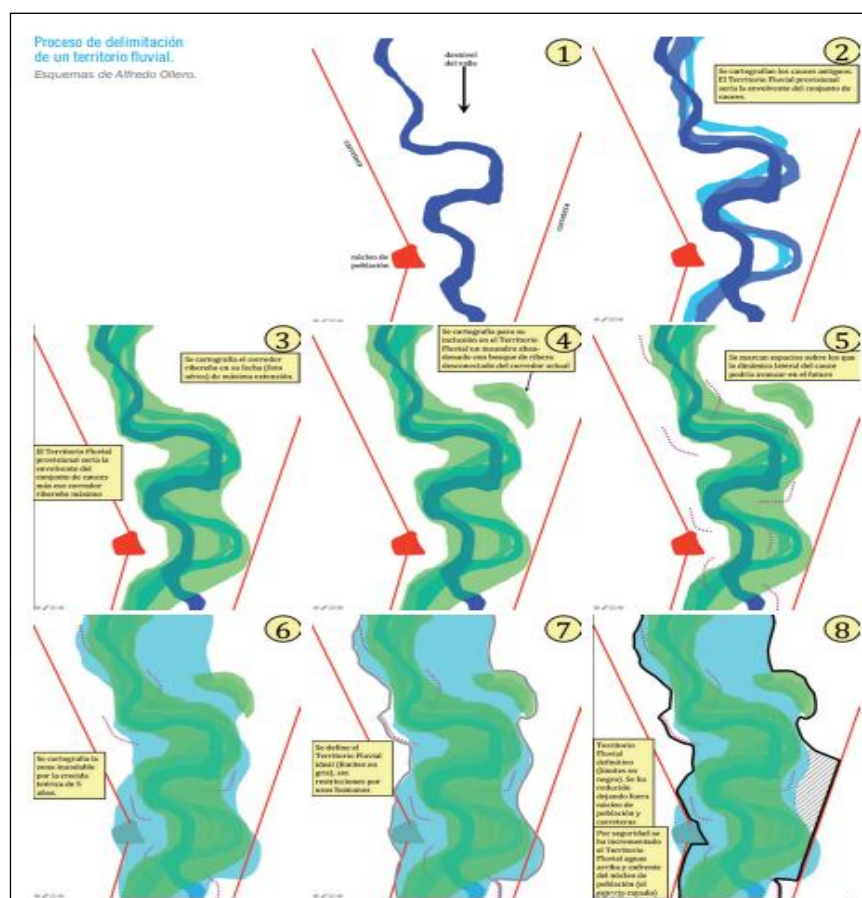


Figura 3: Proceso de delimitación del territorio fluvial [12]

Como observamos en la imagen en el primer paso solo se observa la cartografía actual del río al que se le va a realizar el estudio. En el paso 2 se cartografiaban los distintos trazados del cauce al menos en el último siglo, en el paso 3 la extensión máxima de llanura máxima del corredor ribereño, en el paso 4 se tienen en cuenta meandros abandonados y masas de vegetación ribereña desconectadas del corredor. En el paso 5 se marcan terrenos que puedan pertenecer a la dinámica del río en el futuro a partir de un análisis de las tendencias evolutivas y con criterios de expertos de geomorfología. Del paso 5 en adelante se cartografía la zona inundable por la crecida teórica de 5 años y se define el territorio fluvial ideal.

- Favorecer la desprotección de orillas mediante desencauzamientos y descanalizaciones. Las orillas deben de ser libres, móviles y sujetas a los

procesos de erosión y sedimentación de manera que el cauce debe tener libertad geomorfológica en sus dimensiones longitudinales, laterales y verticales.

- Favorecer el retranqueo de motas. Es una buena práctica que rehabilita algunas funciones en la zona reduciendo la presión de la corriente en crecida y permitiendo una inundación más amplia reduciendo la peligrosidad tanto en la orilla opuesta como en aguas abajo.
- Incrementar la reconexión de cauces. Esta práctica de restauración consiste en recuperar como cauce menor activo el viejo curso fluvial cortado manteniendo o no la canalización consiguiendo que el río original recupere sus procesos geomorfológicos y ecológicos.
 Cuando el río presenta meandros abandonados bastante alejados del cauce activo según lo que dictamina los principios de la restauración se debe optar dejar que el sistema evolucione libremente. Si el río se encuentra en buen estado tendrá la capacidad de ir integrando dichos meandros.
- Recuperar las áreas afectadas por extracciones. Las extracciones de gravas y arenas en la llanura de inundación o el dragado que supone la excavación en el propio lecho fluvial o en depósitos de gravas laterales que suavizan o incluso recortan curvaturas y eliminan islas del cauce son intervenciones que además de posibilitar la contaminación de acuíferos provocan déficit de sedimentos alterando el relieve y su geomorfología. La fauna y la vegetación de ven dañadas gravemente con estas actuaciones.
- Eliminar las especies invasoras. Para actuar contras la especie invasora se debe trabajar desde la desembocadura del río a la cabecera y atajar el problema cuanto antes para evitar su reproducción. Esta práctica no restaura, pero si mejora el estado del río ya que las especies exóticas o invasoras generan graves problemas de salud en el ecosistema.

- Apostar por la revegetación. La revegetación puede llevarse a cabo por motivos estéticos, por estabilizar de orillas o para la mejora de la ribera. Si se hace por las dos primeras razones se va en contra del funcionamiento del sistema natural del río. En cambio, cuando se hace porque la ribera se ha deteriorado como consecuencia de un impacto humano si es una mejora para el sistema fluvial.
- Crear nuevos hábitats para beneficiar a muchas especies que están amenazadas o en peligro de extinción de forma que mejoran la salud del río.
- Fomentar la desurbanización. Este aspecto es importante para el control de las inundaciones. La urbanización supone espacios antrópicos en la llanura de inundación dificultando el funcionamiento del río y un riesgo notorio para la población.
- Establecer un protocolo de seguimiento. La restauración es un proceso de aprendizaje continuo por ello se necesita un seguimiento para adaptarse a las respuestas del río y ajustar el proceso ya que no se puede predecir con certeza. Se debe comenzar antes de la actuación y prolongarse en el tiempo. Es una práctica muy barata ya que hay voluntarios formados previamente o equipos científicos que pueden realizar el seguimiento.

3.5.- El marco legal de la restauración fluvial

Para realizar proyectos de restauración y recuperación de los espacios fluviales existe un marco legal que recoge una sucesión de especificaciones.

3.5.1.- Directiva Marco del Agua (DMA)

Surgió por la necesidad de unificar las actuaciones en materia de gestión del agua en la Unión Europea. Entró en vigor en diciembre del año 2000, tras la puesta en común de diversos ámbitos profesionales, tales como expertos de agua, políticos y agentes medioambientales.

Los estándares de Comunidad Europea exigen una gran demanda de agua de buena calidad y para poder garantizar este servicio surgió la necesidad de conservar de los sistemas fluviales.

Algunos de los principios a modo de resumen que recoge estos planes son:

- Proteger, mejorar y prevenir el deterioro de los ecosistemas acuáticos.
- Promover el uso sostenible del agua.
- Garantizar la reducción progresiva de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.
- Contribuir a paliar los efectos de las inundaciones y sequías.

Este trabajo pretende contribuir a mejorar este último aspecto.

3.5.2.- Directiva de Evaluación y Gestión de riesgos de inundación.

Las inundaciones no son desastres naturales, aunque si generan daños devastadores que perjudican a nivel local, autonómico y estatal. Para la gestión y defensa de estos daños durante los episodios de crecidas la Comisión Europea aprobó en noviembre de 2007 la Directiva 2007/60 sobre evaluación y gestión de inundaciones, transpuesta por la legislación española por el RD 903/2010 de evaluación y gestión de riesgos de inundación. La finalidad es reducir daños mediante la combinación de las administraciones, fundamentalmente en área de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI), como es el caso nuestra zona de estudio. El instrumento principal de esta directiva es la elaboración, aprobación y posterior implantación de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI), regulados por el RD 903/2010. En concordancia se establecen los siguientes objetivos para los planes:

- Mejorar la materia de ordenación del territorio y la gestión de la explotación en las zonas inundables, así como la coordinación administrativa entre todos los intérpretes involucrados y el conocimiento adecuada.
- Mejorar la capacidad predictiva ante situaciones de avenida e inundaciones.

- Aumento de la captación del riesgo de inundación y las estrategias autoprotección en la población, agentes sociales y económicos.
- Disminuir el riesgo en zonas inundables reduciendo las actividades económicas, patrimonio cultural y medioambiental.

3.5.3.- Estrategia Nacional de Restauración de Ríos

La Estrategia Nacional de Restauración de Ríos es un conjunto de actuaciones establecidas para recuperar la salud de los ríos, potenciar su patrimonio cultural, impulsar el desarrollo sostenible de uso de los espacios naturales dinámicos y paliar los riesgos de inundación.

Sus principales impulsores son la Directiva Marco del Agua y la Directiva de Evaluación y Gestión de riesgos de inundación, el actual Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y sus homólogos en legislaturas anteriores.

Los objetivos principales de esta Estrategia son: mejorar la formación para la gestión de los ríos y su restauración, impulsar la participación ciudadana para una mayor concienciación, impulsar la integración de la gestión de los ecosistemas fluviales en cuanto a políticas de uso y gestión de territorio, aportar experiencias y la información sobre actuaciones de restauración fluvial y sobre todo, involucrar a todas las administraciones necesarias para alcanzar el buen estado ecológico y funcional del río descrita en la Directiva Marco de Agua.

Se exigirá una formación actual y multidisciplinar a todos los agentes que intervengan en el proyecto fluvial para planificar las mejores actuaciones que garanticen el aprovechamiento sostenible de los ríos y su conservación. Asimismo, se buscará la percepción de la ciudadanía de los problemas de los ríos, la gestión de los mismos y las llanuras de inundación.

3.5.4.- Reglamento del Dominio Público Hidráulico

Inicialmente, el Real Decreto 9/2008, de 11 de enero supuso la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado en 1986, para incorporar los criterios de la Directiva Marco del Agua y la Directiva de Evaluación y Gestión

de los riesgos de inundación. Este reglamento establece la definición del cauce basándose en criterios geomorfológicos, ecológicos e hidrológicos.

El Dominio Público Hidráulico (DPH) incluye:

- Aguas continentales, tanto superficiales como subterráneas.
- Los cauces de corrientes naturales continuas o discontinuas, es decir, el terreno sobre el circulan los ríos, ramblas, entre otras corrientes de agua.
- Los lechos de embalses y lagos.

La existencia del Dominio Público Hidráulico responde a la necesidad de garantizar una protección de los recursos hídricos y de los ecosistemas fluviales. Generalmente, se requiere un permiso para llevar a cabo ciertas actuaciones dentro de cualquier DPH, tales como extraer áridos, plantar o cortar vegetación o implantar cualquier obra que pudiera afectar al ecosistema del río.

4.- EL CURSO MEDIO DEL RIO EBRO

Este trabajo se va a centrar en un tramo en una zona específica del río Ebro como es su curso medio.

4.1.- El problema del Ebro

El río Ebro ha estado expuesto a numerosas amenazas que han generado problemas como su contaminación y los hundimientos de terreno en la zona del delta. Además, produce inundaciones frecuentes que son percibidas como un problema desde números sectores de la sociedad.

La presencia de nitratos, amonios, nitritos, plaguicidas y otros compuestos químicos causan graves daños a la cuenca del río ya que deterioran los ecosistemas fluviales, suelos, embalses y la calidad del agua suministrada. El principal origen de estos contaminantes se debe a los 3 millones de hectáreas cultivadas y también a la actividad ganadera e industrial. Además, en estudios recientes se ha visto la presencia de mercurio afectando a toda la fauna y flora del río, un dato muy preocupante por ser un metal pesado con tendencia a la bioacumulación.

La posibilidad del hundimiento del delta debido al cambio climático que produce la elevación del mar podría dejar el 50% de su superficie bajo el nivel del mar.

Durante los últimos años, con mayor frecuencia desde 1945 el río Ebro ha experimentado importantes episodios de crecida provocando llanuras de inundación de 2 a 5 km en el tramo medio del río.

Estos eventos suceden con precipitaciones o bien prolongadas durante semanas, cada vez más inusuales o de intensidades elevadas. Además, la subida de la temperatura global desencadena la fusión nival que incrementa aún más el caudal del río.

Las crecidas forman parte de la dinámica del río y traen consigo diferentes tipos de afecciones. En el medio natural tienen una evidencia positiva, estas recargan los acuíferos de la zona inundada, reactivan procesos geomorfológicos fluviales como la erosión de las orillas, la sedimentación en numerosos tramos y variaciones de localización de la línea máxima de velocidad enriqueciendo a los ecosistemas con estos cambios.

Cuando las crecidas adquieren carácter extraordinario conllevan desbordamientos y esto trae efectos negativos a nivel económico y social [13]. Las masas de agua ocupan grandes superficies afectando a zonas industriales, explotaciones ganaderas, campos, áreas urbanizadas e infraestructuras como son carreteras, sistemas de regadío, puentes y los propios sistemas de defensa.

Dentro del estudio de este espacio natural dinámico se han tomado varias medidas tanto naturales como artificiales para detener la fuerza del río a lo largo de los últimos siglos.

Tradicionalmente, los sotos ribereños eran los estabilizadores de las orillas al oponer su rugosidad a la fuerza de la corriente. El entramado de raíces ralentizaba la erosión e impedía el arrastre de materiales, reteniendo los limos que enriquecían el suelo. Otra consecuencia de la relación entre el sistema fluvial y la vegetación de ribera es que el río mantiene una mayor estabilidad hacia el estado de equilibrio, ya que disipa el exceso de energía de las aguas de avenida [14].

La progresiva invasión humana del espacio del río ha disminuido estos efectos.

A pesar de ello, la zona de estudio sigue contando con gran cantidad de sotos de un altísimo valor ecológico. Estos conservan aun el ambiente natural que caracterizaba a la mayor parte de la llanura de inundación hace unas décadas.

A partir de los años cincuenta comenzó un proceso de antropización sin precedentes en este espacio ribereño estimulado por la transformación del sistema agrario y posibilitado por la capacidad técnica. Se potenciaron la

deforestación de los sotos, el avance de los cultivos, las extracciones de gravas o el desarrollo de diversas infraestructuras hidráulicas.

Actualmente la zona consta de motas de tierra compactada aprovechadas como caminos, escolleras que intentan evitar la erosión progresiva de las orillas, muros de hormigón, espigones, derivaciones y otras obras accesorias como sistemas de drenaje y desagüe.

En los últimos años se ha planteado una nueva ordenación del espacio ribereño que contemple la complejidad del sistema de cauce-riberas, de la dinámica fluvial y de las interdependencias entre los distintos factores implicados. Un ejemplo de estas nuevas alternativas se planteó en el proyecto *Ebro Resilience* de restauración fluvial del Ebro en la zona de Alfaro-Milagro [15] de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

4.2- La Confederación Hidrográfica del Ebro

Según la Confederación Hidrográfica del Ebro [16] la Cuenca del Ebro se sitúa al noroeste de la Península Ibérica y ocupa una superficie total de 85.534 Km² con una longitud de 930Km. Representa el 17 % del territorio peninsular español, es la cuenca hidrográfica más grande de España y una de las principales cuencas mediterráneas europeas. Sus límites naturales son: por el este la cadena Costero-catalana, por el norte los montes Cantábricos y los Pirineos y por el suroeste el Sistema Ibérico.

Los afluentes más importantes por su margen izquierda son el Aragón, Gállego, Cinca-Segre que recogen el agua procedente de los Pirineos y montes Cantábricos y por su margen derecha recibe los afluentes procedentes del Sistema Ibérico, normalmente menos caudalosos, como el Oja, Iregua, Jalón o Guadalope.

En la cuenca hay numerosos lagos, fundamentalmente en las zonas montañosas, son los llamados ibones o estanys de los Pirineos, de pequeño tamaño, pero gran belleza.

En la siguiente figura podemos visualizar en un mapa la cuenca hidrográfica Ebro.



Figura 4: Cuenca hidrográfica del Ebro [15]

Según vemos en la imagen, las Comunidades Autónomas se diferencian por colores, la red hidrográfica por una línea azul, los embalses aparecen como masas azules, la línea roja señala la frontera con Francia y las masas rojas son núcleos de población pertenecientes a la cuenca.

4.3.- Características de la Cuenca Hidrográfica del Ebro

La zona de estudio de este trabajo corresponde a uno de los tramos con mayores variaciones de caudal ya que se ve afectado por los caudales irregulares de los afluentes Arga y Aragón. Esta irregularidad de caudales se debe a que sus aguas proceden en algunos momentos de la fusión de la nieve pirenaica. Sus principales derivaciones de caudal son Canal de Tauste y Canal Imperial de Aragón.

4.3.1.- Climatología

La zona de estudio se caracteriza por un régimen pluvionival y un estiaje estival bien marcado. El deshielo de las cabeceras pirenaicas y las lluvias primaverales provocan numerosas crecidas [17].

Además, la influencia pluvial oceánica mantiene el caudal durante el invierno, una de las épocas con alta frecuencia de crecidas.

4.3.2.- Morfoestructura de la cuenca

El río presenta diferentes morfologías, en este estudio sólo se nombrarán las que acontecen a nuestra zona de estudio, el tramo medio del Ebro. El carácter predominante de la zona es meandriforme, estos son meandros libres o divagantes. También discurre trazando grandes curvas por el interior de una amplia llanura de inundación llegando hasta 6 km de anchura, aunque la media está en 3,2km y con un índice de sinuosidad medio del río de 1,505 y la pendiente media es muy baja (0,67m/km).

Igualmente se encuentran islas en el centro del cauce y sólo en orillas prominentes se conservan bosques ribereños.

Por otra parte, se puede decir que la morfología varía con cada crecida con abandonos de meandros, desarrollo de sinuosidades, brazos ciegos, etc. debido a la lucha entre la entrada de energía del caudal de crecida y la oposición como la vegetación de ribera, los propios materiales de cauce y orilla y las obras de contención realizadas por el hombre.

4.3.3.- La litología de la zona

Basándose en el mapa geológico de escala 1: 25000 que puede descargarse de la página web de IDENA, vemos que en la zona de estudio el río discurre sobre materiales recientes, todos ellos pertenecientes al Cuaternario, Holoceno.

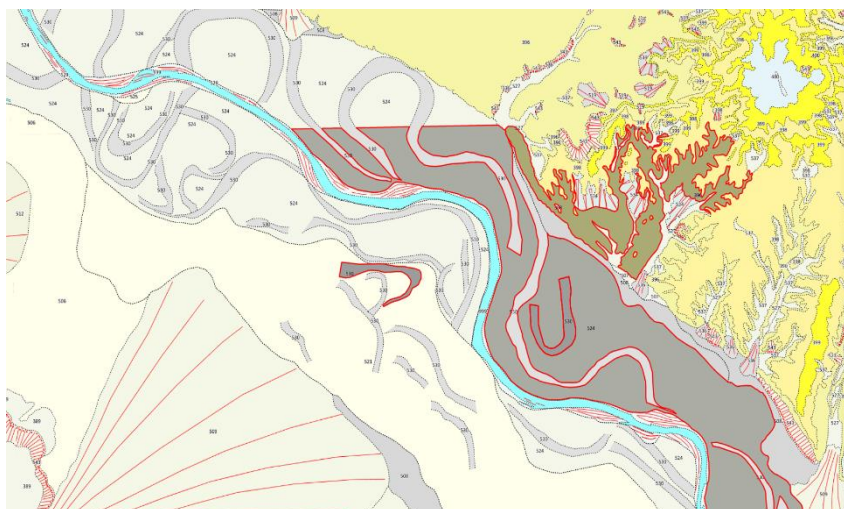


Figura 5: Mapa geológico del tramo de estudio de IDENA. [18]

Se observa la presencia de múltiples meandros abandonados y una terraza fluvial que cubre la mayor parte del terreno.

En la margen izquierda del río donde el cauce se ensancha, se ha formado un depósito de bloques, cantos y gravas que también puede observarse en menor medida en la margen derecha. [19]



Figura 6: Suelo de la orilla del tramo de estudio. (Fuente: autora de este trabajo)

Los materiales observados tienen mucha porosidad lo que permite el filtrado del agua en el subsuelo e indica que a ambos lados del río se encuentra el nivel freático a poca profundidad.

4.3.4.- Historial de inundaciones en la cuenca del Ebro

Las riadas del Ebro son frecuentes y no presentan un patrón único. Su principal regularidad es la rápida subida y bajada de las aguas.

Las más fuertes son las de invierno llamadas cantábricas o pirenaico-cantábricas habitualmente debidas a la situación meteorológica del Noroeste de la Península y las menos fuertes tiene lugar en la primavera y son debidas a fuertes precipitaciones y la fusión nival.

Las principales inundaciones registradas en el siglo XX son la de marzo de 1930, diciembre de 1959, diciembre 1960, enero 1961, noviembre de 1966 y junio de 1977, así como las de enero, febrero y marzo de 1978.

Como ya se ha dicho, los patrones de las riadas del Ebro son complejos y atienden a diferentes factores. Si analizamos dos riadas diferentes como la de 1959 y la de 1978 a través de sus hidrogramas obtenemos la figura 7.

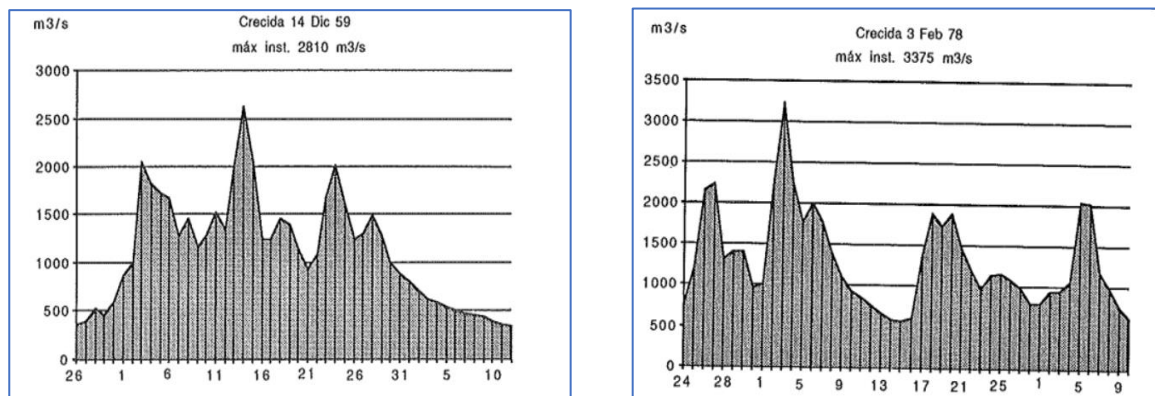


Figura 7: Hidrogramas de crecida en 1959 y en 1978 [20]

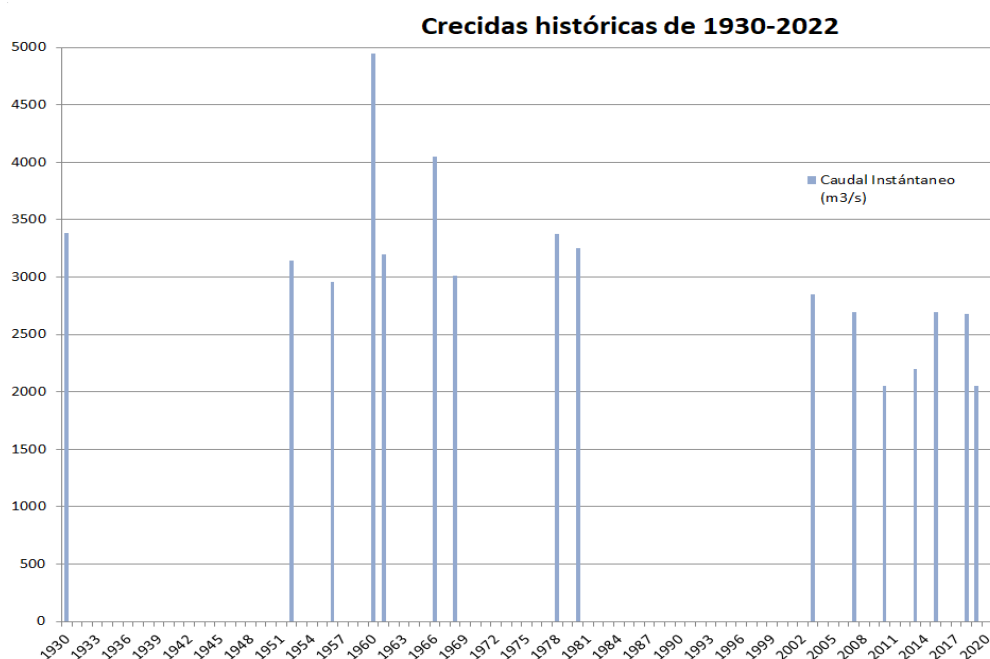
La primera gráfica es un buen ejemplo de crecida compleja ya que se suceden una crecida cantábrica (del 1 al 3 de diciembre) causada por el paso de una borrasca en el Noroeste peninsular con una de tipo pirenaico (del 12 al 15 de diciembre) provocada por un incremento del aporte del río Aragón. La serie termina con otra crecida de origen cantábrico. En la Ribera de Navarra se inundaron 4360 Ha y se produjeron cortes peligrosos en los diques y múltiples roturas de acequias. El total de daños, según las Cámaras Sindicales Agrarias de Navarra y Logroño, ascendieron a unos 24,7 millones de pesetas de la época [19]. La crecida de 1978 combinó también origen de fusión nival con intensas borrascas, aunque en este caso los caudales experimentan subidas y descensos bruscos. Este patrón produjo daños devastadores en la localidad de estudio, Buñuel, con más de 500 Ha inundadas. Esta sucesión de avenidas a lo largo de mes y medio obligó a promulgar el Plan General de Defensa contra las avenidas del Ebro.

En lo que llevamos de siglo, ya se ha superado el umbral de inundación en varias ocasiones. Están registradas las riadas de diciembre 2002, febrero-marzo 2003, marzo abril 2007, junio 2008, enero 2009, enero y abril 2013, marzo 2014, febrero-marzo 2015.y diciembre de 2021. En todas ellas se han repetido las imágenes de carreteras cortadas, puentes superados por el nivel del agua, acequias rotas y defensas destruidas. En 2003 se elaboró un Plan Medioambiental para el río Ebro

que combinó objetivos de protección del sistema fluvial mediante la creación de espacios de alivio y la retirada de algunas motas, pero en 2015 tras la presión de los grupos afectados (ganadero y agricultores principalmente) el programa se paralizó.

A continuación se va a visualizar un gráfico donde se puede observar las crecidas que han tenido lugar del 1930 al 2022.

Para considerarlo episodio de avenida tiene que superar los $2000\text{m}^3/\text{s}$ de caudal instantáneo según el criterio que se ha escogido. Estos caudales se han obtenido a partir de los datos diarios de la estación de aforo de Castejón, la única existente en el Ebro en el área de estudio.



Gráfica 1: Gráfico de caudal instantáneo mayor de $2000\text{ m}^3/\text{s}$ en los últimos 90 años. (Fuente: autora de este trabajo)

En esta gráfica podemos observar 9 riadas en 70 años y 8 riadas en lo que llevamos de siglo, es decir, 22 años. Por lo que se puede hablar de un aumento de tendencia posiblemente debido a las precipitaciones extremas y a la fusión nival.

También se visualiza que los caudales son menores por lo que pudiera ser que el esfuerzo de la *Confederación Hidrográfica del Ebro* para monitorizar todos los caudales de forma instantánea mediante el *Sistema Automático de Información Hidrológica* (SAIH) [22] les dé margen para poder actuar e intentar disminuir los daños y el riesgo.

Podemos resumir lo dicho anteriormente indicando que el Ebro en la Ribera de Navarra y más concretamente en la zona de Buñuel produce crecidas importantes con menor caudal que antes debido al CHE pero de forma recurrente debido al encajonamiento de su cauce, la confluencia de afluentes caudalosos y los fenómenos meteorológicos a los que está sujeto.

4.4.- Localización del tramo de estudio

En el presente trabajo se modelizará el tramo del río Ebro que discurre por el término municipal de Buñuel (Navarra), en concreto, desde los Sotos del Quebrado, el Ramillo y la Mejana hasta pasar el punto de Observación de aves. Esta zona pertenece al curso medio del río Ebro. En la siguiente imagen se puede ver el tramo elegido para el estudio.

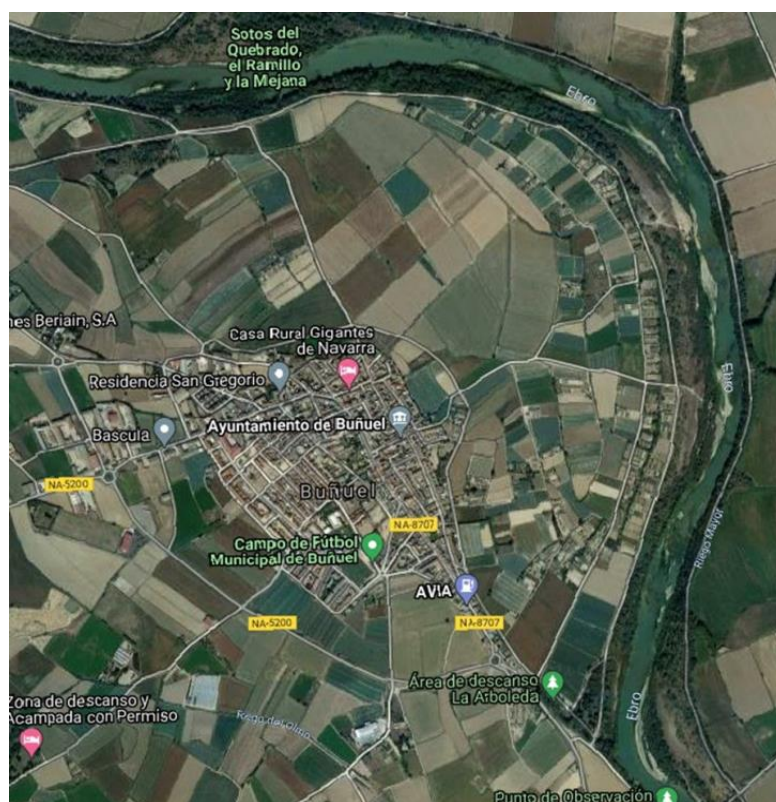


Figura 8: Localidad de Buñuel desde Google Maps. [23]

En la siguiente imagen se observa como Buñuel está situado en uno de los grandes meandros del río Ebro. Esta es una zona declarada por la Unión Europea *Lugar de Importancia Comunitaria* (LIC) por su alto valor ambiental y paisajístico.

4.4.1.- Población y servicios afectados por los desbordamientos del río Ebro

Las sucesivas riadas del río impactan directamente en la vida de los ciudadanos de la zona. Además de los terrenos de cultivo anegados algunos habitantes deben ser desalojados de sus casas debido a que los diques de contención se desbordan o se rompen.

En las siguientes figuras se observan imágenes de la riada diciembre de 2021 en la que el agua afecto incluso al casco urbano de la localidad obligando a los vecinos del barrio de la Fuente en Buñuel a dejar sus casas. Estuvieron tres días sin poder volver a ellas.



Figura 9: Vecinos del barrio de la fuente en Buñuel [23]

En la imagen se ve a algunos vecinos de Buñuel elaboraron sus propios diques de contención para evitar que el agua entrara en sus casas. En esta ocasión este tipo de diques no consiguieron solucionar el problema.

En las figuras que se muestran a continuación se puede ver una imagen aérea de la zona afectada.

Estas imágenes están sacadas de la última riada que afecto bastante al pueblo pero no ha sido la más grande que haya visto Buñuel. Por lo que podemos decir que no es la situación más peligrosa que ha sufrido el pueblo.



Figura 10: Localidad de Buñuel inundada (Fuente: tutora de este trabajo)

Podemos ver como efectivamente el agua llega a los patios y viviendas del casco urbano, produciendo una situación de riesgo no solo para los bienes, sino también para las personas.



Figura 11: Zonas de cultivo de Buñuel inundadas (Fuente: tutora de este trabajo)

En la imagen de la izquierda se puede ver el momento en el que el agua comenzó a superar el cauce del río e iba anegando las zonas de cultivo. En la imagen de la derecha se observa como la fuerza del agua rompe el dique de contención.

4.4.2.- El encauzamiento del río Ebro en la zona de estudio

Bajo el paradigma ingenieril del que ya se ha hablado anteriormente, la zona fue modificada en décadas pasadas. El río fue encauzado mediante motas que eliminaron antiguos meandros y que causó un cambio en el comportamiento del cauce.

Algunas de estas modificaciones pueden apreciarse en la imagen siguiente.



Figura 12: Diferencias del tramo de estudio en 50 años [24].

En la imagen de la izquierda se ve que ya en 1957 se había disminuido el espacio natural del río para usar gran parte de ese terreno como cultivo de regadío. En 2008, situación mostrada en la imagen de la derecha, vemos que dicho espacio ha disminuido todavía más.

Para controlar el cauce en la localidad de Buñuel se construyeron dos motas de forma trapezoidal que tienen un ancho de entre 6 y 8 metros. Son de tierra compactada y actualmente se usan como caminos de paseo y llegar a los campos de cultivo de los alrededores.

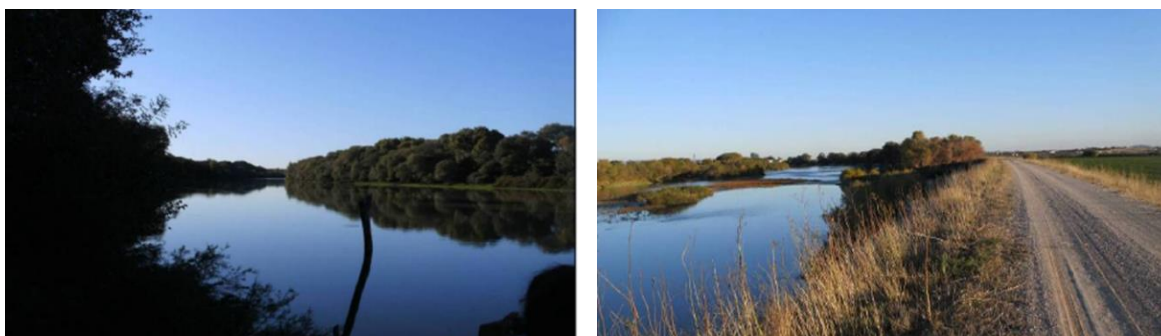


Figura 13: Motas en el cauce del tramo de estudio (Fuente: autora de este trabajo)

Para reforzar este encauzamiento se añadieron 39 espigones en el margen derecho del río y 10 espigones en el margen izquierdo repartidos a lo largo de todo el tramo de estudio como observamos en la siguiente imagen.



Figura 14: Espigones de la localidad de Buñuel (Fuente: autora de este trabajo)

Podemos ver cómo están colocados los espigones repitiéndose este patrón en varios tramos del río. Dentro de la zona, Buñuel es la localidad con más espigones, de hecho, fue el último municipio en usar esta técnica en 1977. Este control del río permite que en algunas zonas se cultive hasta la misma orilla.

Otra forma de control muy utilizada han sido los dragados del fondo fluvial. En la zona se estuvieron realizando cada año hasta 2014.

Otras defensas que se usan son una válvula de capleta, una tubería de desagüe y un muro de hormigón como refuerzo de la mota de tierra en la zona de Mondelalcalde, en la margen derecha.

En los últimos tiempos, este tramo está siendo sometido a un proceso de restauración fluvial. Las especies invasoras se han eliminado mediante el recubrimiento de algunas zonas con plástico biodegradable, especialmente para evitar la aparición de cañas.



Figura 15: Recubrimiento de plástico en las motas del dique. (Fuente: autora de este trabajo)

En las imágenes se aprecia como se ha arrancado la vegetación de algunas zonas, principalmente cañas, y se ha extendido un plástico negro alrededor de estas que previene su crecimiento. A su vez se realiza una siembra de alguna especie autóctona.

Otra actuación llevada a cabo es dejar sin rellenar los socavones generados en la última riada y dejarlos evolucionar para que el río recupere su espacio natural.



Figura 16: Ejemplo de la restauración fluvial que se está realizando en el tramo de estudio. (Fuente: autora de este trabajo)

En la imagen de la derecha se puede ver uno de los socavones que dejó la última riada. En la imagen de la izquierda se observa uno de los carteles que avisa de la restauración que se está realizando.

5.- METODOLOGÍA DE TRABAJO

El problema de las inundaciones y el tratamiento que de forma tradicional se ha hecho de las mismas es lo que motiva a la realización de este estudio. En él se va a realizar una modelización del cauce del río Ebro a su paso por Buñuel para intentar comprender la dinámica fluvial y proponer alguna posible área de mejora a la situación existente.

El modelado expuesto en este documento se ha realizado mediante el software HEC-RAS y el procedimiento seguido se mostrará en los próximos apartados.

El proceso comenzó consiguiendo los mapas georreferenciados suministrados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) [20].

Dicha información no puede ser leída directamente en el software HEC-RAS por lo que se necesita ser transformada mediante QGIS.

5.1.- El programa QGIS

QGIS es un *Sistema de Información Geográfica* (GIS) de código abierto licenciado amparado por la Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) que es una organización no gubernamental cuya misión es dar soporte y promover el desarrollo colaborativo de tecnologías geoespaciales con datos abiertos. El programa permite analizar los datos geográficos y geoespaciales mediante diversos formatos sin tener que convertirlos y permite exportar la información de un mapa a otros programas como HEC-RAS. En este trabajo la versión usada ha sido Qgis 3.22.

5.2.- Descripción del HEC-RAS

La siguiente modelización del tramo del río Ebro se lleva a cabo mediante el programa, *Hydrologic Engineering Center–River Analysis System* (HEC-RAS) desarrollado por el *US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center*. El programa es ampliamente utilizado a nivel profesional en todo el mundo.

Este software está especializado en modelización hidráulica y es de uso gratuito. Además, se encuentra actualizado y mejorado de forma continua. Su objetivo principal es realizar estudios de inundabilidad ya que permite variar diferentes parámetros como son el caudal, la velocidad de fluido y los coeficientes de rugosidad de Manning.

Este software tiene la posibilidad de simular hidráulicamente cauces abiertos naturales con contornos rígidos, tanto un régimen permanente como en flujo gradualmente variado por medio del *Standard Step Method*.

Permite calcular perfiles en lámina libre en flujo gradualmente variado y es capaz de realizar un análisis unidimensional o bidimensional del flujo para varios tipos de regímenes. Otras propiedades importantes son su capacidad para localizar el resalto hidráulico y analizar estructuras inmersas en el cauce como obstrucciones y puentes.

5.3- Coeficiente de Manning

Para formular una hipótesis realista respecto a una inundación se tienen en cuenta la superficie de agua que depende del valor de la pendiente del fondo, la geometría de la superficie del terreno y la estimación del coeficiente de Manning. Este último es el principal parámetro que se debe elegir y no existe ningún método exacto para su selección ya que depende de la rugosidad superficial principalmente pero también de la vegetación, la irregularidad del vaso, la sedimentación de materiales y las obstrucciones en el cauce. También afecta el caudal, el nivel del agua y los cambios estacionales. Además, el valor de dicho coeficiente es muy sensible a la variación de la pendiente, el radio hidráulico o la granulometría de fondo.

Por todo esto, la elección del Coeficiente de Manning es compleja y debe hacerse tomando datos que han sido contrastados experimentalmente. Existen numerosas tablas suministradas en diferentes estudios. En la práctica las más usadas son las tablas de Chow (2004).



Para la modelación hidráulica, como es nuestro caso, es un factor determinante.

5.4.- Metodología de trabajo

En primer lugar, se necesita obtener el modelo de elevación del terreno suministrado por el *Instituto Geográfico Nacional (IGN)* [21]. El plano obtenido es el plano es MDT02-ETRS89-HU30-0321-1-COB2 suministrado por el centro de descargas (CNIG). Este archivo tiene una extensión (.asc) que ha de ser transformado a (.tif) mediante QGIS.

5.4.1.- Creación del proyecto 1D

En el proyecto 1D se pretende obtener el perfil del vaso en el tramo de estudio. Para ello se realizan las operaciones siguientes:

- Se selecciona **File/New Project**, se le pone nombre y se guarda. En este momento se creará una carpeta con el proyecto que, aunque todavía vacía tendrá la extensión (.prj).
- Se abre el Ras Mapper  **/Project/Create** (no hará falta poner las referencias, ya que ya están puestas en el mapa original).
- Se marca +/mapa tif/ y se selecciona el mapa que hemos guardado /crear.
- El siguiente paso es crear la geometría 1D. Para abrir la ventana **Geometric Data** se va al cuadro principal y marcamos en **geometric/add new geometric** y le damos un nombre en nuestro caso 1D20mar.
- Se marca en el botón  y el cursor se convierte en un lápiz; con sucesivos clics trazamos el curso del río. Para terminar, se hace doble click y aparece un cuadro para darle nombre al río y a ese tramo (reach). Se guarda esta parte marcando el punto rojo superior.
- Ahora es el momento de definir las orillas del río o **Back lines**. Para ello hay que ir marcando con el lápiz, pero siempre siguiendo el curso del río y comenzando por la orilla izquierda.
- A continuación, se definen las zonas de inundación o **Flow Path** del mismo modo en que se han definido las orillas.
- Después se definen las secciones a estudiar llamadas **Cross section**. Se marcan de forma similar a las anteriores pero perpendiculares a la corriente.

A continuación, se obtiene la imagen en la que aparecen todos estos elementos.

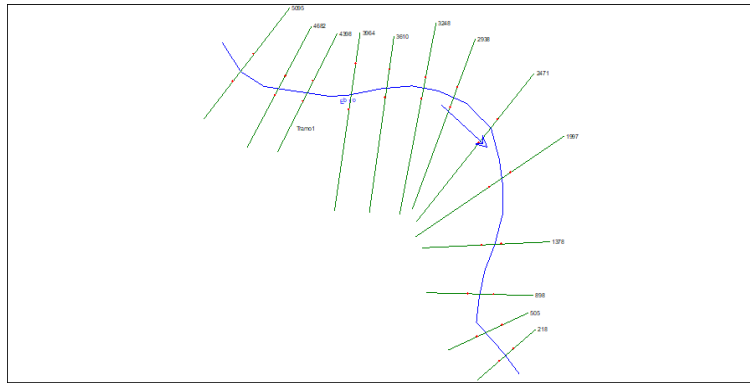



Figura 17.: Datos de la geometría 1D (Fuente: el propio Hec-Ras)

En nuestro caso, como se observa en la imagen, se muestran las secciones que van de 5095 a 218. El río aparece en azul y la flecha marca el sentido de la corriente. Las secciones aparecen en verde y los puntos en rojo marcan las zonas inundables.

- Una vez terminada la geometría hay que importarla con el  icono. Se abre una pantalla nueva y se selecciona File/Importar geometría. Se Importa de HEC-RAS **format** marcando el nombre de la geometría, en nuestro caso el archivo se llama 1D20 mar. En este momento es importante seleccionar el sistema internacional de unidades (SI). Se obtiene la siguiente figura.

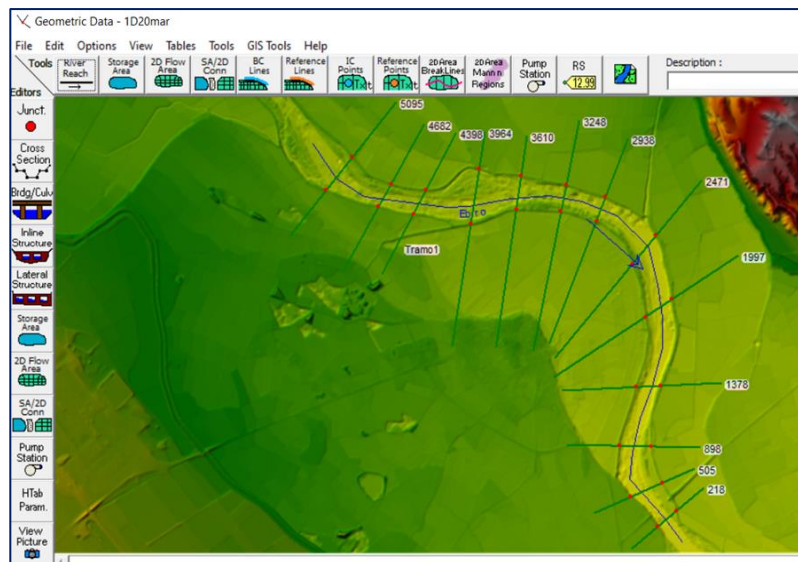



Figura 18: Geometría importada 1D20mar (Fuente: el propio Hec-Ras)

Para poder continuar se comprueba que está correcto, por lo que vamos a **Cross section** y ver si sale el perfil que marca las elevaciones sobre el nivel del mar. Para ello se marca el  icono **View cross section** y aparecerá una imagen como la que visualizamos a continuación.

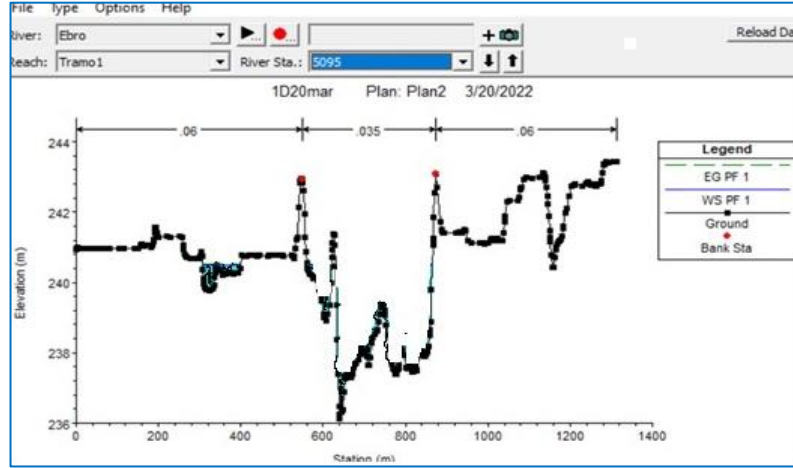



Figura 19: Geometría importada 1D20mar (Fuente: el propio Hec-Ras)

En esta imagen se puede ver como aparece en azul la primera sección transversal llamada 5095. Moviendo la flecha de la derecha se podrán visualizar todas las secciones transversales que hemos definido.

- Ahora es el momento de incorporar el caudal. En este caso se ha introducido un caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ para realizar la simulación correspondiente. Para ello se selecciona  **SteadyFlow** en el comando y se introduce el valor deseado. En la figura 20 se muestra la ventana correspondiente.

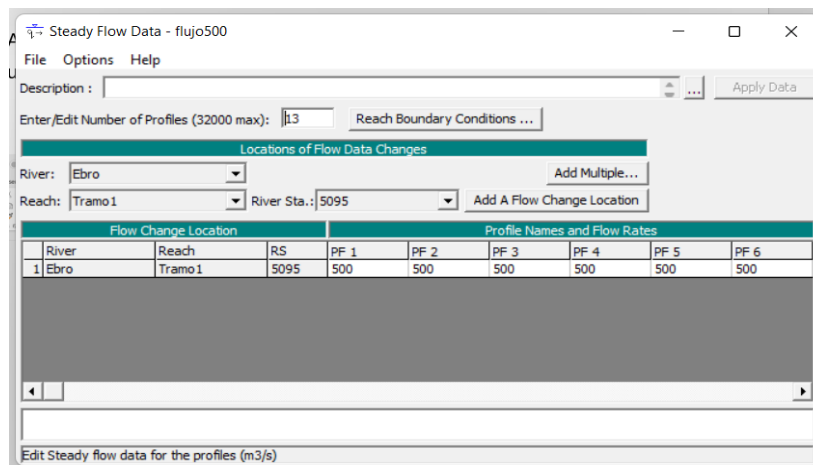



Figura 20: Geometría importada 1D20mar (Fuente: el propio Hec-Ras)

A continuación, se marca el icono  **Steady Flow data** y aparecerá una nueva ventana en la que se marca **Reach Boundary Conditions** y después **Downstream/ Normal Depth**. Ahí se introduce el valor de la pendiente a la que se le ha dado un valor medio de $S=0.0008$.

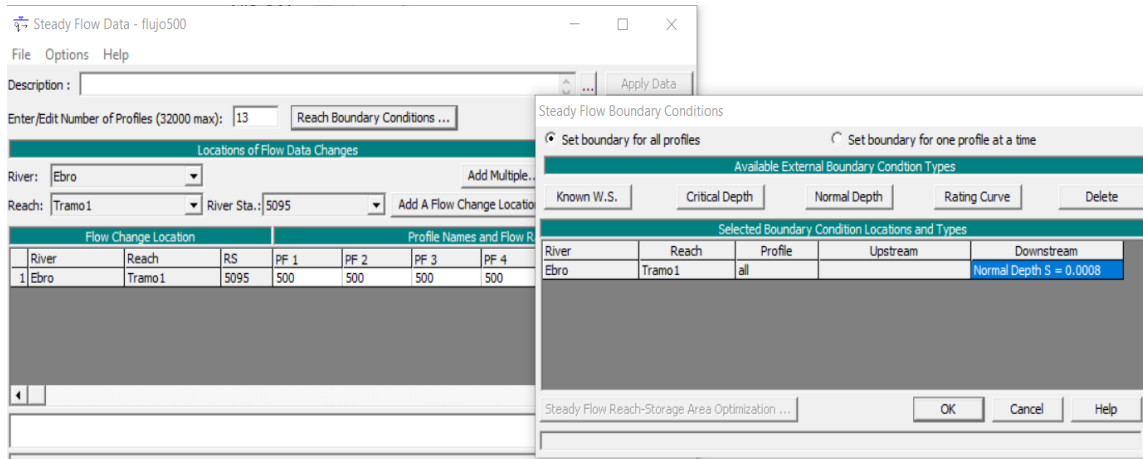


Figura 21: Introducción condiciones de contorno Fuente: el propio Hec-Ras)

- Para finalizar, se incorporan los coeficientes de Manning para las orillas y para la corriente del río. Estos valores son 0,06 y 0,035 respectivamente.

The screenshot shows the 'Edit Manning's n or k Values' dialog box in HEC-RAS. The 'River' is 'Ebro' and the 'Reach' is 'Tramo1'. The table below shows the Manning's n values for 13 river stations along the 'Ebro' river reach 'Tramo1'. The values are 0.06 for the banks and 0.035 for the channel.

River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1 5095	n	0.06	0.035	0.06
2 4682	n	0.06	0.035	0.06
3 4398	n	0.06	0.035	0.06
4 3964	n	0.06	0.035	0.06
5 3610	n	0.06	0.035	0.06
6 3248	n	0.06	0.035	0.06
7 2938	n	0.06	0.035	0.06
8 2471	n	0.06	0.035	0.06
9 1997	n	0.06	0.035	0.06
10 1378	n	0.06	0.035	0.06
11 898	n	0.06	0.035	0.06
12 505	n	0.06	0.035	0.06
13 218	n	0.06	0.035	0.06

Figura 22: Geometría importada 1D20mar (Fuente: el propio Hec-Ras)

Para la obtención del perfil del vaso hemos asignado el mismo valor para toda la corriente y el mismo valor para todas las orillas, independientemente del tipo de cultivo, ya que esta diferenciación se hará en el proyecto 2D.

Para finalizar hay que decir que, si todo se ha cargado correctamente en el proyecto, cuando se abre nuevamente quedará reflejado en la pantalla de entrada de la siguiente forma:

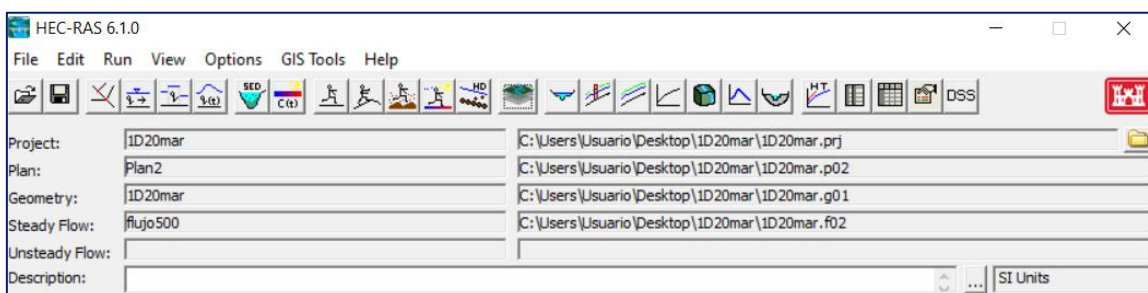


Figura 23: Pantalla de inicio de HEC-RAS (Fuente: el propio Hec-Ras)

En la figura vemos como se ha cargado tanto el proyecto, como la geometría y el flujo.

5.4.2.- Creación del proyecto 2D

Al principio de la sección se ha explicado como generar el archivo (.tif). Este archivo es el que se adjuntará a HEC-RAS como *terreno*. A continuación:

- Una vez que el terreno está cargado se pueden añadir diversas capas en el apartado RAS Mapper de HEC-RAS. Para ello, desde QGIS (Web/Quick Map Service) se ha añadido un mapa de fondo georreferenciado de la zona en la opción *Open Street Map* (OSM) [22]. Una vez cargado, se seleccionan las diferentes zonas de cultivo en el mapa de *Infraestructuras de Datos Espaciales de Navarra* (IDENA) [23] en la capa Agricultura y ganadería/cultivos y aprovechamientos y se descarga cada zona como archivos shapefile. Estos archivos se añaden uno a uno como capas en el proyecto de QGIS que contiene el mapa OSM. A partir de todas estas capas de cultivo se construye un único archivo que contiene todas las

capas cargadas. Este archivo es el que se carga en RAS Mapper como LandCover.

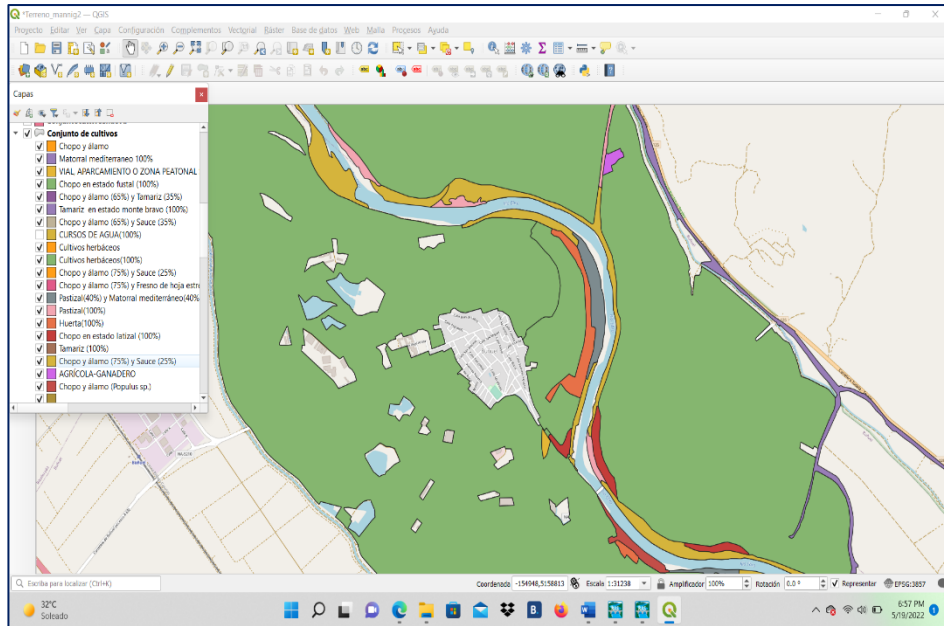


Figura 24.: Cultivos en la zona de Buñuel [29]

En la leyenda se aprecian los diferentes colores que el programa ha asignado a cada zona de cultivo.

- Para finalizar la carga de las diferentes capas, se debe marcar en **RAS Mapper** la opción **Google Hybrid** para que el mapa incorpore el mapa Google de la zona.
- Al finalizar de cargar los mapas en HEC-RAS se debe obtener la siguiente imagen.

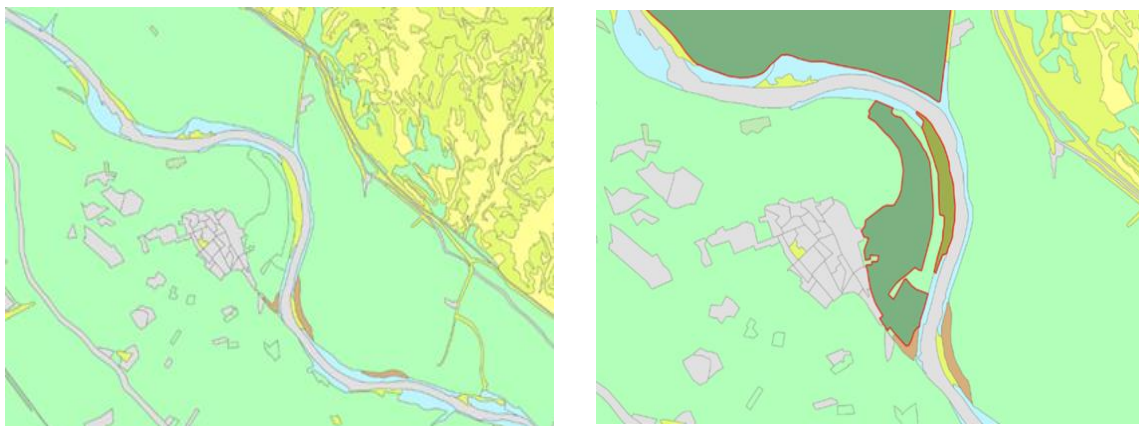


Figura 25: Visualización de las capas cargadas (Fuente: el propio Hec-Ras)

En ella se ve el río propiamente dicho, en color gris y la localización de la localidad de Buñuel. También se aprecia como se ha cargado correctamente la capa de cultivos (Imagen de la derecha).

6.- RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS

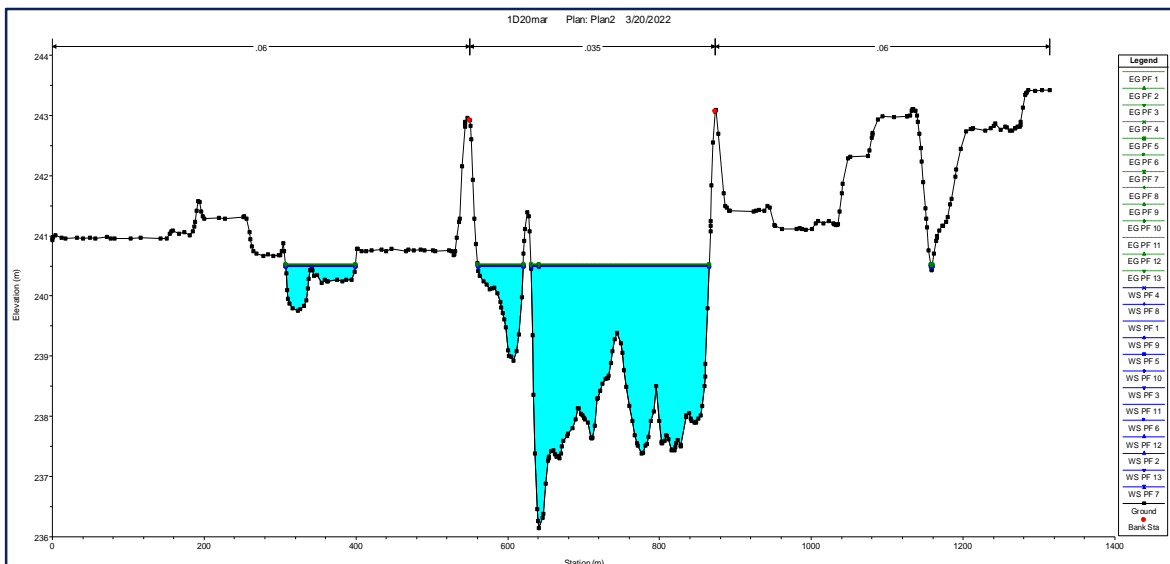
Tras llevar a cabo las simulaciones hidráulicas a partir de HEC-RAS se han obtenido una serie de resultados los cuales se presentan y analizan a continuación.

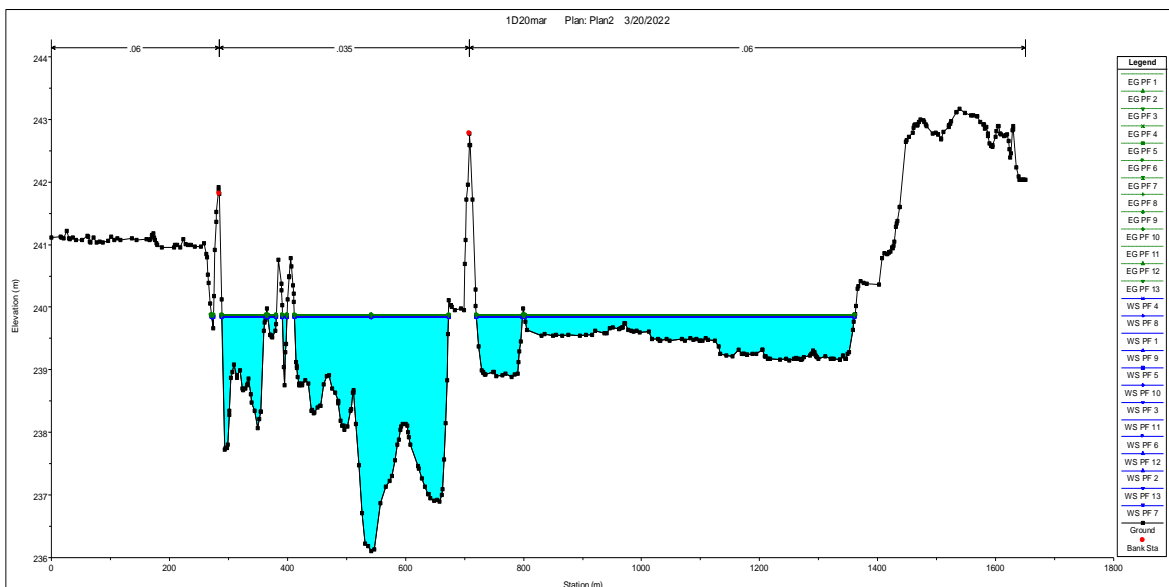
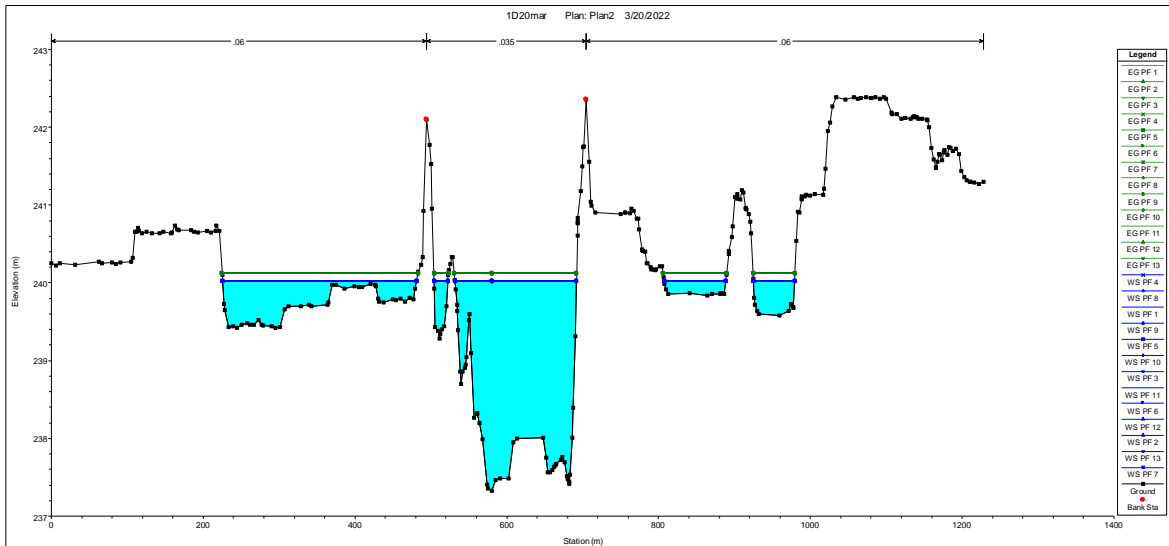
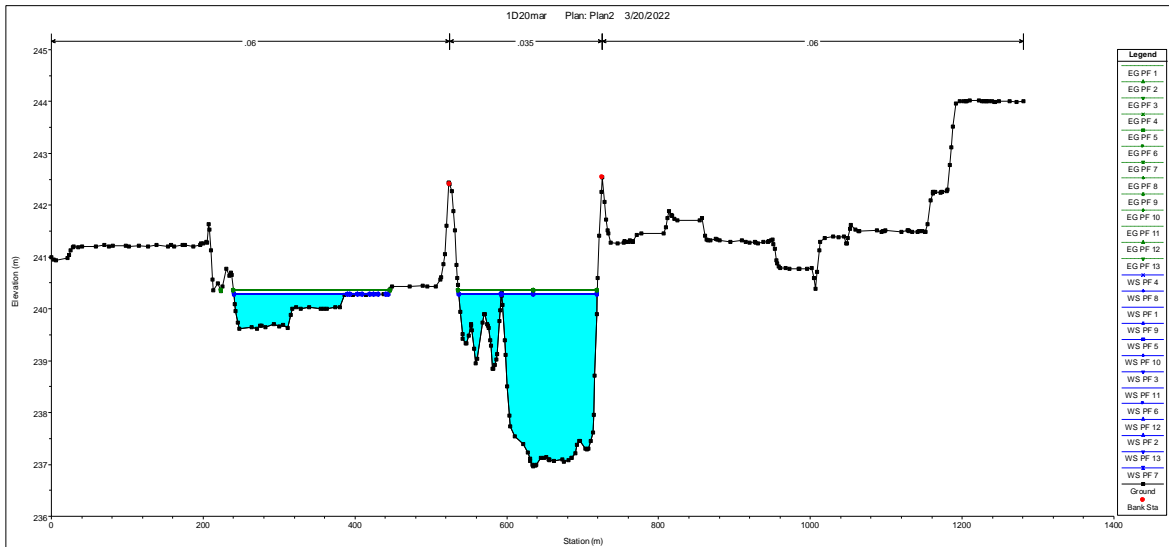
6.1.-Comportamiento hidráulico del cauce en 1-D

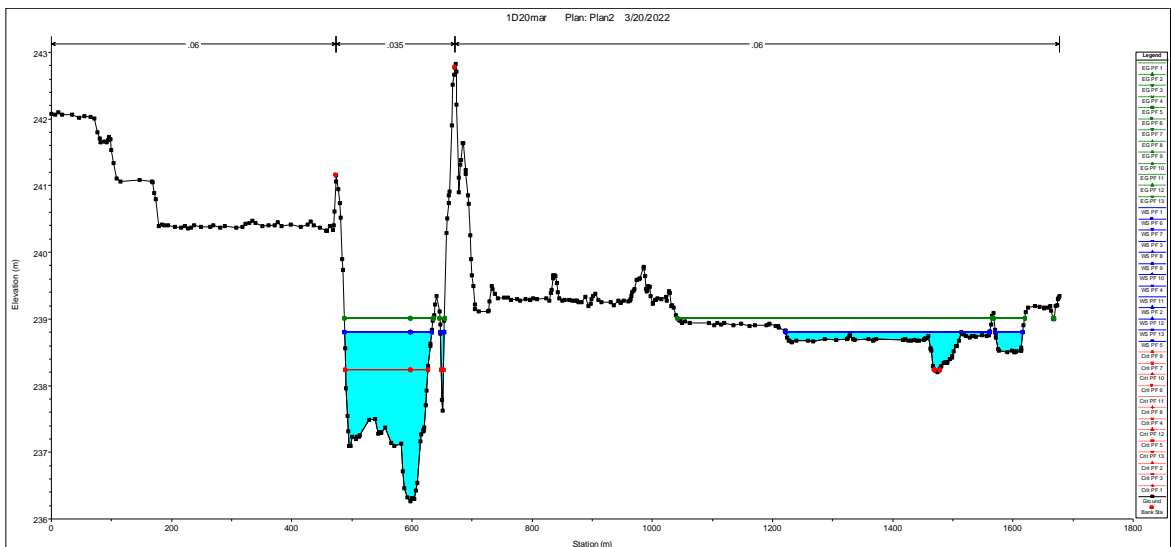
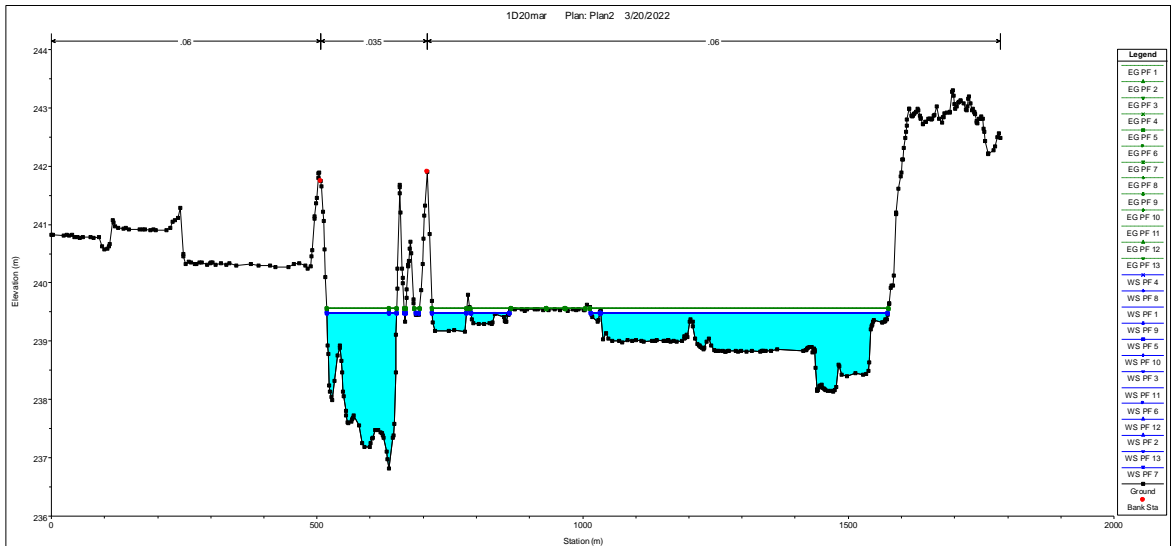
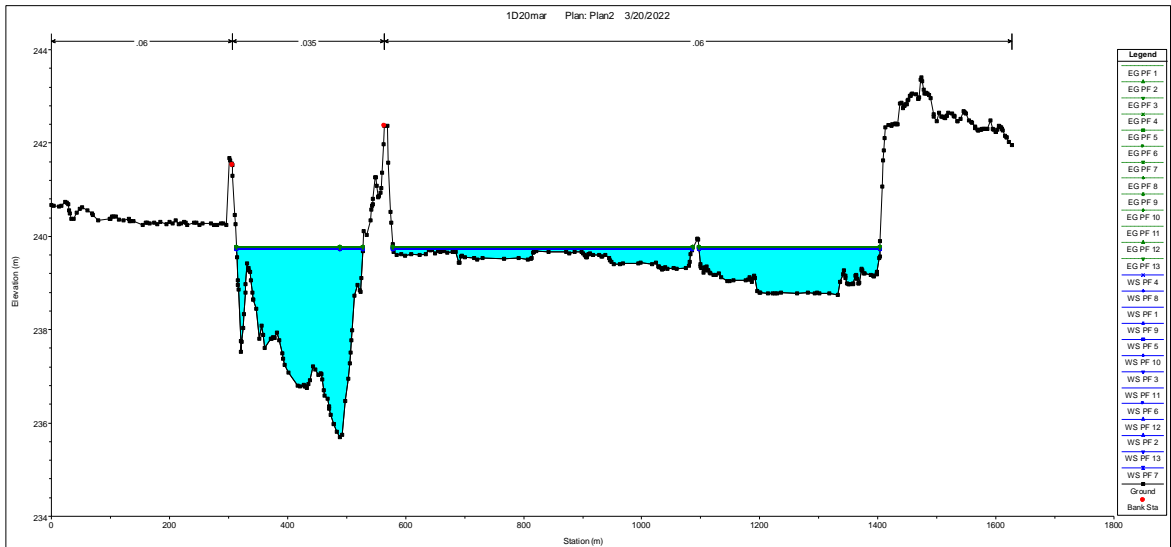
En este apartado se van a analizar los resultados de la primera simulación con un caudal de $Q=500\text{m}^3/\text{s}$. Este es un caudal importante que generalmente produce la salida del agua del cauce, aunque no llega a producir una inundación importante.

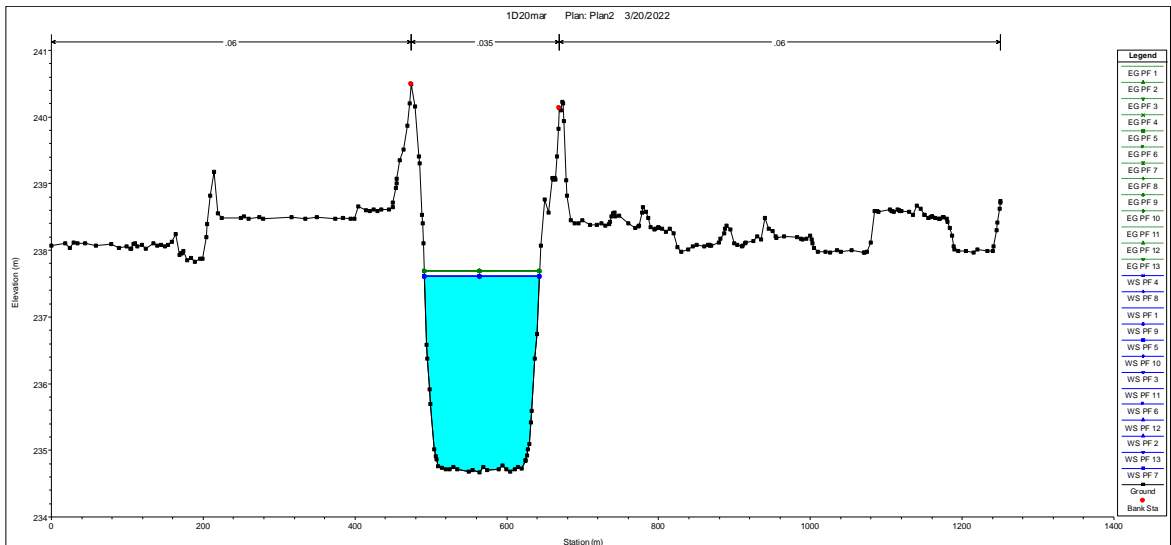
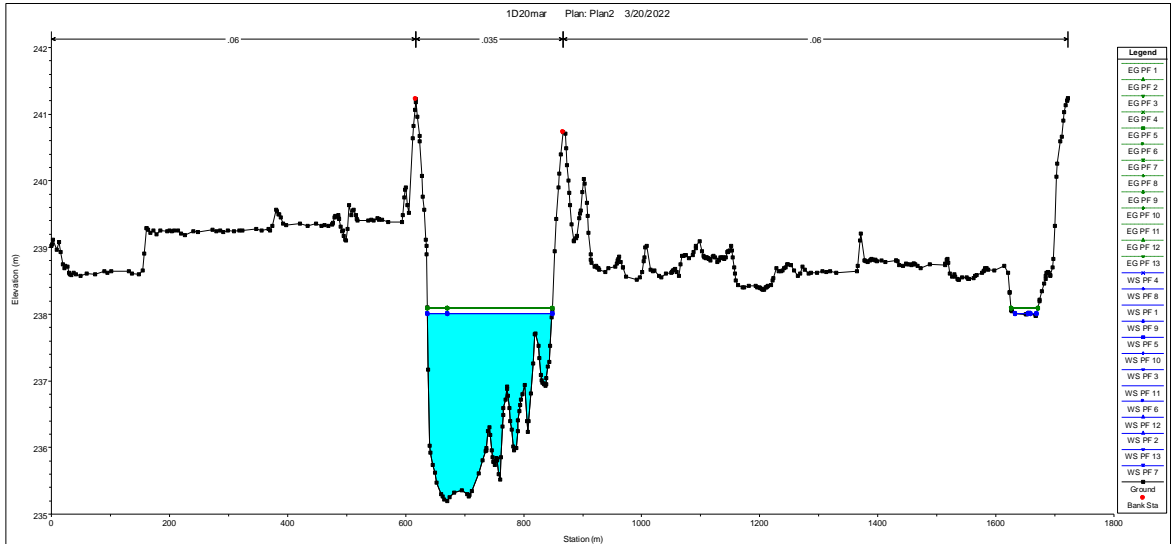
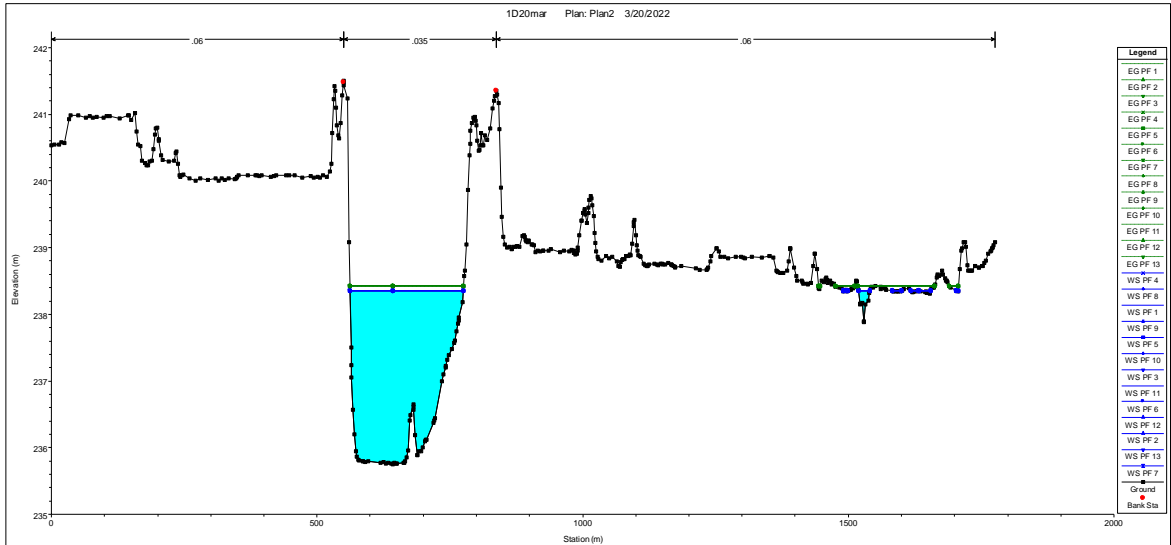
Los caudales medios anuales del Ebro están alrededor de los $170\text{m}^3/\text{s}$ y se considera un caudal normal en torno a $100\text{m}^3/\text{s}$ [16]. Los caudales de avenida pueden oscilar entre los $500\text{m}^3/\text{s}$ y los $3000\text{m}^3/\text{s}$ en situaciones extraordinarias.

Se obtienen resultados desde la sección transversal 5095 hasta la 218, en orden decreciente. La primera es la imagen de la izquierda que corresponde con la sección 5095 y la segunda es la imagen de su derecha que corresponde a la sección 4682 y así sucesivamente hasta la última sección. En se obtienen resultados para 13 secciones transversales.









En las imágenes se observa que el vaso tiene un perfil irregular. Las secciones y el fondo del río varían ampliamente de unas zonas a otras. También se pueden distinguir las motas que encauzan el río y que en algunos casos se usan como caminos. Estas motas corresponden a los puntos rojos que aparecen en cada una de las secciones. Estos encauzamientos constriñen el cauce por lo que hacen que aumente la velocidad del fluido y que a su vez aumente la erosión en el lecho del río.

También se observa cómo, aunque el agua no supera la altura de las motas, existe agua fuera del cauce, puesto que esta, por filtración, irá a rellenar las zonas más bajas del terreno, limitando por tanto la efectividad de dichas motas.

Además, entre la imagen 2 y la 4 que corresponde a la entrada del meandro, se produce un ensanchamiento del río en el que la velocidad del agua descenderá y se podrá generar un resalto hidráulico.

6.2.-Simulación hidráulica del cauce en 2D

Se ha realizado un estudio 2D del río para un caudal de avenida de $2400 \text{ m}^3/\text{s}$. Para este tipo de simulaciones el programa no trabaja por secciones transversales, sino que realiza un mallado del terreno en el que solo hay que definir una sección de entrada y otra de salida.

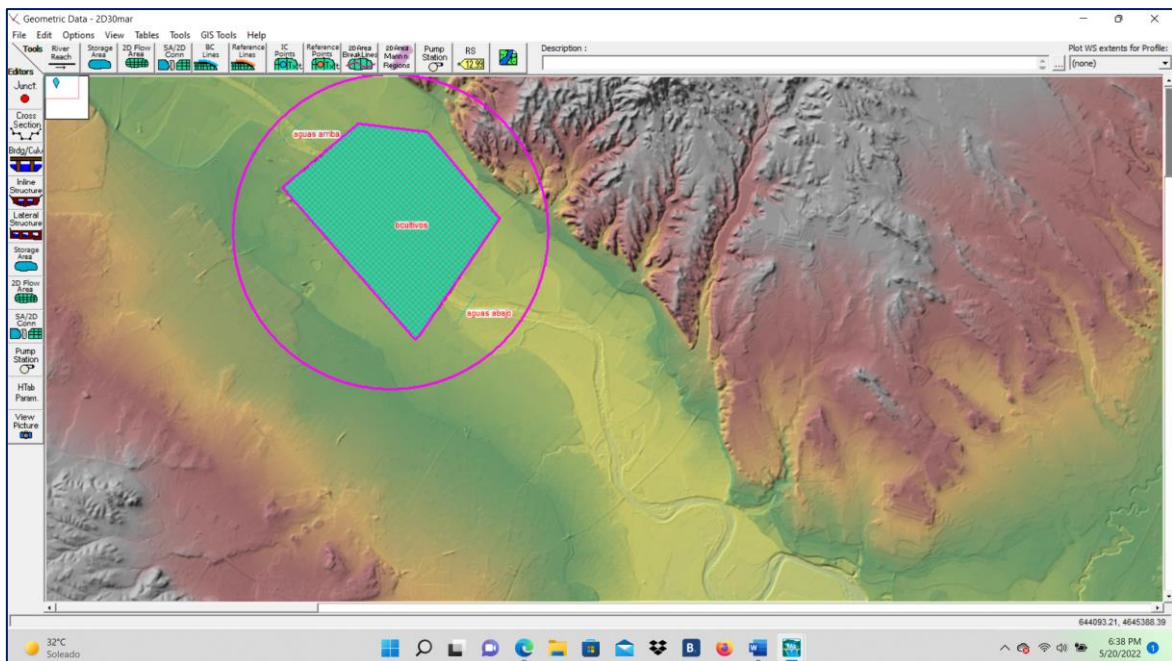


Figura 27: Visualización del mallado de la zona (Fuente: el propio Hec-Ras)

En la figura podemos observar cómo se marca el tramo del río aguas arriba que se ha considerado como entrada y, posteriormente, la zona de cultivo en la que se realizará el cambio del coeficiente de Manning. También se aprecia la sección transversal de salida aguas abajo.

6.2.1 Resultados de la inundación con n de Manning bajos (Manning 2)

Los valores del Coeficiente de Manning elegidos para esta simulación han sido los siguientes:

Tabla 1 Coeficiente n de Manning para distintos usos del suelo (Manning 2)

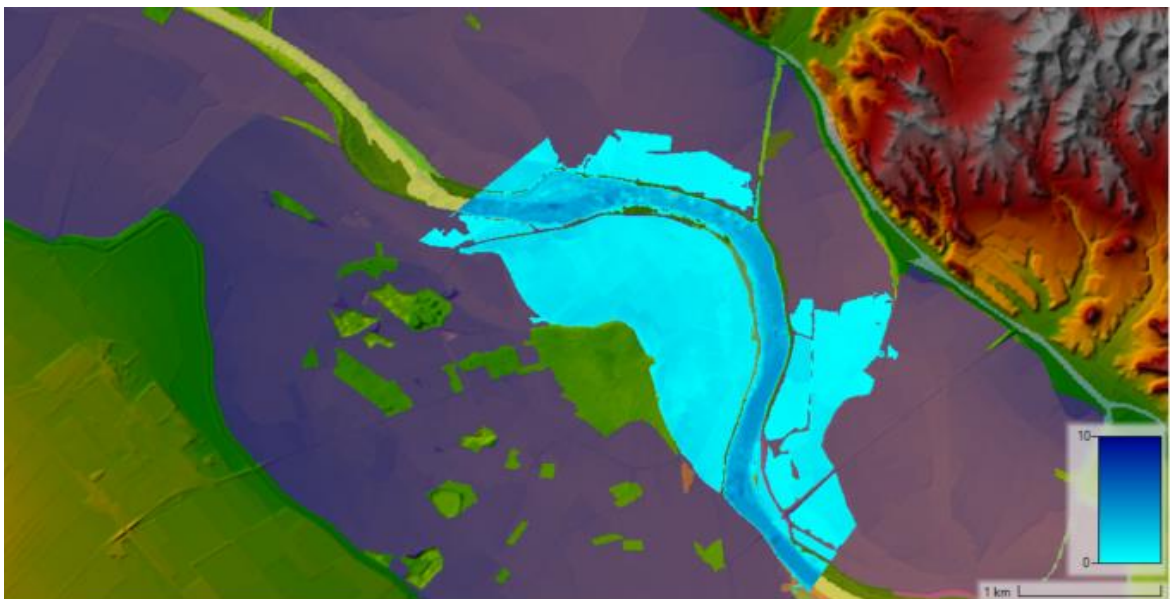
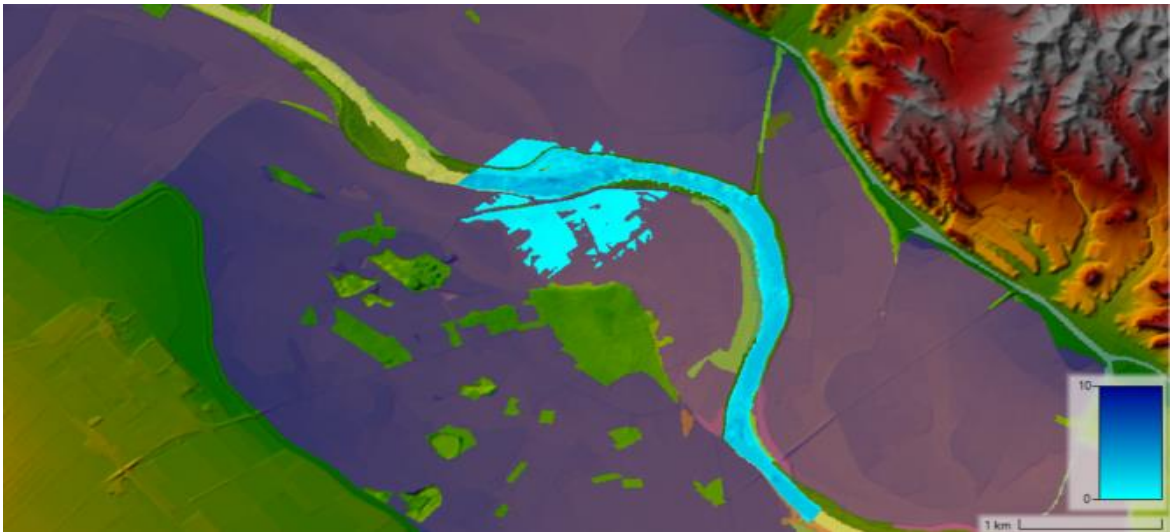
Tipo de cultivo	Coeficiente n de Manning
Otras mezclas de frondosas	0,06
Curso de agua	0,035
Cultivos herbáceos	0,04
Chopo	0,035
Pastizal	0,035
Suelo agrícola y ganadero	0,035
Tamariz	0,035
Otros pastos arbolados	0,035
Huerta	0,04
Chopo con álamos	0,035
Suelo desnudo	0,03
Cementerio	0,1

En esta sección se van a visualizar los resultados que ofrece HEC-RAS para la profundidad del agua, la altura que esta alcanza y la velocidad que adquiere.

El programa simula durante 24 horas lo que sucedería con el caudal elegido en la zona de estudio.

La primera imagen está obtenida a las 0:00 de la simulación, la segunda, a las 2:00, la tercera, a las 6:00, la cuarta corresponde al punto de máxima inundación (12:40h), la quinta corresponde a las 20:00 y la última a las 24:00.

Una leyenda muestra en diferentes niveles de azul la profundidad del agua desde 0 a 10m.



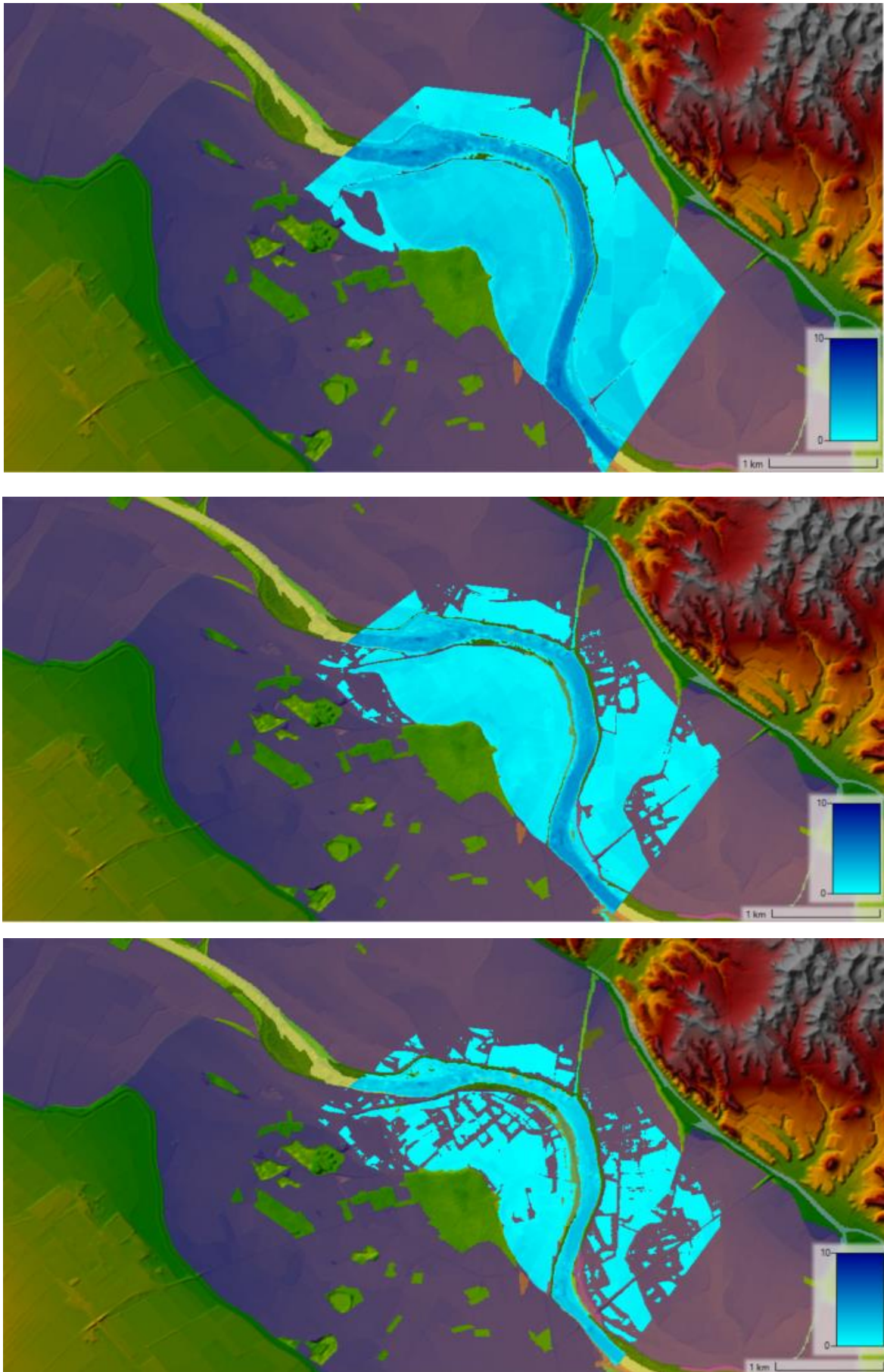


Figura 28: Visualización de la inundación (Fuente: el propio Hec-Ras)

Las tres primeras imágenes corresponden al periodo de subida de las aguas. También A partir de la cuarta imagen la riada entrará en fase de recesión, para al final quedar sólo el estancamiento residual.

Además, se puede observar como la parte que más se inunda es la zona pegada a la localidad debido a la morfología del meandro.

El cauce del río siempre mantiene la mayor profundidad del período de simulación como era de esperar.

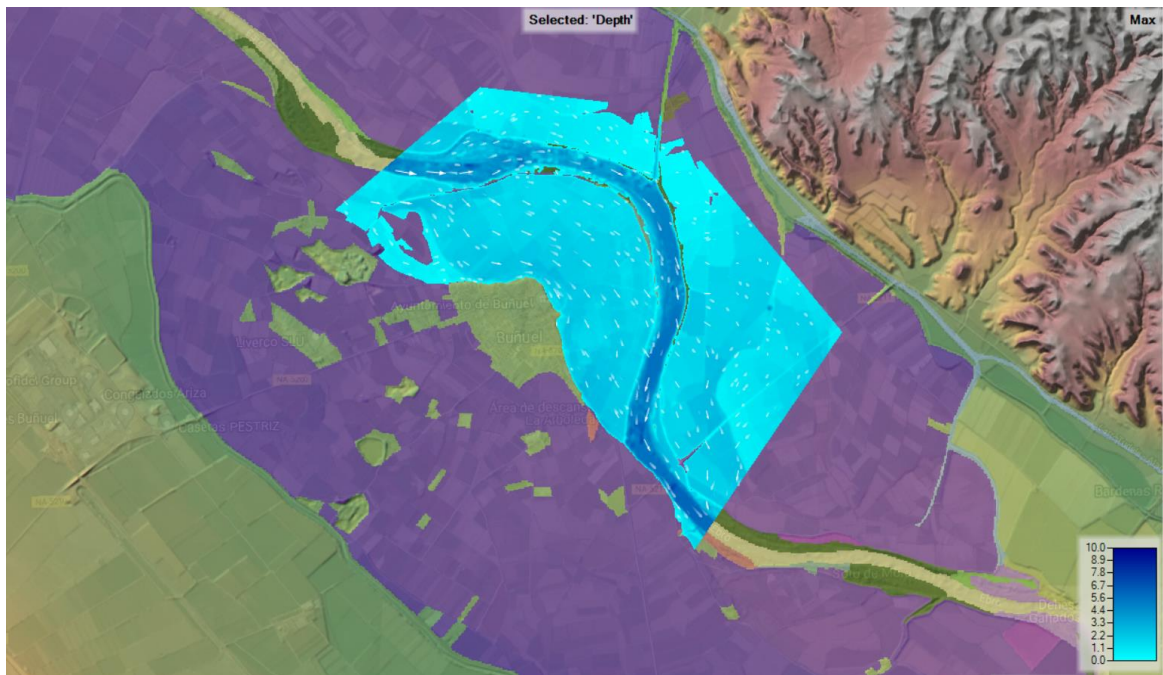
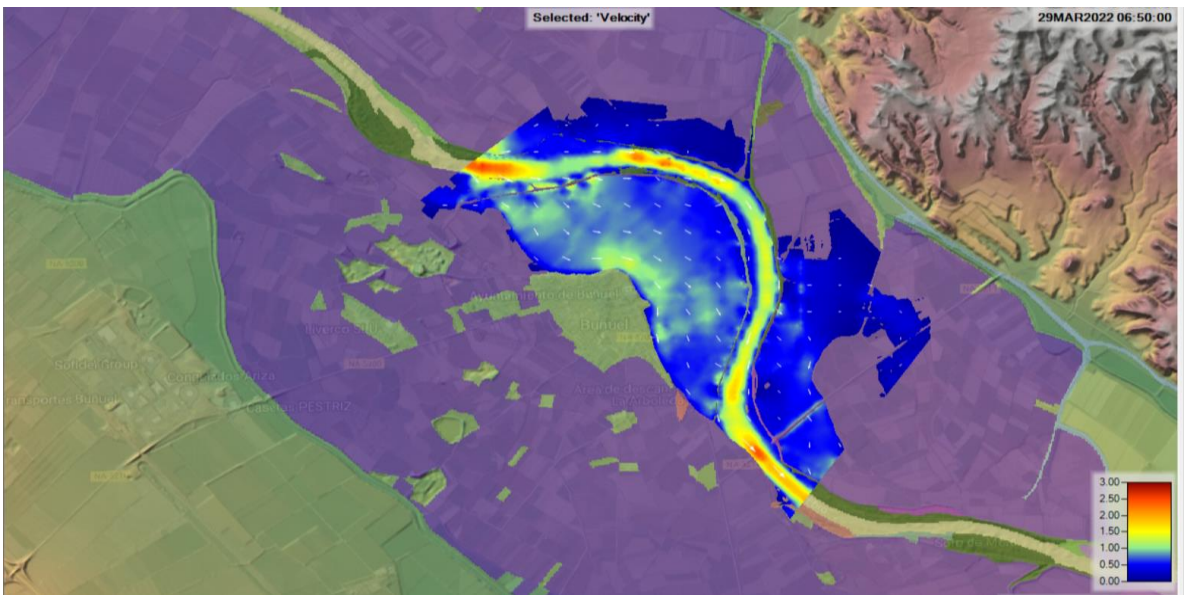
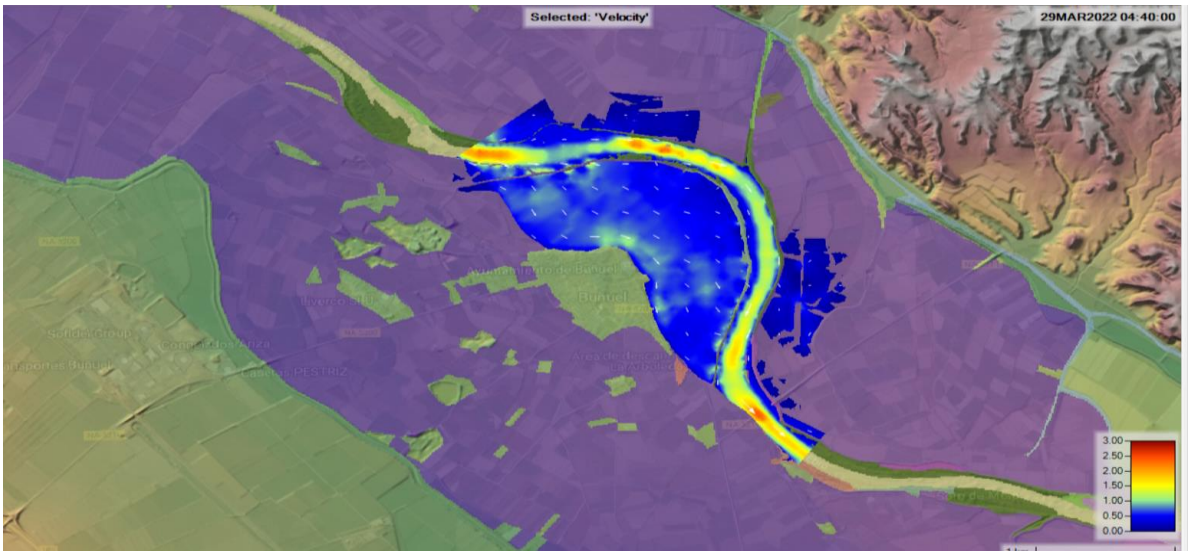
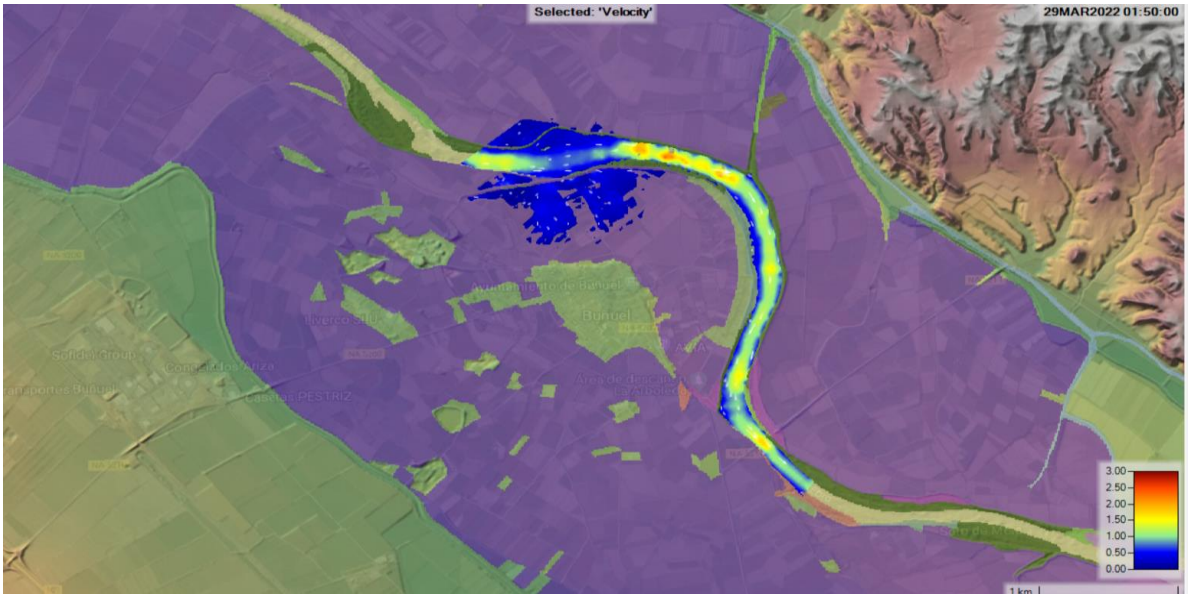


Figura 29: Visualización de las líneas de velocidad (Fuente: el propio Hec-Ras)

En esta figura se pueden visualizar los vectores velocidad. Es interesante señalar que se aprecia que dichos vectores inciden en mayor medida en la margen izquierda, por lo que es allí donde se experimenta la erosión. De la misma forma, la margen derecha es la zona de deposición de materiales.

El programa nos muestra que la profundidad del agua en el río llega a ser de 5.89 metros.

A continuación, analizaremos las imágenes que nos proporciona el Hec-Ras sobre la velocidad del agua durante la crecida.



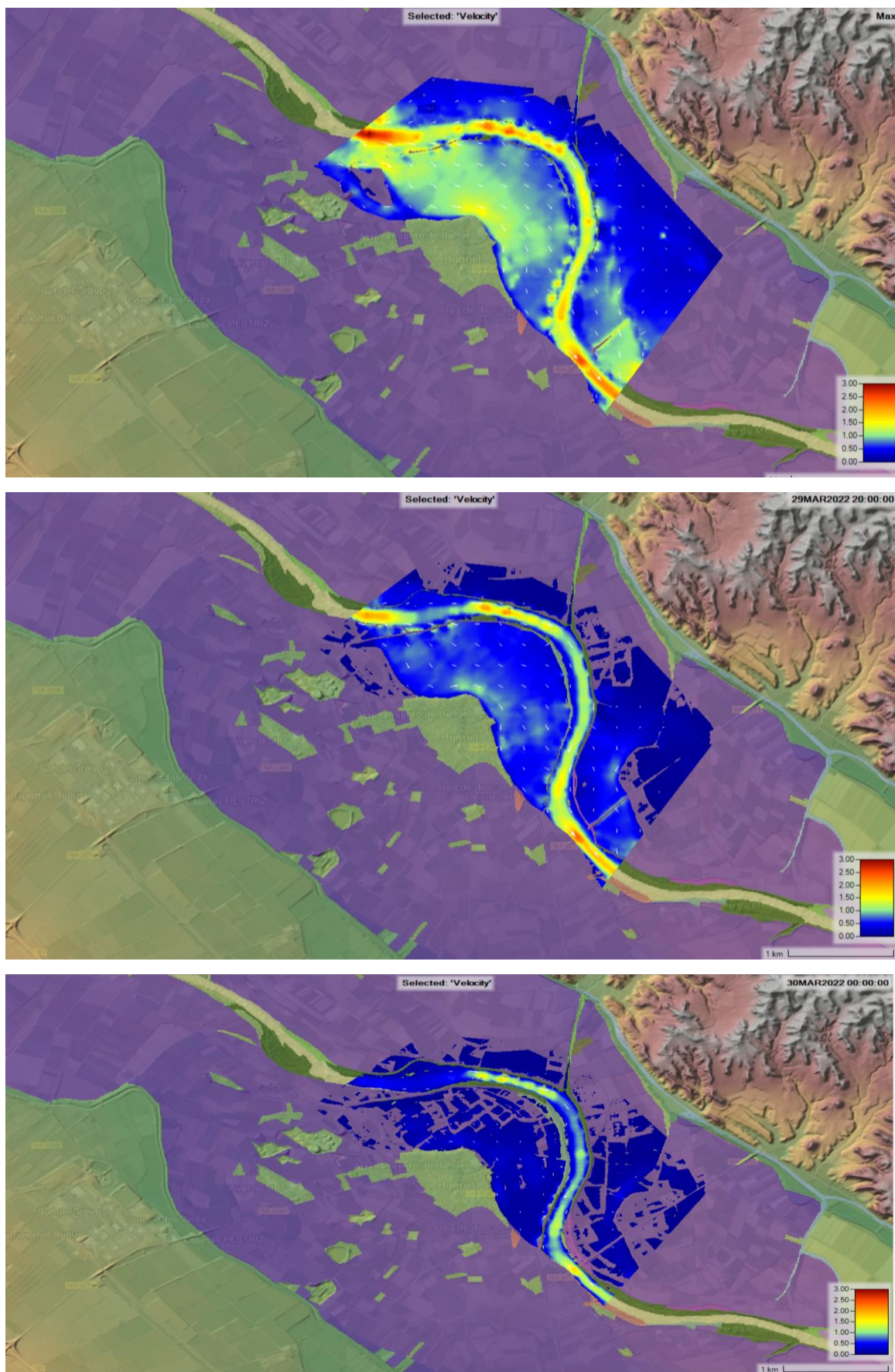


Figura 30: Visualización de la velocidad del agua (Fuente: el propio Hec-Ras)

Se ha seleccionado un rango de velocidades que va de 0 a 3 m/s. En las tres primeras imágenes se puede observar como la velocidad del agua va aumentando, llegando a alcanzar valores de 3 m/s en algunos puntos del cauce. Hay que tener en cuenta que en un río de caudal medio como este las velocidades normales no suelen sobrepasar 1 m/s. En los ríos muy caudalosos y de pendiente acentuada la velocidad del agua puede llegar hasta los 2m/s.

También se observa como en las proximidades de la localidad se pueden alcanzar velocidades entre 1 y 1,5 m/s, con el consiguiente peligro para los habitantes y sus bienes.

Se observa también que las mayores velocidades se alcanzan durante el período de inundación y que estas son más elevadas en la margen derecha.

En el comienzo del meandro se pueden llegar a alcanzar los 2,6m/s mientras que al final de este la velocidad disminuye.

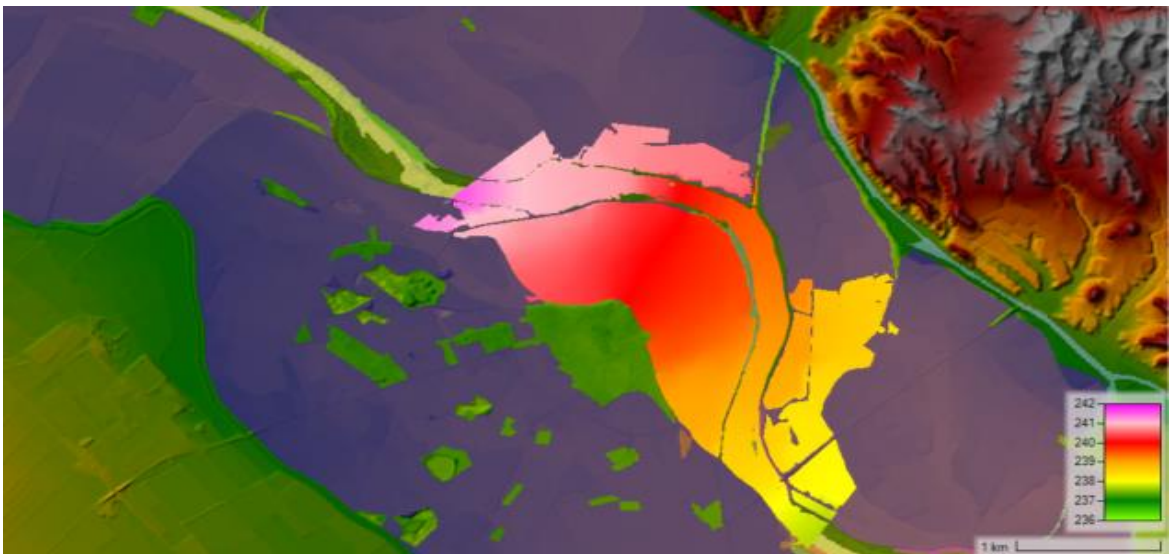
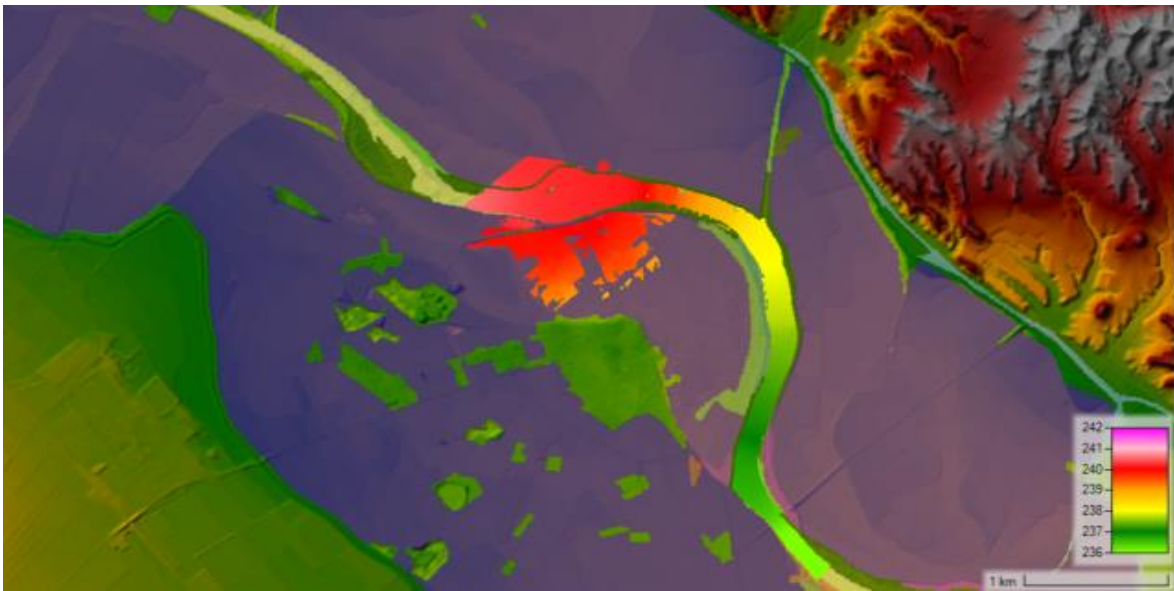
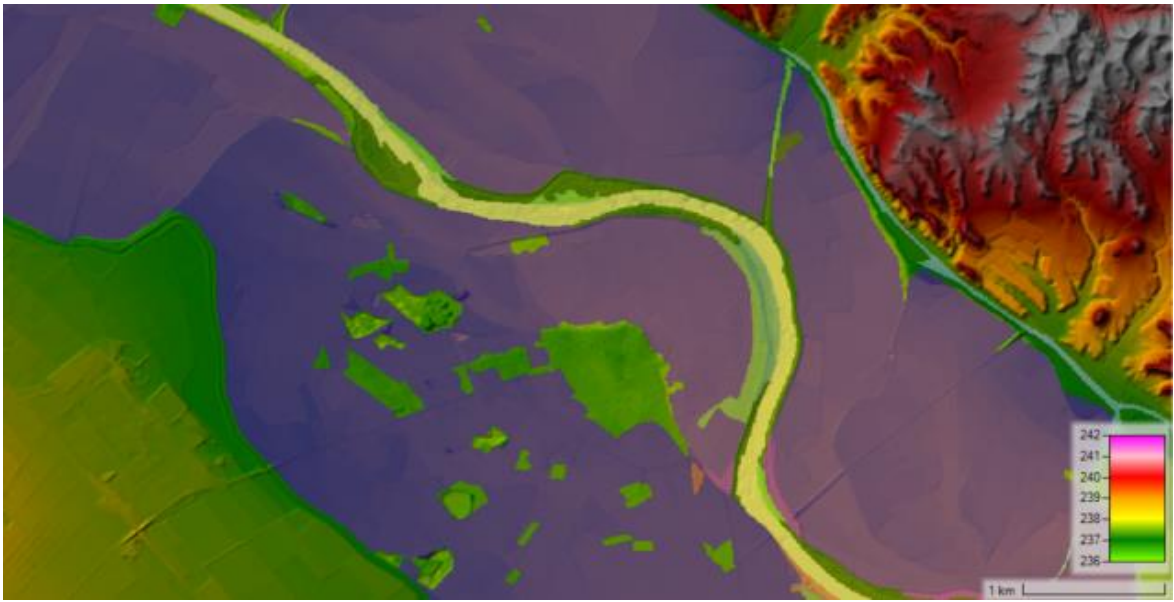
Desde el comienzo de la inundación se aprecia una zona al principio del meandro en la que la velocidad del agua disminuye rápidamente, pasando el fluido de régimen supercrítico a subcrítico. Se podría pensar que es esa zona se va a producir un efecto de resalto hidráulico, y que esa vuelta del agua hacia atrás podría ser un factor que favoreciera que el río se desbordara por esa zona.



Figura 31: Visualización de la velocidad del agua (Fuente: el propio Hec-Ras)

En la imagen vemos como la curva a la entrada del meandro puede hacer que el agua disminuya su velocidad y se produzca el efecto de resalto hidráulico.

De manera análoga se analizarán los resultados relativos a la altura del agua, entendida esta como altura sobre el nivel del mar.



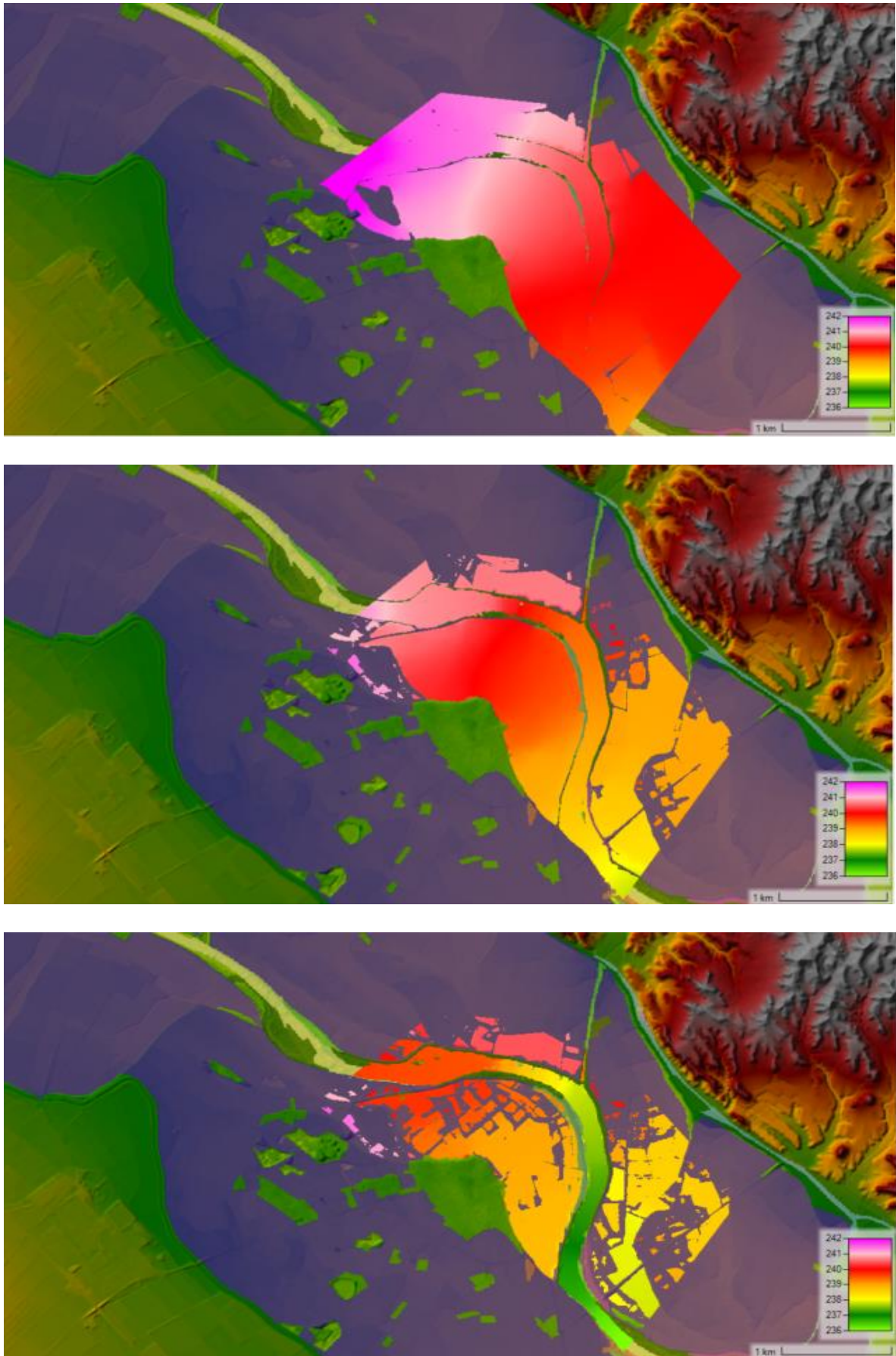


Figura 32: Resultados de la altura de la simulación 2-D con Manning bajo (Fuente: el propio Hec-Ras)

En las siguientes imágenes se observa la leyenda que marca una altura que varía desde los 236 metros representado por el color verde hasta una altura de 242 metros en color morado. Al comienzo de la simulación observamos como el cauce del río aumenta de altura aguas arriba con 240 metros y por esa razón se comienza a desbordar al principio del tramo. Esto tiene sentido ya que las motas como se explica en anterioridad tienen una altura de 2 a 3 metros.

6.2-2.- Resultados de la inundación con n de Manning altos (Manning 11)

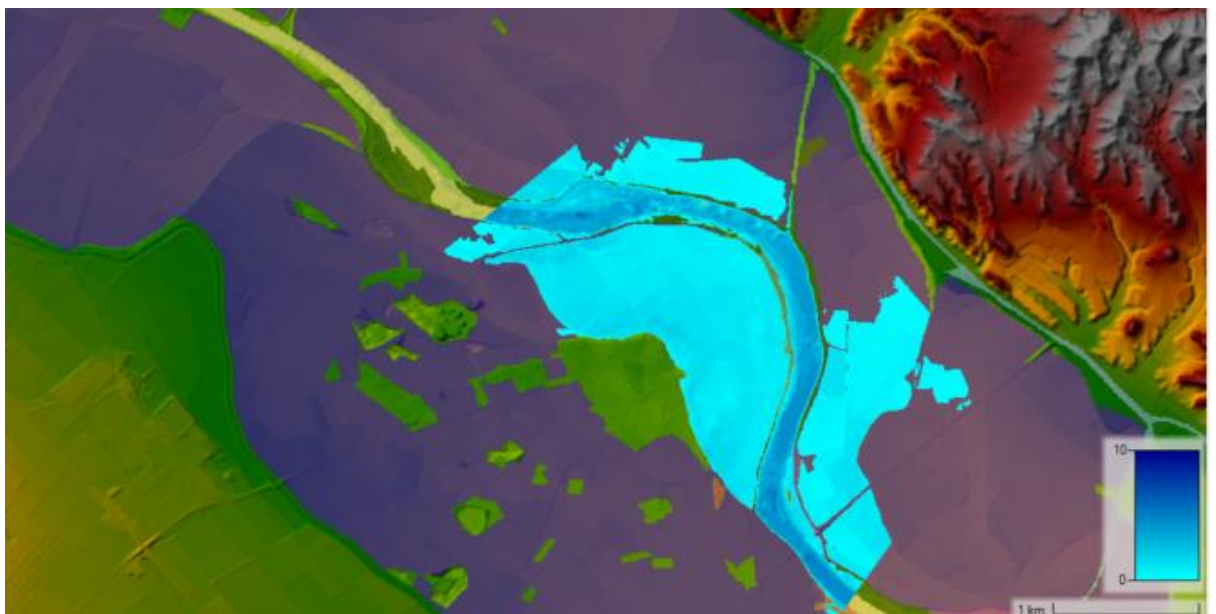
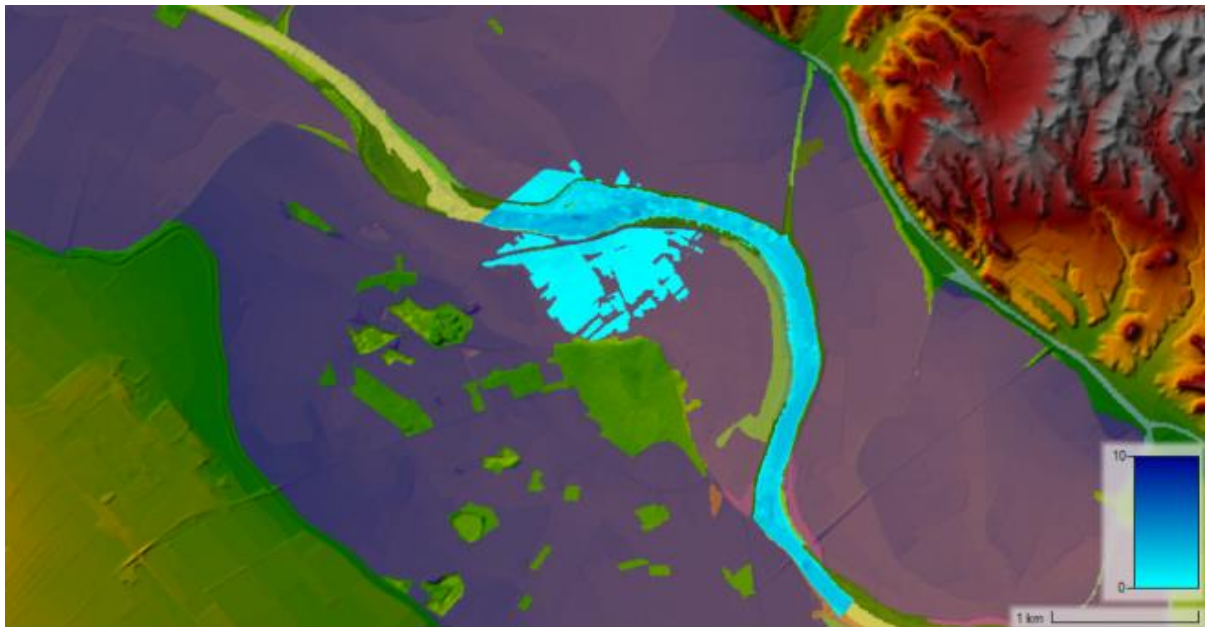
Al igual que la simulación anterior se van a obtener y analizar los resultados que nos ofrece HEC-RAS relativos a la profundidad del agua, la velocidad y la altura del agua sobre el nivel del mar.

Esta también simula durante 24 horas lo que sucederá con el caudal elegido en la zona de inundación. El orden y momento de las capturas de HEC-RAS será el mismo que en el apartado anterior.

Tabla 2: Coeficiente n de Manning para distintos usos del suelo (Manning 11)

Tipo de cultivo	Coeficiente n de Manning
Otras mezclas de frondosas	0,07
Curso de agua	0,04
Cultivos herbáceos	0,04
Chopo	0,07
Pastizal	0,035
Suelo agrícola y ganadero	0,035
Tamariz	0,07
Otros pastos arbolados	0,07
Huerta	0,04
Chopo con álamos	0,06
Suelo desnudo	0,03
Cementerio	0,1

Comenzamos analizando la profundidad del agua. La primera imagen está obtenida a las 0:00 de la simulación, la segunda, a las 2:00, la tercera, a las 6:00, la cuarta corresponde al punto de máxima inundación (12:40h), la quinta corresponde a las 20:00 y la última a las 24:00.



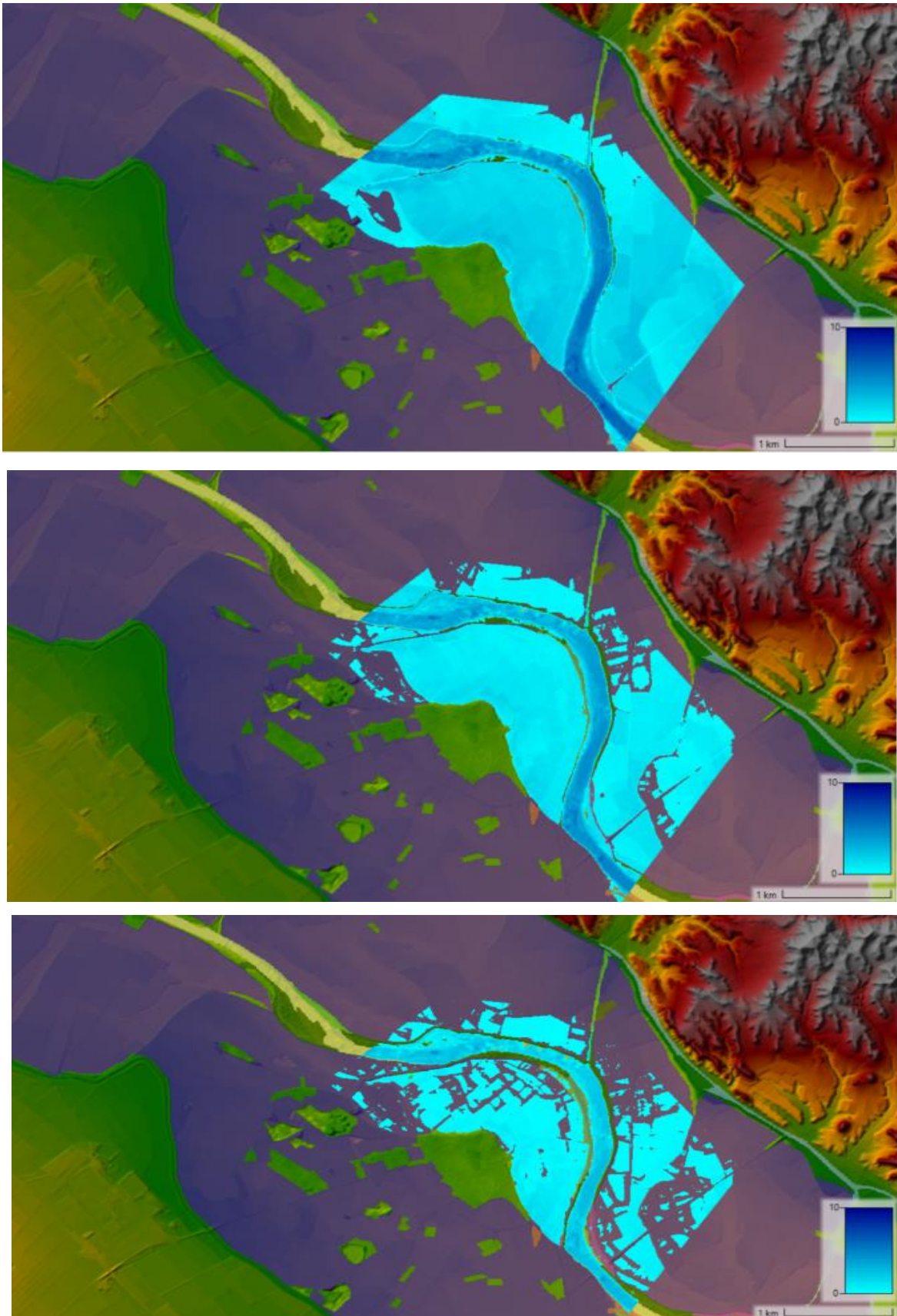


Figura 33: Resultados de la altura de la simulación 2-D con Manning alto. (Fuente: el propio Hec-Ras)

Se mantienen los mismos valores para construir la leyenda.

Si se observa la figura 4 y se compara con la imagen análoga, cuando la simulación se hacía con los valores de Manning bajos, vemos que ahora la inundación es mayor. Observamos pequeñas zonas a ambos lados del río que antes no se inundaban y ahora sí lo hacen.

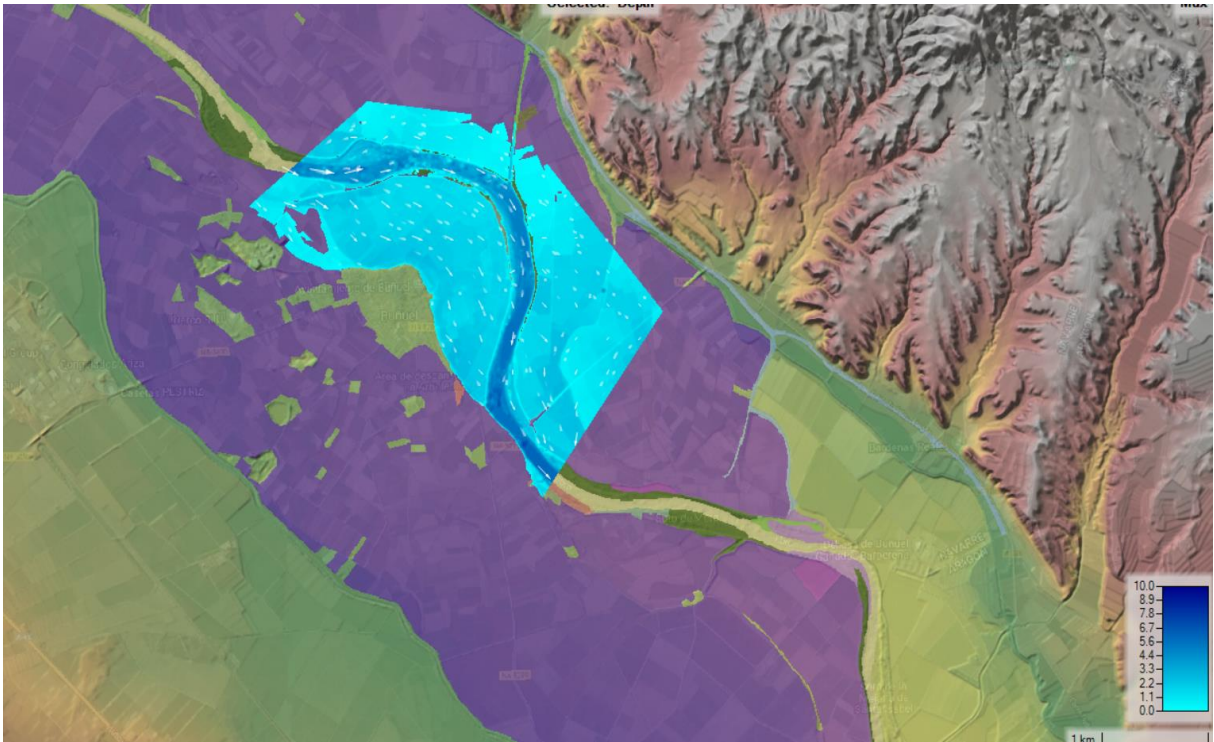
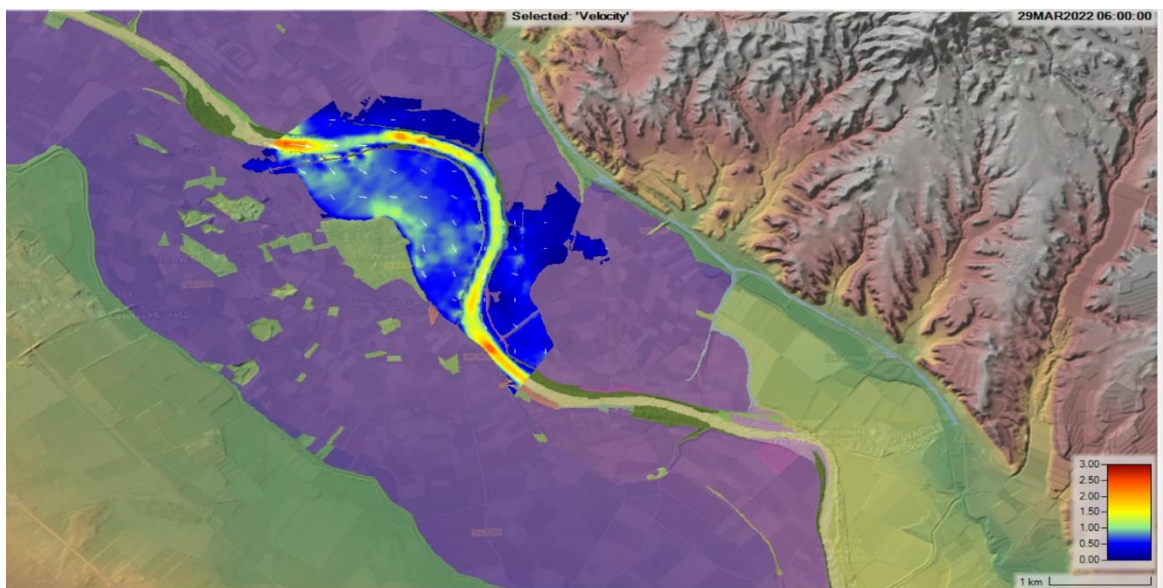
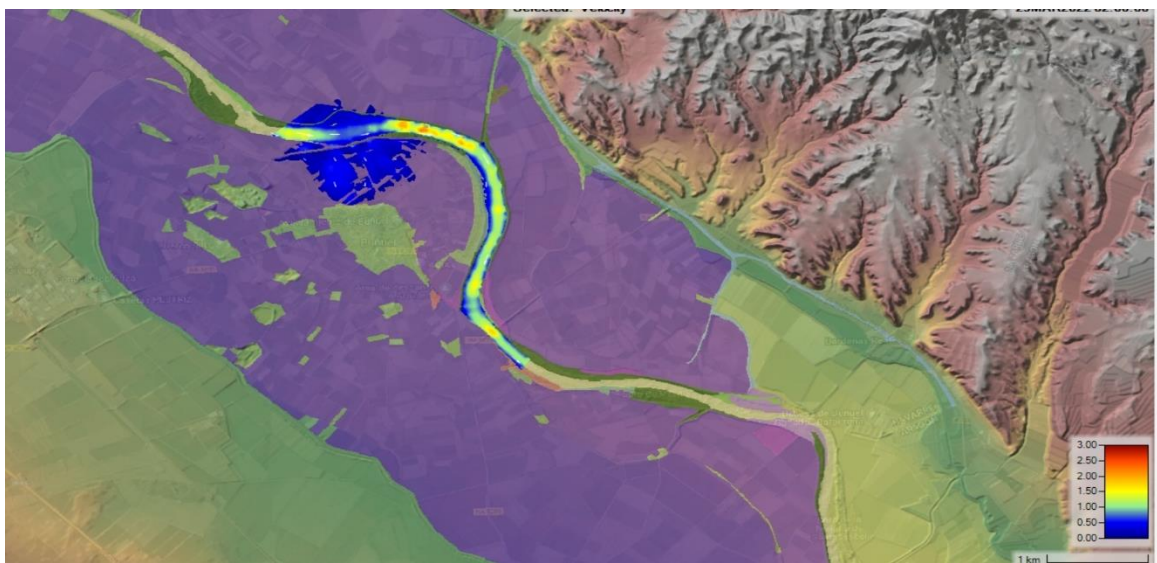
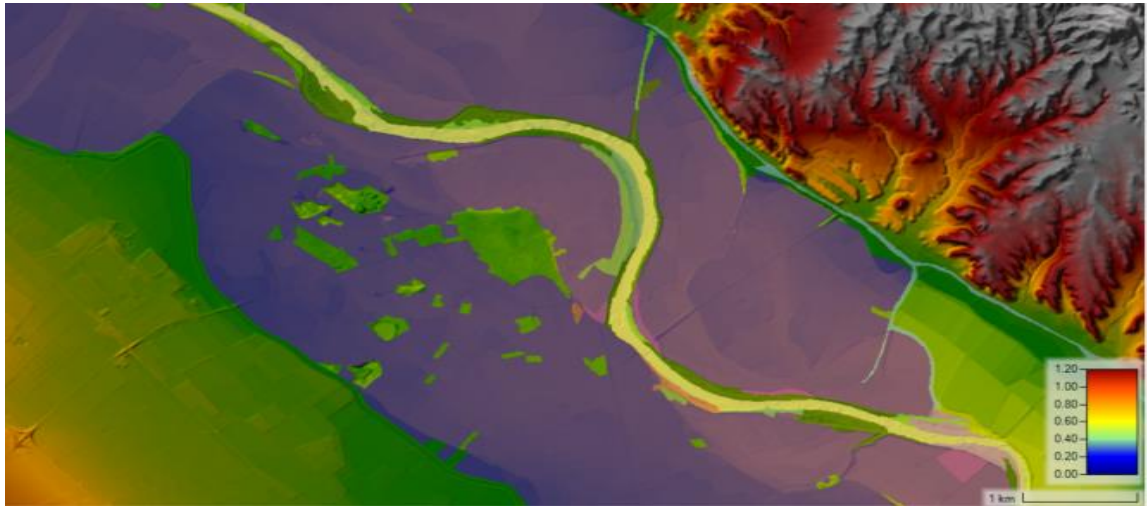


Figura 34: Resultados de la altura de la simulación 2-D con Manning altos (Fuente: el propio Hec-Ras)

En la figura vemos como los vectores de velocidad son mayores por lo que la erosión de la margen izquierda es mayor. Lógicamente, también será mayor la deposición de materiales en la margen derecha.

A continuación, analizaremos las imágenes que nos proporciona el Hec-Ras sobre la velocidad del agua con el coeficiente de Manning elevado.



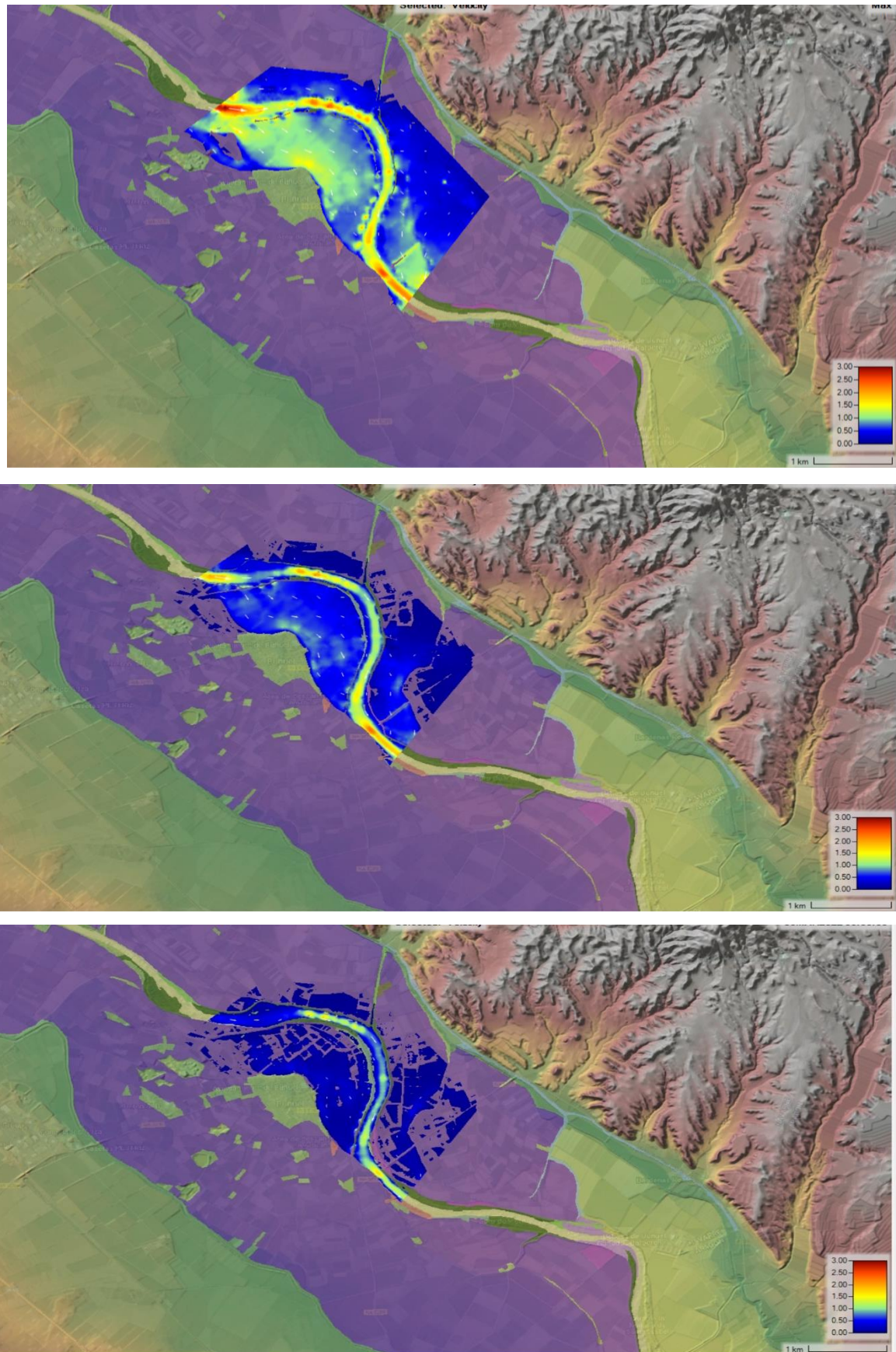
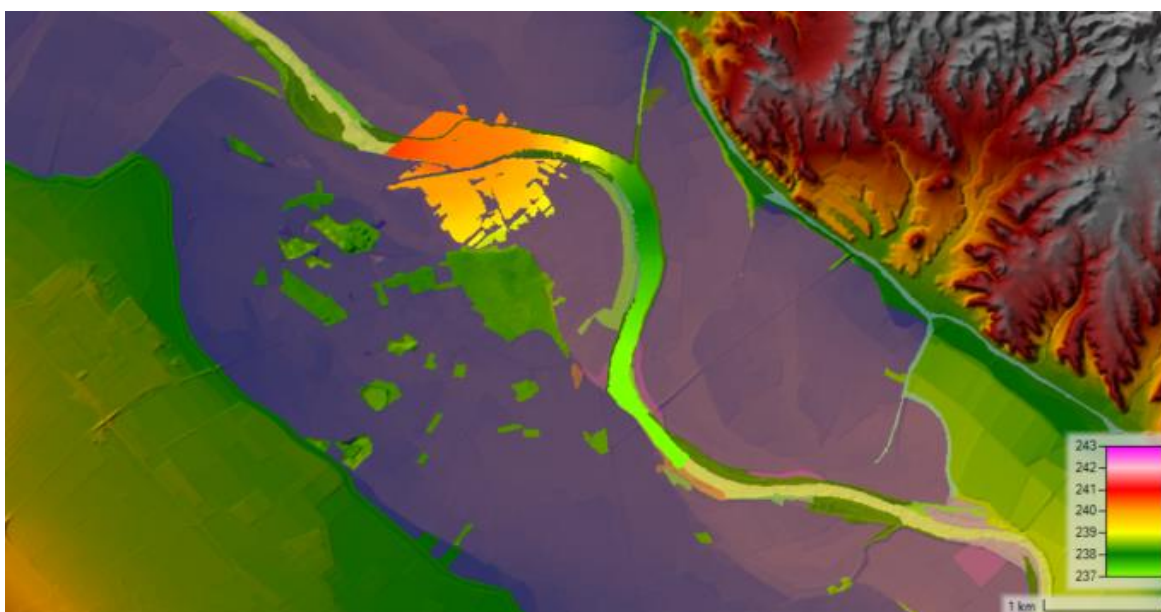
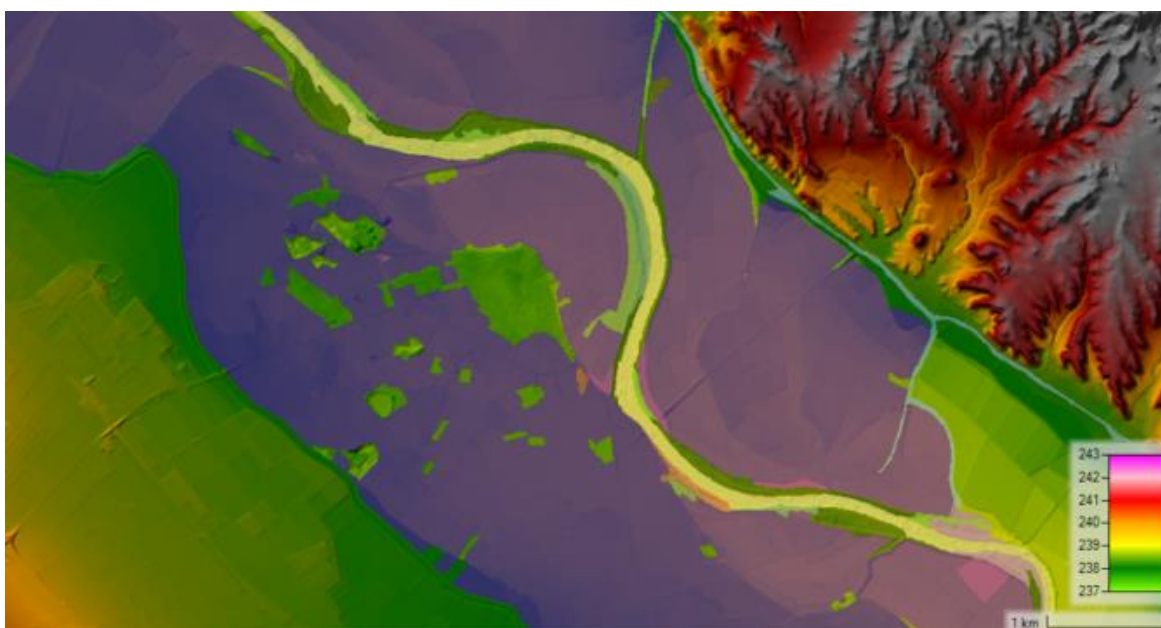
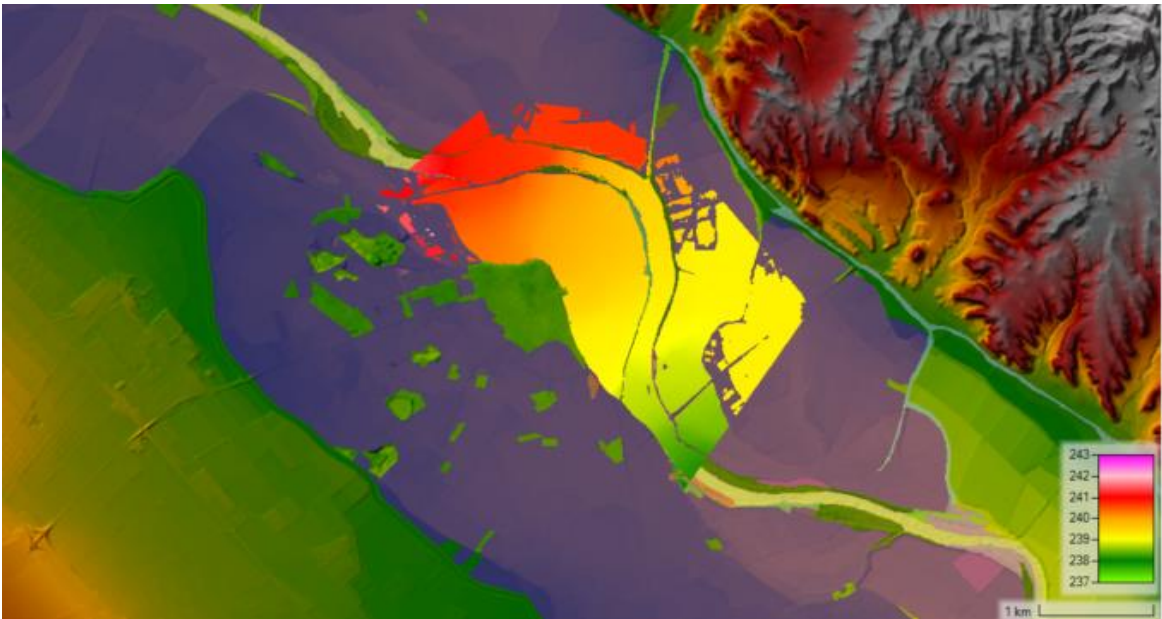
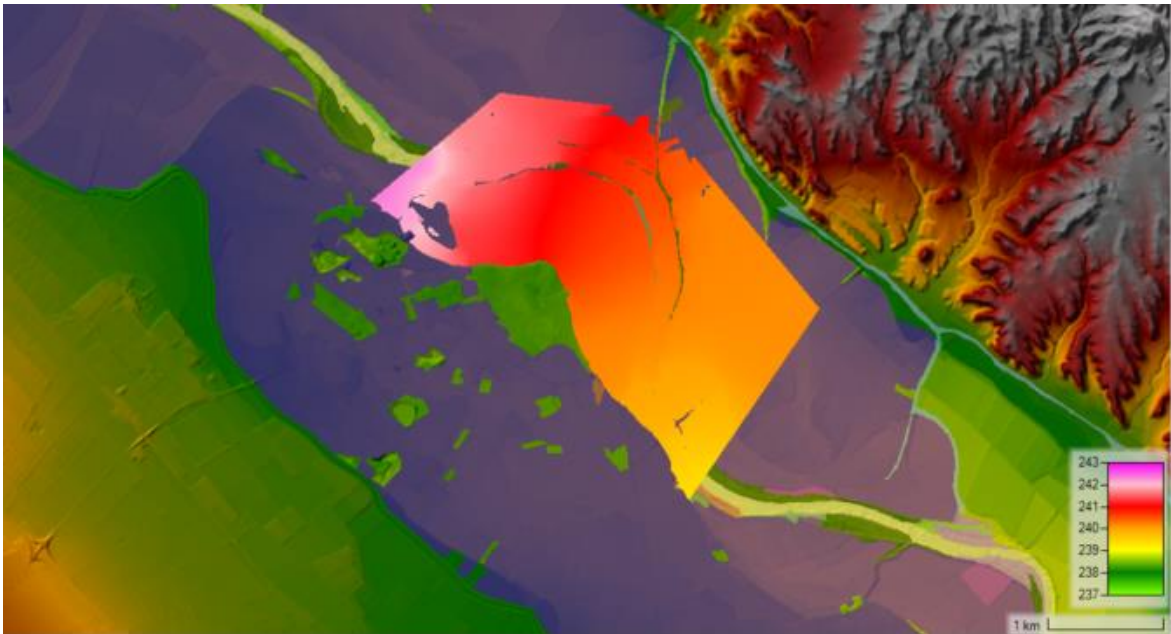
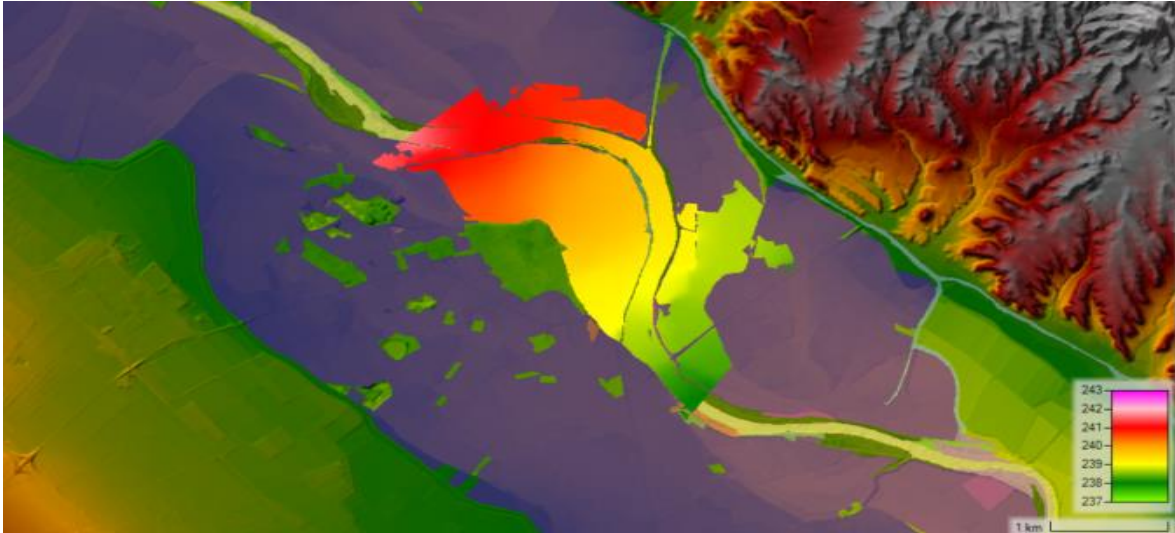


Figura 35: Resultados de la velocidad de la simulación 2-D con Manning altos. (Fuente: el propio Hec-Ras)

Las mayores velocidades las lleva el cauce con 2,6 m/s. Igualmente, la velocidad en la zona cercana a la localidad disminuye en dirección aguas abajo, en cambio en la zona contraria es al revés en aguas abajo tiene mayor velocidad, esto se explica por la morfología del meandro.

Del mismo modo, vamos a analizar ahora las imágenes del HEC-RAS estudiando el parámetro de altura sobre el nivel del mar.





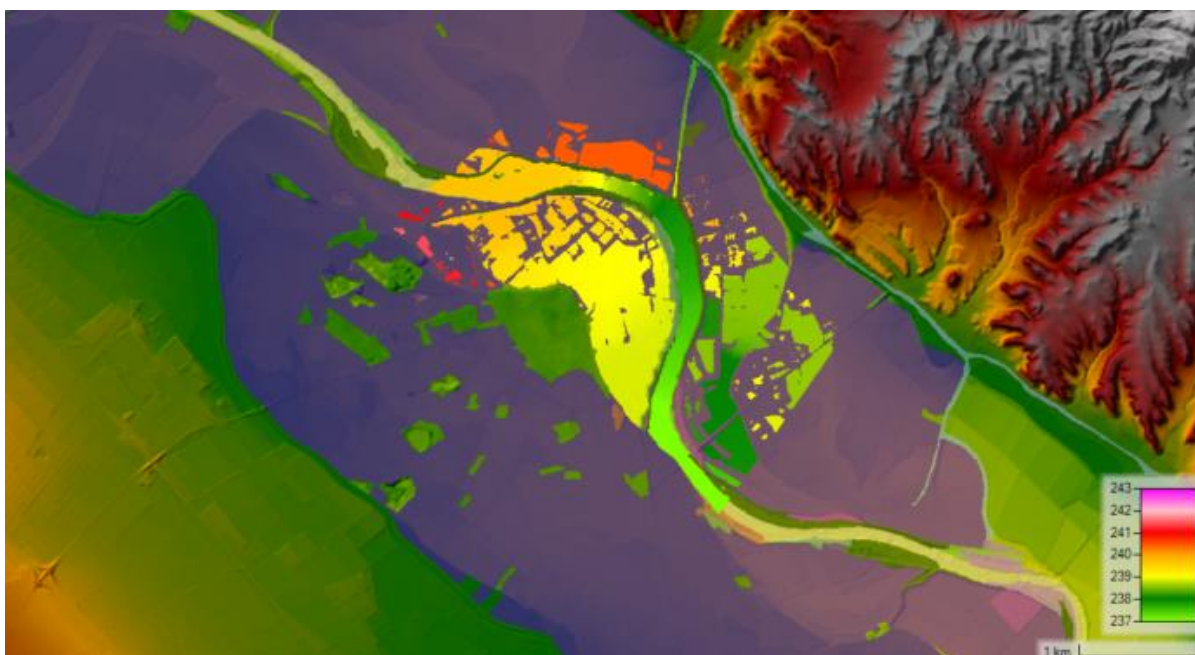


Figura 36: Resultados de la altura de la simulación 2-D con Manning altos (Fuente: el propio Hec-Ras)

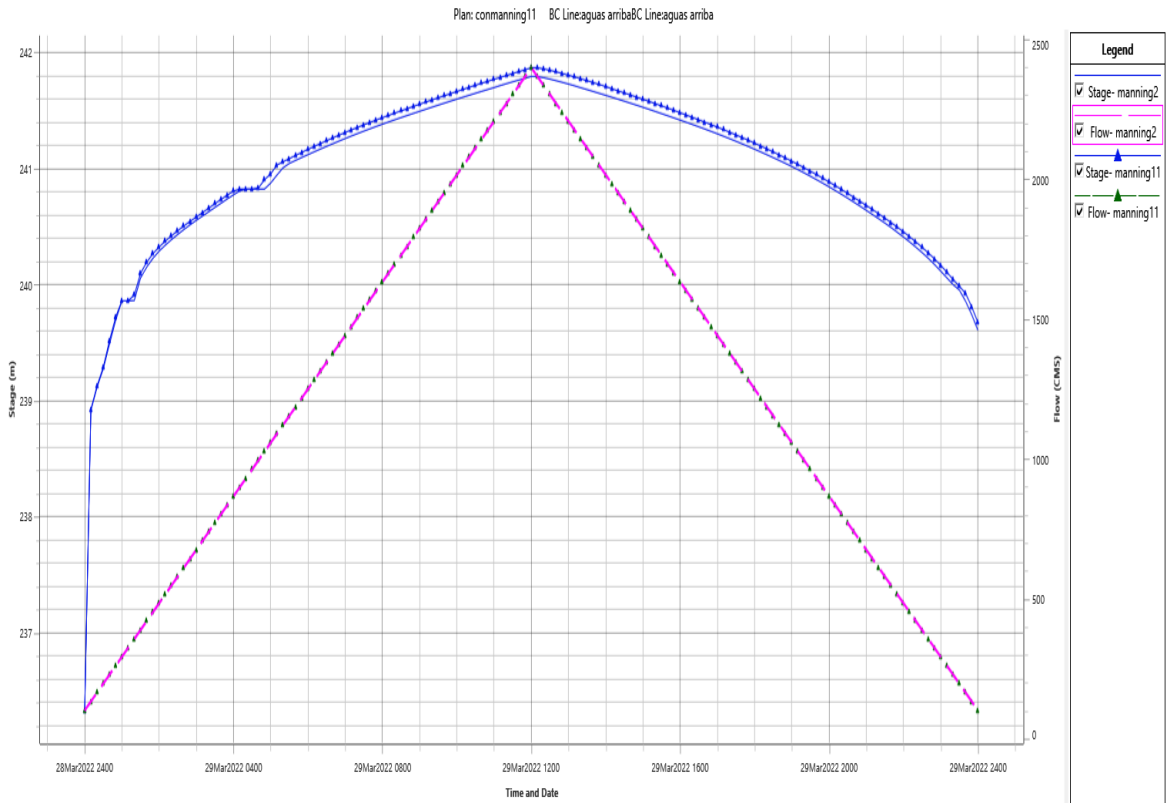
Siguiendo el patrón de la simulación anterior la leyenda de las imágenes va de una altura de 237 metros representada por el color verde a una altura de 243 metros con el color morado.

En lo que respecta a la simulación, no se aprecian cambios significativos entre las situaciones con n de Manning diferentes. Esta es la razón por la que se va a recurrir a las gráficas que suministra el programa, ya que tal vez, de esta forma se puedan apreciar algunas diferencias.

6.2.3 Resultados relativos a la comparación entre los dos valores de Manning

Como ya se ha dicho, se va a intentar buscar las diferencias más allá de la sensación visual que la simulación puede ofrecer.

Si analizamos la altura que alcanza el río aguas arriba para los dos valores de coeficiente n de Manning obtenemos la siguiente gráfica.



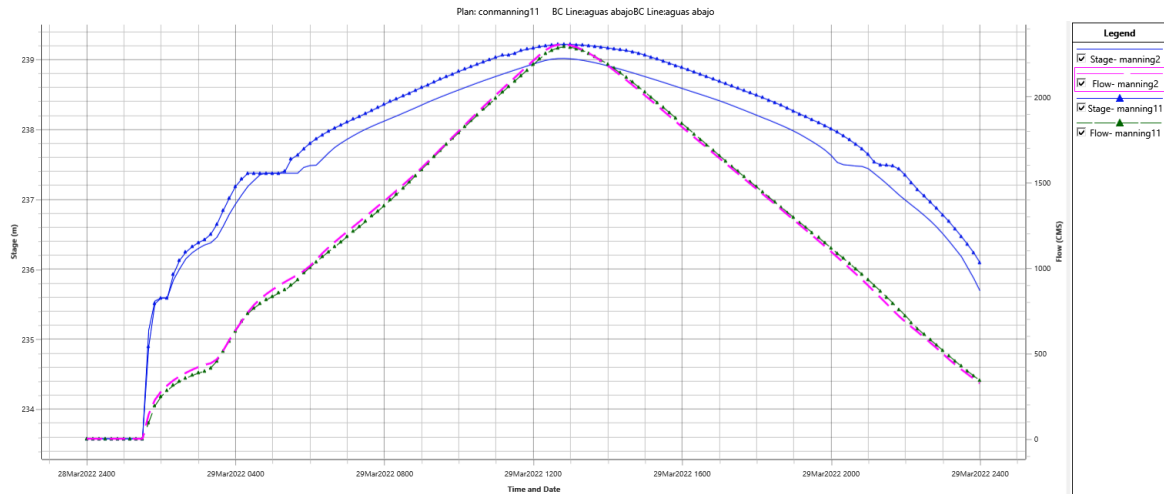
Gráfica 2: Gráfica de altura frente a tiempo en aguas arriba con Manning alto.

En la gráfica se ve que hay poca diferencia aguas arriba entre tener un cauce con mucha rugosidad o con poca, lo cual es lógico ya que el agua, en realidad, todavía no ha pasado por la zona en la se han variado los valores de Manning.

Tabla 3: Valores de altura de agua y de caudal aguas arriba

	Altura del agua	Caudal
Manning 11	241,87	2400
Manning 2	241,80	2400

Si se realiza la misma gráfica aguas abajo, obtenemos la gráfica siguiente:



Gráfica 3: Gráfica de altura frente a tiempo en aguas abajo con Manning alto.

En esta gráfica se aprecia ya una diferencia notable en la altura del agua.

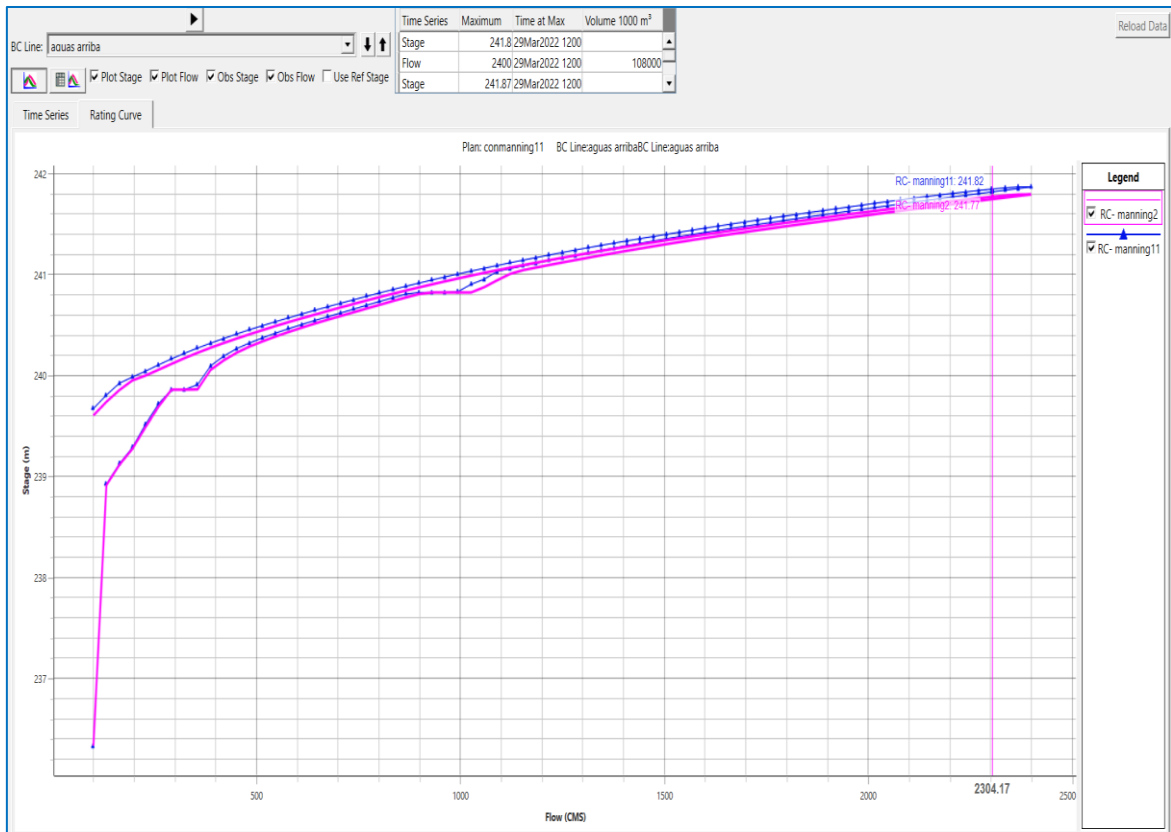
Tabla 4: Valores de altura de agua y de caudal aguas abajo

	Altura del agua	Caudal
Manning 11	239,22	2290,92
Manning 2	239,02	2302,6

En la tabla se ve como la diferencia de alturas es de 0,2 m. Aunque a priori no parezca una diferencia importante, en realidad es que esos 20 cm pueden representar que el agua entre a una casa o no.

Se pueden obtener también las gráficas que representan la altura del agua en las dos situaciones tanto en la fase de crecida como en la fase de decrecimiento. En color azul tenemos los valores mayores del coeficiente de Manning y en color morado tenemos los valores menores.

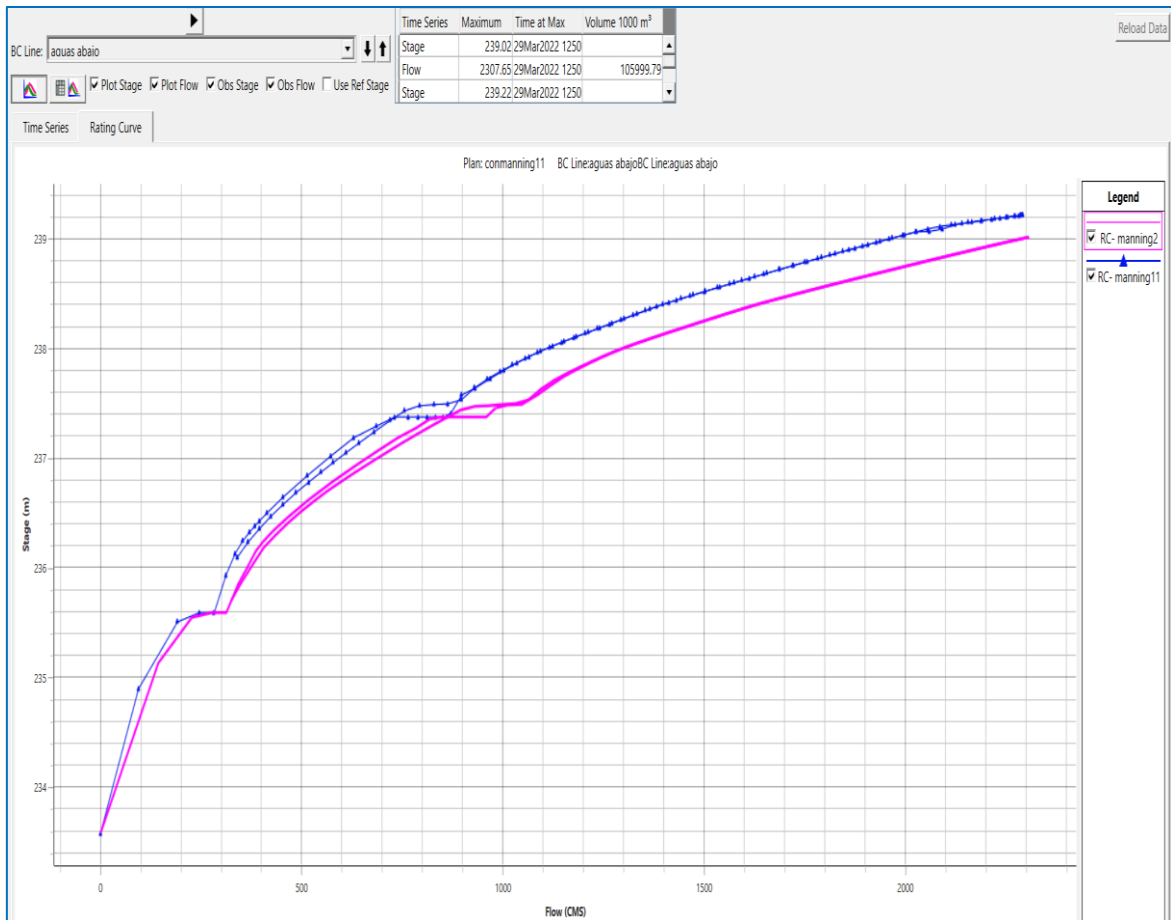
Si se busca el perfil de subida aguas arriba, se obtiene la gráfica que aparece a continuación.



Gráfica 4: Gráfica de altura frente a tiempo en aguas abajo con Manning alto.

Vemos que, aguas arriba, no hay mucha diferencia entre el patrón de subida y el de bajada del agua. Esto tiene sentido ya que como explicamos en el *Problema del Ebro*, una característica de este río es que en sus crecidas la curva de subida y bajada suele ser la misma. Sin embargo, si se nota diferencia cuando se observa la situación con Manning 2, ya que el agua alcanza alturas menores. Además, se puede decir que el retorno no ha terminado por lo que podemos sospechar que será más lento, ya que no terminan en el mismo punto.

En el caso del patrón de subida y bajada del agua, aguas abajo, los resultados se observan en la gráfica siguiente.



Gráfica 5.: Gráfica de altura frente a tiempo en aguas abajo con Manning alto.

La diferencia que observamos es que la de menor valor de Manning no sube hasta 239 metros, sino que se queda en 238'8 metros, es decir, cambiando el coeficiente se ha conseguido disminuir 20 cm de altura. Por lo que observamos las curvaturas son iguales, pero en la de menor valor de Manning al, tener 20 cm menos, se suceden antes los cambios de pendiente porque se empieza a notar el cambio de Manning de manera paulatina.

7.- CONCLUSIONES

En este trabajo se han extraído las siguientes conclusiones:

- Las inundaciones son un fenómeno complejo que depende de múltiples factores.

Pues se ha visto que depende no sólo de los factores meteorológicos e hidrológicos sino que también de la relación humana con el río, ya que la construcción de obras ingenieriles como mecanismo de defensa o a modo de control para poder ganar terreno han aumentado el daño producido a la sociedad y al río agravando la situación en tiempos de avenida. Consecuentemente esto nos ha llevado al nuevo paradigma con que se trabaja hoy en día de restauración fluvial. También el factor humano afecta ya que la capacidad de respuesta es clave.

- Las inundaciones suponen un mecanismo natural de la dinámica fluvial y contribuyen a que el río regule su funcionamiento.

Con anterioridad se relacionaba las inundaciones con algo negativo pero después de numerosos estudios se ha colaborado que las inundaciones son positivas y fundamentales para realizar procesos naturales imprescindibles para el sistema fluvial y sus ecosistemas asociados. Algunos ejemplos son: rellenar los acuíferos y aguas superficiales, nutrir el suelo y los sotos de las orillas, reparto de sedimento, entre otros. La nueva estrategia parte de una educación en el riesgo y la necesidad de convivir con los mismos e intentar mitigar los efectos de estas mediante la ordenación del territorio como dicta la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos.

- Los sistemas de contención mediante estructuras hidráulicas se han revelado insuficientes en el control de las inundaciones.

Aunque es cierto que se han evitado inundaciones generalizadas con estos sistemas, se ha agravado la situación en los puntos desprotegidos donde la fuerza de corriente de avenida ha originado penetraciones importantes en la llanura de inundación. Estas obras han alterado la tendencia natural de la corriente fluvial, de manera que el cauce no puede construir la curva ideal a la que tendería para compensar la energía sobrante en tiempos de avenida, lo que provoca en muchas ocasiones el choque perpendicular de las aguas contra la defensa, rompiéndola. En ocasiones agravando el riesgo en la inundación. Por lo

que no sólo son insuficientes, también son peligrosos. Además nos dan una falsa seguridad.

- El software HEC-RAS permite modelizar el cauce de un río en 1D.

Esto nos permite realizar simulaciones hidráulicas para generar modelos de inundación, a fin de analizar los efectos ante episodios de crecidas extraordinarias e incluso introducir hidrogramas con distintos tiempo base para obtener cuál es el más característico. En este caso las simulaciones se realizaron de 24 horas pero se puede aumentar el tiempo lo que posiblemente nos daría valores más relevantes. También se pueden analizar hidrogramas de anteriores crecidas y comprobar que la llanura de inundación de la situación real coincide de manera aproximada con la de HEC-RAS y si no es así investigar que pudo no tenerse en cuenta. Además, con la predicción meteorológica cada vez más avanzada se puede predecir y simular hidrogramas para poderse aproximar a la situación real y prevenir daños.

- La modelización 1D suministra información sobre la geometría del vaso y la del terreno adyacente.

Esto se consigue con la función cross-section de HEC-RAS que son secciones transversales que se colocan a lo largo del eje del río, siempre buscando la perpendicularidad de estas respecto a la dirección del flujo para cumplir la hipótesis básica de unidimensionalidad. Se pueden colocar cuantas se quiera. En este trabajo se han colocado 13 y hemos podido analizar las diferentes irregularidades que presentaban el Ebro.

- La modelización 1D permite señalar las zonas del río en el que este circula más constreñido mediante.

Podemos observar en muchas de ellas como es insuficiente el espacio que deja las motas en el tramo escogido del Ebro e incluso decir que donde más constreñido esta es donde primero desborda. Por otro lado, el agua se filtra o desborda con caudales bajos, verificando que el río sufre por falta de espacio

fluvial. En este trabajo no se ha estudiado, pero se puede adivinar que, con el retranqueo de motas, los riesgos de inundación disminuyen. Esto se debe al espacio que se le da al río para gastar esa energía de más que lleva el agua. Por lo que se confirma que darle espacio fluvial al río es una medida adecuada.

Por lo que podemos decir que en este trabajo se verifica los efectos negativos que suceden al constreñir el río.

- En las zonas en las que el vaso es más estrecho, el agua alcanza velocidades mayores.

Esto se puede explicar con la conservación de energía ya que para mantener la energía potencial del fluido la cinética aumenta, y al estrecharse disminuye la sección por lo que aumenta su velocidad. En el estudio que se ha hecho de la velocidad y del cambio del coeficiente de Manning se observa también como influye la rugosidad del suelo en la conservación de la energía ya que si vamos a la figura 30 imagen 6, de menor Manning se visualiza como al final de la simulación las aguas tiene mayor velocidad que en la Figura 35 imagen 6, de mayor Manning. Esto se debe a que el flujo disipa mayor energía cuanto mayor fricción encuentre, en este caso cuanto mayor Manning.

- El software HEC-RAS permite identificar las zonas en las que se puede producir un potencial efecto resalto hidráulico.

En la Figura 30 y 35 se observa como el agua disminuye la velocidad en la primera curva por lo que podemos hablar de un cambio de régimen supercrítico (rápido) a régimen subcrítico (lento) y esto tiene lugar gracias a un resalto hidráulico que actúa como disipador natural de energía.

- El software HEC-RAS permite adivinar las zonas donde se va a producir mayor erosión y aquellas en las que se van a depositar materiales.

Gracias a esto se puede mejorar el estado del río aportando sedimentos para paliar el déficit al que se ha estado sometiendo al río siguiendo el criterio que el

Hec-Ras marca. Esto se debe a que no se ha dejado actuar a las crecidas dinamizadoras en el río reajustando sus formas y procesos.

- Es posible mitigar los efectos de una riada con una modificación de los valores del coeficiente n de Manning.

Este es un factor determinante como se ha evidenciado con este trabajo. La diferencia de 20 cm supone una gran diferenciada ya que el estudio sólo se ha realizado en un pequeño municipio, pero si se realizará de manera más global podríamos hablar de un cambio importante. Con lo cual podemos decir que la medida del cambio de Manning que supone cambiar de Tabla 1 a Tabla 2 es efectiva y si tiene consecuencias que contribuyen a mitigar los efectos de la riada.

8.- FUTURAS INVESTIGACIONES

En este trabajo se ha intentado evaluar en qué medida una pequeña acción como la de variar el valor del coeficiente de Manning puede ayudar a mejorar una situación de avenida. Sin embargo, las variaciones de los coeficientes de Manning que se han realizado han sido muy pequeñas y en áreas poco extensas. Sería interesante analizar cómo afectan a las situaciones de avenida cambios importantes de este valor y que sucede cuando dichas variaciones se producen en extensiones mayores de terreno.

Además, se ha realizado el estudio con un solo caudal por lo que un posible estudio sería analizar el comportamiento del flujo para caudales mayores. Con los sistemas meteorológicos cada vez más precisos se podrían simular episodios de avenidas futuras para prevenir posibles daños por inundación.

Por otra parte, el área de estudio ha estado muy localizada en la zona de Buñuel, por lo que sería importante seguir ampliando dicha zona de estudio para comprobar cómo evolucionan todos los parámetros estudiados.

Se debería también aumentar la precisión de las simulaciones introduciendo otros elementos en el cauce como son espigones, puentes, etc., elementos que en este trabajo se han obviado. En este sentido, se podría estudiar cómo afecta el retranqueo de motas a las situaciones de avenida.

Finalmente, sería importante estudiar cómo evolucionan los fondos de los ríos a lo largo del tiempo. Sabemos que no siempre unos determinados caudales se traducen en las mismas alturas de agua. Seguramente este hecho tenga que ver con la evolución de los fondos del río a lo largo del tiempo y con su estado de colmatación. Creemos que esta hipótesis merecería ser estudiada.

Como ya se ha explicado anteriormente la simple sustitución de unos cultivos por otros o la limpieza regular de ciertas zonas del cauce puede producir efectos beneficiosos para los ciudadanos y sus bienes. Tradicionalmente esta limpieza la realizaban los animales que pastaban en las orillas, pero la disminución de esta actividad además de otros factores ha resultado en que en extensas zonas de las orillas de nuestros ríos ofrecen un rozamiento muy elevado al paso del agua cuando el río se desborda. Además, esta situación inutiliza estos espacios para otros usos de tipo deportivo o recreativo que tradicionalmente se realizaban en los ríos.

La limpieza de estas orillas por personal especializado es una buena medida de recuperación de nuestros espacios fluviales por ser poco invasiva y no excesivamente cara.

Esperamos que este trabajo pueda ayudar, aunque sea en pequeña medida, a consolidar el camino ya empezado de la recuperación de nuestros ríos.

9.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] K.Smith; Ward, R., Floods Physical Processes and Human Impacts, J. Wiley, Ed., Chichester: J Wiley & sons, 1998.
- [2] González del Tánago, Marta, «Inundaciones y cambio climático,» Madrid, 2008.
- [3] Gobierno de Aragón, «Cambio Climático,» 21 Enero 2022. [En línea]. Availa <https://www.aragon.es/-/el-cambio-climatico#:~:text=La%20temperatura%20del%20planeta%20sube%3A%20es%20el%20calentento%20global,-Las%20temperaturas%20de&text=En%20los%20C3%BAltimos%20100%20a%20C3%B1os,el%20C3%81rtico%20hasta%205%20C2%BAC..> [Último acceso: 12 Mayo 2022].
- [4] M. Miralles, «El cambio de paradigma de la extinción a la gestión del fuego.,» de *7ª Congi*

Forestal Español, Plasencia, 2017.

- [5] D. Vieites, «Efectos del cambio climático en el medio ambiente,» *Greenpeace*, 11 Julio 2019.
- [6] J. G. Cantero, «Prevención y consecuencias del cambio climático,» *Tiempo de paz*, nº 128, 44-45, 2018.
- [7] Ministerio de medioambiente, «Una nueva perspectiva en política de aguas,» Ministerio medioambiente, 2000.
- [8] Parlamento europeo y el consejo de la unión europea, *Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.*, Bruselas, 2007, pp. 27-34.
- [9] España, Gobierno de, «miteco.gob,» Gobierno de España, [En línea]. Availa <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/delimitacion-y-restauracion-del-dominio-publico-hidraulico/estrategia-nacional-restauracion-rios/>. [Último acceso: 2022 abril 19].
- [10] Demográfico, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto, «miteco.gob,» 15 04 2022. [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/delimitacion-y-restauracion-dominio-publico-hidraulico/estrategia-nacional-restauracion-rios/>. [Último acceso: 15 04 2022].
- [11] A. Ollero, *Guía metodológica sobre buenas prácticas en restauración fluvial*, 2015.
- [12] A. Ollero, «Guía sobre buenas prácticas en restauración fluvial,» *esPosible*, vol. esPosible49.
- [13] J.I., Barredo, «Normalised flood losses in Europe:1970-2006,» de *Natural Haard and Ec System Sciences*, 9, pp. 97-104.
- [14] Regato Pajares, P, «Contribución al estudio de la flora y la vegetación del galacabo de la Alfraga en relación con la evolución del sistema fluvial,» Zaragoza, Diputación General de Aragón 1988, p. 188.
- [15] Ebro, Confederación Hidrográfica del, «iagua,» 27 Septiembre 2021. [En línea]. Availa <https://www.iagua.es/noticias/confederacion-hidrografica-ebro/redaccion-proyecto-ebro-resilience-restauracion-fluvial>. [Último acceso: 19 abril 2022].
- [16] Ebro, Confederación Hidrográfica del, «chebro,» 2022. [En línea]. Availa <https://www.chebro.es/>. [Último acceso: 18 abril 2022].
- [17] de la Riva, J; Ibarra, P; Montorio, R; Rodriguez, M, «Análisis espacial y representación geográfica de la innovación y aplicación,» Universidad de Zaragoza-AGE, 2015, pp. 1853-1862.
- [18] G. d. Navarra, «Idena.navarra,» [En línea]. Available: <https://idena.navarra.es/Portal/Inicio>.
- [19] A. O. Ojeda, «Lucha contra las crecidas del Ebro en la Ribera de Navarra,» de *Centro de estudios de Merindad de Tudela*, pp. 71-94.

- [20] m. y. a. u. Ministerio de transportes, «ign,» AENOR, [En línea]. Availa <http://www.ign.es/web/ign/porta>. [Último acceso: 04 mayo 2022].
- [21] Instituto Geográfico Nacional, «Centro de descargas (CNIG),» [En línea]. Availa <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>. [Último acceso: 19 Mayo 2022].
- [22] Open Street Map, «Open Stret Map Fundation,» [En línea]. Availa <https://www.openstreetmap.org/#map=6/40.337/6.130>. [Último acceso: 20 Mayo 2022].
- [23] Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra, «Infraestructura de Datos Espaciales Navarra,» [En línea]. Available: <https://idena.navarra.es/Portal/Inicio>. [Último acceso: 12 M 2022].
- [24] G. d. Navarra, «Idena,» 04 mayo 2022. [En línea]. Availa <https://cartotecayfototeca.navarra.es/#ZXh0fGJhc2V8bWFwYWJhc2V8bGF5ZlZl40OTA1NzMzQyfDQ2MDQ3ODMuNDk0fDczNjA4MS4zNDJ8NDgzMjYyMy40OTReJDB8QDR8NXw2fDddf8MnwzfEBdXQ==>.
- [25] D. L.M. Chavarri, «El agua del Ebro entra en casa de Buñuel,» *Diario de Navarra*, 13 diciembre 2021.
- [26] K.Smith y R. Ward, *Floods Physical Processes and Human Impacts*, J. Wiley, Ed., Chichester: J Wiley & sons, 1998.
- [27] M. González del Tánago, «Inundaciones y cambio climático,» Madrid, 2008.
- [28] P. Regato Pajares, «Contribución al estudio de la flora y la vegetación del galacabo de la Alfra en relación con la evolución del sistema fluvial.,» Zaragoza, Diputación General de Aragón 1988, p. 188.