



EBRO **RESILIENCE**

Estudio de detalle **Tramo 6**

Ebro en

Pradilla de Ebro
y
Boquiñeni

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	3
2. TRABAJOS REALIZADOS.....	8
2.1. Modelo digital del terreno (MDT).....	8
2.2. Modelo hidráulico.....	10
3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	12
4. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS.....	13
4.1. Alternativas con actuaciones de dragado	14
4.2. Alternativas estudiadas	16
4.3. Descripción de la alternativa propuesta.....	18
4.4. Análisis coste-beneficio	20
5. CONCLUSIÓN	21
6. ¿Y AHORA QUÉ?	21

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

En el ámbito de la Estrategia Ebro Resilience, se están estudiando un total de 260 kilómetros de longitud del río Ebro, divididos en 16 tramos. El tramo 6 comprende el curso del río Ebro a su paso junto a las poblaciones de Pradilla de Ebro y Boquiñeni, con una longitud de 16 kilómetros y discurriendo por los términos municipales de Gallur, Pradilla de Ebro, Boquiñeni, Luceni y Tauste (figura 1).



Figura 1. Tramo de estudio sobre fotografía aérea del PNOA 2015 (elaboración propia).

Las localidades de Pradilla de Ebro y Boquiñeni se sitúan sobre una terraza fluvial¹ que conforma en este tramo un estrechamiento natural que comienza aguas arriba de la localidad de Pradilla de Ebro y termina en el meandro aguas abajo de Boquiñeni (figura 2).

¹ Conformada por el paso de un río.



Figura 2. Límites de la primera terraza fluvial en trazo verde (elaboración propia).

No obstante, las inundaciones extraordinarias han sido capaces de superar la cota de esta primera terraza en diversas ocasiones, obligando a evacuar Pradilla de Ebro en 1961, 2003 y 2007 y ambas en 2015.

A partir de 1961 se comenzaron a construir diques de defensa para proteger tanto los núcleos urbanos como los campos de cultivo de las avenidas más recurrentes. Sin embargo, estas infraestructuras limitan la llanura de inundación, reduciendo su sección hidráulica, por lo que se produce un incremento de la altura del agua en situación de avenida. Por ello, cuando se supera la capacidad de las defensas se producen inundaciones de mayor calado.

Al ser una zona con elevado riesgo de inundación y resultar afectados dos núcleos urbanos, se han realizado numerosas intervenciones destinadas a la reducción de los daños por inundación desde el año 2003 hasta el 2018 (figura 3). Las intervenciones realizadas incluyen diversas tipologías, desde actuaciones clásicas como refuerzos de las defensas existentes, construcción de otras nuevas y dragados, hasta técnicas novedosas como áreas de

inundación temporal², conformación de perímetros de seguridad³ y tratamientos de la vegetación con la técnica del curage⁴.



Figura 3. Actuaciones acometidas a partir de la avenida de 2003 (elaboración propia).

Estas actuaciones han supuesto sensibles mejoras en el comportamiento del flujo durante las avenidas, incrementando la capacidad de desagüe de este tramo y reduciendo la altura del agua durante el paso de las avenidas. Esto se pudo comprobar en la avenida de 2018, donde los niveles alcanzados por el río se redujeron hasta un metro respecto a avenidas similares (figura 4).

² Terreno que se inunda voluntariamente en un momento previo a la inundación real para la reducción de daños.

³ Perímetro de vigilancia y control de la inundación que circunda la zona urbana y permite realizar con seguridad trabajos de emergencia si fuera preciso.

⁴ Técnica que consiste en la recuperación de la funcionalidad hidráulica de brazos de río no funcionales a través de masas de sedimentos densamente vegetadas.

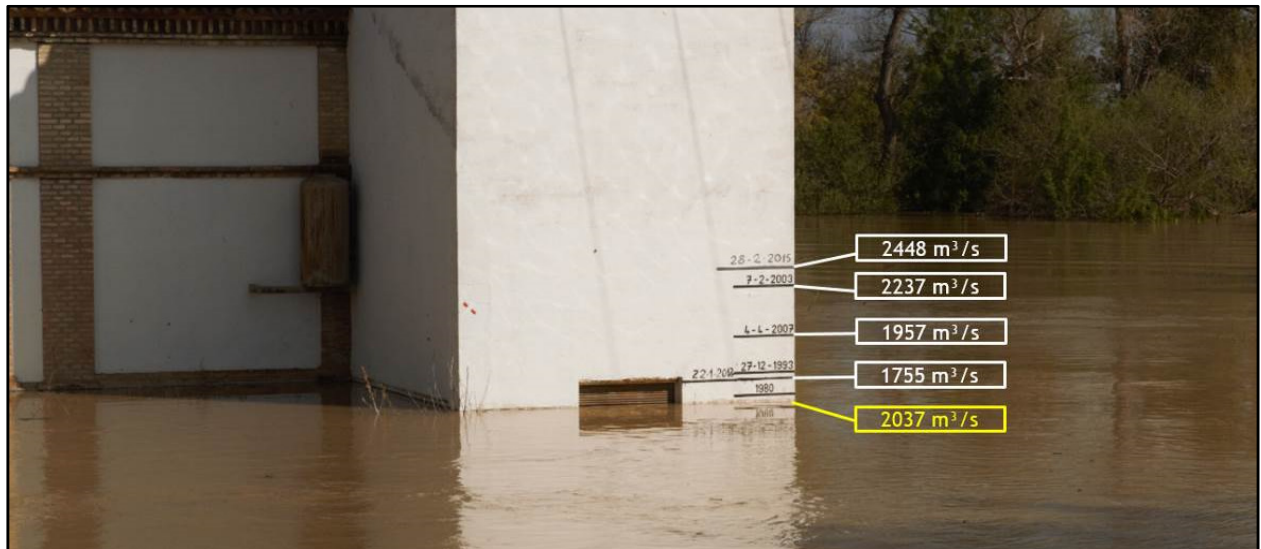


Figura 4. Nivel alcanzado en Boquiñeni durante la avenida de 2018. El rebaje de la mota de la margen derecha ha supuesto una mejora significativa de la capacidad de desagüe del cauce (elaboración propia).

En la actualidad se ha conseguido mejorar en cierta medida la capacidad de desagüe de este tramo y ya no se producirían afecciones a los núcleos urbanos para avenidas de 10 años de periodo de retorno. No obstante, el estrechamiento que forma el sistema de motas aguas abajo de Pradilla de Ebro sigue existiendo y para avenidas de mayor caudal podrían llegar a resultar afectados ambos núcleos urbanos.



Figura 5. Avenida de 2018 y actual sistema de defensas (elaboración propia).

Una eventual rotura de estas motas, por desbordamiento o colapso, supondría una inundación repentina con una altura de agua muy importante, con el consiguiente riesgo. Por

otro lado, el elevado nivel que alcanzan las aguas incrementa los problemas de filtraciones, que acaban llegando a los núcleos urbanos, y que también podrían provocar problemas de colapso de las defensas por subsidencia.

2. TRABAJOS REALIZADOS

Para la elaboración del estudio se han realizado una serie de trabajos técnicos con las últimas tecnologías disponibles que han permitido evaluar la situación actual del tramo respecto a los objetivos planteados. Una vez evaluada la situación actual se han estudiado distintas alternativas de actuación, de forma individual y combinada, seleccionando aquellas que han producido los efectos deseados y descartando las menos favorables o contraproducentes.

2.1. Modelo digital del terreno (MDT)

Uno de los trabajos realizados para el estudio es la elaboración de un modelo digital del terreno⁵ (denominado MDT) que reproduzca la situación actual. Es importante que este MDT reproduzca fielmente los condicionantes del tramo de río en análisis, para ello se han realizado los trabajos enumerados a continuación.

Primeramente se reproduce a gran escala el terreno, utilizando topografía LIDAR⁶ que consiste en la realización de un escáner del terreno mediante el uso de medios aéreos (normalmente para grandes superficies se utiliza una avioneta, pero es común el uso de drones).

Seguidamente se obtiene la topografía de los elementos más importantes para el estudio como son: la coronación de los diques, muros, espigones, puentes, drenajes, cauces de alivio, perímetros de seguridad, etc. Este trabajo ha sido realizado mediante métodos clásicos de topografía, aumentando la precisión de los datos en estos elementos clave.

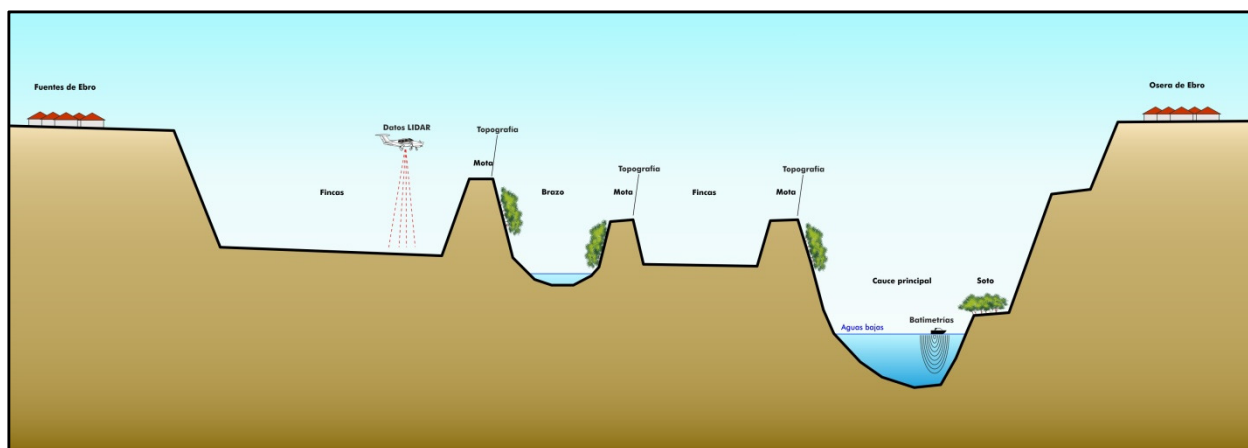


Figura 6. Esquema de la toma de datos realizada (elaboración propia).

Los métodos anteriores tienen el inconveniente de que no son capaces de obtener datos del terreno que se encuentra debajo del agua. Este ha sido el principal inconveniente que se

⁵ El equivalente a una maqueta del terreno pero en un entorno digital.

⁶ Acrónimo del inglés Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging.

han encontrado estudios de inundación realizados con anterioridad. Actualmente existe tecnología que permite obtener la topografía del lecho del río de manera continua. Como novedad para estos estudios realizados en el marco de la Estrategia Ebro Resilience, se han utilizado medios acuáticos dotados de un sonar⁷ para la toma de datos batimétricos⁸ del lecho del cauce, incorporando estos datos al estudio. Los datos obtenidos se combinan para la elaboración del MDT (figura 7).

El análisis del MDT permite corroborar la existencia de los niveles de terraza y detectar los antiguos trazados del río. Destaca la presencia de las defensas sobre la llanura de inundación del río, con una cota bastante más baja.

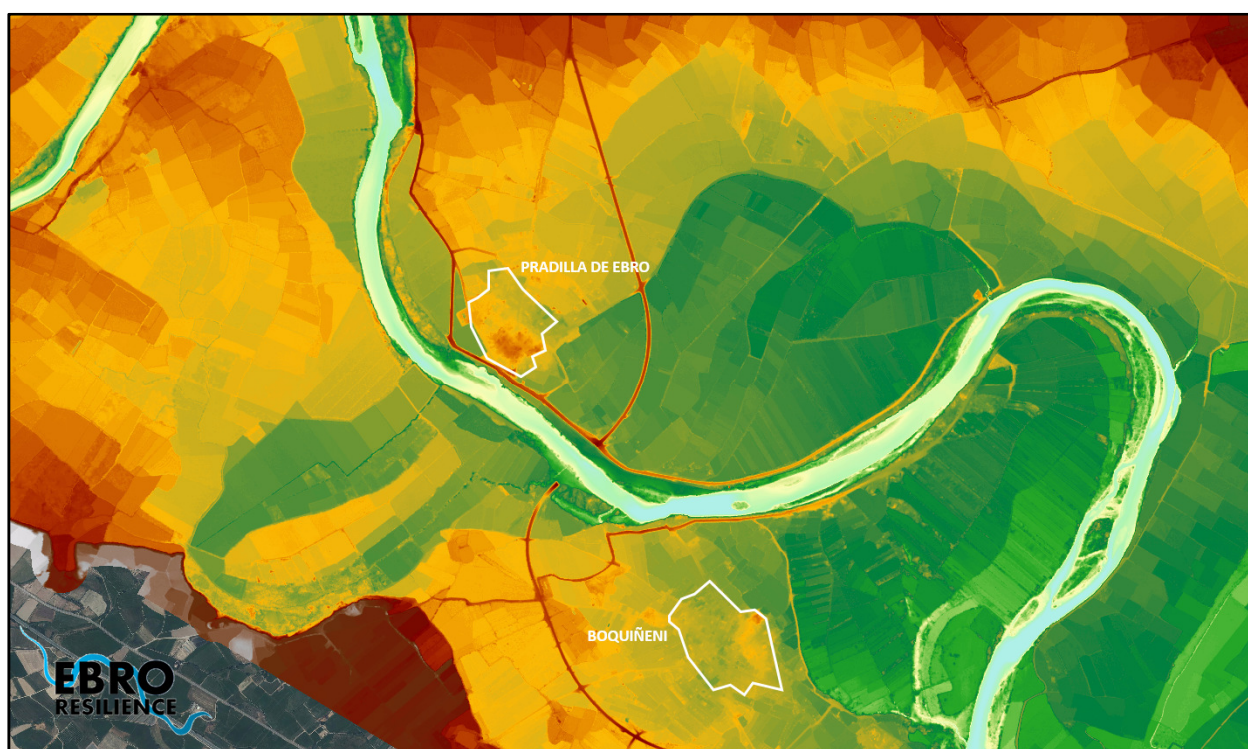


Figura 7. Fragmento del modelo digital del terreno. Colores rojizos indican las zonas más elevadas y los tonos verdes y azules las zonas más profundas (elaboración propia).

Por otra parte, la batimetría muestra la existencia de procesos erosivos en el entorno de la zona más estrecha de la canalización, aguas abajo del puente de la carretera CP-3 y frente a la población de Boquiñeni. Este estrechamiento implica un incremento de la velocidad de la corriente y una mayor erosión. Esto se traduce en una mayor incisión del cauce en este punto, encontrándose el lecho 11 m por debajo de la terraza sobre la que se asienta la mota que defiende el núcleo urbano de Boquiñeni (figura 8). Si bien esta defensa se encuentra sobre

⁷ Elemento que obtiene la profundidad del fondo del mar o un río mediante la emisión de sonidos y la medición de su reflexión.

⁸ Topografía realizada debajo del agua.

unos estratos de conglomerados, una mayor erosión incrementa el riesgo de colapso de la cimentación de esta infraestructura.



Figura 8. Perfil transversal del cauce del río Ebro entre Pradilla de Ebro y Boquiñeni, en el tramo más estrecho de la canalización (elaboración propia).

2.2. Modelo hidráulico

El siguiente paso del estudio es el análisis de los episodios de inundación. Para realizar este trabajo se utilizan modelos hidráulicos, que consisten en una herramienta informática que aplica sobre el MDT un caudal determinado y reproduce los efectos de la inundación⁹.

Estas herramientas informáticas necesitan de un proceso denominado calibración para ajustar los resultados obtenidos a las características del tramo en estudio. En este caso, se han utilizado las fotos aéreas de la avenida de abril de 2018 y de diciembre de 2019, consiguiendo una buena calibración.

⁹ El equivalente a verter agua en la maqueta.

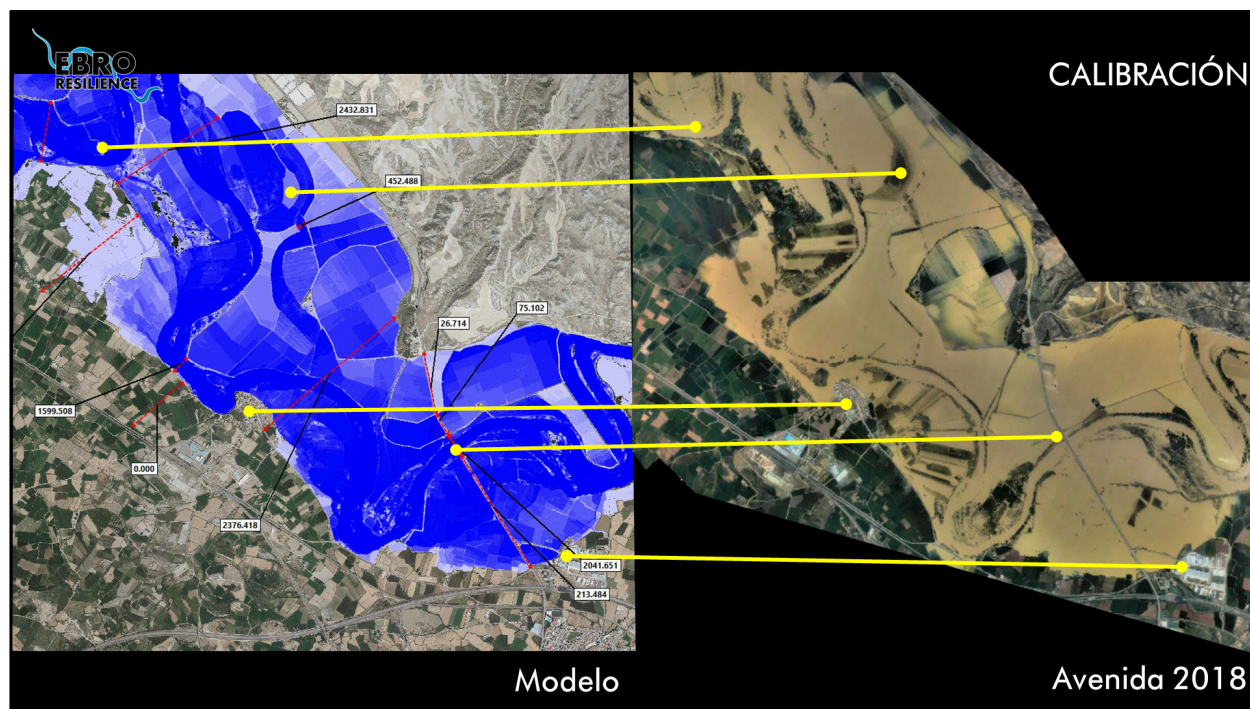


Figura 9. Ejemplo de calibración de un modelo hidráulico con la avenida de 2018 (elaboración propia).

Una vez configurado y calibrado el modelo hidráulico se reproduce la **avenida objetivo**, en este caso la correspondiente a un periodo de retorno de 25 años, que en este tramo equivale a un caudal de $3.100 \text{ m}^3/\text{s}$, y se analizan los efectos producidos sobre las zonas urbanas.

Respecto a los problemas que puedan originar los posibles desbordamientos hay que tener en cuenta que el modelo hidráulico considera el terreno rígido, es decir, las motas no colapsan en ningún momento, aunque sean desbordadas. Para compensar esta circunstancia, la punta de la avenida en la simulación se prolongará en el tiempo, consiguiendo efectos de inundación análogos a los producidos en un suceso real.

El resultado de la modelización se comenta en el apartado 4 “Estudio de Alternativas”.

3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

De acuerdo con los planteamientos de la Estrategia Ebro Resilience, los objetivos específicos del estudio realizado han sido:

- Evaluar el nivel de protección de las zonas urbanas para avenidas de periodo de retorno de 25 años, que se corresponde en este tramo con un caudal de 3.100 m³/s.
- Proponer actuaciones para evitar su inundación, en el caso de que esta se produzca.
- Reducir daños en zonas no urbanas para una avenida de periodo de retorno de 10 años, que en este tramo equivale a un caudal de 2.700 m³/s.

El estudio tiene nivel de anteproyecto, estando determinado para seleccionar las alternativas más adecuadas y permitir realizar la evaluación ambiental de las soluciones propuestas. La definición de las dimensiones exactas de las actuaciones a ejecutar y sus detalles debe realizarse en el correspondiente proyecto constructivo.

4. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

En el análisis de la simulación de la avenida objetivo para un periodo de retorno de 25 años ($3.100 \text{ m}^3/\text{s}$ en este tramo) se concluye que los núcleos urbanos de Pradilla de Ebro y Boquiñeni resultarían afectados directamente por la inundación superficial (figura 10).



Figura 10. Resultados del modelo hidráulico para la avenida de periodo de retorno de 25 años (elaboración propia).

Aguas abajo del puente de la carretera CP-3 el espacio entre defensas longitudinales se reduce a 166 m, siendo uno de los mayores estrechamientos del tramo medio del Ebro. La capacidad de desagüe del río se encuentra mermada en este punto. El estrechamiento funciona como un embudo y las aguas se embalsan en el tramo situado aguas arriba, incrementando el riesgo de inundación en Pradilla de Ebro y en Boquiñeni (figura 11). En esta última localidad, llegaría a entrar en funcionamiento el paleocauce que rodea el núcleo urbano por su lado suroeste, junto a la variante, y que se encuentra en una terraza superior. Este hecho ya se produjo en la avenida de 2015.

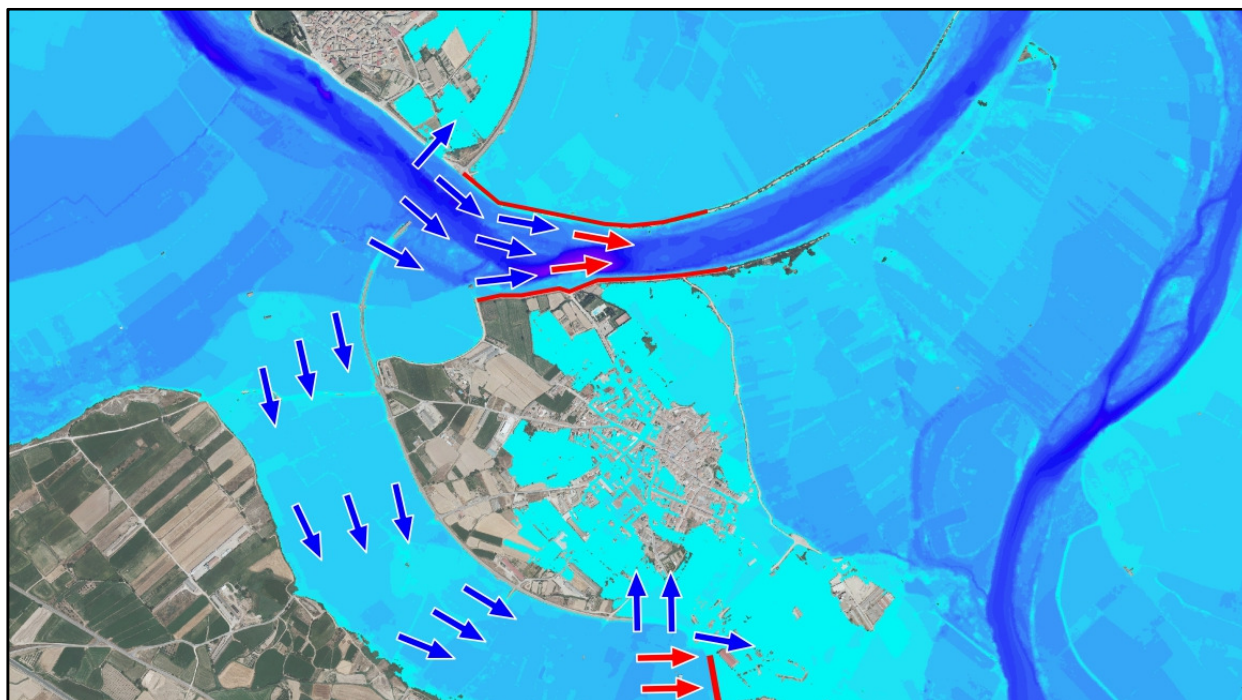


Figura 11. Flujos de agua y estrechamiento en la canalización (señalado en rojo). Las flechas rojas indican secciones con capacidad hidráulica insuficiente o los flujos interrumpidos (elaboración propia).

En el caso de Pradilla de Ebro, la inundación se produce por el desbordamiento de la defensa inmediatamente aguas arriba del puente de la CP-3.

En el caso de Boquiñeni, la inundación se produce desde el paleocauce que rodea la localidad por el sur. La inundación es capaz de desbordar el cierre construido, entrando en este paleocauce. Una vez alcanza la carretera CP-3, los marcos construidos en 2015 son insuficientes para desaguar el caudal entrante y se produce el desbordamiento de la carretera hacia el núcleo urbano.

4.1. Alternativas con actuaciones de dragado

Aunque en el tramo estudiado ya se han realizado intervenciones de dragado (figura 3), resultando poco eficaces y con una durabilidad anual, ante las peticiones recibidas por parte del ayuntamiento de Boquiñeni se han estudiado dos intervenciones de retirada de sedimentos en el entorno del meandro de Boquiñeni. El estudio ha sido realizado por la Universidad Politécnica de Catalunya, debido a la complejidad y especialización que requiere un análisis de este tipo.

En la primera de ellas (en amarillo en la figura 12) se retirarían 580.000 m³ de sedimentos. En la segunda de ellas, el volumen retirado aumentaría a 1.500.000 m³ (en rojo en la figura 12).

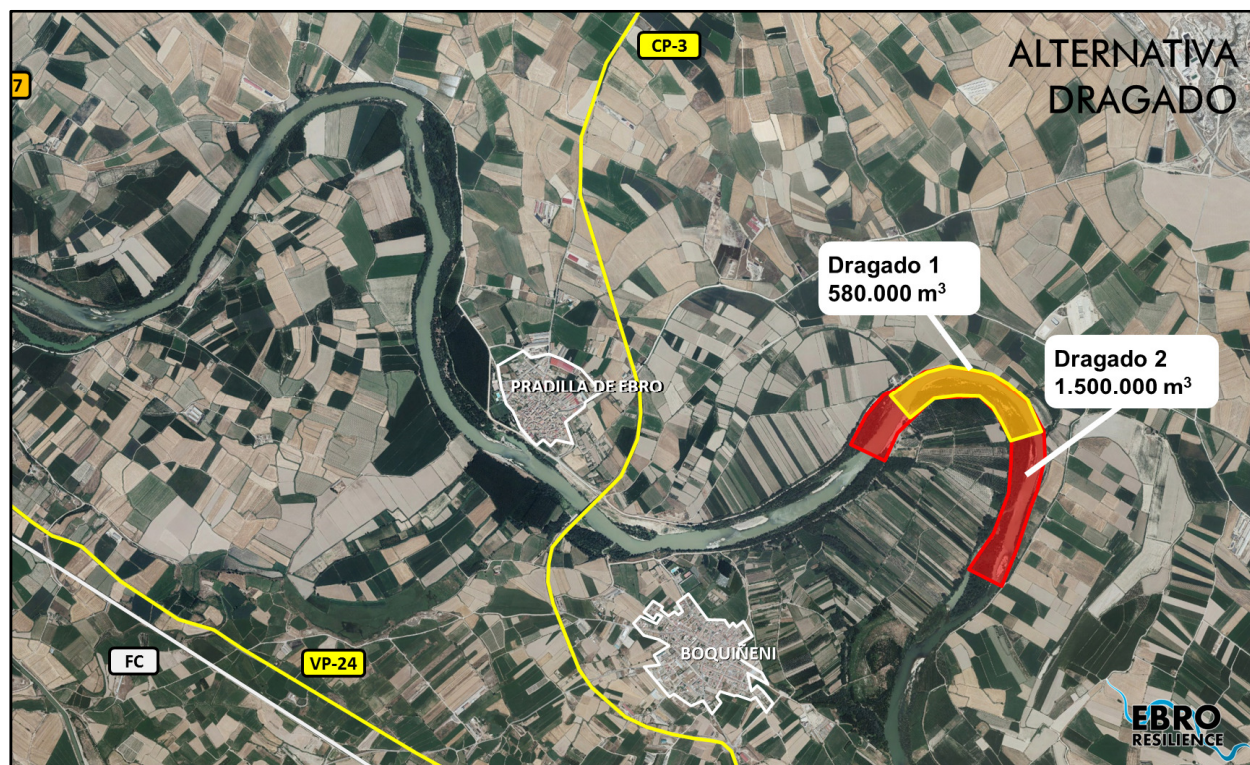


Figura 12. Alternativas de dragado estudiadas en el tramo (elaboración propia).

Las conclusiones del estudio son las siguientes:

	Dragado 1	Dragado 2
Volumen:	580.000 m ³	1.500.000 m ³
Resultado:	Rebaje de lámina de agua 20 cm inmediatamente aguas arriba. Se seguirían inundando ambos núcleos urbanos.	Rebaje de lámina de agua 70 cm inmediatamente aguas arriba. Se seguirían inundando ambos núcleos urbanos.
Durabilidad:	10 días de Q = 2.000 m ³ /s	25 días de Q = 2.000 m ³ /s
Coste:	9.000.000 €	25.000.000 €
Cumple los objetivos:	No	No

La efectividad del dragado se limita al tramo inmediatamente aguas arriba y tiene una durabilidad muy corta, diez días de avenida para el dragado 1 y 25 días para el dragado 2. En el estudio se han analizado los efectos de durabilidad frente a una avenida de 2.000 m³/s, pero se ha constatado que en el Ebro a partir de caudales en circulación del entorno de los 400 m³/s ya se produce movilización del sedimento, por lo que en la práctica la durabilidad de la intervención sería todavía inferior a lo indicado en el resultado del estudio.

Esta alternativa no resuelve los problemas de inundación de los núcleos urbanos y, en consecuencia, ha sido descartada.

4.2. Alternativas estudiadas

En primer lugar, se han estudiado varias alternativas encaminadas a reducir el remanso que el sistema de defensas produce en situación de avenida a la altura de los núcleos urbanos.

Analizando el resultado que ofrece el modelo hidráulico se observa que el estrechamiento que presenta el sistema de defensas produce una importante sobreelevación de la lámina de agua en el tramo aguas arriba, aumentando la presión sobre las propias defensas de los núcleos urbanos. De acuerdo con el modelo, esta circunstancia origina la derivación de las aguas hacia el núcleo urbano de Pradilla de Ebro y hacia el paleocauce que rodea Boquiñeni por el suroeste (figura 13).

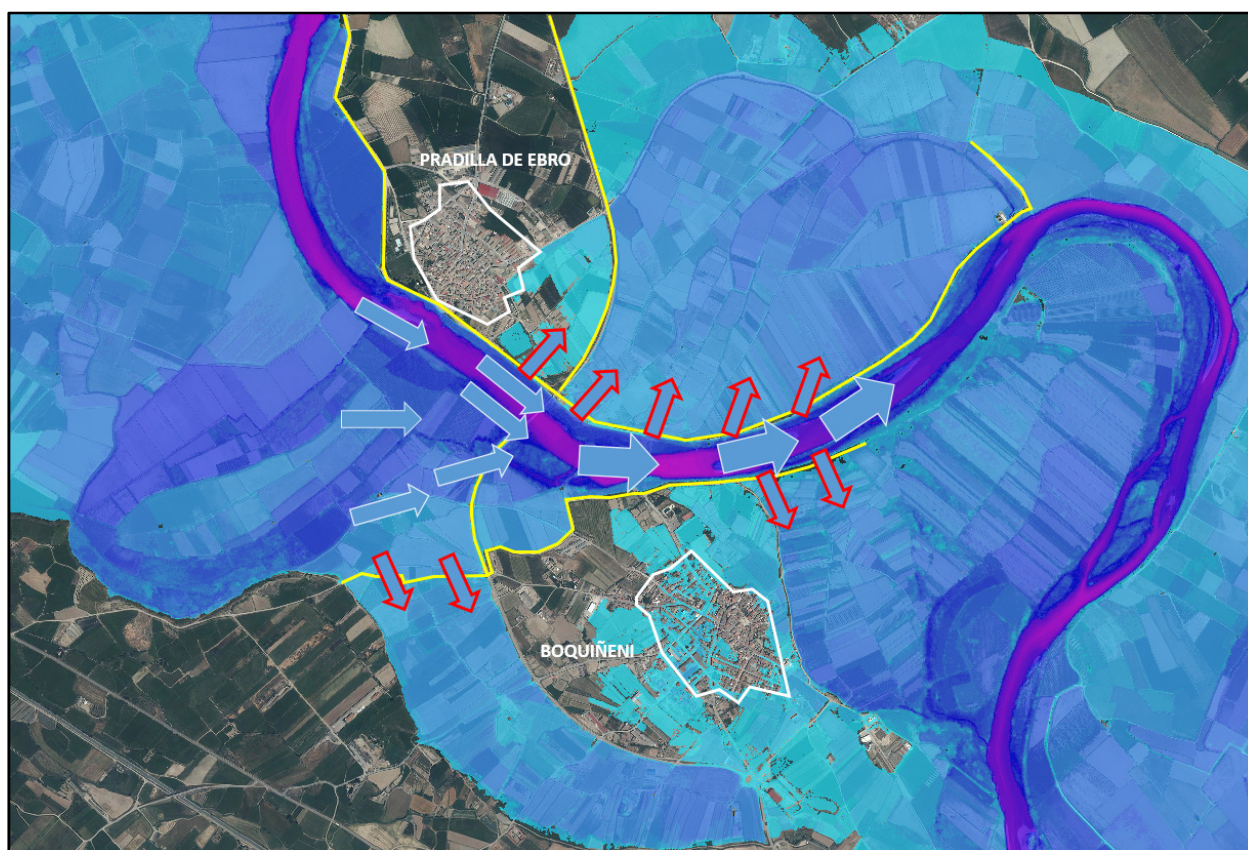


Figura 13. Representación de la problemática actual en la zona más estrecha de la canalización para la avenida de periodo de retorno de 25 años (elaboración propia).

Aunque el modelo hidráulico no lo refleje, hay que tener presente que el desbordamiento de una mota de tierras suele implicar su rotura, con la consiguiente entrada de agua con una cota elevada y a gran velocidad. Esto entraña graves riesgos para la población porque la inundación se produce de forma repentina y con gran capacidad de arrastre. Además, implica

unos daños materiales mucho mayores por el gran poder erosivo que presenta una corriente de este tipo.

Por último, aunque no se llegue a producir el desbordamiento, unas defensas que tratan de contener una inundación de gran calado presentan un mayor riesgo de colapso. Una mayor presión de agua incrementa las filtraciones tanto a través del cuerpo de la mota como por debajo de su cimentación. El afloramiento de estas filtraciones por detrás de la defensa arrastra material y reduce la capacidad portante del terreno, pudiendo producir el colapso de un tramo de la misma. En este caso, la rotura se produce de forma todavía más repentina.

Para tratar de paliar esta situación se han estudiado diversas alternativas, como retranqueos de distinta magnitud en la huerta de Pradilla o cauces de alivio con distintas ubicaciones en el meandro de Boquiñeni.

Por otra parte, el paleocauce que rodea el núcleo urbano de Boquiñeni cuenta con un cierre en su entrada que se ejecutó en 2015. No obstante, para avenidas de 25 años de periodo de retorno esta defensa se ve desbordada. Una vez se produce el desbordamiento de esta defensa las aguas circulantes por el paleocauce sólo pueden salir por los marcos que se construyeron en la zona donde se rompió la carretera de acceso a la población durante la avenida de 2015. Sin embargo, estos marcos son insuficientes para evacuar esos caudales, por lo que se produce el desbordamiento de la carretera hacia el núcleo urbano (figura 14).

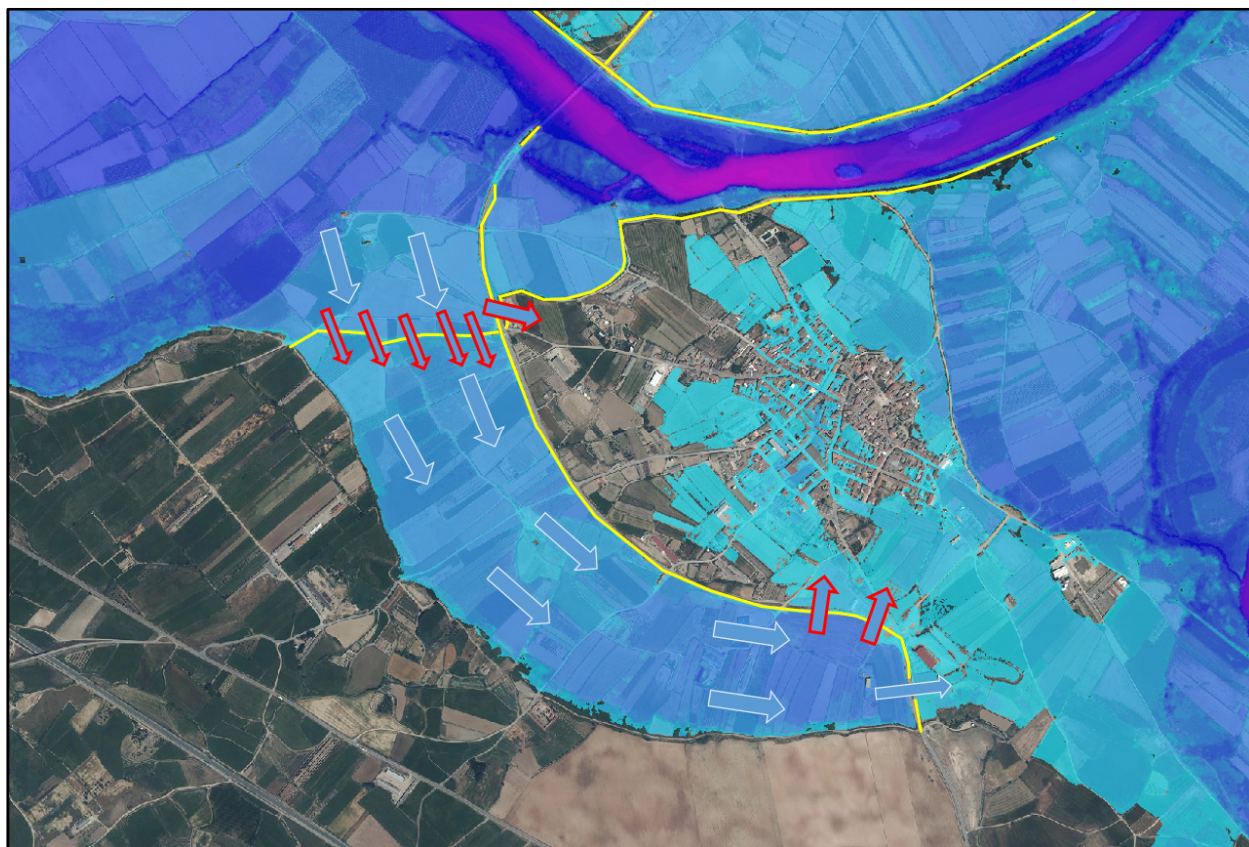


Figura 14. Representación de la problemática actual en el entorno de Boquiñeni para la avenida de periodo de retorno de 25 años (elaboración propia).

Recrecer el cierre del paleocauce no supone una solución viable, ya que supondría incrementar el riesgo de desbordamiento de la carretera al noroeste del núcleo urbano, de forma que las aguas desbordadas llegarían al núcleo urbano desde aguas arriba, con el riesgo que esto supone. De hecho, la entrada de agua por el paleocauce reduce el riesgo de desbordamiento de este sector de las defensas de Boquiñeni.

Por otro lado, hay que estar preparados ante una eventual rotura de este cierre, ya que se trata de una defensa de tierras con la problemática anteriormente expuesta.

Por lo tanto, se han estudiado distintas alternativas para evitar el desbordamiento de la carretera hacia el núcleo urbano, contemplando asimismo eventuales roturas del cierre del paleocauce.

4.3. Descripción de la alternativa propuesta

La alternativa que se ha mostrado como más eficiente en las simulaciones y que cumple los condicionantes establecidos es una combinación de intervenciones de la siguiente manera (figura 16):



Figura 16. Alternativa propuesta (elaboración propia).

- A. Nivelación de la mota de defensa de Pradilla de Ebro para incrementar la seguridad del núcleo urbano.
- B. Eliminación de los obstáculos situados en la orilla derecha del río y que retrasan la entrada en funcionamiento del galacho de Los Fornazos.
- C. Retranqueo de la mota de la huerta de Pradilla para eliminar el estrechamiento que actúa como un embudo y reduce la capacidad de desagüe aguas arriba.
- D. Construcción de una nueva defensa retranqueada.
- E. Rebaje del terreno en el espacio liberado, lo que permitirá incrementar aún más la capacidad de desagüe en este estrechamiento.
- F. Instalación de una batería de marcos, cerrados con muro de bloques de hormigón, en la mota de cierre del paleocauce de Boquiñeni. Estos marcos entrarían en funcionamiento, rompiendo el muro de bloques, cuando las aguas amenacen desbordar esta infraestructura o cuando sea necesario rebajar la cota de inundación en el frente oeste de las defensas del núcleo urbano.
- G. Instalación de una batería de marcos en la carretera de acceso a Boquiñeni, con el objeto de desaguar los caudales que discurren por el paleocauce, bien por la apertura

de los marcos ubicados aguas arriba o por rotura o desbordamiento de la mota de cierre. Estos marcos evitarán que la carretera se comporte como una presa y acabe desbordando hacia el núcleo urbano. Estos pasos también permanecerían cerrados en avenidas pequeñas.

4.4. Análisis coste-beneficio

La alternativa propuesta tendría un coste estimado de ejecución de 8.000.000 €, incluyendo la adquisición de los terrenos necesarios.

De acuerdo al análisis coste beneficio realizado, la puesta en práctica de las propuestas supondría un ahorro de 15.500.000 € en daños en un periodo de 25 años, comparativamente a la situación actual. Para esta comparativa se han tenido en cuenta los daños declarados en las avenidas de 2018 en cultivos, los costes de reparación de las infraestructuras y los posibles daños en las zonas urbanas de acuerdo a la altura que alcanzarían las aguas.

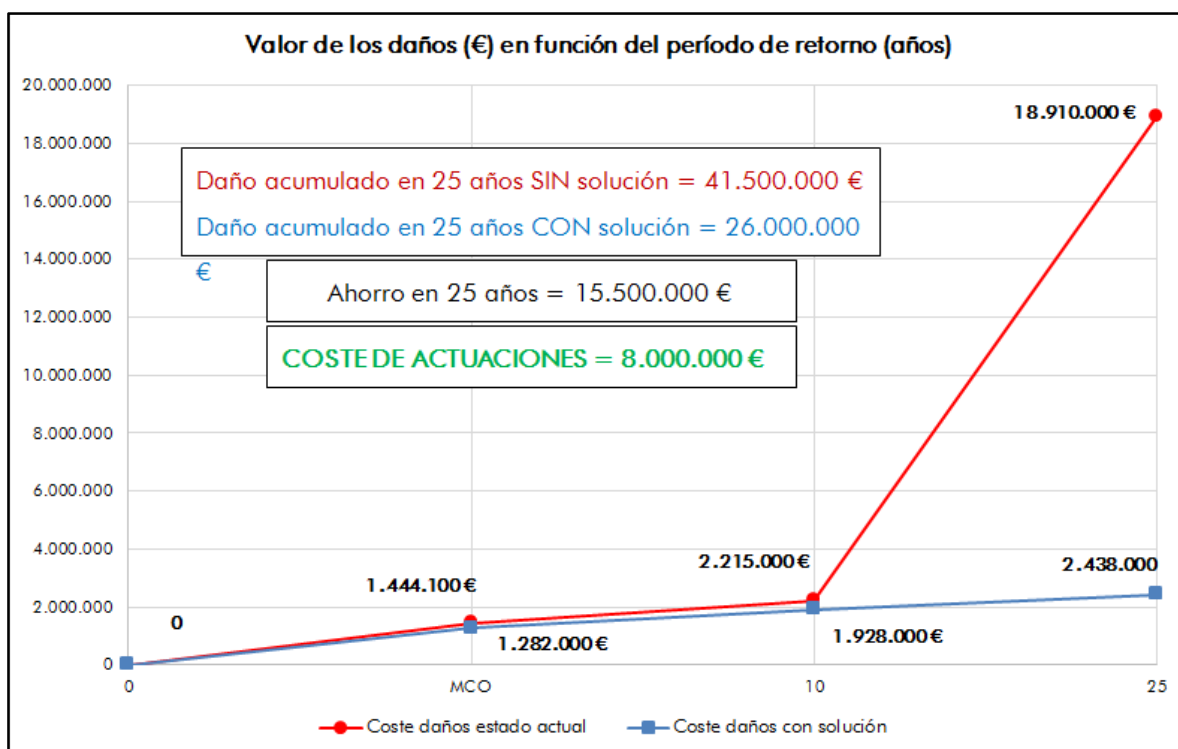


Figura 17. Comparativa de daños en 25 años (elaboración propia).

En consecuencia, la alternativa propuesta es viable económicamente.

5. CONCLUSIÓN

Con la alternativa seleccionada como más eficiente se conseguiría evitar la inundación de los núcleos urbanos de Boquiñeni y Pradilla de Ebro para avenidas con un periodo de retorno de 25 años, alcanzando los objetivos planteados inicialmente.

Adicionalmente se reduce la altura de la inundación sobre los campos en un porcentaje importante (70% 920 ha) de las fincas del tramo en estudio para la avenida objetivo de 10 años de periodo de retorno. Una menor altura del agua supone igualmente una reducción del riesgo de rotura de las defensas y de las filtraciones.

El estudio tiene nivel de anteproyecto, estando determinado para seleccionar las alternativas más adecuadas y permitir realizar la evaluación ambiental de las soluciones propuestas. La definición de las dimensiones exactas de las actuaciones a ejecutar y sus detalles debe realizarse en el correspondiente proyecto constructivo.

La ejecución de estas actuaciones deberá llevar asociado un seguimiento de su evolución que permita comprobar que los objetivos perseguidos se consiguen.

6. ¿Y AHORA QUÉ?

Una vez concluido el estudio de detalle del tramo se realizarán talleres deliberativos abiertos al público para conocer la opinión de la población.

Seguidamente se realizarán los correspondientes ajustes a la propuesta, si fuese necesario, y comenzará la tramitación ambiental de las intervenciones.

Finalmente, se redactarán los proyectos constructivos y cada Administración pondrá en marcha, en el ámbito de sus competencias, las actuaciones para una mejor gestión del riesgo de inundación del tramo que corresponda.