



Universidad de Oviedo



Facultad de Geología

TRABAJO FIN DE GRADO

**ANALIZANDO LA INUNDACIÓN DE  
2010 EN EL BAO:  
ESTUDIO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO  
DEL RÍO BARAYO (ASTURIAS)**

ELISA SUÁREZ REY

GRADO EN GEOLOGÍA  
JULIO - 2024



## Analizando la inundación de 2010 en El Bao: Estudio hidrológico-hidráulico del río Barayo (Asturias)

Autor: Elisa Suárez Rey

**Resumen:** El Bao sufrió importantes inundaciones en 2010 a causa de una represa del río Barayo originada por una obra de drenaje transversal bajo la carretera N-634. Este trabajo analiza las máximas lluvias probables para periodos de retorno de 100 y 500 años, los caudales esperables y el comportamiento del flujo de agua asociado, analizando el alcance de los desbordamientos. Para ello se utilizará el método racional junto con el programa HEC-RAS, que permitirá la modelización del comportamiento del río considerando tres escenarios geométricos: 1) la situación actual, con dos obras de drenaje transversal; 2) la situación de 2010, con tres obras de drenaje transversales completamente funcionales (sin obstrucciones); y 3) la situación de 2010, con la obra de drenaje transversal situada a menor cota casi totalmente taponada de sedimentos. Los resultados obtenidos, en base a los parámetros considerados muestran únicamente inundaciones en el último caso mencionado, sugiriendo que la inundación de 2010 pudo ser producida por la acumulación de sedimentos en las tuberías de la obra de drenaje transversal situada más aguas abajo.

**Abstract:** El Bao suffered significant flooding in 2010 due to a damming of the Barayo River caused by a culvert under road N-634. This work analyses the maximum probable rainfall considering return periods of 100 and 500 years, the expected discharges and the behavior of the corresponding water flow, assessing the extent of related floodings. For this purpose, the rational method will be used together with the HEC-RAS software, enabling the modelling of water flow behavior considering three geometric scenarios: 1) the current situation, with two culverts; 2) the 2010 situation, with the three culverts fully functional (unobstructed); and 3) the 2010 situation, but with the lowest culvert almost fully clogged with sediment. The results obtained, based on the parameters considered, only show flooding in the last case mentioned, suggesting that the 2010 flooding could have been caused by sediment accumulation of in the drainage pipes of the culvert located further downstream.

### 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Durante las últimas décadas, la peligrosidad por inundación, así como otros riesgos naturales, han aumentado su frecuencia a escala global, debido al crecimiento exponencial de la población y a su interacción con el medio (Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, 2008). Por lo tanto, las organizaciones gubernamentales se han visto obligadas a crear legislaciones y estudios específicos para cada tipo de riesgo.

El desbordamiento de los ríos es un fenómeno natural recurrente relacionado con eventos de precipitación intensa que se observa por todo el territorio europeo, siendo España uno de los territorios con más alto nivel de amenaza por riesgo de inundación, como quedó reflejado en el informe sobre impactos territoriales de los desastres naturales (Cantergiani et al., 2020).

En la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico, la presencia de miles de cauces fluviales que recorren el territorio supone la existencia de gran cantidad de zonas de potencial peligrosidad por inundación, es decir, zonas con probabilidad de ocurrencia de una inundación dentro de un periodo de tiempo determinado y en un área dada. Además, muchas de estas zonas se encuentran ampliamente pobladas, lo cual genera una gran vulnerabilidad e implica un riesgo elevado. La vulnerabilidad consiste en el grado de probabilidad de pérdida de un elemento en riesgo, expresado en una escala de 0 (sin daño) a 1 (pérdida total), y el riesgo, es el número esperado de víctimas, daños materiales y desorganización de la actividad económica, como consecuencia de una inundación (Boletín Oficial del Estado, 1995).

En las últimas décadas han ocurrido grandes inundaciones por todo el territorio gestionado por la Confederación Hidrográfica del Cantábrico a causa principalmente de lluvias torrenciales que modifican el

curso fluvial de algunos ríos o que afecta a zonas costeras (Confederación Hidrográfica del Cantábrico, 2024). Estos desastres naturales dejan tras su paso cuantiosas pérdidas materiales, como se observó tras las inundaciones de junio de 2010 en municipios como Parres, Ribadesella y Pravia, donde estas afectaron a viviendas, locales, garajes y viales. Las reparaciones de los daños asociadas a dicho evento requirieron una inversión económica de cinco millones de euros destinados a sufragar costes de las obras de emergencia en zonas de dominio público y playas (Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, 2010).

Para minimizar los efectos de estos desastres es conveniente la realización de estudios de inundabilidad o hidrológico-hidráulicos, los cuales permiten estimar la peligrosidad ligada a eventos de precipitación con diferentes recurrencias o periodos de retorno. Estos trabajos han de ser realizados por personal técnico cualificado teniendo en cuenta las precipitaciones históricas, las características de la cuenca hidrológica, los usos del suelo, la geomorfología y la permeabilidad del terreno, entre otras variables. La clasificación de los periodos de retorno se establece según la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, de 31 de enero de 1995, considerando las recurrencias de las inundaciones, determinando así: (i) las inundaciones frecuentes (cada 50 años o menos), (ii) inundaciones ocasionales (avenidas de periodo de retorno entre 50 y 100 años), y (iii) inundaciones excepcionales (para avenidas de periodo de retorno entre 100 y 500 años) (Boletín Oficial del Estado, 1995).

Como se ha mencionado anteriormente, las inundaciones producidas durante junio de 2010 afectaron a toda la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico. Durante una semana (del 9 al 16 de junio) se registraron, en algunas zonas de la provincia de Asturias, más de 400 mm de precipitación acumulada; siendo los días 9, 11 y 15 los de mayor precipitación. De acuerdo con Mora et al. (2019), considerando la serie de datos más larga para el cálculo del periodo de retorno, se obtiene un valor superior a los 200 años.

Una de las zonas más afectadas por estas inundaciones fue la localidad de El Bao, un pequeño pueblo situado entre Navia y Luarca por donde discurre el río Barayo. Previamente a la construcción de la Autovía del Cantábrico (A-8), la carretera N-634, construida en 1985, representaba un importante enclave para la red de transporte siendo la conexión entre Asturias y Galicia. La modificación del trazado en la antigua N-634 para generar un tramo rectilíneo a su paso por el punto kilométrico 515 supuso la construcción de un terraplén de aproximadamente 35 m de altura dispuesto de manera transversal al río Barayo. Para favorecer el drenaje del cauce fluvial bajo dicha construcción se instaló una Obra de Drenaje Transversal (ODT) compuesta por tres tuberías de drenaje de diferentes diámetros. Aguas arriba de esta infraestructura, referida en adelante como ODT 3, existen otras dos pequeñas ODT que permiten el flujo del río Barayo bajo otros viales. Durante las inundaciones de junio de 2010 se produjo la obstrucción de la ODT 3 por acumulación de sedimentos, desencadenando un desbordamiento del río Barayo por represamiento que dejó los viales secundarios y las casas cercanas inundadas casi por completo.

Según notas de presa y denuncias de los vecinos, las zonas de drenaje se encontraban taponadas (*La Nueva España, 2010*) (Fig. 1). La solución adoptada para hacer descender el nivel del agua de la inundación fue la demolición de la carretera. Las pérdidas económicas y materiales ascendieron a 2.316.930 euros, siendo este el presupuesto designado para las obras de alivio de las aguas y desembalse, la excavación del terraplén y la retirada de los tubos de desagüe, el acondicionamiento del desvío de la N-634, la mejora del trazado en el entronque con la N-634 en uno de sus lados y la restauración medioambiental (*RTPA, 2010*) (Fig. 2).



FIGURA 1. A) Casas afectadas en la localidad de El Bao por la inundación en junio de 2010. B) Obras de retirada de la obra de drenaje transversal bajo el antiguo trazado de la N-634 (PK-515). C) Tuberías de la ODT 3 rellenas de sedimentos. Fotografías de Miki Núñez para La Nueva España.

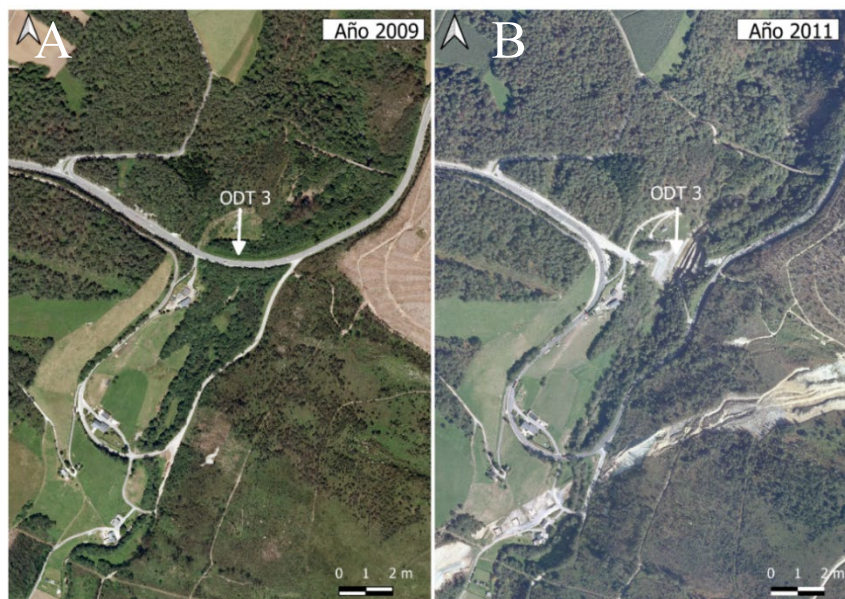


FIGURA 2. A) Ortofoto correspondiente al Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de 2009, previa a la inundación, en la cual se observa el antiguo trazado de la N-634, señalizando la ODT 3 problemática. B) Ortofoto correspondiente al PNOA de 2011, un año posterior a la inundación, en la cual se observa el desmonte de la ODT 3.

En este trabajo se analizarán los motivos que pudieron provocar la inundación de El Bao, considerando dos hipótesis:

- a) La inundación pudo producirse debido a la obstrucción de las tuberías de drenaje de la ODT 3.
- b) La inundación pudo relacionarse con un dimensionamiento inadecuado de la ODT 3 bajo la carretera N-634, es decir, si esta fue incapaz de drenar los máximos caudales esperables.

### Objetivos

Los principales objetivos de este trabajo son: 1) realizar un análisis hidrológico de la cuenca del río Barayo para estimar los caudales máximos esperables considerando dos periodos de retorno (100 y 500 años) y, 2) realizar una modelización hidráulica en el tramo bajo del cauce para determinar el comportamiento de la lámina de agua (desbordamientos y calados esperables). En las modelizaciones se han considerado los caudales más desfavorables del río Barayo para los diferentes periodos de retorno analizados, y dos geometrías diferentes correspondientes a la situación en 2010 y en la actualidad.

### Área de Estudio

La zona de estudio se localiza en el occidente asturiano, concretamente en el entorno de El Bao, un pequeño pueblo en la parroquia de Villapedre situado en el municipio de Navia, por el cual discurre río Barayo (Fig. 3). Dista 10,5 km de la capital municipal y se sitúa a una altitud de 70 m s.n.m. La zona se encuentra dentro de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental (Sistema de Explotación del Río Navia; Fig. 3).



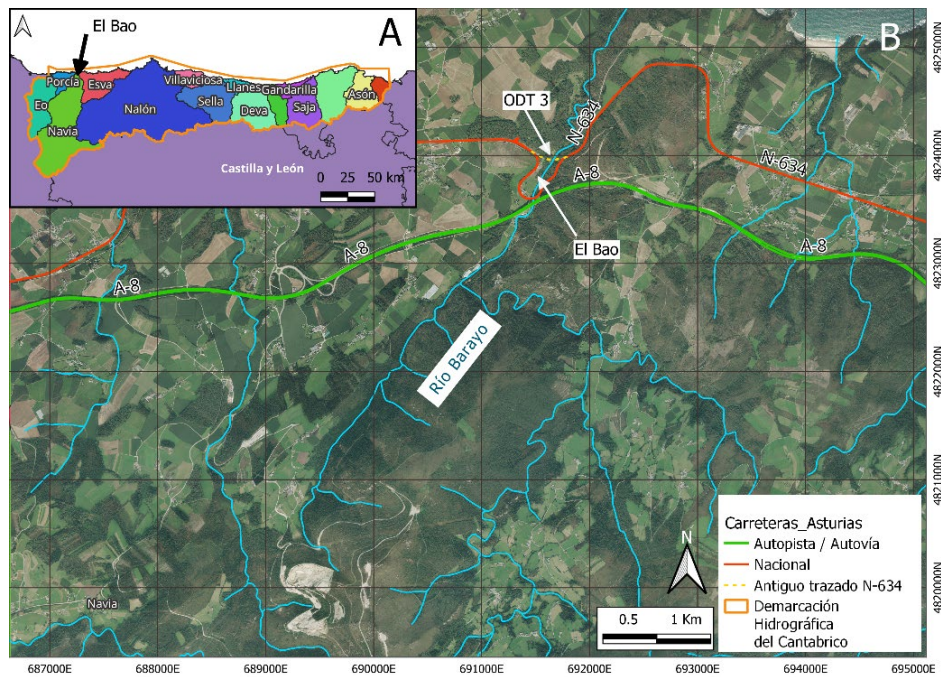


FIGURA 3. Localización geográfica del El Bao en el Principado de Asturias y su situación en el contexto del Sistema de Explotación del río Navia, englobado dentro de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental (A). Situación sobre la ortofotografía PNOA de máxima actualidad, correspondiente al año 2023 (B). Sistema de proyección UTM y huso 29T.

Desde el punto de vista geológico, la zona de estudio está localizada en la Zona Asturoccidental-Leonesa del Macizo Ibérico (Julivert et al., 1972; Lotze, 1945). Las rocas del sustrato rocoso en el entorno de la zona de estudio corresponden fundamentalmente a cuarcitas, pizarras y areniscas cambro-ordovícicas de la Serie de Los Cabos, Capas Superiores del Eo y Fm. Agüeira. En la cartografía consultada también se distinguen formaciones superficiales de edad cuaternaria como depósitos de rasa, derrubios de ladera, coluviones y depósitos aluviales (Marcos y Pulgar, 1980; Fig. 4).

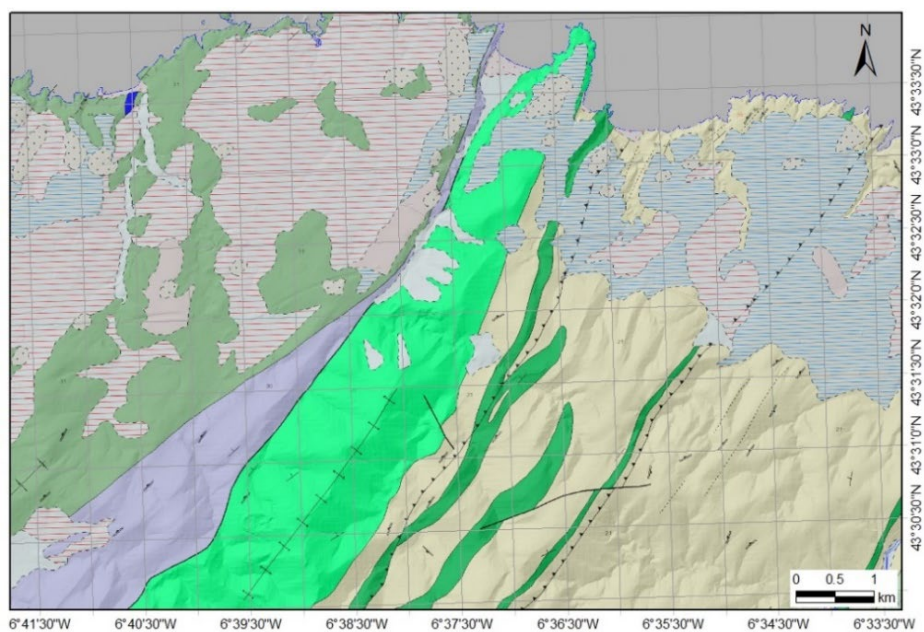


FIGURA 4. Mapa geológico del entorno de la zona de estudio (González-Menéndez et al., 2008 basado en Marcos y Pulgar, 1980). La leyenda se puede consultar en el sitio web del Instituto Geológico y Minero de España (IGME): <https://igme.maps.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=44df600f5c6241b59edb596f54388ae4>

El clima de la zona de estudio es considerado como de tipo Cfb según la clasificación climática de Köppen-Geiger en la Península Ibérica para el periodo 1981-2010 (Chazarra-Bernabé et al., 2018). Este clima se caracteriza por mostrar temperaturas medias comprendidas entre 0 y 18°C en el mes más frío, sin estación seca, y de carácter templado (temperatura media del mes más cálido igual o inferior a 22 °C). Los datos registrados durante un periodo de 23 años (del 1 de enero de 2001 al 31 de diciembre de 2023) por la estación meteorológica 1212E, situada en el Aeropuerto de Asturias, muestran que el promedio de precipitaciones del mes más seco ha sido de 12,5 mm mientras que las del mes más lluvioso es de 27,7 mm (Agencia Estatal de Meteorología, s.f.). Esto sugiere que la costa asturiana se caracteriza por tener precipitaciones regulares a lo largo del año, con un promedio de 1044,3 mm/año según los datos consultados. La media de temperaturas no supera los 22°C en el mes más caluroso y hay cuatro o más meses a lo largo del año donde la temperatura media es superior a 10°C, estando las máximas concentradas en los meses de verano.

En lo que respecta a los usos de suelo, se consideró la cartografía de *Corine Land Cover* (2018) incluida dentro del programa “Copernicus” para obtener una base de datos europea unificada y actualizada de la ocupación del suelo. Esta información puede ser descargada del centro de descargas del CNIG y/o consultada en el visor Copernicus (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>). Los datos muestran que en la zona estudiada predominan los bosques de coníferas, los bosques de frondosas, landas, matorrales y algunos cultivos de maíz.

## 2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo comprendió los siguientes apartados: 1) recopilación de información, 2) trabajo de campo, 3) análisis de la precipitación, 4) estudio hidrológico y 5) modelización hidráulica.

### Recopilación de información

Para este estudio se consultaron noticias de prensa de varios periódicos regionales como La Nueva España o El Comercio y de algunos medios digitales (TPA), así como comunicados emitidos por el Ayuntamiento de Navia sobre la inundación ocurrida en El Bao en junio de 2010. Se utilizaron datos de precipitación registrados por dos estaciones meteorológicas: 1) Aeropuerto de Asturias y 2) Cabo Busto, recopilados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Para determinar los parámetros morfológicos de la cuenca se descargaron modelos digitales del terreno con tamaño de celda de 5 m, disponibles en el centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN). También se descargó la información altimétrica de la nube de puntos LiDAR (*Light Detection and Ranging*) correspondiente al año 2015, así como las ortofotografías del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de los años 2009, 2011 y 2023 para la zona de estudio. Los datos geológicos se consultaron y descargaron a partir del Mapa Geológico Nacional (MAGNA) a escala 1:50.000 procedente del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Asimismo, se descargaron datos de cobertura vegetal del proyecto *Corine Land Cover* (2018) disponible en el centro de descargas del IGN.

### Trabajo de campo

El día 2 de febrero de 2024 se realizó una jornada de trabajo de campo en la localidad de El Bao para reconocer las características del cauce y de sus márgenes en un tramo del río Barayo de unos 580 m, localizado aguas arriba de la ODT 3 que estaba situada bajo la carretera nacional N-634. Durante la jornada se inspeccionó el número y características de las diferentes obras de drenaje transversal ubicadas en dicho tramo del río y se realizó un aforo en el río Barayo (43°32'33"N, 6°37'37"W). No se pudo acceder a la zona donde se ubicaba la ODT 3 (donde se produjo el represamiento en junio de 2010) debido a la densa vegetación. El tramo utilizado para realizar el aforo y la toma de datos de velocidad fue de 7,5 m de longitud y 5,3 m de ancho representativo de una zona rectilínea, teniendo un calado medio de 0,41 m obtenido de la media de 9 mediciones al inicio y al final de la sección analizada. La medición se llevó a cabo con la ayuda de una cinta métrica y se utilizó el método del flotador para determinar la velocidad de la corriente de agua. El tiempo medio obtenido es el resultado de tres mediciones que representan los segundos que tarda el flotador en recorrer los 7,5 m de longitud. A partir de ese tiempo se calculó la velocidad de la corriente en superficie la cual se multiplica por 0,8 ya que se ha de tener en cuenta que el flotador viaja por el centro del

canal y en superficie donde el flujo se mueve más rápido que en las márgenes o en el fondo debido al rozamiento el flujo con el lecho y las márgenes. El proceso se repitió 3 veces y se obtuvo un valor promedio de la velocidad. También se usó un molinete modelo FLOWATCH, que tiene un error de aproximadamente  $\pm 2\%$  en varios puntos de la sección, sin embargo, en algunos casos, la velocidad no pudo ser registrada puesto que era menor que el valor mínimo que podía determinar el aparato. Finalmente, el caudal se obtuvo por el producto del área de sección y la velocidad media. Posteriormente se recorrió la zona para realizar observaciones sobre la geomorfología, geología y vegetación en el entorno del cauce.

### **Análisis de la precipitación**

Los datos de precipitación se obtuvieron a partir de la base de datos históricos de AEMET para estimar los valores de precipitación máxima diaria esperables para los periodos de retorno considerados en este trabajo ( $T_{100}$  y  $T_{500}$ ). El rango de datos estudiados abarca 23 años naturales completos (01/01/2001 – 31/12/2023). Se valoró el uso de datos de la estación meteorológica de Cabo Busto debido a su cercanía con la zona de estudio, sin embargo, el registro estaba incompleto y no permitía un correcto análisis. Por ende, se utilizó la estación meteorológica del Aeropuerto de Asturias (1212E), que además de tener un registro más completo, contaba con los datos de precipitación correspondientes al mes de junio de 2010. A partir de los registros de precipitación diaria, los datos se organizaron en una tabla de precipitación máxima mensual en 24 h, la cual se utilizó para obtener las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) a través de una plantilla Excel gratuita disponible en <https://www.hidrojing.com/>.

Para determinar los valores de precipitación máxima diaria esperables para los periodos de retorno de 100 y 500 años se utilizaron tres métodos: (i) método gráfico de Santamaría Arias y dos métodos estadísticos (ii) Gumbel y (iii) SQRT-ETmax.

El método de Santamaría Arias (1999) se encuentra descrito en el documento de “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular”, editado por el Ministerio de Fomento. Este método, recopila dos formas de obtener las precipitaciones máximas diarias, el primero consiste en el uso del programa informático MAXPLU; y el segundo, consiste en el uso de los planos y tablas presentes en el documento. En este estudio se ha recurrido al segundo de ellos. En primer lugar, se ha de localizar la zona de estudio en los planos-guía. En ella se consultan los valores de las isoyetas y el coeficiente de variación ( $C_v$ ) más próximos al área de trabajo. El valor del  $C_v$  es de 0,35 (adimensional) y el valor medio de la máxima precipitación anual interpolada para la zona de estudio es de 57 mm/día. A continuación, se determina el factor de amplificación ( $K_I$ ) para los periodos de retorno de 100 y 500 años con la tabla correspondiente adjunta en dicho documento. Finalmente se multiplica el factor de amplificación por el valor medio de la precipitación diaria anual para obtener la precipitación diaria máxima (mm) esperable para cada periodo de retorno.

Los métodos de distribución de Gumbel y de SQRT-ETmax son métodos estadísticos para el estudio de valores extremos de precipitación. Para su cálculo se ha requerido el uso de plantillas de Excel introduciendo los valores de precipitación máxima diaria anual registrados por la estación meteorológica 1212E.

### **Estudio hidrológico**

La finalidad del estudio hidrológico es calcular el caudal máximo de avenida esperable para un periodo de retorno específico en un punto deseado. En este estudio, el cálculo hidrológico del río Barayo se ha llevado a cabo para los periodos de retorno de 100 y 500 años ya que son los caudales máximos para los cuales se estiman las obras de drenaje de transversal (Ministerio de Fomento, 2019). El nivel base utilizado corresponde a la zona donde se tomaron los datos de campo cercana a la ODT 2.

Para la determinación de los parámetros morfométricos de la cuenca, se ha recurrido a un Sistema de Información Geográfica o SIG para el tratamiento y análisis de la información (QGIS). A partir del modelo de elevaciones (con una resolución de 5 m) se obtuvieron modelos de pendientes, de sombreado y de flujo acumulado. Con el comando *Fill sinks tool* (Wang y Liu, 2006), disponible en la caja de herramientas *Terrain Analysis-Hydrology* del complemento de *Saga*, se han rellenado las ausencias de datos en el modelo de elevaciones. A continuación, se utilizó el comando *Channel networks and drainage basins* para trazar automáticamente la red de drenaje. Posteriormente se utilizó el comando *Upslope area* para delimitar la extensión de la cuenca de drenaje que vierte sus aguas al nivel base determinado. Partiendo de estos modelos, se calcularon el área y el perímetro de la cuenca hidrográfica. En base a la red de drenaje se determinaron el orden y la longitud tanto del cauce principal como de la red hídrica total.

A partir de las precipitaciones, se ha de considerar la cantidad de agua de lluvia que produce escorrentía directa (precipitación neta) y la cantidad que se infiltra en el terreno (abstracciones). El método más utilizado para hallar el umbral de escorrentía (cantidad de la precipitación inicial que no produce escorrentía directa) es el método empírico del número de curva (NC) desarrollado por el *Soil Conservation Service* (Mockus, 1964). En primera instancia, se calculó el NC. Para ello se utilizaron la cartografía de usos de suelo (*Corine Land Cover*, 2018), la información geológica (González-Menéndez et al., 2008) y la pendiente del terreno reclasificada en valores mayores y menores a 3%.

La información geológica se reclasificó en tres grupos en función de su capacidad de drenaje, el grupo A corresponde a aquellas litologías con infiltración muy rápida y cuyos suelos presentan textura areno-limosa con un drenaje perfecto. El grupo B corresponde a litologías con infiltración moderada con suelos de textura franco-arenosa, franca (mezcla uniforme de arcillas, arenas y limos), franco-arcillosa-arenosa y franco-limosa con un drenaje bueno a moderado y el grupo C a litologías y suelos relacionados con una infiltración lenta y textura franco-arcillosa, franco-arcillo-limosa y arcillo-arenosa con un drenaje imperfecto.

Estos datos se combinaron, y se les asignó un valor inicial del umbral de escorrentía inicial ( $P_{0i}$ ), siguiendo la tabla 2.3 recogida en la Norma 5.2-IC 1990 de la Instrucción de Carreteras (Ministerio de Fomento, 2019). A continuación, se aplicó la fórmula (1) para obtener el NC de cada polígono.

Posteriormente, se realizó la media ponderada por el área para obtener el NC de la cuenca y su umbral de escorrentía ( $P_0$ ).

$$NC = 5080/(P_{0i} + 50,08) \quad (1)$$

El estudio hidrológico se realizó siguiendo la normativa vigente más actual y aceptada para el cálculo de caudales, siendo esta la Norma 5.2-IC 1990 de la Instrucción de Carreteras (Ministerio de Fomento, 2019). Se ha utilizado esta normativa con el fin de seguir las reglas generales y prescripciones para proyectar, construir y conservar adecuadamente las obras, elementos y sistemas de drenaje superficial de la Red de Carreteras de Estado. Entre otras situaciones esta norma comprende una resolución para la conducción y evaluación de aguas procedentes del drenaje subterráneo de la carretera, cauces naturales, sistemas de alcantarillado o de la capa freática (Ministerio de Fomento, 2019). Para el caso estudiado del río Barayo se ha aplicado el método racional modificado de Témez (1991) puesto que el área de la cuenca de drenaje es inferior a 50 km<sup>2</sup>.

El caudal máximo esperable se obtiene a partir de la fórmula (2). Los parámetros presentes corresponden al caudal máximo anual ( $Q_T$ ; m<sup>3</sup>/h), la intensidad ( $I(T, t_c)$ ; mm/h), el coeficiente de escorrentía ( $C$ ; adimensional), el área de la cuenca ( $A_i$ ; m<sup>2</sup>) y el coeficiente de uniformidad ( $K_t$ ; adimensional).

$$Q_T = \frac{K_t}{3,6} \cdot I(T, t_c) \cdot \Sigma[C_i \cdot A_i] \quad (2)$$

Estos parámetros se obtienen a través de diversas fórmulas, que se desglosan a continuación:

El parámetro  $I(T, t_c)$ , calculado mediante la expresión (3), se refiere a la intensidad de precipitación correspondiente al periodo de retorno considerado  $T$ , para una duración del aguacero igual al tiempo de concentración  $t_c$ .

$$I(T, t_c) = I_d \cdot F_{int} \quad (3)$$

Siendo  $I_d$ , la intensidad media diaria de precipitación corregida correspondiente al período de retorno  $T$  (mm/h) y  $F_{int}$  el factor de intensidad (adimensional). Ambos factores se desglosan en más fórmulas recogidas en los epígrafes 2.2.2.2 y 2.2.2.4 (Ministerio de Fomento, 2019).

El tiempo de concentración ( $h$ ) corresponde al tiempo mínimo necesario desde el inicio del aguacero para que toda la superficie de la cuenca esté aportando escorrentía en el punto de desagüe, este se ha calculado aplicando la expresión (4). Las variables utilizadas corresponden a la longitud de cauce ( $L_c$ ; km) y a la pendiente media del cauce ( $J_c$ ; adimensional).

$$t_c = 0,3 \cdot L_c^{0,76} \cdot J_c^{-0,19} \quad (4)$$



El coeficiente de escorrentía,  $C$ , define la parte de la precipitación de intensidad  $I(T, t_c)$  que genera el caudal de avenida en el punto de desagüe de la cuenca. Se determina aplicando la fórmula (5), donde  $P_d$  (mm) es la precipitación diaria correspondiente al período de retorno  $T$ ,  $K_A$  (adimensional) es el factor reductor de la precipitación por área de la cuenca y  $P_0$  (mm) es el umbral de escorrentía.  $P_0$  se obtuvo a partir del NC, descrito previamente (1).

$$C = \frac{\left(\frac{P_d \cdot K_A}{P_0} - 1\right) \left(\frac{P_d \cdot K_A}{P_0} + 23\right)}{\left(\frac{P_d \cdot K_A}{P_0} + 11\right)^2} \quad (5)$$

Por último, el coeficiente de uniformidad ( $K_t$ ) considera la falta de uniformidad en la distribución temporal de la precipitación, obteniéndose a través de la expresión (6), en la que  $t_c$  es el tiempo de concentración (4).

$$K_t = 1 + \frac{t_c^{1,25}}{t_c^{1,25} + 14} \quad (6)$$

### Modelización hidráulica

La modelización hidráulica del río Barayo a su paso por El Bao se realizó utilizando el software HEC-RAS v.6.5 con su extensión RAS-Mapper, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EEUU (Brunner, 2020). La modelización se centró en un tramo de 1,4 km del río Barayo a la altura de la intersección con la N-634. La zona modelizada incluye tanto las zonas habitadas (edificaciones) como las obras de drenaje transversales existentes, que quedaron inundadas durante las fuertes precipitaciones de junio de 2010. En la modelización se consideraron los caudales asociados a periodos de retorno de 100 y 500 años, así como dos geometrías diferentes: (i) situación actual con las ODTs observadas en campo, y (ii) situación correspondiente al año 2010. Esta última, incluye la ODT 3 que estaba instalada en la base de un gran terraplén sobre el que se situaba la N-634. En este caso se han considerado dos escenarios posibles: a) que las tuberías de drenaje sean completamente funcionales, y b) que las tuberías se encuentren parcialmente colmatadas de sedimentos (como ocurrió durante el evento de 2010). Con estos modelos se pretende comprobar si el dimensionamiento de la ODT era adecuado para drenar los máximos caudales esperables. En cambio, la modelización con la geometría actual tiene como finalidad verificar si se pudiese producir un desbordamiento futuro del cauce y, en su caso, la extensión de la zona inundable.

Para entender cómo se comportará la lámina de agua asociada a un caudal determinado es necesario disponer de una topografía detallada de la zona a modelizar. En este trabajo se ha utilizado la cobertura de datos LiDAR del año 2015. El tratamiento de datos LiDAR se ha realizado a través de un Sistema de Información Geográfica o SIG. En primer lugar, se han descomprimido los archivos en formato .laz al formato .las, utilizando para ello la caja de herramientas previamente instalada "LAS Tools" y el comando "las2las (transform)". Una vez cargados, se han filtrado los puntos por *Ground* para eliminar las elevaciones correspondientes a la vegetación. Esta conversión permitió generar un modelo de elevaciones detallado en formato .tif de la zona a modelizar a través del comando "LAS Dataset to Raster". A continuación, se introdujo el MDE creado en el software HEC-RAS y a través de la extensión de RAS-Mapper se crearon las geometrías pertinentes. Se digitalizó la línea correspondiente al eje del río, otras indicando los márgenes del cauce y finalmente la extensión de la trayectoria del flujo. Seguidamente, se realizaron 39 secciones transversales al cauce, de izquierda a derecha y de aguas arriba a aguas abajo, con un espaciado de 35 m aproximadamente. Estas cortan a las geometrías antes mencionadas, asegurando su perpendicularidad respecto al trazado del río (Fig. 5). A cada sección se le asignó un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,04 para los márgenes y 0,035 para la zona central del cauce, correspondientes a cursos fluviales naturales limpios, rectos, sin montículos ni pozos, pero con piedras y maleza.

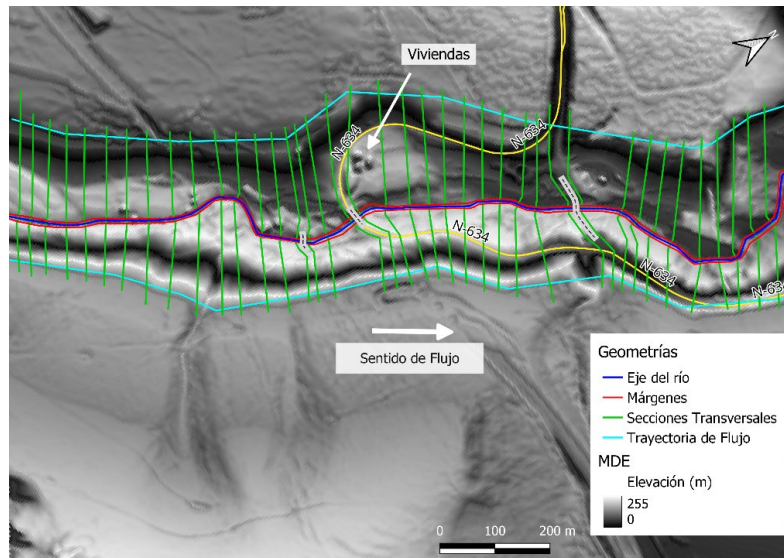


FIGURA 5. Representación de las geometrías creadas para la modelización hidráulica en la zona de El Bao. Sobre el modelo digital de elevaciones se han representado eje del río, las márgenes del mismo, y las secciones transversales consideradas en el modelo.

Posteriormente, se introdujeron las obras de drenaje transversal en el modelo (Fig. 6). Aguas arriba se localiza la primera de ellas (ODT 1), representada por una plataforma de 6,1 m de ancho y 0,8 m de grosor que conecta ambos lados del río (sobre la que circula la carretera N-634). La ODT 2 corresponde a un pontón circular de 25 m de longitud y 7,5 m de anchura construido para favorecer el drenaje del río Barayo bajo la línea de ferrocarril. Se le ha atribuido un valor de coeficiente de pérdida de entrada de 0,2 y un número de Manning de 0,15 correspondiente al valor medio de una tubería enladrillada revestida con mortero de cemento (Brunner, 2020). También se modelizó una tercera ODT (ODT 3), la cual correspondía al drenaje bajo la modificación rectilínea de la N-634 que estaba en funcionamiento antes de junio de 2010. Se trataba de un conjunto de tres tuberías de drenaje: dos laterales de 2,33 m diámetro y una central de 3,83 m. Para el conjunto se han establecido un coeficiente de pérdida de entrada de 0,9 ya que las tuberías eran de metal corrugado proyectadas desde el relleno (sin muro de cabecera) y un coeficiente de Manning de 0,021 correspondiente a este tipo de canalización (Brunner, 2020).

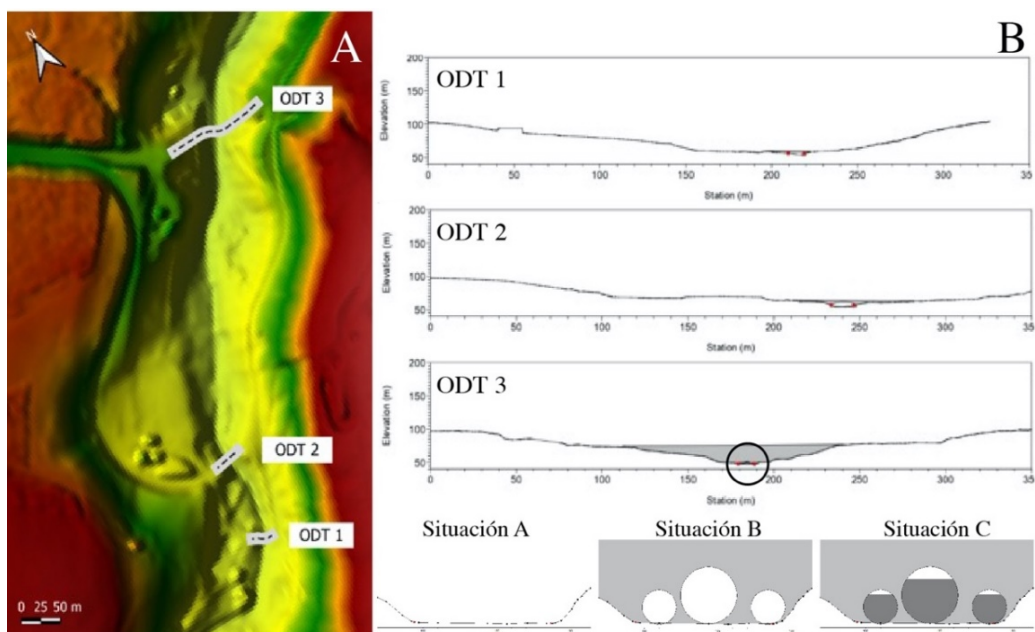


FIGURA 6. A) Posición de las tres ODTs consideradas en el modelo hidráulico. B) Secciones transversales de las ODTs. En la parte inferior se muestran las tres situaciones modelizadas en la zona de la ODT 3.

La modelización se llevó a cabo bajo un flujo permanente para los dos caudales máximos calculados previamente en el modelo hidrológico. Se consideró la opción *normal depth* en las condiciones de contorno, introduciendo el valor de la pendiente de las secciones superior e inferior de la zona considerada. Finalmente se computó el modelo para un régimen de flujo de tipo mixto debido a las variaciones en la pendiente del cauce a lo largo de su trazado y se exportaron las capas donde se pudo observar el comportamiento y distribución de la lámina de agua para los diferentes caudales en cada geometría. Este proceso se repitió para tres situaciones:

- A. Modelización de la situación actual, es decir, con las ODTs 1 y 2.
- B. Modelización utilizando las tres ODTs descritas y en condiciones óptimas (sin obstrucciones).
- C. Modelización con las tres ODTs descritas, estando la ODT 3 parcialmente colmatada de sedimentos (85% de la capacidad de drenaje de las tuberías (Fig. 1C).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para este estudio, los resultados se exponen siguiendo el orden establecido en la metodología.

#### Trabajo de campo

Durante la jornada de campo del día 2 de febrero de 2024, se observó un cauce rectilíneo encajado en una zona de laderas y con una amplia llanura aluvial. Respecto al río la zona más empinada se encuentra hacia la margen derecha mientras que hacia la margen izquierda, se encuentra la llanura aluvial modificada antrópicamente con muros de escollera. Es en esta zona donde se sitúan la mayoría de las viviendas y edificaciones. Aguas arriba, la margen izquierda presenta vegetación herbácea y árboles frutales. Sin embrago, aguas abajo, las dos márgenes se encuentran llenas de vegetación de tipo arbórea y matorral (Fig. 7). El lecho del río está compuesto por cantos redondeados, de baja esfericidad y de diversos tamaños, desde tamaño bloque ( $> 256$  mm) hasta tamaños de arena muy fina ( $< 0, 125$  mm). También se encuentran restos de maleza y pequeñas zonas con vegetación sobre los sedimentos de mayor tamaño los cuales no están permanentemente sumergidos.



FIGURA 7. A) Zona aguas arriba de donde se tomaron los datos de campo. La margen derecha solo presenta vegetación herbácea mientras que la izquierda tiene vegetación de tipo arbóreo, arbustivo y matorral. B) Zona aguas abajo de donde se tomaron los datos de campo. Ambos márgenes presentan vegetación arbórea, arbustiva y de matorral.

Las medidas realizadas para la sección del río establecida en la metodología se muestran en la tabla I. A partir de los datos, se calculó un caudal de estiaje de  $0,29$  m<sup>3</sup>/s.

| Datos de campo  |      |
|-----------------|------|
| Ancho cauce (m) | 5,31 |

|   |       |
|---|-------|
| Profundidad lámina de agua (m)                      | 0,41  |
| Longitud (m)  | 7,50  |
| Área (m <sup>2</sup> )                              | 2,20  |
| Tiempo medio (s)                                    | 45,93 |
| Velocidad obtenida por el método de flotador (m/s)  | 0,13  |
| Velocidad obtenida por el método del molinete (m/s) | 0,10  |

TABLA I. Medidas realizadas en un tramo del curso medio del río Barayo durante la salida de campo. Estos datos han sido utilizados para determinar el caudal de estiaje correspondiente al día 02/02/2024.

### Análisis de la precipitación

Los datos de precipitaciones máximas diarias registradas durante el periodo de 1 de enero de 2001 y el 31 de diciembre de 2023, se han clasificado y ordenado en la tabla II para facilitar su manejo y análisis.

| DATOS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 Hrs. (mm) |       |         |       |       |       |       |       |        |            |         |           |           |              |
|---|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|--------------|
| Año   | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo  | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre | Máximo       |
| 2001  | 19,70 | 16,70   | 18,30 | 19,30 | 18,00 | 19,40 | 10,10 | 13,50  | 129,10     | 23,70   | 19,40     | 16,80     | 129,10 (SEP) |
| 2002  | 5,90  | 19,30   | 16,00 | 25,10 | 31,10 | 30,50 | 9,00  | 86,10  | 12,80      | 21,10   | 16,70     | 24,20     | 86,10 (AGO)  |
| 2003  | 33,60 | 19,60   | 10,20 | 9,60  | 4,60  | 14,00 | 25,20 | 14,80  | 17,20      | 29,40   | 40,10     | 31,80     | 40,10 (NOV)  |
| 2004  | 18,90 | 23,80   | 21,10 | 15,70 | 15,70 | 18,80 | 12,80 | 16,70  | 16,40      | 34,20   | 19,10     | 15,80     | 34,20 (OCT)  |
| 2005  | 13,00 | 23,90   | 15,10 | 18,40 | 9,80  | 8,50  | 9,80  | 8,30   | 26,60      | 53,30   | 44,90     | 39,10     | 53,30 (OCT)  |
| 2006  | 16,30 | 16,40   | 13,00 | 22,10 | 11,50 | 7,00  | 12,90 | 17,10  | 24,90      | 37,60   | 23,80     | 22,80     | 37,60 (OCT)  |
| 2007  | 26,10 | 42,90   | 19,10 | 52,30 | 25,20 | 7,00  | 33,50 | 14,30  | 13,30      | 21,90   | 19,40     | 18,90     | 52,30 (ABR)  |
| 2008  | 19,70 | 16,80   | 18,40 | 37,30 | 24,50 | 12,30 | 15,80 | 14,30  | 18,10      | 34,00   | 29,80     | 32,00     | 37,30 (ABR)  |
| 2009  | 19,00 | 17,80   | 20,50 | 14,00 | 19,10 | 7,30  | 24,70 | 18,20  | 16,40      | 7,80    | 33,00     | 29,00     | 33,00 (NOV)  |
| 2010  | 27,00 | 18,20   | 12,80 | 7,20  | 22,10 | 95,90 | 2,40  | 9,20   | 10,40      | 57,10   | 51,40     | 48,30     | 95,90 (JUN)  |
| 2011  | 50,50 | 12,50   | 17,00 | 7,00  | 13,50 | 10,00 | 17,70 | 16,20  | 10,70      | 21,40   | 41,90     | 32,20     | 50,50 (ENE)  |
| 2012  | 9,30  | 24,30   | 8,10  | 35,60 | 9,10  | 10,00 | 4,70  | 19,60  | 2,80       | 28,90   | 34,00     | 15,00     | 35,60 (ABR)  |
| 2013  | 53,20 | 37,70   | 45,40 | 51,60 | 21,20 | 18,10 | 1,40  | 7,20   | 17,70      | 11,90   | 28,00     | 17,80     | 53,20 (ENE)  |
| 2014  | 27,60 | 19,00   | 35,40 | 12,40 | 21,90 | 9,40  | 13,90 | 15,00  | 37,70      | 17,00   | 26,90     | 34,00     | 37,70 (SEP)  |
| 2015  | 31,70 | 33,30   | 22,80 | 10,00 | 6,00  | 11,30 | 19,20 | 11,40  | 19,50      | 29,20   | 29,20     | 7,90      | 33,30 (FEB)  |
| 2016  | 43,30 | 31,30   | 34,50 | 27,20 | 16,70 | 23,30 | 15,40 | 7,20   | 81,60      | 32,30   | 31,70     | 11,80     | 81,60 (SEP)  |
| 2017  | 15,40 | 24,40   | 16,80 | 22,60 | 16,70 | 20,70 | 4,90  | 21,10  | 18,70      | 3,60    | 24,20     | 56,80     | 56,80 (DIC)  |
| 2018  | 20,00 | 22,70   | 25,50 | 11,10 | 32,30 | 27,30 | 20,00 | 26,90  | 41,10      | 53,30   | 49,80     | 10,70     | 53,30 (OCT)  |
| 2019  | 58,00 | 20,40   | 11,40 | 16,90 | 30,40 | 9,40  | 9,70  | 9,10   | 11,20      | 66,50   | 44,30     | 67,00     | 67,00 (DIC)  |
| 2020  | 12,20 | 15,80   | 38,30 | 6,40  | 22,40 | 18,10 | 6,90  | 29,70  | 27,10      | 61,40   | 7,20      | 45,50     | 61,40 (OCT)  |
| 2021  | 41,60 | 41,70   | 5,00  | 13,30 | 23,70 | 51,40 | 9,30  | 27,70  | 43,80      | 27,70   | 35,70     | 38,20     | 51,40 (JUN)  |
| 2022  | 42,70 | 19,70   | 26,90 | 42,20 | 26,50 | 18,50 | 5,00  | 17,10  | 25,30      | 10,90   | 32,30     | 23,90     | 42,70 (ENE)  |
| 2023  | 56,40 | 30,10   | 19,80 | 11,80 | 8,70  | 15,20 | 3,20  | 37,40  | 15,40      | 37,40   | 15,00     | 13,80     | 56,40 (ENE)  |
| MAX   | 58,00 | 42,90   | 45,40 | 52,30 | 32,30 | 95,90 | 33,50 | 86,10  | 129,10     | 66,50   | 51,40     | 67,00     | 129,10       |

TABLA II. Datos mensuales de precipitación máxima en 24 horas para el periodo del 1 de enero de 2001 hasta el 31 de diciembre de 2023 según la estación meteorológica del Aeropuerto de Asturias (1212E).

Posteriormente, se han seguido los pasos necesarios (introduciendo los datos en la plantilla Excel) para obtener las curvas IDF de los periodos de retorno de 100 y 500 años (Fig. 8).

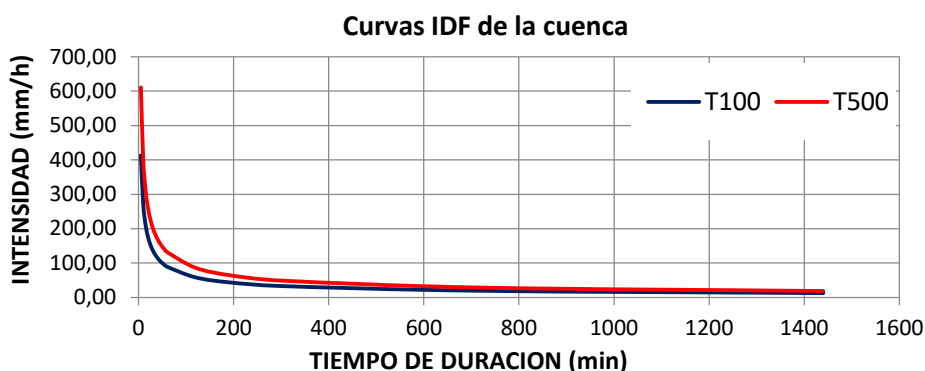


FIGURA 8. Gráfico de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de la cuenca para una duración de 0 a 1440 min de agua cero. El valor mínimo de intensidad es de 12,60 mm/h y el mayor 610,95 mm/h. Los datos más relevantes



corresponden a 1440 min (24h) y 194,70 min (tiempo de concentración) los cuales para el periodo de 100 años tienen una intensidad de 12,60 y 43,24 mm/h respectivamente. Para el periodo de 500 años su intensidad es de 18,62 y 63,93 mm/h.

Para obtener las precipitaciones máximas diarias asociadas a cada periodo de retorno, como se describió en la metodología, se han utilizado varios métodos: a) en el método de Santamaría Arias (1999) se han empleado los parámetros de coeficiente de variación, el valor medio de la máxima precipitación anual y el factor de amplificación para 100 y 500 años; b) en los métodos de estadísticos de distribución de Gumbel y distribución SQRT-ETmax se han utilizado los valores máximos anuales recogidos en la Tabla II.

En la Tabla III se muestran los resultados obtenidos para los dos periodos de retorno considerados. El método de Santamaría Arias es el que presenta los valores más bajos, mientras que los métodos estadísticos presentan valores mayores. La distribución estadística de Gumbel da como resultado el valor más alto de precipitaciones diarias para el periodo de retorno de 100 años (144,05 mm). Los valores obtenidos para el periodo de retorno de 500 años son muy similares entre ambas distribuciones. Por ende, se ha optado por utilizar para el resto de los cálculos (estudio hidrológico) los valores obtenidos mediante análisis Gumbel al considerarlos como la situación más desfavorable.

| Precipitaciones máximas diarias (mm) |                  |            |        |
|--------------------------------------|------------------|------------|--------|
| T (años)                             | Santamaría Arias | SQRT-ETmax | Gumbel |
| 100                                  | 126,54           | 138,00     | 144,05 |
| 500                                  | 161,37           | 181,57     | 179,08 |

TABLA III. Resultados obtenidos por los diversos cálculos de precipitaciones máximas diarias en mm (Santamaría Arias, SQRT-ETmax y Gumbel) para los periodos de retorno de 100 y 500 años, utilizando el registro de datos del 1 de enero de 2001 al 31 de diciembre de 2023.

### Estudio hidrológico

En base a la metodología, primero se obtuvieron los parámetros morfológicos de la cuenca de drenaje. Esta tiene un área de 17,47 km<sup>2</sup> y un perímetro de 20,30 km. Su ancho máximo y longitud axial son de 4,73 y 6,67 km respectivamente, y la pendiente media es de 22 grados. La red de drenaje es de orden 4, siendo su longitud total de 50,99 km con una pendiente media del 5%. El cauce principal es de 11,01 km y tiene sus extremos superior e inferior situados a una cota máxima de 508,98 msnm y una mínima de 49,55 msnm (Fig. 9).

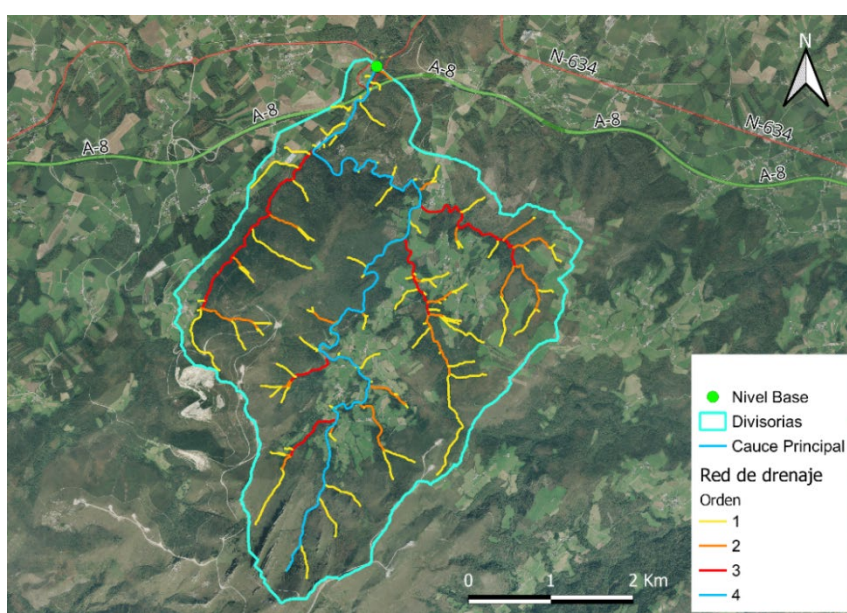


FIGURA 9. Cuenca hidrográfica del río Barayo y red de drenaje consideradas para el cálculo de caudales de proyecto. El nivel de base considerado corresponde a la ODT 2, en la cual se realizó la toma de datos de campo.

Siguiendo con la metodología, se calculó el umbral de precipitaciones que no producen escorrentía directa utilizando el método empírico del número de curva (NC) (Mockus, 1964). El método requiere la reclasificación y combinación de los usos de suelo, los grupos hidrológicos del suelo y las pendientes de la cuenca hidrográfica (Fig. 10).

Los usos de suelo recogidos en el *Corine Land Cover* (CLC) son zonas de bosques de coníferas, bosques de frondosas, landas, matorrales y algunos cultivos de maíz. Cada uno de estos tipos está codificado por el CLC de acuerdo con la tabla IV.

| Usos del suelo, Corine Land Cover 2018                                  | Código CLC-2018 |
|---|-----------------|
| Zona de extracción minera   | 131             |
| Zona de construcción  | 133             |
| Tierras de labor de secano  | 211             |
| Praderas  | 231             |
| Terrenos agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural | 243             |
| Bosques de Frondosas  | 311             |
| Bosques de coníferas  | 312             |
| Landas y Matorrales   | 322             |
| Matorral boscoso de transición  | 324             |

TABLA IV. Codificación de los usos de suelo presentes en la zona según el proyecto del Corine Land Cover 2018.

La reclasificación en grupos hidrológicos del suelo se llevó a cabo según lo expuesto en la metodología, dando lugar a zonas de grupo A, grupo B y/o grupo C en función de la naturaleza de las diferentes litologías y formaciones superficiales existentes en la cuenca. El grupo A corresponde a coluviones y depósitos aluviales, el grupo B a las pizarras negras, areniscas y cuarcitas de las Capas de Lago y el grupo C incluye las pizarras negras de las capas de Berducedo, las cuarcitas y pizarras de las capas superiores del Eo, así como los niveles cuarcíticos de la Cuarcita de Sabugo y las pizarras y areniscas de la Formación Agüeira.

Por último, la pendiente se reclasificó en zonas donde su porcentaje es mayor o igual del 3% y zonas donde es menor. En la cuenca hidrológica han predominado las zonas con un porcentaje de pendiente superior al 3%.

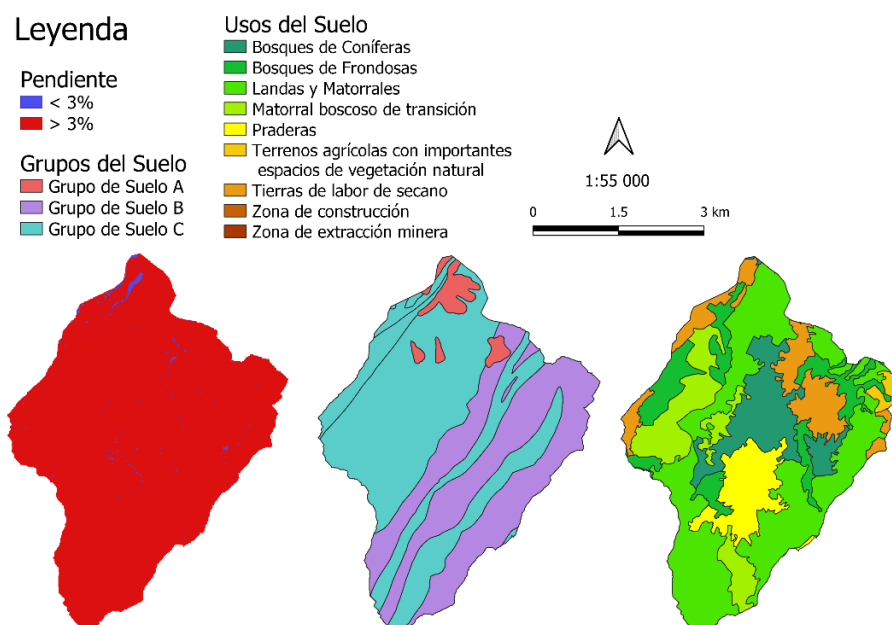


FIGURA 10. Parámetros utilizados para la obtención del número de curva (pendiente, grupos hidrológicos y usos del suelo).

Estas tres variables se han combinado celda a celda, permitiendo determinar un número de curva promedio para toda la cuenca de 52,87 mm y un umbral de escorrentía de 45,27 mm (Fig. 11).

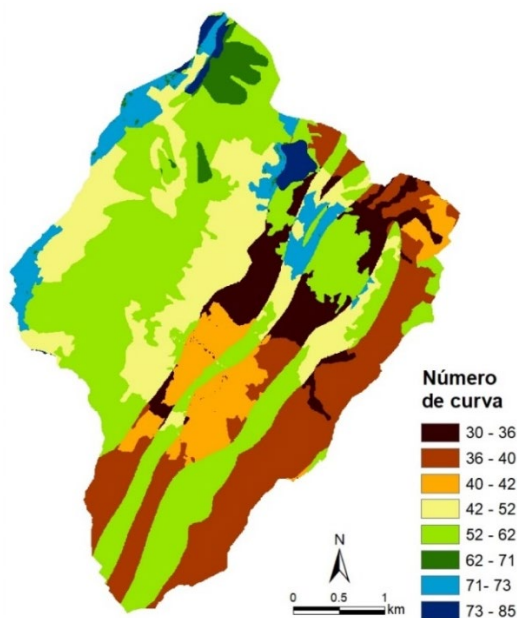


FIGURA 11. Número de Curva de la cuenca obtenido a partir de la pendiente, los usos del suelo y los grupos hidrológicos del suelo. A cada polígono se le ha dado un valor inicial del umbral de escorrentía (Ministerio de Fomento, 2019) a partir del cual se ha calculado el NC de la cuenca.

Tras obtener el número de curva de la cuenca se realizaron los cálculos establecidos en la Norma 5.2-IC de la Instrucción de Carreteras. Drenaje superficial para la obtención del caudal máximo esperable y sus parámetros según los periodos de retorno de 100 y 500 años. Los valores resultantes a partir de las fórmulas desglosadas en la metodología se muestran en la tabla V.

| Datos hidrogeológicos,<br>coeficientes y variables | $T_{100}$   | $T_{500}$    | Unidades               |
|--|-------------|--------------|------------------------|
|  | Valor       | Valor        |                        |
| $I(T, t_c)$  | 24,76       | 30,78        | mm/h                   |
| $I_d$  | 5,51        | 6,84         | mm/h                   |
| $F_{int}$  | 4,49        | 4,49         | adim.                  |
| $t_c$  | 3,24        | 3,24         | h                      |
| $C$  | 0,26        | 0,27         | adim.                  |
| $P_d$  | 144,04      | 179,07       | mm                     |
| $K_a$  | 0,92        | 0,92         | adim.                  |
| $P_0$  | 45,16       | 52,97        | mm                     |
| $K_t$  | 1,24        | 1,24         | adim.                  |
| $Q_t$  | <b>37,9</b> | <b>50,48</b> | <b>m<sup>3</sup>/s</b> |

*TABLA V. Parámetros utilizados en el método racional para la obtención final de los caudales máximos esperables para los periodos de retorno de 100 y 500 años.*

La finalidad principal del método racional para este estudio es la obtención de los caudales máximos anuales para los periodos de retorno de 100 y 500 años. Tal y como se muestra en la tabla V, corresponden a 37,9 y 50,48 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

Estos caudales serán los que se utilicen para realizar la modelización hidráulica que permitirá obtener el comportamiento de la lámina de agua durante picos de caudal correspondientes a sendos periodos de retorno en los escenarios explicados en la metodología.

### **Modelización hidráulica**

Los resultados obtenidos en la modelización para las tres situaciones se muestran en las figuras 12 y 13.

El primer escenario (Fig. 12 A y Fig. 13 A), que representa la situación actual, consta de dos ODTs. Para el periodo de retorno de 100 años, se observa un desbordamiento del canal principal, restringido al entorno del cauce sin llegar a afectar a ninguna edificación. La zona inundada alcanza aproximadamente 10 metros de anchura y registra un calado máximo de aproximadamente 4,5 m con respecto al fondo del cauce entre las ODTs 1 y 2. La zona de mayor velocidad corresponde a un tramo de 32 m aguas abajo de la ODT 2, donde esta alcanza valores de 7,3 m/s. Para el periodo de retorno de 500 años, al igual que en el caso anterior, el desbordamiento no afectaría a las edificaciones cercanas, aumentando aproximadamente 1 metro de extensión lateral con respecto al periodo de retorno de 100 años. La lámina de agua llega a alcanzar los 4,5 m de profundidad en el centro del canal entre la ODT 1 y la ODT 2. En relación con la velocidad, esta aumenta hasta los 7,7 m/s en la misma zona que en el caso anterior.

El segundo escenario considerado (Fig. 12 B y Fig. 13 B) representa la situación previa al evento de 2010, con las tres ODTs previamente descritas en condiciones ideales. En este caso, para el periodo de retorno de 100 años, se ha observado un mayor desbordamiento del cauce que en el escenario anterior, especialmente entre la ODT 2 y la ODT 3. En este caso las viviendas tampoco se verían afectadas por la inundación. El desbordamiento sería casi el doble que el observado en la situación anterior, ocupando una extensión lateral de 18 m. Se alcanzarían calados máximos de 4 m en la misma zona que en la situación anterior. La velocidad aumenta en varias zonas, llegando a los 4,7 m/s. Para el periodo de retorno de 500 años, se observa un desbordamiento mayor que con  $T_{100}$ , alcanzando una anchura máxima de 20 m, pero que al igual que en casos anteriores no afecta a las edificaciones. De nuevo, el calado es igual que en la anterior situación considerada (5 m de profundidad sobre el canal fluvial). La velocidad no experimenta grandes diferencias respecto al periodo de retorno de 100 años.

El último escenario considerado (Fig. 12 C y Fig. 13 C) corresponde a la situación que habría ocurrido en junio de 2010, con la ODT 3 obstruida por acumulación de sedimentos, reduciendo aproximadamente en un 85% la sección libre de las tuberías de drenaje (Fig. 6). Para el periodo de retorno de 100 años, las tuberías serían incapaces de drenar el caudal recibido provocando el desbordamiento del cauce y ocupando la totalidad de la llanura aluvial. En esta situación se inundarían la mayoría de las viviendas localizadas aguas arriba de la ODT 3, como ocurrió en 2010 (Fig. 1 C). El calado máximo, se produciría aguas arriba de la ODT 3, alcanzando los 30 m de profundidad. La velocidad disminuye hasta los 0,02 m/s en este modelo, debido al represamiento del agua. Para el periodo de retorno de 500 años, el desbordamiento aumentaría levemente en planta en algunas zonas. El calado máximo, al igual que en el periodo de retorno de 100 años, se sitúa cerca de la ODT 3, llegando hasta a los 30,5 m de profundidad. La velocidad no varía respecto al anterior periodo de retorno.

La Figura 14 muestra los resultados de la modelización hidráulica para el periodo de retorno de 100 años en una sección transversal al cauce (sección 1123) en la que se observa que la altura de la lámina de agua no sufre grandes variaciones entre las situaciones A y B. Sin embargo, en la situación C (ODT 3 parcialmente taponada) se aprecia un aumento considerable de la lámina de agua por efecto del represamiento causado por la ODT 3 (parcialmente taponada; Figs. 1 y 6).



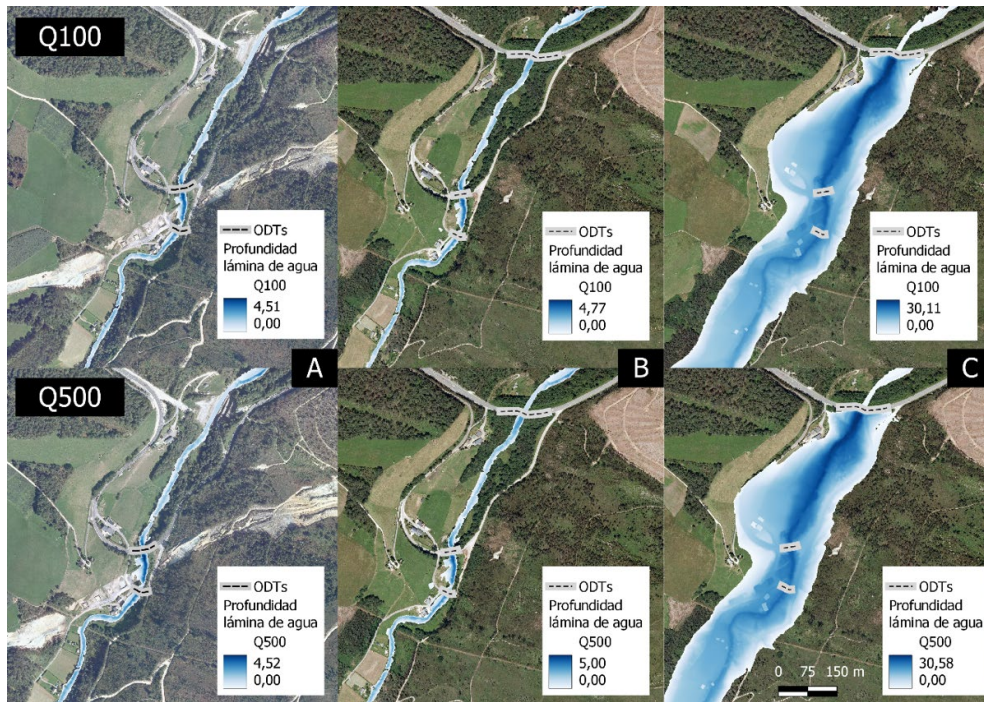


FIGURA 12. Modelización de los calados asociados a los caudales de 100 y 500 años de periodo de retorno considerando tres escenarios: A) geometría actual (sin ODT 3), B) geometría de 2010 con las tuberías de la ODT 3 libres de sedimentos, y C) geometría de 2010 con las tuberías de la ODT 3 parcialmente taponadas. Profundidad de la lámina de agua expresada en metros.

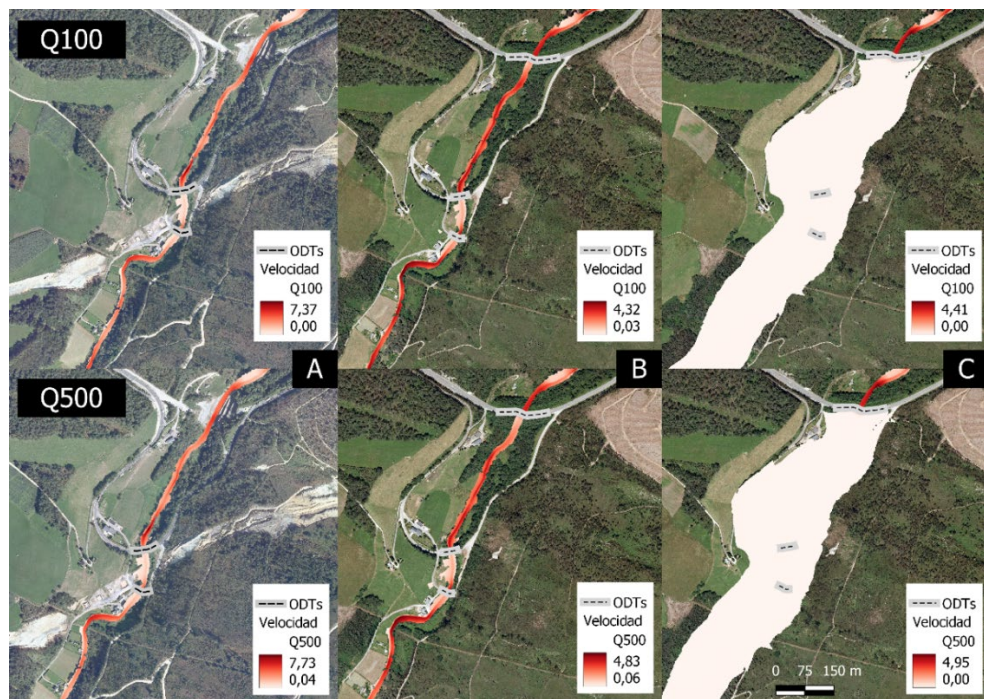


FIGURA 13. Modelización de la distribución de la velocidad (m/s) para los caudales con periodos de retorno de 100 y 500 años considerando tres escenarios: A) geometría actual (sin ODT 3), B) geometría de 2010 con las tuberías de la ODT 3 libres de sedimentos, y C) geometría de 2010 con las tuberías de la ODT 3 parcialmente taponadas.

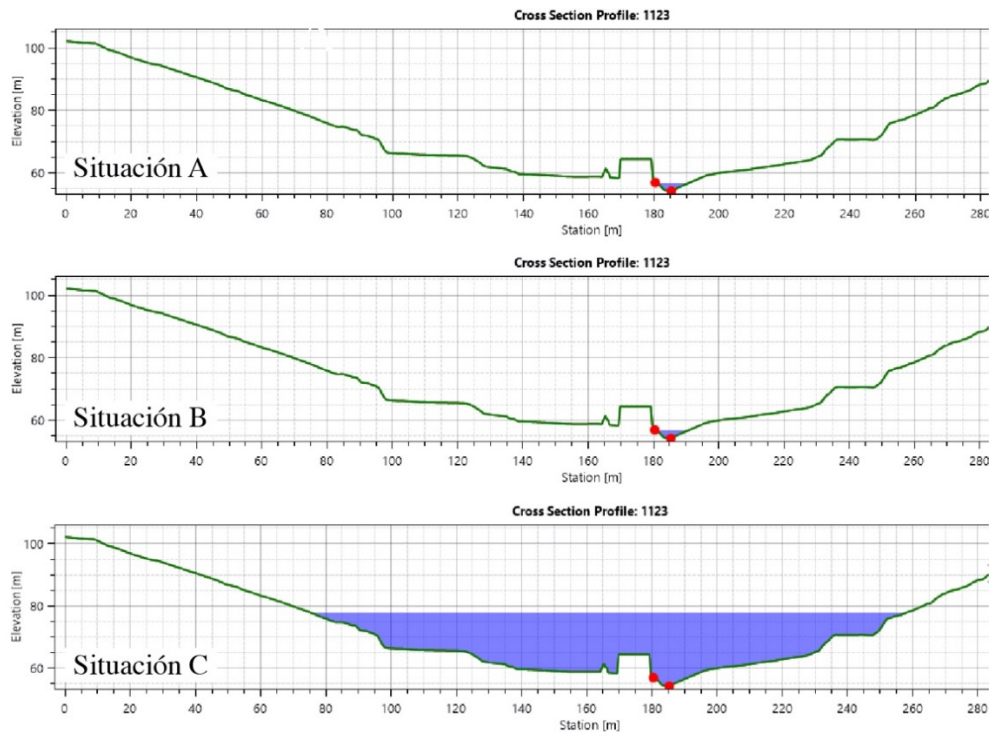


FIGURA 14. Ejemplo de los resultados de la modelización hidráulica en una sección transversal al cauce (sección 1123) para el periodo de retorno de 100 años en cada una de las tres situaciones consideradas.

Los resultados obtenidos sugieren que el diseño de la ODT 3 estaba preparado para desaguar los máximos caudales esperables para periodos de retorno de 100 y 500 años sin producir graves desbordamientos, implicando que la inundación de El Bao podría estar influenciada en gran medida por un taponamiento de las tuberías de drenaje (Fig.1C).

Por lo tanto, es posible, que un factor muy importante a tener en cuenta para explicar la inundación de El Bao en 2010 sea la colmatación de las tuberías por sedimentos. Esta pudo haberse producido antes de la avenida que causó la inundación de 2010, por la acumulación de sedimentos movilizados durante episodios de crecida previos, o durante la propia avenida debido al aumento del agua en el cauce, ya que produce una mayor erosión del lecho fluvial y una mayor removilización y transporte de sedimentos y vegetación. Sin embargo, si se puede afirmar que, considerando los parámetros estudiados, los resultados de las modelizaciones sugieren que la ODT 3 (la cual provocó la represa del río) estaba dimensionada para ser capaz de desaguar los caudales máximos esperables para los periodos de retorno analizados (100 y 500 años) siempre y cuando las tuberías fuesen completamente funcionales. En cambio, cuando la capacidad de desagüe de las tuberías se anula por la obstrucción de estas (Fig. 1C), el resultado observado es un desbordamiento de gravedad aguas arriba de la ODT 3 (Fig. 1A y Fig. 12).

#### 4. CONCLUSIONES

En el estudio se han determinado los caudales máximos correspondientes a periodos de retorno de 100 y 500 años para la zona de El Bao. Utilizando el caudal más desfavorable obtenido por diferentes métodos (cálculo hidrológico), se han realizado modelizaciones hidráulicas para tres situaciones que permitirían explicar las inundaciones ocurridas en la zona durante las lluvias torrenciales ocurridas en junio de 2010.

La primera situación consistió en modelizar únicamente las dos infraestructuras situadas aguas arriba, existentes en la actualidad, con el fin determinar su influencia en las inundaciones. Estas infraestructuras no generaron graves desbordamientos en ninguno de los periodos de retorno considerados.

La siguiente situación estudiada consistió en incluir a la modelización la infraestructura que estaba localizada aguas abajo de la zona, que consistía en un gran terraplén sobre el que pasaba la carretera N-634. El drenaje bajo esta infraestructura estaba compuesto por 3 tuberías de diferente diámetro (ODT 3). Al igual

que en la situación anterior, los resultados obtenidos sugieren un leve desbordamiento del cauce que no llega a afectar a las viviendas cercanas para ninguno de los periodos de retorno considerados.

Por último, se consideró una situación en la cual las tuberías de esta última infraestructura estuvieran casi colmatadas de sedimentos. En este caso, los resultados muestran una gran inundación que afecta a toda la llanura aluvial, tanto para el periodo de retorno de 100 años como para el de 500 años. En ambos casos el calado máximo de la lámina de agua alcanzaría una profundidad mayor de 27 m, anegando por completo las viviendas de la zona.

Por lo tanto, los resultados obtenidos a partir de las modelizaciones hidráulicas en las diferentes situaciones sugieren que la colmatación de la obra de drenaje pudo ser un factor clave para comprender la inundación de El Bao durante el evento extraordinario de precipitación ocurrido en Asturias en junio de 2010.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Estatal de Meteorología (s.f.). *Datos climáticos de la estación meteorológica de Asturias Aeropuerto (Asturias)* [en línea]. Fecha de consulta: 22 febrero de 2024. Disponible en línea en: [https://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/ultimosdatos?k=ast&l=1212E&w=0&datos=img&x=h24&f=vel\\_viento](https://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/ultimosdatos?k=ast&l=1212E&w=0&datos=img&x=h24&f=vel_viento)
- Brunner, G.W. (2020). HEC-RAS River Analysis System. *Hydraulic Reference Manual version 6.0. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center*. Disponible en línea en: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Cantergiani, C., Navarro, D., García, G., Feliu, E., Klein, J., Valkama, M., Schmidt-Thomé, P., Kesäläinen, V., Staudt, M., Fleischhauer, M., Greiving, S., Mihal, P., Blecking, M., Ferhrmann, P., Jorg, L., Rademaekers, K., Petsinaris, F., Korteweg, L., Ivanova, O., Eklund, L., Molnár, B., Fazekas, D. y Stenning, J. (2020). ESPON-TITAN Impactos territoriales de los desastres naturales (Informe final). *ESPON*.
- Chazarra-Bernabé A., Flórez García E., Peraza Sánchez B., Tohá Rebull T., Lorenzo Mariño B., Criado Pinto E., Moreno García J.V., Romero Fresneda R. y Botey Fulla R. (2018). *MAPAS CLIMÁTICOS DE ESPAÑA (1981-2010) Y ETo (1996-2016)*. Ministerio de Transición Ecológica y Agencia Estatal de Meteorología. pp.11-13
- Confederación Hidrográfica del Cantábrico (2024). Mapa de zonas inundables [Visor SIG CHC].
- CORINE Land Cover (2018). <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>
- González-Menéndez, L., Heredia, N., Marcos, A. (2008). *Mapa Geológico Digital continuo E. 1:50.000, Zona Asturoccidental-Leonesa (Zona-1100)*. En GEODE. Mapa Geológico Digital continuo de España. [en línea]. [16/02/2024]. Disponible en línea en: <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geodezona.aspx?Id=Z1100&language=es>
- Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (2008). Guía metodológica para la elaboración de cartografías de riesgos naturales en España. Ministerio de Vivienda.
- Julivert, M, Fontboté, J.M., Ribeiro, A., Conde, L.E., 1972. Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares, escala 1:1.000.000, memoria explicativa. IGME, Madrid, pp. 1-13.
- La Nueva España, (2010). La inundación de El Bao. Disponible en línea en: <https://www.lne.es/occidente/2010/06/23/inundacion-bao-21316637.html>
- Latevaweb (2022, octubre 4). HidrojING, ingenieros hidráulicos. HidrojING. <https://www.hidrojing.com/hidrojing/>
- Lotze, F., 1945. Zur gliederung der varisziden der Iberischen Meseta. *Geotektonische Forschungen* 6, 78-92.
- Marcos A. y Pulgar J.A. (1980). Mapa geológico y Memoria de la Hoja nº 11/1124 (Luarca). Mapa geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME. Depósito Legal: M· 33,906 -1980
- Ministerio de Fomento (2019). *Norma 5.2-IC de la Instrucción de Carreteras. Drenaje superficial. Dirección General de Carreteras*. Págs. 1 a 31. Disponible en línea en: [https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/carreteras/52ic\\_fom2982016\\_err\\_fom1852017\\_res180326\\_consolidado.pdf](https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/carreteras/52ic_fom2982016_err_fom1852017_res180326_consolidado.pdf)
- Ministerio de Justicia e Interior (1995). Directriz Básica de Planificación Civil ante el Riesgo de Inundaciones. Boletín Oficial del Estado núm. 38, págs. 4846 a 4858. Disponible en línea en: <https://www.boe.es/boe/dias/1995/02/14/pdfs/A04846-04858.pdf>
- Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (2010). Episodios de inundaciones diagnóstico de la situación a 3 de noviembre de 2010. Madrid. NIPO: 770-10-234-0 [https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf\\_EIR%2FEIR\\_2010\\_1Noviembre.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_EIR%2FEIR_2010_1Noviembre.pdf)



- Mockus, V. (1964). National engineering handbook. US Soil Conservation Service. Vol. 4. Washington.
- Mora, M.A., Domínguez, M.J., Valenzuela, P. (2019). Inestabilidades de ladera provocadas por precipitaciones intensas: caso de estudio del 9 al 16 de junio de 2010 en Asturias. Agencia Estatal de Meteorología. P. 659-666. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/11030>
- RTPA (2010). La N-634 en El Bao se acondicionará por su viejo trazado y no por el derruido. Disponible en línea en: [https://www.rtpa.es/noticias-asturias:La-N-634-en-El-Bao-se-acondicionara-por-su-viejo-trazado-y-no-por-el-derruido-\\_111280486741.html](https://www.rtpa.es/noticias-asturias:La-N-634-en-El-Bao-se-acondicionara-por-su-viejo-trazado-y-no-por-el-derruido-_111280486741.html)
- Santamaría Arias J., Parrilla A., Menéndez M., Témez J.R., Ardiles L., Estrela T., Ferrer M., Ferrer J., Gamo J.R., Pérez M.A., Rosel P., Bartolomé C. y Navarro A., (1999). Máximas lluvias diarias en la España peninsular. *Ministerio de Fomento*. p.55 [https://www.transportes.gob.es/recursos\\_mfom/0610300.pdf](https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/0610300.pdf)
- Wang, L. & H. Liu (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20 (2), 193-213.