



VNIVERSIDAD D SALAMANCA

Escuela **Politécnica Superior**
de **Ávila**

Grado en Ingeniería Civil

Trabajo fin de grado

Curso académico 2019/2020

**La avenida del 7 de diciembre del 2000 en la cuenca del arroyo
Respina. Comparación de los datos geomorfológicos y los modelos
hidrológico-hidráulicos**



Autor

Iván Aris Hernández

Tutores

Pedro Huerta Hurtado

Javier Elez Villar

Ávila, Junio de 2020

ÍNDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT.....	6
AGRADECIMIENTOS	7
1. Introducción	8
2. Contexto geográfico	11
2.1 Delimitación de la cuenca.....	15
2.2 Climatología	16
3. Contexto geológico	19
3.1 La cuenca del arroyo Respina	22
3.2 Parámetros e índices morfométricos de la cuenca.....	26
3.2.1 Resultados	31
3.3 Características de la red de drenaje	32
3.4 Perfil longitudinal del cauce principal.....	34
4. Materiales y metodología	36
4.1 Fuentes de información.....	36
4.2 Elaboración de cartografía temática	37
4.3 Estudio geomorfológico de la zona de afección	37
4.3.1 Introducción	37
4.3.2 Inundabilidad histórico-geomorfológica	38
4.3.3 Elementos morfológicos a estudiar	39
4.3.4 Estudio de los sedimentos	39
4.3.5 Delimitación de las zonas con evidencias recientes y/o reiteradas	40
4.3.6 Trabajos de campo para localización e identificación de las evidencias, formas y depósitos	41
4.3.7 Delimitación de niveles de máximas crecidas a partir de elementos geomorfológicos	42
4.4 Software de modelización IBER	45
4.4.1 Capacidades.....	45

4.4.2 Hidráulica	46
4.4.3 Ecuaciones de Saint Venant	46
4.4.4 Fricción de fondo	47
4.5 Generación del modelo e implementación de la simulación (preproceso)	48
4.5.1 Geometría	49
4.5.2 Modelo de pérdidas	53
4.5.3 Condiciones Hidrodinámicas de entrada y salida.....	59
4.5.4 Rugosidad.....	59
4.5.5 División en subcuencas	60
5. La avenida del 7 de diciembre del 2000.....	62
5.1 Hidrograma de avenida	64
5.2 Efectos erosivos y sedimentarios de la avenida y procedencia de los acarreos.....	69
6. Resultados	83
6.1 Escenarios.....	84
6.2 Modelización hidrometeorológica.....	87
6.3 Modelización hidráulica	94
7. Discusión de resultados	96
7.1 Comparación de escenarios	96
7.2 Comparación con los datos geomorfológicos observados.....	98
7.3 Mapas de peligrosidad de inundaciones	100
8. Conclusiones	103
9. Referencias	106
Índice de figuras.....	111
Índice de tablas	114
Anexo: “Número de Manning”	115
Anexo: Hidrogramas resultantes, estudio de afección del tamaño malla.....	118

RESUMEN

En la actualidad, los eventos hidrológicos extremos son foco cada vez de más atención dado el enorme coste social y económico que causan, costes claramente en aumento a lo largo de las últimas décadas. Entre ellos, las avenidas e inundaciones representan un riesgo potencial especialmente elevado por la cantidad de daños y pérdidas que pueden ocasionar. Este TFG ha abordado esta problemática mediante el estudio de la avenida ocurrida el 7 de diciembre del año 2000 en la cuenca del arroyo Respina que causó importantes daños por los efectos erosivos y sedimentarios que tuvieron lugar en la zona afectada.

En el marco de esta avenida, se han planteado distintos escenarios para encontrar aquel que más se ajustara a lo ocurrido puesto que se carece de registros pluviométricos y foronómicos dentro de la cuenca. El siguiente paso ha sido la realización de diferentes modelos hidrológicos con los que se ha obtenido el caudal punta de la avenida para posteriormente construir un modelo hidráulico. Los resultados de este modelo han sido contrastados con las evidencias geomorfológicas recogidas con el fin de evaluar la idoneidad del modelo y justificar los efectos erosivos y sedimentarios que provocó la avenida de estudio. En este sentido se puede afirmar que la falta de datos hidrológicos de la avenida con los que se debe llevar a cabo la modelización puede ser solventada por el estudio de evidencias geomorfológicas recogidas en campo.

Palabras clave: avenida torrencial, modelización hidrológico-hidráulica, geomorfología, erosión, carga sólida

ABSTRACT

Nowadays, extreme hydrological events are the focus of increasing attention given the enormous social and economic costs they cause, which have clearly increased over the last few decades. This TFG has addressed this problem by studying the flood that occurred on 7 December 2000 in the Respina waterhead, which caused significant damage due to the erosive and sedimentary effects that occurred in the affected area.

In the framework of this flood, different scenarios have been set out in order to find the one that would best suit what happened, since there is a lack of pluviometric and foronomic records within the basin. The next step has been to carry out different hydrological models with which the peak flow of the flood has been obtained in order to subsequently construct a hydraulic model. The results of this model have been contrasted with the geomorphological evidence collected in order to evaluate the suitability of the model and justify the erosive and sedimentary effects caused by the flood under study. In this context, it can be said that the lack of hydrological data of the flood with which the modelling should be carried out can be solved by the study of geomorphological evidence collected in the field.

Key words: flash flood, hydrological-hydraulic modelling, geomorphology, erosion, sediment transport

AGRADECIMIENTOS

Cuando pienso en todas las personas que de una forma u otra me han ayudado a llegar hasta aquí se me vienen a la cabeza infinidad de nombres. Quizás si intento nombrar a todas y cada una de ellas cometa el error de olvidarme de alguien y no me gustaría incurrir en él porque considero que todas han aportado su granito de arena a esta gran montaña. Sin embargo, tendré que mencionar a algunas de ellas por su enorme apoyo durante todo este largo proceso. Empezando por mi familia, mi madre, mi hermana, mis tíos, mi abuela, los que siempre han estado conmigo cuando todo se ponía cuesta arriba. Siguiendo por mis profesores, los duros y los cercanos, porque de todos ellos he aprendido mucho, aunque a veces pensara que solo me hacían sufrir. Aquí no puedo olvidarme de mis tutores, Pedro y Javi, y también de Fernando, porque me han dedicado todo su tiempo y paciencia para transmitirme su enorme conocimiento de forma encantadora. También tengo que agradecer la idea y el buen trato recibido por parte de Pablo, sin él este trabajo no hubiera nacido. Ahora viene el turno de mis amigos y compañeros, una larga lista de personas con las que desconecto, cojo aire y me dan alas para perseguir mis objetivos. Y por último, me gustaría dedicarle unas líneas a todas esas personas que el deporte me ha dado la oportunidad de conocer y que, de diferente manera, me han abierto puertas y allanado el camino para estar donde ahora estoy.

1. Introducción

En el presente estudio se tratará de evaluar la carga sólida transportada durante la avenida ocurrida el 7 de diciembre del año 2000 en la cuenca del arroyo Respina, que desemboca en la población de Puebla de Lillo (norte de la provincia de León), la cual provocó importantes daños en los criaderos de salmónidos situados en el cauce de dicho arroyo.

El interés por el estudio de dicha avenida se remonta al pleito que tuvo lugar entre la Mina de Talco situada en la cabecera de la cuenca y, los propietarios de los criaderos de salmónidos localizados a lo largo del cauce. Estos últimos aducían que la responsabilidad del desastre ocurrido debía ser soportada por la empresa minera pues se creía a esta culpable de la inadecuada manutención de las escombreras, lo que según aquellos provocó que la carga de sedimentos se viera incrementada.

Se establece como punto de partida al presente estudio el informe de Silva (2000). Este informe presenta cartografías de campo y análisis sedimentológicos de la avenida a estudio, así como un análisis de los procesos sedimentarios y erosivos relacionados. El objetivo de este TFG es contrastar los resultados de la modelización hidrológica e hidrometeorológica con las evidencias geomorfológicas recogidas y sintetizadas en la cartografía del evento torrencial. No se pretende discutir el eventual papel que pudieran tener las actividades mineras en el criadero de salmónidos.

La avenida del 7 de diciembre se desencadenó por la combinación de diversos factores geográficos, meteorológicos, hidrológicos y geomorfológicos. Las consecuencias que esta causó se debieron al cúmulo de varias circunstancias relacionadas con las precipitaciones: la alta humedad previa que presentaba el suelo debido a las precipitaciones que se registraron los días anteriores a la avenida, la elevada intensidad de la lluvia en los momentos previos (capaz de reactivar estructuras de erosión y sedimentación aparentemente estabilizadas) y la focalización de las mismas en las zonas de la cuenca susceptibles de generar carga sedimentaria. En el estudio de otras avenidas catastróficas en cuencas de montaña como la del barranco de Arás del Pirineo Aragonés, se describe una casuística similar (García-Ruiz *et al.*, 1996; Alcoverro *et al.*, 1999); aludiendo a estos factores y realizando interpretaciones de relevancia e interés para el presente estudio debido a la similitud que existe en los fenómenos.

El objetivo de este TFG es reconstruir la avenida empleando la modelización tanto en la parte hidrológica, para estimar el caudal circulante, como en el ámbito hidráulico, para obtener las velocidades y calados que se dieron en el cauce, con el fin de poder realizar una comparación con las evidencias geomorfológicas que se tomaron tras el evento y su posterior análisis. Así mismo, los datos obtenidos en los modelos hidrológico-hidráulicos serán empleados para la determinación de la carga sedimentaria movilizada, así como la procedencia de la misma, lo cual podrá ser contrastado atendiendo a las pruebas geológicas y parámetros geomorfológicos que se tomaron en la cuenca.

La problemática del estudio de los riesgos que ocasionan las inundaciones está en boga actualmente debido a las numerosas pérdidas sociales y económicas que éstas han producido en toda Europa durante el pasado siglo. El desafío al que se enfrentan este tipo de estudios es la escasez o inexistencia de datos sobre caudales instantáneos representativos de las grandes avenidas en las cuencas a estudiar (Benito, 2014).

En toda Europa, las respectivas legislaciones nacionales basan la evaluación de la peligrosidad de inundaciones en un análisis de la frecuencia de crecidas para estimar caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno (Benito *et al.*, 2004). El procedimiento más común supone una extrapolación usando los registros de estaciones de aforo que normalmente tienen datos hasta 40 años atrás, lo que es un exiguo registro con el que estimar los cuantiles de las avenidas más grandes y de las extremas. Este tradicional método de abordar la problemática de los riesgos por inundación puede verse mejorado si se incluye en el estudio información acerca de avenidas extremas usando metodologías y procedimientos sistemáticos claros.

En cuencas y arroyos de montaña, los denominados flujos hiperconcentrados que abarcan avenidas de derrubios y corrientes con escasa carga de sedimento transportada (Smart y Jaeggi, 1983), adquieren una relevante importancia en la problemática de las grandes avenidas. El estudio de las avenidas de derrubios se puede acometer desde dos aproximaciones metodológicas: 1) directa, lo que implica analizar el fenómeno mientras ocurre mediante mediciones de parámetros físicos como pueden ser la velocidad, densidad, volumen de carga sólida, etc. o sobre modelos a escala en el laboratorio; y 2) indirecta, a través del análisis de fenómenos pasados y la aplicación de modelos matemáticos que emplean ecuaciones para reproducir su funcionamiento y su probable actividad futura (del Pozo *et al.*, 2006).

La dificultad de aplicar modelos directos a causa de la instantaneidad y aletoriedad que los caracteriza, hace que normalmente se analicen mediante modelos físico-matemáticos que calculan parámetros hidrológicos (caudales, líquido y sólido) e hidráulicos (velocidad, calado, densidad..). Sin embargo, la mayoría de las veces, estos modelos incurren en la necesidad de ser cumplimentados y combinados con evidencias geomorfológicas y modelos hidro-geotécnicos para reconstruir fielmente las particularidades de cada evento (Rickenmann, 1991).

Para la reconstrucción de estas avenidas se hace importante contar con varias fuentes de datos como son los registros de precipitaciones de la zona de estudio, los registros de caudales de las estaciones de aforo en funcionamiento, información realtiva a inundaciones de relevancia ocurridas en el pasado así como parámetros geomorfológicos y geotécnicos con los que poder elaborar mapas temáticos de la cuenca. Es muy frecuente no disponer de información referente a todos y cada uno de los aspecto mencionados, sin embargo, apoyándose en las herramientas existentes actualmente, se pueden establecer relaciones entre los datos disponibles para tratar de incrementar la base de información sobre la que se elaboran los modelos que reproducen estos eventos (Lopetegi, 2005).

2. Contexto geográfico

La cuenca del arroyo Respina, objeto de estudio del presente trabajo, se encuentra localizada en la comunidad autónoma de Castilla y León, concretamente al norte de la provincia de León colindando con el principado de Asturias y al oeste de la Cordillera Cantábrica. Es una cuenca de carácter montañoso situada a una gran elevación sobre el nivel del mar (más de 2000 m en cabecera) donde se ha originado un valle glaciar propio de la montaña Leonesa.



Figura 1.- Mapa de situación geográfica.

El punto de obra de la cuenca se ha situado en la entrada del cauce a la población de Puebla de Lillo para estudiar en toda la extensión geográfica la avenida que afectó también a dicha población. Además, dicho punto de obra se encuentra próximo a la estación de aforos del embalse del Porma perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Duero de la cual se han obtenido datos relevantes de la cuenca de estudio. De ahí el interés por aproximar el punto de desagüe de la cuenca lo más cerca posible de esta estación de aforos, pero manteniendo como cauce principal el arroyo Respina y su continuación hasta la citada población.

En la **Figura 2)** se pueden localizar los elementos más importantes a la hora de representar un esquema general.

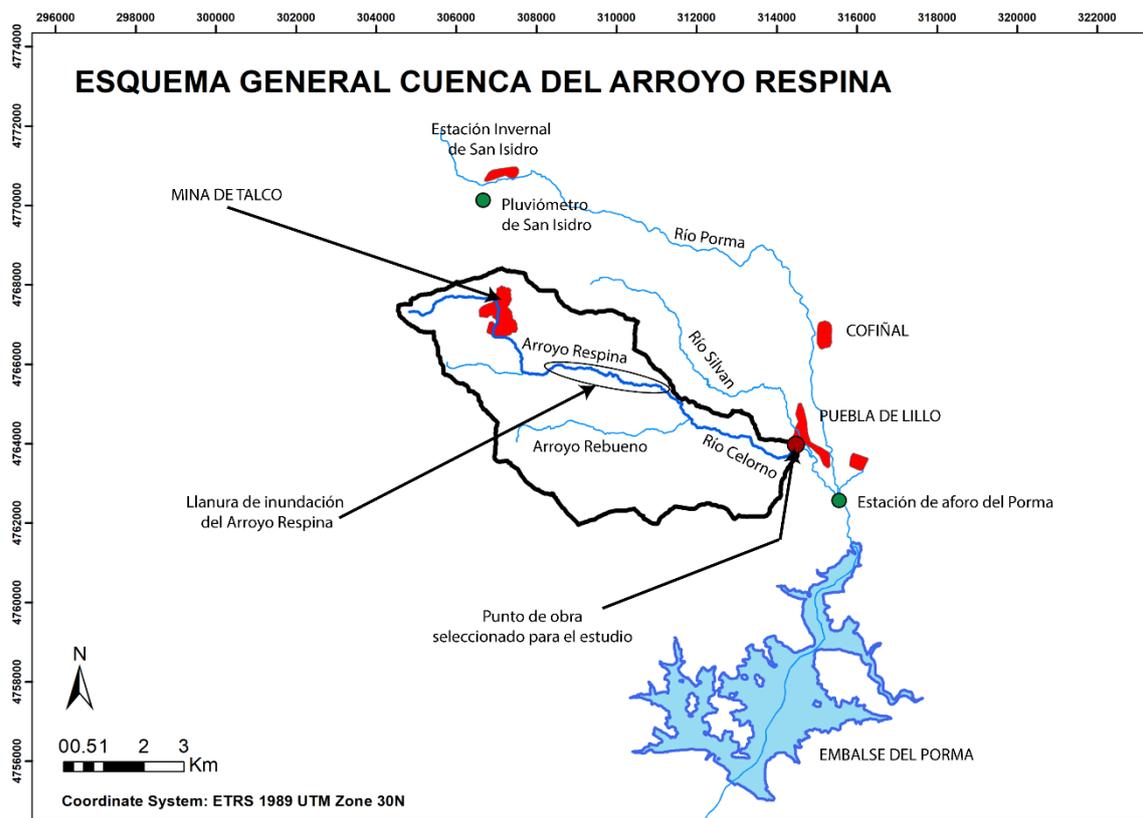


Figura 2.- Esquema general de la cuenca de estudio.

Más arriba de la población de Puebla de Lillo se sitúa el municipio de Cofiñal, por donde discurre el río Porma en su recorrido inicial. El arroyo Respina, tras unirse con el río Celorno, acaba desembocando en el río Porma que sigue hasta desaguar en el Embalse del Porma, pasando por la estación de aforo a la que se ha hecho referencia antes y de la cual se ha obtenido el hidrograma del día de la avenida que se expondrá en los apartados siguientes.

Fuera de la delimitación de la cuenca se encuentra la estación pluviométrica del puerto de San Isidro en las inmediaciones de la estación invernal homónima. De esta estación también se obtuvieron datos tanto de los días previos a la avenida como de las horas en las que ésta tuvo lugar. Sin embargo, como más adelante se expondrá, estos datos no son representativos de los episodios lluviosos que realmente provocaron la avenida de estudio. No obstante, suponen un dato fiable que será utilizado como punto de partida.

Finalmente, en la cabecera de la cuenca se encuentra situada la corta abandonada de la mina a cielo abierto denominada Respina, de donde se extraía talco y que explotó la multinacional Río Tinto Minerals hasta el año 2010, habiéndose iniciado en el año 1975.

El cierre de la explotación se debió al agotamiento del recurso mineral que extraían, según afirmó la propia compañía y publicó el Diario de León en enero del 2010.¹



Figura 3.- Fotografía de la entrada a la mina. Fuente: Cañón, 2009

Actualmente la corta de la mina se encuentra abandonada, existiendo diversos canales ejecutados por los propietarios de la mina para la recogida de la escorrentía de la parte superior de la corta hacia el fondo de ésta. Además, las escombreras que fue necesario ejecutar durante y tras la explotación suponen una gran superficie en los alrededores de la corta.

¹<https://www.diariodeleon.es/articulo/leon/rio-tinto-cierra-mina-talco-puebla-lillo-planta-bonar/201001221032001079173.html>



Figura 4.- Fotografía desde el mirador de la corta hacia la cabecera de la cuenca. Fuente: Sanchis, 2018.

Como ejemplo de las canalizaciones citadas, en la **Figura 5)** se puede ver cómo han sido construidos los cauces para recoger la escorrentía de la zona de las escombreras y restituirla al cauce natural del arroyo. La mayoría de estos canales son funcionales solamente en episodios lluviosos intensos como el que a nosotros nos concierne. Sin embargo, se sabe que parte de estas canalizaciones fueron ejecutadas a posteriori, es decir, después de los efectos provocados por la avenida que estudiaremos.



Figura 5.- Canal del aliviadero hasta la restitución al arroyo. Fuente: Sanchis, 2018

2.1 Delimitación de la cuenca

La cuenca de estudio ha sido delimitada empleando el MDTs de tamaño de píxel de 5 m que ofrece el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), y utilizando las herramientas de hidrología del programa de SIG ArcGIS 10.3. Aunque el modelo hidráulico se limitará al estudio de la llanura de inundación del arroyo Respina la cuenca ha sido delimitada tomando como punto de obra la entrada a la población de Puebla de Lillo por las razones anteriormente expuestas. Como resultado se ha obtenido la siguiente cuenca hidrográfica:



Figura 6.- Mapa general de la cuenca de estudio con la red de drenaje.

Asimismo, la red de drenaje ha sido obtenida de forma análoga a como se ha obtenido la divisoria de dicha cuenca pero, posteriormente ha sido corregida y refinada en aquellos puntos donde lo obtenido carecía de sentido, de acuerdo a la ortofoto de máxima actualidad (tomado en mayo del año 2018, con una resolución de 0,25 x 0,25 m y, descargada del CNIG).

Uno de los puntos conflictivos en la definición de la red de drenaje ha sido la corta clausurada donde se ubica la mina Respina, en donde ha sido necesario redibujar ciertos cauces que no quedaban definidos correctamente debido a las imprecisiones del MDT.

Con el fin de definir y denominar correctamente los cauces y localizaciones más importantes de la zona de estudio se ha elaborado el siguiente mapa topográfico (Figura 7) a partir de las hojas 1:25.000 disponibles en la web del CNIG.

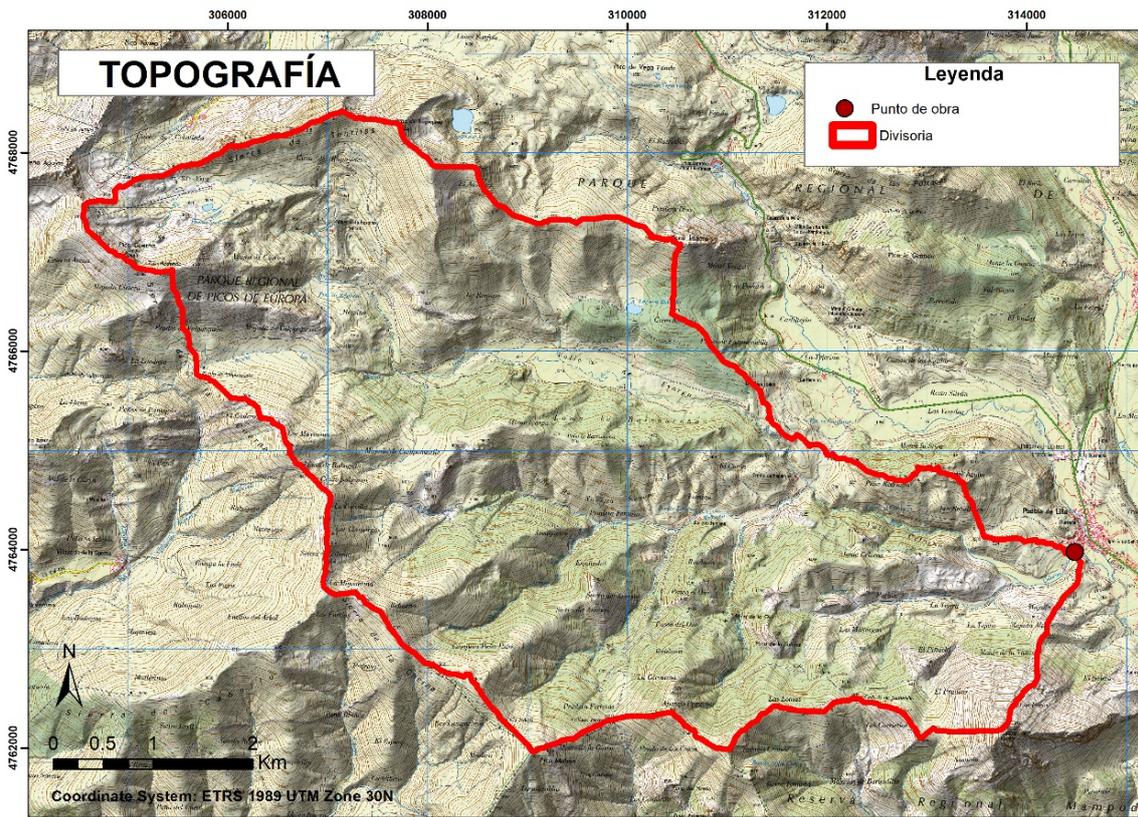


Figura 7.- Mapa topográfico de la cuenca de estudio. Fuente: CNIG

2.2 Climatología

El clima dominante en el área de estudio donde se localiza nuestra cuenca es el propio de la Cordillera Cantábrica. Esta cadena montañosa se extiende casi por todo el límite norte de España e introduce un marcado contraste entre lo que se conoce como la Iberia Húmeda y la Iberia Seca. La cara norte está constituida por una estrechada fachada azotada por los vientos de origen marino provenientes del mar Cantábrico y está cubierta por una vegetación atlántica. La vertiente meridional constituye un extenso espacio de transición climática donde se presentan taxones submediterráneos o subatlánticos (Ortega Villazán y Morales Rodríguez, 2015).

La vertiente occidental, donde se encuentra situada la cuenca de estudio, está estructurada en grandes moles de relieves apitonados y profundos valles, lo que la convierte en una montaña compartimentada, una muralla orientada de este a oeste y según vertientes N/S como son los valles de Fuentes de Invierno, S.Isidro/Curueño-Porma. En esta parte se dan los rasgos climáticos de alta montaña, lo que le hace ser un área de alta peligrosidad climática ya que las precipitaciones son más elevadas, las nevadas más copiosas y prolongadas en el tiempo, las temperaturas más bajas, y la aridez estival no existe.

Los inviernos pueden ser caracterizados como inviernos de montaña, largos y muy rigurosos ya que las temperaturas son las propias de un clima de montaña sobre todo en las zonas altas pues los valles no dejan de ser áreas cobijadas, aunque en ocasiones, debido a las inversiones térmicas, los valles también sufren la intensidad de las bajas temperaturas propias de las cumbres. El dato que justifica esta afirmación es la temperatura media de enero en la estación Isoba/S.Isidro, situada a más de 1300 m, con un valor de 0,1°C. Además, la estación de Cofiñal, situada en una zona de valle a una altitud de alrededor de 1100 m, arroja el dato de 1,3°C, lo que también supone una temperatura media en enero realmente baja. La duración del frío puede ser contrastada con el número de meses con temperaturas medias inferiores a 10°C, que para el caso de la estación de S.Isidro suele variar de 8 a 10 meses. Todo ello es altamente clarificador acerca del clima de montaña que se da en nuestra zona de estudio.

Por otro lado, los veranos se presentan con carácter de montaña, siendo frescos, cortos y dispares. La temperatura media estival (julio y agosto), obtenida a partir de los datos medios mensuales de la estación de Isoba/S.Isidro es de 12,7°C, un dato que corrobora el hecho de que el sol tarda en calentar el suelo desde el amanecer y la sensación de frescor es palpable hasta varias horas después. También se alcanzan temperaturas elevadas, sin embargo, es posible percibir grandes contrastes térmicos entre el día y la noche o el sol y la sombra y esto es debido a la altitud a la que se encuentra la cuenca y la sequedad que se presenta en la atmósfera en el periodo estival.

En cuanto a las precipitaciones, se ha empleado la estación pluviométrica situada en Puebla de Lillo de la cual se tienen registros desde 1934, durante 73 años. Para medir la irregularidad temporal de las precipitaciones se emplea el coeficiente de variación de la serie estudiada (Balairón Pérez, 2002), cuyo valor para la serie de datos estudiada es de

0,204. Conocido este valor, es posible afirmar una cierta de regularidad de las precipitaciones si atendemos al dato de que en España el coeficiente de variación media para las diferentes demarcaciones hidrográficas se encuentra entre 0,35-0,4. La media anual de precipitaciones de todo el periodo de estudio arroja un valor de 1413 mm la cual supera en gran medida a la media anual de la península (675 mm aproximadamente). Esto es debido a la localización de la cuenca al oeste de la Cordillera Cantábrica, donde los frentes provenientes del atlántico afectan en mayor medida, viéndose disminuida la humedad de las masas de aire en sentido este. Si la cuenca estuviera situada en la cara norte de la Cordillera, en la zona asturiana, este valor sería aún mayor, sin embargo, ocurre algo similar en sentido sur en cuanto a la humedad de las masas de aire.

Respecto a la distribución mensual de las precipitaciones se presenta el siguiente hietograma (**Figura 8**) extraído de Magalhães (2010) de la estación de Puebla de Lillo donde se puede comprobar que diciembre, el mes en el que ocurrió la avenida, es uno de los meses más lluviosos del año.

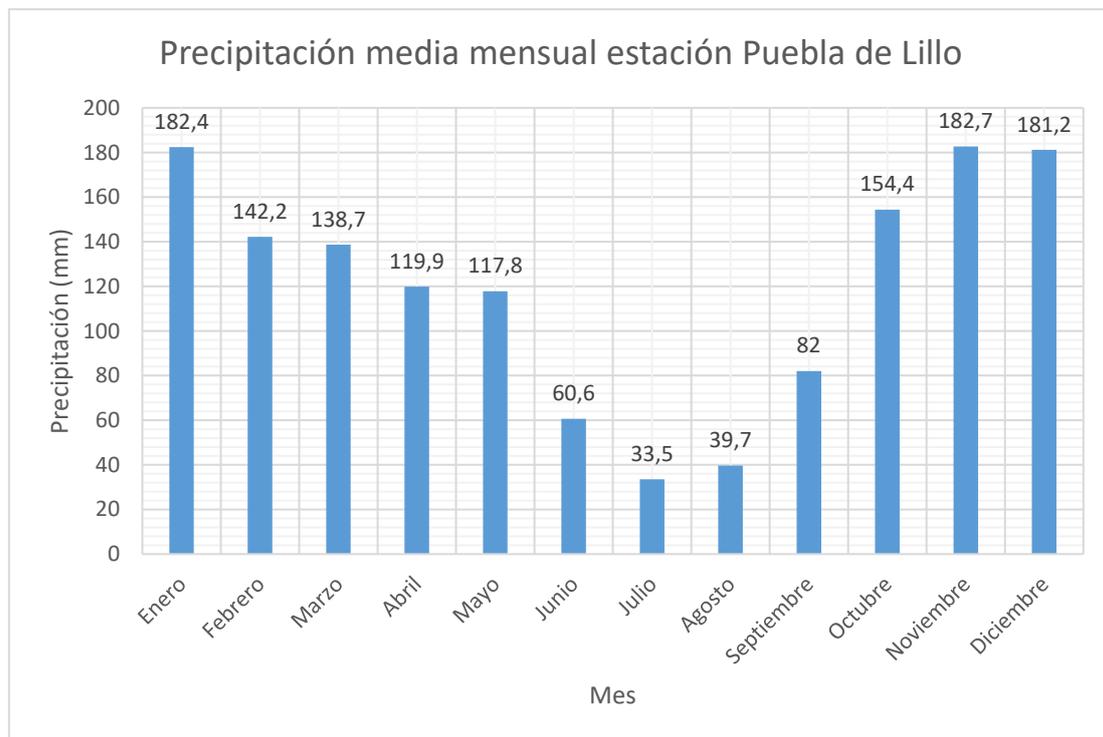


Figura 8.- Distribución mensual de las precipitaciones en la estación pluviométrica de Puebla de Lillo. Modificado de Magalhães (2010)

3. Contexto geológico

La mayor parte de la cuenca se encuentra situada en la hoja número 0079 de la distribución realizada en el MTN50, solo una ínfima parte de la cuenca, en su zona sur, se encuentra dentro de la hoja número 0104 por lo que la descripción geológica se realizará al completo de acuerdo a la memoria explicativa del Mapa Geológico Nacional (MAGNA) elaborada por el IGME (Álvarez-Marrón *et al.*, 1990).

La cabecera de la cuenca está compuesta por cuarzoarenitas, areniscas blancas y pizarras del Cámbrico Superior que son las litologías asociadas a las cumbres que conforman la divisoria de la cuenca y rodean la zona de minas de talco. La zona media y baja de la cuenca está conformada por calizas, lutitas, areniscas y margas que datan del Carbonífero (Moscoviense) (Álvarez-Marrón *et al.*, 1990). La sucesión geológica presente en la zona fue deformada durante la Orogenia Varisca (Carbonífero-Pérmico) y también durante la Orogenia Alpina (Eoceno-Mioceno). Esta última orogenia es la responsable, junto con otros procesos, del relieve de la cordillera.

La región donde se sitúa la cuenca, en referencia a la estratigrafía, se caracteriza por la presencia de una laguna estratigráfica que comprende parte del Ordovícico, el Silúrico y el Devónico, con la salvedad de una pequeña representación del Devónico Superior.

Los procesos que han dado forma al relieve son de diversa naturaleza, dando lugar a una superposición de diversos tipos de modelado que han intervenido sucesivamente en relación con los cambios climáticos pleistocenos (Vega *et al.*, 2014). Aunque prácticamente en la totalidad del territorio dominan procesos característicos de modelado templado-húmedo, en las laderas más elevadas y umbrías se han conservado formas ocasionadas por pequeños aparatos glaciares de montaña, así como formas nivales y periglaciares.

En la llanura de inundación del arroyo Respina se observan litologías de fondo de valle y depósitos aluviales. También en la cabecera, se encuentran glaciares de roca que demuestran la importancia del glaciario en esta área de la cordillera Cantábrica (Danis-Álvarez y Santos-González, 2017) y de los procesos periglaciares hoy en día funcionales por encima de los 1600 m de altitud (Pérez, 1995).

Los glaciares se presentan como uno de los principales agentes de modelado en el relieve de la Tierra, y sus formas, tanto erosivas como sedimentarias, determinan el

relieve de extensas áreas del planeta (Benn y Evans, 2010). La influencia glacial en los valles fluviales de montaña, que es donde tienden a ubicarse los glaciares, queda patente incluso mucho tiempo después en la dinámica fluvial, ocurriendo readaptaciones en la red de drenaje como consecuencia de la acumulación de formas de relieve producidas por la acción glacial (Passmore y Waddington, 2009).

Como ejemplo significativo de la influencia de este agente de modelado geológico en la red de drenaje de la cuenca de estudio se encuentra el desvío del arroyo Respina y la generación de un nuevo valle. Este fenómeno ha sido consecuencia de una intensa acumulación morrénica proveniente de la lengua glacial del valle del Silván (Danis-Álvarez y Santos-González, 2017). Este hecho se produce en la zona donde confluyen los valles Silván, Respina, y Rebueno, al final de la llanura de inundación del arroyo Respina. Aquí el arroyo Rebueno capturó al arroyo Respina produciendo un cambio brusco en su dirección e impidiendo que se uniese al arroyo Silván en el cual desembocaba con anterioridad a la captura. Esto es debido a que, durante la glaciación, entre los valles de Silván y Respina se generaron importantes arcos morrénicos que imposibilitaban la evacuación del agua del glaciar de Respina, por lo que se vio forzado a virar hacia el SO, erosionando la divisoria existente con el valle de Celorno (Danis-Álvarez y Santos-González, 2017).

Finalmente y, después de la desaparición de los glaciares en las cotas más bajas, el arroyo Respina se encajó en las morrenas y gradualmente las fue desmantelando. Esto le ha impedido retornar a su antiguo curso y por tanto sigue desaguando por el valle de Celorno, generando un valle realmente estrecho en ese tramo.

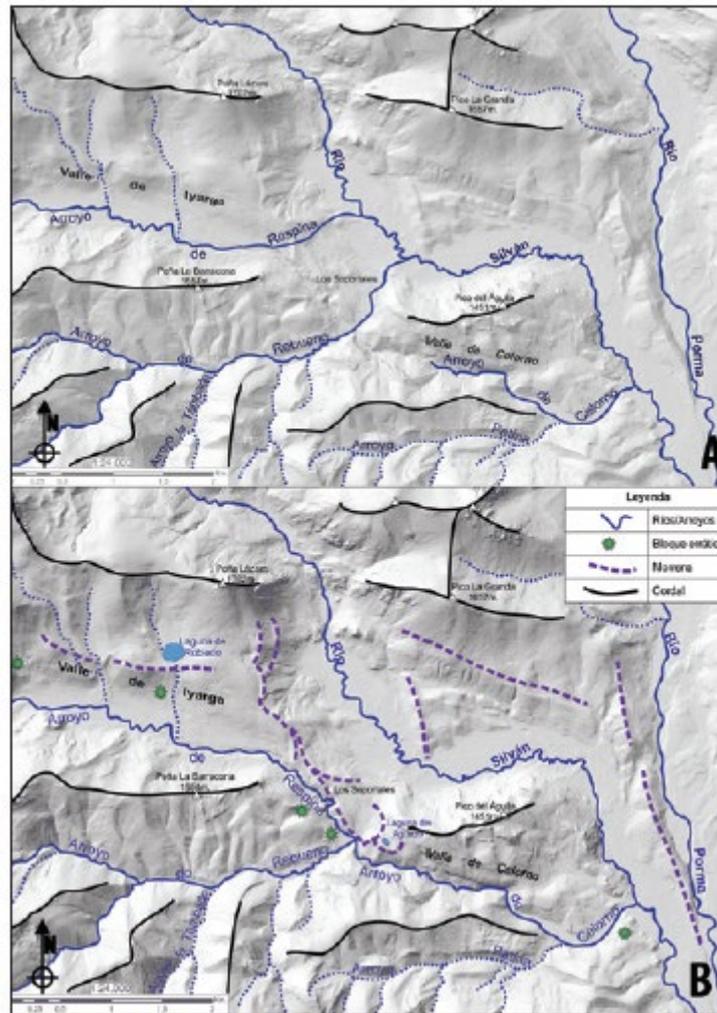


Figura 9.- Esquema topográfico de los cambios producidos en la red de drenaje hasta la situación actual (B) desde la teórica situación inicial (A) durante la glaciación. Tomada de Danis-Álvarez y Santos-González (2017)

En la cartografía geológica de la cuenca de estudio (**Figura 10**) se pueden observar la ubicación de las litologías y estructuras tectónicas presentes en la zona.

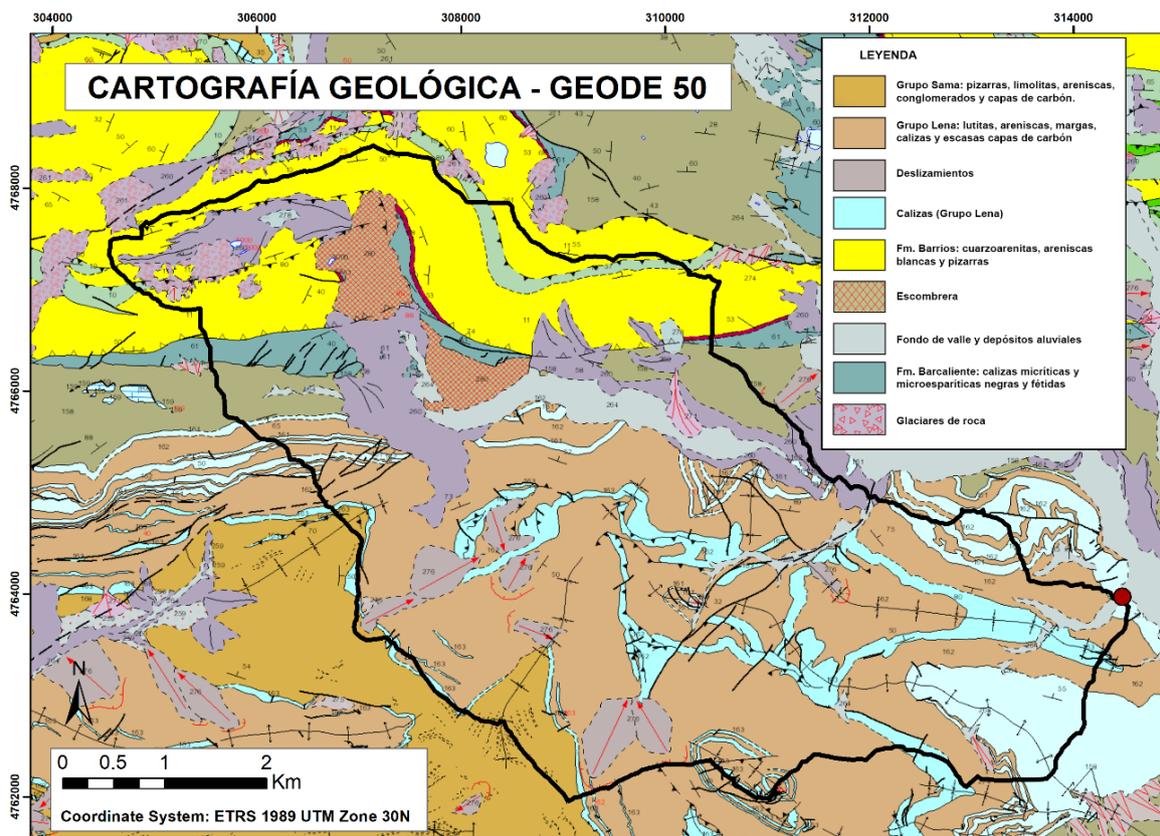


Figura 10.- Mapa geológico de la zona de estudio (Merino-Tomé et al., 2014). Fuente: IGME

3.1 La cuenca del arroyo Respina

El arroyo Respina es un pequeño arroyo de montaña de carácter torrencial con una cuenca hidrográfica de algo menos de 18 km² cuya cabecera se encuentra en las inmediaciones de la estación de esquí de San Isidro y desemboca en la confluencia con el río Celorno, localizada en la zona de la Ermita de Peñas Rubias. En este mismo lugar confluye el arroyo Rebueno con el río Celorno que fluye hasta la localidad de Puebla de Lillo, punto de obra de la cuenca de nuestro estudio, la cual tiene en su totalidad una superficie de 32,6 km².

La cuenca correspondiente únicamente al arroyo Respina puede compartimentarse en tres grandes sectores A, B, C como se muestra en el siguiente mapa esquemático extraído y modificado del mapa geomorfológico (**Figura 21**).

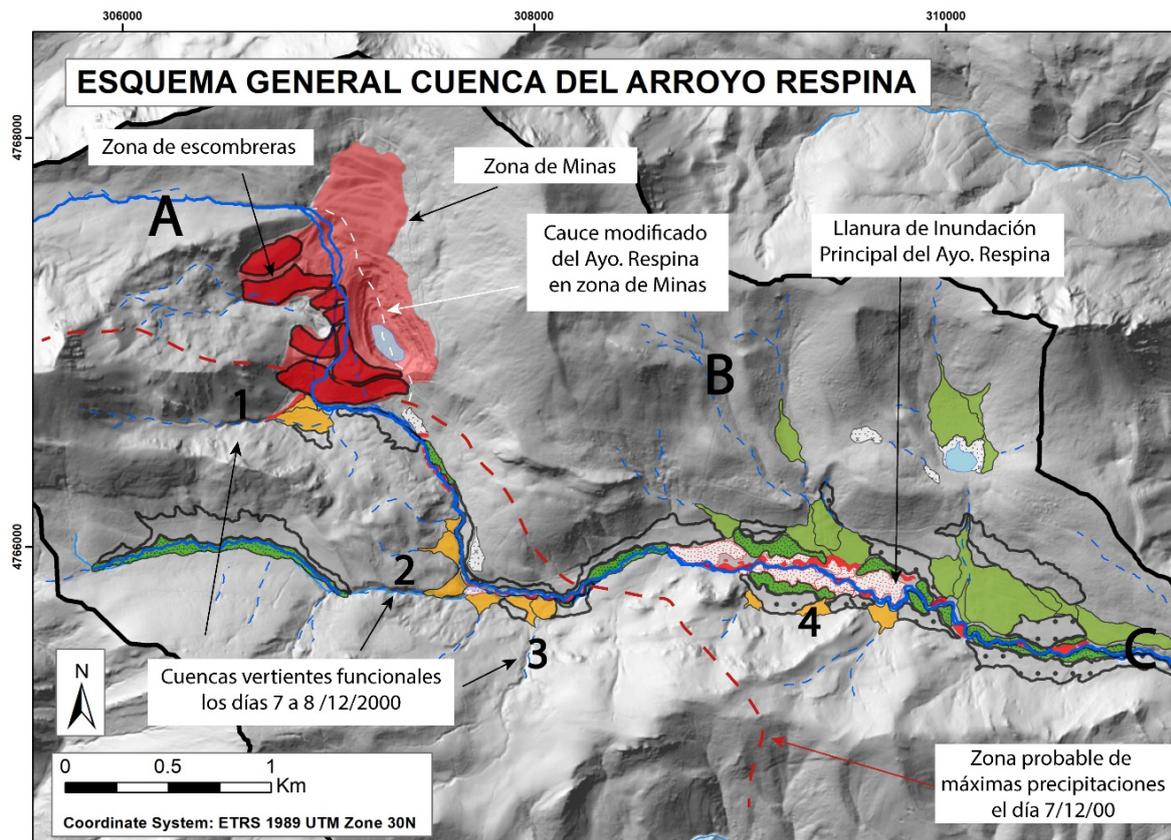


Figura 11.- Esquema por sectores de la parte oeste de la cuenca del arroyo Respina.

- **SECTOR A:**

Cuenca de recepción principal del arroyo, que incluye la cabecera del propio arroyo Respina en el circo glaciar de la Sierra de Sentiles, así como la de tres cuencas vertientes torrenciales que desarrollan conos de deyección funcionales en su desembocadura (1, 2, 3, **Figura 11**). Se desarrolla hasta el umbral rocoso constituido por el denominado Alto del Respina, a cuyo pie se desarrolla el último arco morrénico glaciar que semi-confina el valle (Pérez, 1995) (**Figura 21**).

Este sector posee un área de unos 8,5 km² y abarca prácticamente la mitad del área total de la cuenca, pudiéndosela considerar como la principal área productora de sedimentos. Por ella el arroyo discurre ligeramente encajado (máximo 1-1,5 m) en los depósitos fluvio-glaciares de fondo de valle y su cauce es estrecho, de elevada pendiente (11,07 %) y esencialmente rectilíneo, superando un desnivel de 620 m en 5,6 km. Tan solo presenta dos pequeñas y estrechas zonas inundables aguas debajo de la zona de minas (**Figura 21**). Una justo aguas abajo de las escombreras y otra en las inmediaciones del Alto del Respina, donde el arroyo torna su curso dirección E-O antes de su paso por el

arco morrénico. En estas zonas inundables es donde desembocan los sistemas afluentes torrenciales anteriormente mencionados (**Figura 12**). Es aquí donde se observa como por encima de los depósitos fluvio-glaciares, constituidos por bloques y gravas subredondeadas de gran calibre y bordes engastados se disponen unos sedimentos finamente bandeados, testigos de anteriores inundaciones de hasta 1 m de espesor (**Figura 13**).



Figura 12.-Confluencia de un sistema un torrencial por la margen derecha con evidencia de acarreo de gravas, bloques y ramaje al cauce principal.



Figura 13.- Sedimentos finamente laminados depositados por inundaciones anteriores.

- **SECTOR B:**

Constituye la vega media del arroyo, donde tras el paso del arco morrénico se desconfina adquiriendo una anchura máxima de fondo de valle (zona inundable) de hasta 500 m. Constituye, con un área de unos 9,6 km², casi la otra mitad de la subcuenca. En ella el cauce adquiere menor pendiente (2,17 %), superando un desnivel de 70 m en 3,2 km. En respuesta, el cauce se hace más sinuoso desarrollando, a veces, meandros de cierta importancia. (ver zona llanura de inundación **Figura 11**). Esta es una respuesta dinámica común en arroyos de montaña ya que el desconfinamiento del valle implica una reducción súbita del caudal del arroyo en procesos de avenida, lo que se traduce en una pérdida de la capacidad de carga (transporte) de las aguas y por consiguiente en el abandono (sedimentación) de los materiales que se transportan. Como efecto secundario se produce una disminución de la pendiente del valle por relleno, lo que invita al cauce a adquirir mayor sinuosidad para poder mantener su perfil de equilibrio (Asensio Amor y Gómez Miranda, 1983). (Ver perfiles longitudinales, **Figura 18** y **Figura 19**).

En geomorfología a estas situaciones se las denomina como de “equilibrio inestable”, ya que durante los procesos de avenida los cauces pueden bifurcarse, ramificarse y cambiar de curso por obturación o avulsión (desbordamiento) produciendo cortes de meandros (Vélez Upegui, 2013). Estas situaciones se desarrollaron a pequeña escala durante la avenida del 8 de diciembre de 2000. De la misma forma el estudio fotogeológico de los fotogramas aéreos de distintas fechas revela cambios de cauce más importantes producidos entre 1983 y 1998, así como otros anteriores al 83 durante avenidas previas en todo el sector del valle. Además, este sector B del valle muestra multitud de canales de estiaje, normalmente inactivos, que tan solo funcionan durante episodios de crecida distribuyendo el agua y el sedimento en todo el entorno del valle (Guerra Hernández y Cruz Flores, 2017). (Ver mapa geomorfológico, **Figura 21**).

Por lo demás en este sector B del valle, las cuencas vertientes están hidrológicamente peor organizadas y poseen menor recorrido. No obstante, en la vertiente norte del valle se desarrollan antiguos sistemas torrenciales de desembocadura, pero prácticamente inactivos (vegetados por pastos y núcleos boscosos). Tan solo en la vertiente sur se ha observado un pequeño aparato torrencial con signos de actividad.

- **SECTOR C:**

Tramo final del valle en el cual el cauce vuelve a encajarse y rectificarse, adquiriendo de nuevo una elevada pendiente (7,78 %) en la que se superan los 70 m de desnivel en tan solo 0,9 km hasta su desembocadura en el río Celorno (Ermita Peñas Rubias). Este es un tramo poco significativo del río desde el punto de vista hidrológico, ya que su área es inferior a los 0,6 km².

3.2 Parámetros e índices morfométricos de la cuenca

En este apartado se describen los parámetros e índices morfométricos que se han considerado para realizar una precisa descripción de la cuenca objeto de estudio. Al final del apartado se muestran los resultados y la discusión de los mismos.

Los parámetros relacionados con la superficie son:

- Área de drenaje, que supone la proyección horizontal de la superficie de la cuenca, es decir medida en un plano.
- Perímetro de la cuenca, que hace referencia a longitud lineal de la divisoria que limita la cuenca.

Respecto a la forma de la cuenca cabe destacar:

- Índice de Gravelius o Coeficiente de compacidad, que se define como:

$$K_c = \frac{\text{Per. Cuenca}}{\text{Per. Círculo}} = 0,282 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde P es el perímetro de la cuenca y A, su área.

- Factor de forma de Horton que se define como:

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Donde L es la longitud del cauce principal, aquel que vertebra de manera más idónea la cuenca.

Cuanto mayor es el factor de forma, mayor es el riesgo de avenidas.

Son dos parámetros de interés ya que la forma de la cuenca va a controlar el hidrograma resultante. Una cuenca estrecha y alargada tendrá un mayor tiempo de concentración (tiempo en el que toda la cuenca contribuye con aportaciones) que una cuenca subcircular, lo que se asocia a una menor probabilidad de avenidas ya que, en el segundo caso, el agua llegaría al mismo tiempo, de forma agolpada.

Atendiendo al relieve de la cuenca, se considerarán los siguientes parámetros:

- Altura media de la cuenca que se define como:

$$H_m = \frac{\sum n_i (H_i \times S_i)}{S_{total}}$$

Donde H_i es la altura media del intervalo seleccionado y S_i su área.

La elección del número de intervalo (i) de cotas se hace siguiendo la siguiente regla:

$$n_i = \frac{(H_{m\acute{a}x} - H_{m\acute{i}n})}{6}$$

Dónde $H_{m\acute{a}x}$ es la altura máxima de la cuenca y $H_{m\acute{i}n}$ la mínima, sin embargo, se ha decidido elegir 10 intervalos para aumentar la precisión ya que esto no supone un problema utilizando las herramientas adecuadas como lo son los Sistemas de información Geográfica (SIG). En este caso, la altura media también será calculada como la media de la cota de los distintos píxeles que conforman el MDT de la cuenca.

- Altura mediana que es la altura en la cual el 50% de la cuenca queda por debajo de la misma. El valor será obtenido de la curva hipsométrica.
- Altura más frecuente que se obtendrá del siguiente gráfico de barras donde se ha representado las alturas con el porcentaje de área de la cuenca que le corresponde a cada altura:

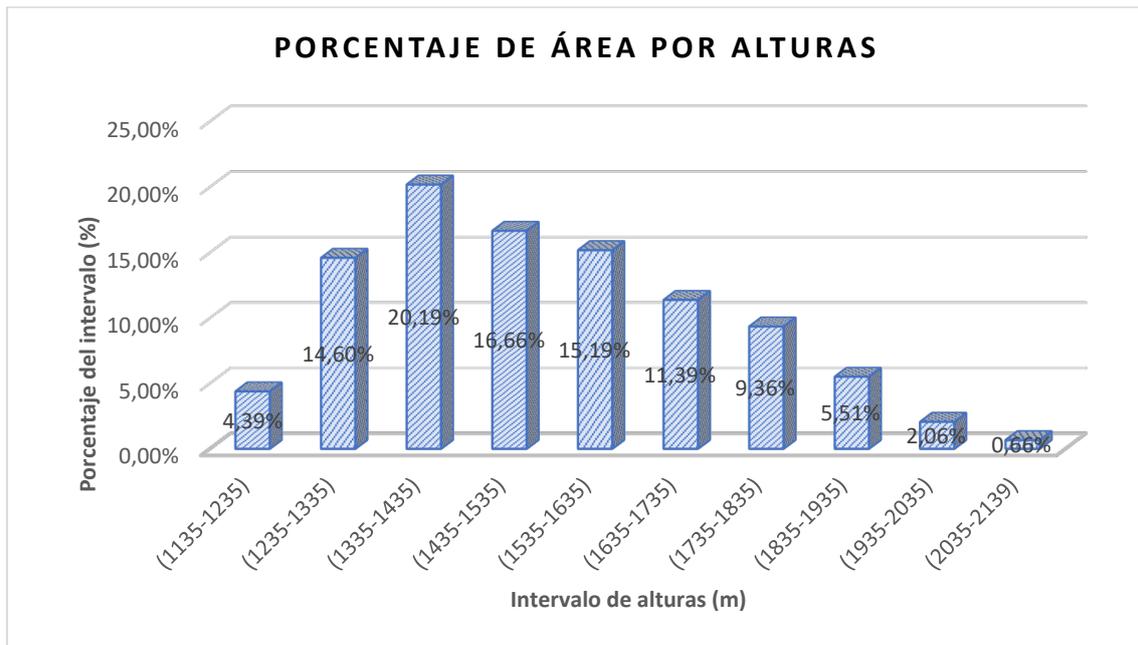


Figura 14.- Gráfico de barras que muestra el porcentaje de área por alturas de la cuenca.

En la siguiente figura (**Figura 15**) se muestra el mapa de hipsometría de la cuenca donde se pueden comprobar como los porcentajes representados en el anterior gráfico de barras se corresponden con la ocupación de área de cada intervalo de alturas. De este modo se puede afirmar que la mayor parte del área de la cuenca se encuentra comprendido entre la cota 1235 y la cota 1835 de aquí que se etiqüete la cuenca como cuenca de montaña por su elevada altitud.

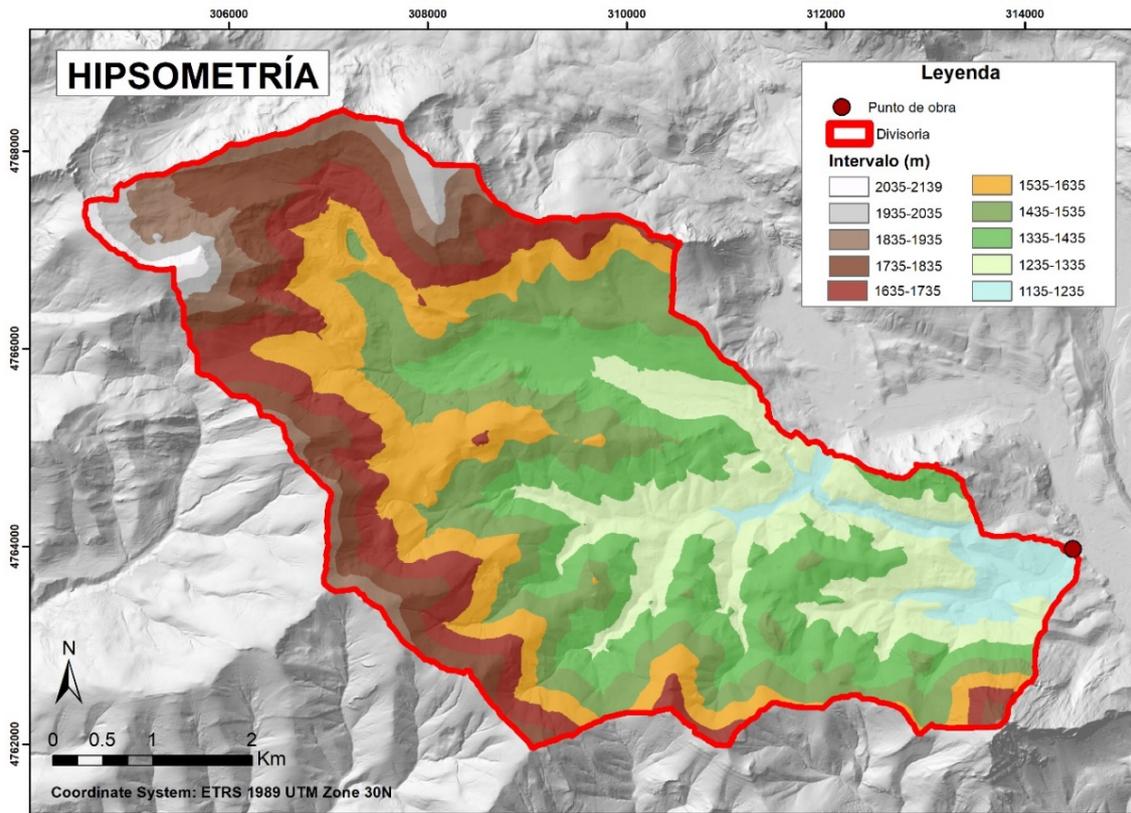


Figura 15.- Mapa de hipsometría de la cuenca representado por escala de colores.

- Pendiente media que se define como:

$$J = \frac{(\sum L_i) \times E}{A}$$

Donde sumatorio de L_i es la suma de la longitud de todas las curvas de nivel de la cuenca, E es la equidistancia de curvas y A el área total de la cuenca.

- Curva hipsométrica: es la representación gráfica de la relación acumulada ente la elevación y el área en dichos intervalos de elevación.

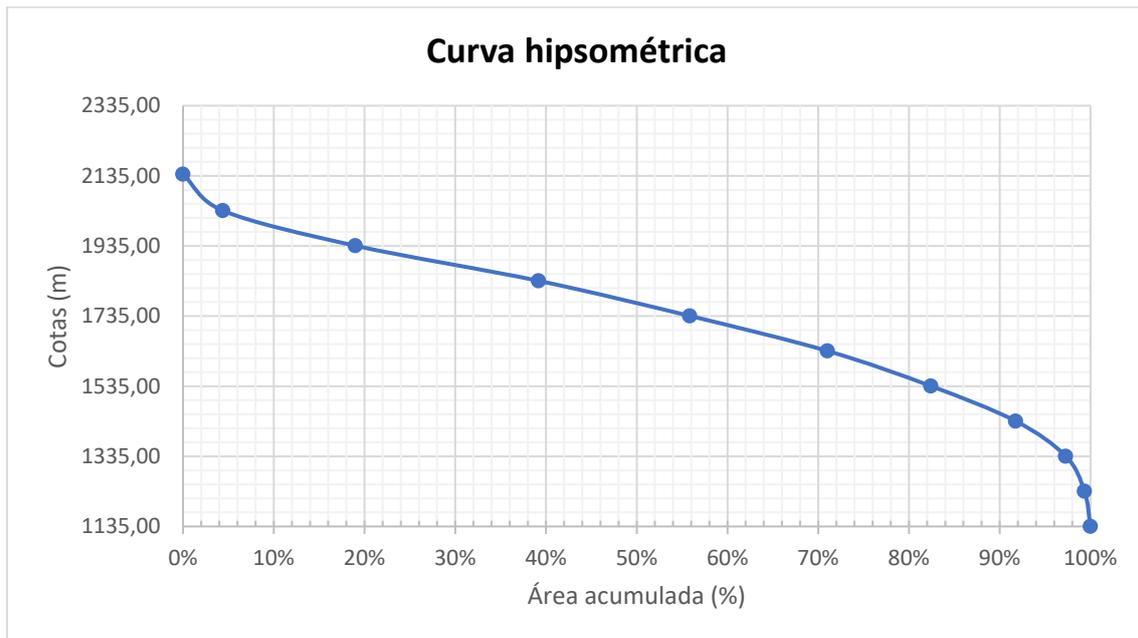


Figura 16.- Gráfico que representa la curva hipsométrica de la cuenca.

De la curva hipsométrica se ha obtenido la relación hipsométrica que, según Straler, se define como sigue:

$$R_{hip} = \frac{A_s}{A_i}$$

Donde A_s es el área que está por encima de la curva y A_i el área bajo la curva.

- Pendiente del cauce principal que se define como:

$$S_m = \frac{(H_{max} - H_{min})}{L}$$

En definitiva, el relieve de la cuenca va a condicionar la rapidez de la respuesta hidrológica de ésta ante un evento lluvioso, por lo que se puede afirmar que, en cuencas de igual área y forma, la respuesta será más brusca en aquellas de mayor pendiente.

3.2.1 Resultados

A continuación se muestra una tabla (**Tabla 1**) donde se han recopilado los resultados tras calcular los índices y parámetros expuestos en el apartado anterior. Tras ella, se procederá al análisis de estos.

Tabla 1.- Resultados de los parámetros morfométricos de la cuenca de estudio.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA		
DESCRIPCIÓN	UD	VALOR
Índice de Gravelius	-	1,44
Factor de forma de Horton	-	0,16
<u>Superficie</u>		
Área	km ²	32,56
Perímetro	km	29,12
<u>Cotas</u>		
Máxima	msnm	2139,62
Mínima	msnm	1135,27
Cota máxima del cauce principal	msnm	1991,09
Cota mínima del cauce principal	msnm	1135,50
<u>Centroide (UTM)</u>		
Coordenada x	m	309413,16
Coordenada y	m	4764937,46
<u>Relieve</u>		
Altura media	msnm	1524,98
Altura mediana	msnm	1773,25
Altura más frecuente	msnm	1385
Relación hipsométrica	-	0,23
Pendiente media	%	23,07
Longitud del cauce principal	km	14,10
Pendiente del cauce principal	%	0,06

El índice de Gravelius con un valor cercano de 1,44 indica que la cuenca tiene una morfología que se separa de formas subcirculares siendo alargada en sentido NO-SE. Si este valor se acercara aún más a 1 su carácter subcircular sería más marcado. Es importante resaltar el sentido que tiene la morfología de la cuenca en eventos hidrológicos extremos ya que cuanto más circular es la cuenca, el hidrograma de salida presentará un pico mayor debido a que el agua llega de forma agolpada. Esto hace a la cuenca tener una probabilidad media de avenidas.

Por otro lado, el factor de forma de Horton presenta un valor bajo con lo que los indicios de peligrosidad no son tan marcados puesto que el agua no llegará al punto de desagüe tan agolpada como si este índice fuera mucho mayor.

En cuanto al relieve de la cuenca, atendiendo a su altura media (1525 m) podemos confirmar que se trata de una cuenca de montaña. Este dato es importante pues determinará en muchos casos la forma de la precipitación (agua, nieve...) y con ello la escorrentía superficial que generen los estos eventos de precipitación. Además, el carácter montañoso y la elevada altitud media hace posible que se puedan concentrar lluvias por efecto orográfico.

La pendiente no condiciona la respuesta de las avenidas, pero si es un indicador del tipo de cuenca y de su morfología. Una cuenca con pendientes altas hace que su respuesta sea más rápida que en otra igual pero con pendientes bajas. En este caso, el valor de 23% nos indica que estamos ante una cuenca montañosa en cuyas vertientes más pronunciadas se pueden producir fenómenos erosivos importantes ante avenidas como la estudiada.

Respecto a la relación hipsométrica y a la forma convexa de la curva hipsométrica podemos afirmar que se trata de una cuenca joven poco erosionada.

3.3 Características de la red de drenaje

Para determinar las características de la red de drenaje existente en la cuenca se ha procedido a realizar la clasificación de los cauces según Straler obteniéndose que el drenaje es de orden 5 ya que el cauce que llega al punto de obra es de este orden como se puede visualizar en el siguiente mapa (**Figura 17**). En este mapa también se pueden ver los cauces con su respectivo orden según la clasificación empleada.

Por otro lado, el tiempo de concentración de la cuenca se calculará de acuerdo a la expresión definida por Témez. Este tiempo indica lo que tarda en contribuir toda la cuenca a la escorrentía superficial en el punto de obra. La expresión es la siguiente:

$$t_c = 0,3 \times \left(\frac{L}{J^{0,25}} \right)^{0,76}$$

Donde L y J son la longitud (km) y la pendiente del cauce principal respectivamente.

Para nuestra cuenca el tiempo de concentración resulta ser 3,82 horas.

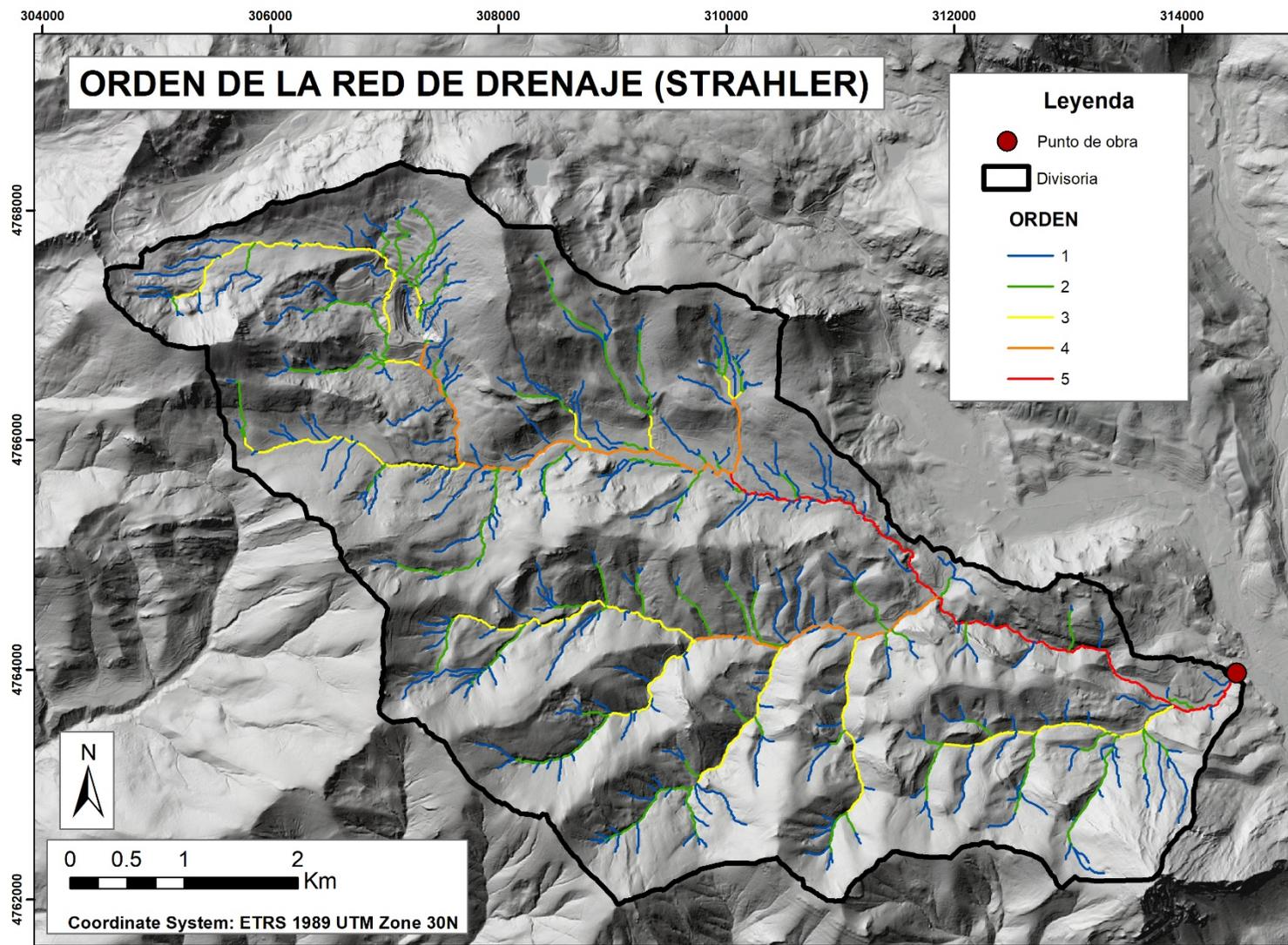


Figura 17.- Orden de la red de drenaje según Strahler.

3.4 Perfil longitudinal del cauce principal

Se ha elaborado el siguiente gráfico (**Figura 18**) con el perfil longitudinal del cauce principal que es el que mejor vertebra la cuenca. Este perfil ha sido generado empleando el MDT por lo que puede presentar pequeñas irregularidades que se han tratado de corregir redibujando correctamente el cauce sobre el modelo de elevación.

Se puede ver como en su parte inicial (la parte correspondiente al arroyo Respina) las pendientes son más elevadas, es decir, en la zona de minas y previamente a la apertura del valle y a la llanura de inundación, donde los efectos de la avenida fueron más dramáticos.

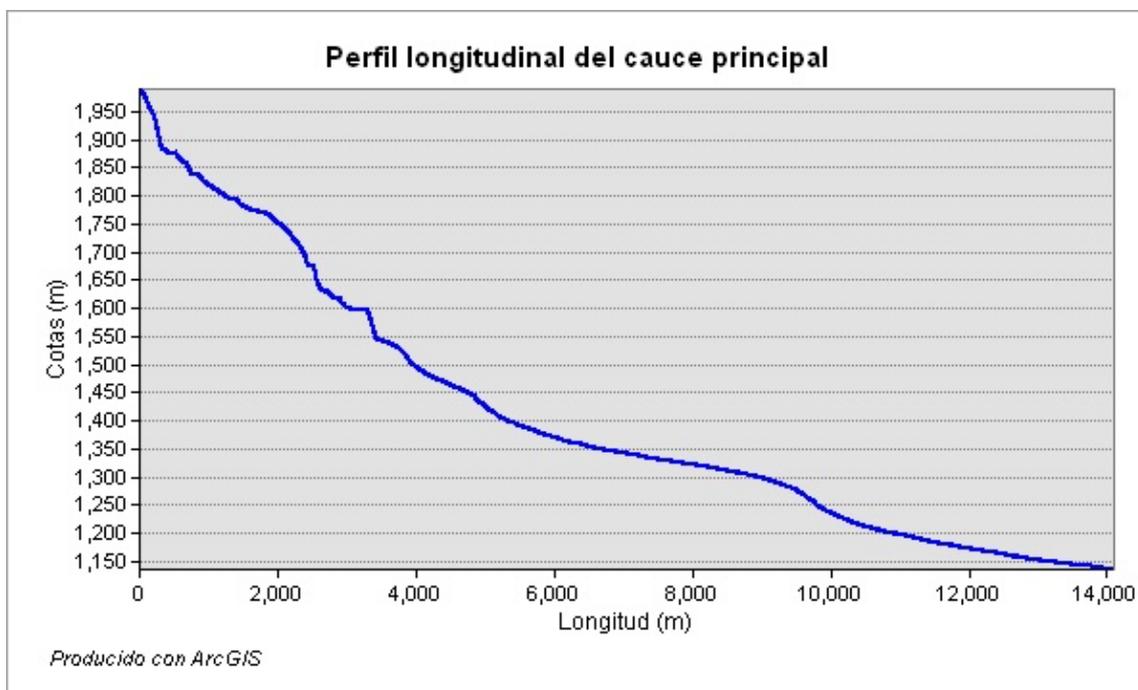


Figura 18.- Perfil longitudinal del cauce principal.

Silva (2000) representa en el perfil longitudinal la locación de los fenómenos erosivos más importantes, así como las demás pruebas geomorfológicas recogidas y cualquier otro tipo de información relevante que se ha expuesto y que se expondrá en el siguiente apartado (5.2 Efectos erosivos y sedimentarios de la avenida y procedencia de los acarrees).

La longitud es equivalente en los dos perfiles transversales salvo que, en el segundo, solo se ha representado la parte del cauce principal correspondiente al arroyo Respina y

por eso la longitud total es menor, sin embargo, el punto de inicio del cauce es el mismo para ambos perfiles.

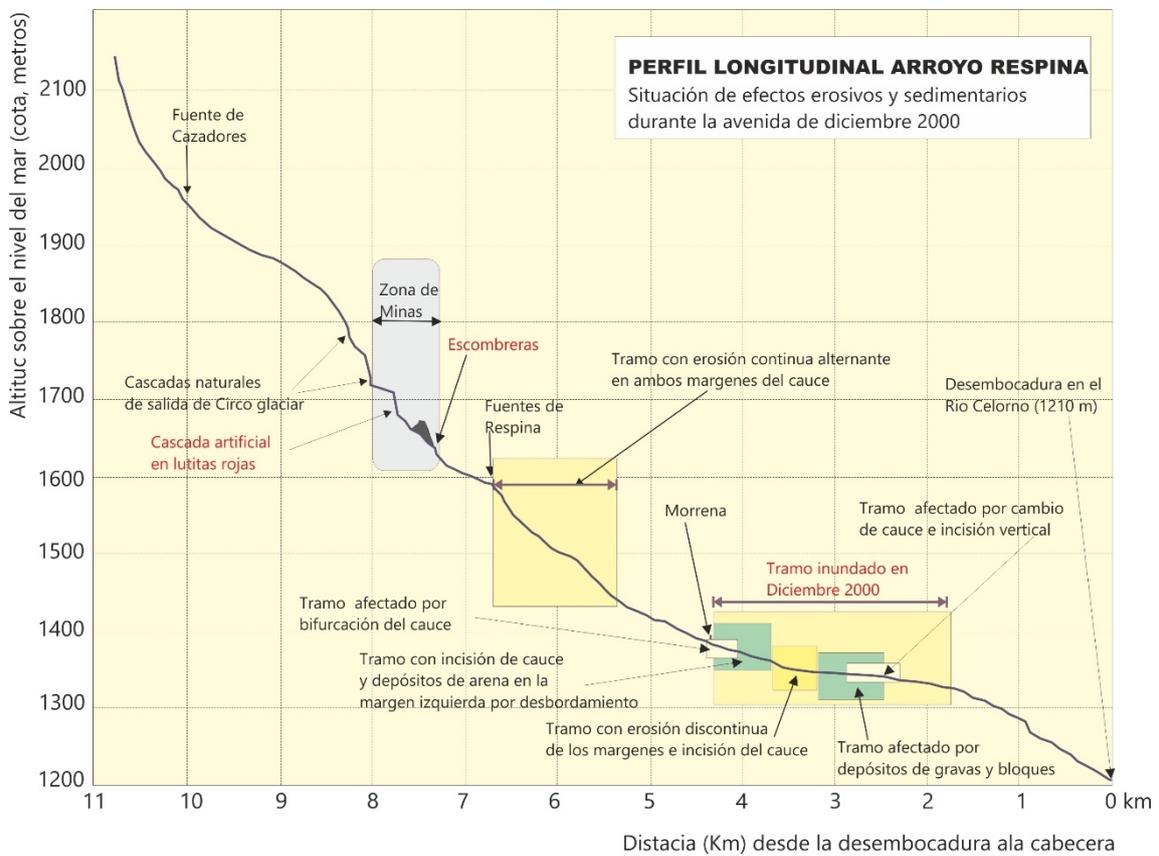


Figura 19.- Perfil longitudinal del arroyo Respina. Tomado de (Silva 2000)

4. Materiales y metodología

4.1 Fuentes de información

El estudio sobre la avenida del 7 de diciembre del 2000 en el arroyo Respina ha requerido obtener información sobre la topografía, geología y geomorfología, así como imágenes (fotografías aéreas y ortofotos). También ha sido necesario obtener datos meteorológicos (series de precipitaciones) y datos hidrológicos (valores de caudales) con el fin de relacionar todos los condicionantes que tuvieron lugar ese día y poder valorarlos de manera justificada. Además, estos materiales se han empleado para la elaboración de la cartografía específica y mapas temáticos de la cuenca de estudio. A continuación, se indica la recopilación de los materiales de partida y sus principales características:

Tabla 2.- Fuentes de información geográfica empleadas.

Tipo	Escala	Coordenadas	Huso	Fuente
<u>Planimetría</u>				
Mapa topográfico	1:25.000	ETRS 1989 UTM	30N	CNIG
<u>Modelo Digital de Elevación</u>				
MDT05	5x5 m	ETRS 1989 UTM	30N	CNIG
LIDAR		ETRS 1989 UTM	30N	ITACYL
<u>Cartografía temática</u>				
Mapa Geológico GEODE	1:50000	ETRS 1989 UTM	30N	IGME
SIOSE				ITACYL
Grupos hidrológicos del suelo	1:200000	ETRS 1989 UTM	30N	ITACYL
<u>Ortoimágenes</u>				
PNOA Máxima actualidad	0.5x0.5 m	ETRS 1989 UTM	30N	CNIG
<u>Fotografías aéreas</u>				
Vuelo Americano serie B 1956-57	1:32000	-	-	CNIG

El Doctor Pablo G. Silva fue contratado para la elaboración de un informe que tratara de esclarecer los hechos ocurridos mediante un análisis en campo en coordinación con la información recopilada por la empresa minera y los organismos públicos como AEMET y CH Duero. Parte de dichos materiales han sido cedidos (Silva 2000) para establecer un

punto de partida al presente estudio que tiene como objetivo modelizar la avenida producida.

4.2 Elaboración de cartografía temática

Para el presente estudio se han elaborado diferentes mapas de la cuenca del arroyo Respina partiendo de las fuentes de información arriba indicadas y empleando el software de ESRI: ArcMap 10.3.

El objetivo de la elaboración de estos mapas es recoger toda la información relevante para la consecución del estudio y mostrar de forma clara los aspectos más importantes plasmados en una cartografía de detalle.

4.3 Estudio geomorfológico de la zona de afección

4.3.1 Introducción

Los distintos cauces fluviales que conforman la cuenca del río Duero, entre los que se encuentra el arroyo Respina, presentan una identidad geomorfológica e hidrológica propia, consecuencia de la larga historia evolutiva de los relieves y de las diferentes litologías que atraviesan.

El resultado de la dinámica activa asociada a los procesos fluviales confluye en las formas y depósitos presentes en la llanura de inundación. Estos procesos, en muchos casos cíclicos, condicionan además la evolución del relieve siguiendo generalmente unas tendencias como cambios de trazado de cauces, migraciones, orillas erosionadas o con depósitos sedimentarios asociados a esta metamorfosis de los sistemas fluviales (Francés y Ojeda, 2000). Por tanto, la huella geomorfológica generada por estos procesos en la llanura de inundación y en las zonas próximas a los cauces pueden ser reconocidas mediante evidencias históricas o geomorfológicas y técnicas dendrogeomorfológicas (Díez-Herrero *et al.*, 2007).

El análisis geomorfológico a desarrollar tiene por objeto delimitar cartográficamente cada uno de los elementos, formas y/o depósitos que evidencian la circulación de las aguas por los valles, describiéndolas, ordenándolas sistemáticamente y realizando su seguimiento histórico-evolutivo. Para ello, se investigará su origen y desarrollo estableciéndose su comportamiento o respuesta frente a las crecidas o posibles inundaciones debidas a diferentes eventos hidrológicos extremos que puedan producirse

en el sistema fluvial. Finalmente, con todo ello, se pretende concluir lo ocurrido en la avenida que atañe a este estudio.

Son por tanto tres los aspectos fundamentales que se deben tener en cuenta en el estudio geomorfológico:

- Configuración de las formas del relieve.
- Dinámica fluvial y productos resultantes.
- Evolución de las zonas inundables.

Para ello se partirá de los documentos gráficos disponibles, elaborada por Silva (2000), fundamentalmente planos y fotografías aéreas históricas. Dichos documentos han sido actualizados y complementados mediante análisis foto-cartográfico de las imágenes PNOA de máxima actualidad y trabajos topo-cartográficos de los vuelos LIDAR. Para precisar el análisis foto-cartográfico se había programado una campaña de reconocimiento “in situ” para complementar dichos documentos con evidencias geomorfológicas, sin embargo, la situación que se vive durante la redacción del presente estudio (confinamiento por la COVID-19) ha impedido dicha actividad.

Finalmente, el procedimiento anteriormente expuesto se plasmará en un mapa geomorfológico que recogerá de forma gráfica las evidencias observadas a partir de las cuales se podrán elaborar las hipótesis en los diferentes escenarios para luego contrastarlas con los resultados obtenidos en el modelo.

4.3.2 Inundabilidad histórico-geomorfológica

El objetivo final de los estudios histórico-geomorfológicos será delimitar las zonas inundables en espacios fluviales a partir de los datos recopilados de inundaciones pasadas y mediante las evidencias geomorfológicas que la acción de las avenidas ha dejado sobre el terreno. Además sirven de calibración o indicadores comparativos a los resultados obtenidos con los métodos hidrológico–hidráulicos (Rico y Benito, 2002).

La principal ventaja que presentan estos estudios es la fiabilidad al basarse en evidencias tangibles (formas), capaces de ser clasificadas cualitativa y cuantitativamente.

Por el contrario, su principal desventaja es que no aporta datos cuantitativos de caudal ni de recurrencia, aunque los resultados cualitativos correctamente interpretados en su conjunto pueden aportar un rango fiable de valores tanto de periodos de retorno

como de caudales para una parte importante de las zonas inundables estudiadas. Su objetivo es por tanto señalar un referente de inundabilidad, el cual corresponde o queda englobado en los resultados del método hidrológico-hidráulico (Leopold *et al.*, 1995).

En este caso concreto, se tratará de emplear estos marcadores hidrogeomorfológicos para hacer una reconstrucción fiel de la avenida del 7 de diciembre con el fin de estimar el caudal circundante durante dicha avenida y relacionarlo con la carga sedimentaria que se movilizó de acuerdo a las evidencias recogidas.

4.3.3 Elementos morfológicos a estudiar

En el estudio se recogen e interpretan las diversas evidencias geomorfológicas asociadas a la dinámica natural del río y de las inundaciones, valorando las posibles modificaciones en el trazado fluvial habidas en los últimos años y desencadenados por la avenida (estrangulamientos, acortamiento, avulsiones...) así como las variaciones en el patrón del canal observadas y el posible impacto por la modificación de algunos de los elementos del cauce.

4.3.4 Estudio de los sedimentos

El estudio de los sedimentos que se forman durante y después de un evento de inundación es fundamental para conocer el comportamiento de los mismos, puesto que desde la perspectiva geomorfológica, los cursos fluviales son esencialmente agentes de erosión y de transporte de sedimentos, siendo las llanuras de inundación los principales lugares de sedimentación.

Cada año, y en función de las características geológicas y ambientales de sus cuencas, los ríos transfieren grandes cantidades de material sólido desde el interior de los territorios drenados hacia las partes bajas de los mismos y hacia el mar (Bermúdez y Díaz, 1992), siendo su análisis y estudio lo que nos permite reconstruir el alcance y efectos de crecidas pretéritas. A partir de técnicas radiométricas, paleontológicas, arqueológicas o dendrocronológicas, como técnicas más comunes, se puede datar el tiempo transcurrido desde que tuvo lugar el evento que generó ese depósito.

Por otra parte, se deben analizar los depósitos de abanicos aluviales y su geometría, puesto que son estos los puntos donde se va a producir la mayor descarga de material sólido, pudiendo soterrar infraestructuras o cegar canalizaciones y/o puentes, induciendo

de este modo un peligro añadido por el represamiento de grandes volúmenes de agua que pueden generar avenidas súbitas aguas abajo y mayores inundaciones aguas arriba.

Cabe destacar las particulares características de los procesos de arrastre de sedimentos en las cuencas de montaña donde, con una pequeña extensión pueden concentrar eventos lluviosos muy localizados e intensos por lo que normalmente las curvas de los hidrogramas tienen una gran pendiente. Esta elevada pendiente se traduce en velocidades del flujo muy altas que provocan que el fenómeno de erosión y arrastre de sedimentos sea muy pronunciado durante las avenidas (Radice *et al.*, 2013).

4.3.5 Delimitación de las zonas con evidencias recientes y/o reiteradas

Partiendo de los informes y fotografías recogidas durante el reconocimiento del cauce realizado por Silva (2000) y que tuvo lugar días después de la avenida, se identificarán en aquellos terrenos adyacentes al cauce que conforman la llanura de inundación, los indicios que marcan la extensión la superficie del agua durante el evento. La aproximación geomorfológica permite realizar una delimitación preliminar de la llanura inundación y las áreas de riesgo potencial en casos donde no existen datos hidrológicos (Cunha *et al.*, 2017).

Las zonas que presentan evidencias recientes o reiteradas de inundación suelen formar parte del propio cauce histórico, en el caso de las zonas con actividad muy alta, o coincidir con la primera terraza fluvial en las zonas con actividad alta (Lastra *et al.*, 2008).

Se considerará como parte de las zonas con actividad muy alta aquellas superficies que, en base a las evidencias geomorfológicas de inundación observadas y sin estar incluidas ni en el canal de aguas bajas ni en la ribera, forman parte del cauce histórico. Son por tanto terrenos con evidencias nítidas de actividad fluvial reiterada, cuyo impacto y elevada frecuencia se manifiestan en el hecho de que no es habitual identificar en ellos labores agrarias.

Aunque no se observen evidencias en toda su superficie, se definirán como zonas con actividad alta aquellos terrenos con características geomorfológicas y fisiográficas homogéneas que puedan individualizarse entre la coronación del escarpe del cauce histórico y el siguiente escarpe significativo que se reconozca a partir de la interpretación estereoscópica de las imágenes del Vuelo Americano.

Tanto las evidencias geomorfológicas como las evidencias efímeras y topográficas suelen mostrar una alta correlación con el carácter inundable de los terrenos y con el tránsito de avenidas de alta intensidad de forma recurrente.

En resumen, las diferentes evidencias estudiadas son indicadoras de flujos con velocidades y calados diversos, desde los que son capaces de transportar y depositar grandes volúmenes de sedimento o dismantelar la cubierta superficial de los terrenos, hasta los que permiten depositar los elementos flotantes más efímeros o decantar los finos en suspensión.

FORMAS DE ACUMULACIÓN	FORMAS EROSIVAS
Macro y mesoformas	Macroformas (>Dm)
Barras y bancos	Canales abandonados
Laterales	Cañones
Longitudinales	Ensanchamiento de bancos de orilla
De meandro	Mesoformas (>m; <Dm)
Medias y diagonales	Pulidos y facetados
Longitudinales	Superficies pulidas
Transversales	Bloques facetados
Obstáculo	Sobreexcavaciones
Semilunares (pre-)	Semilunares
Pendiente (tras-)	Marmitas de gigante y hoyas de erosión
Diques naturales	Superficies armadas
Lineales	Microformas (<dm)
Digitados	Acanaladuras
Dunas y megarizaduras	Microfacetas
Cresta recta	Formas transversas
Cresta ondulada	Marcas en flauta
Mantos y láminas	Cavidades de arranque
Lóbulos, derrames y cordones	Microestrias
En abanico	Micromarmitas
Elongados	Escarpes erosivos
Abanicos y conos	
Confluencia de tributarios	
Desembocadura	
Microformas (<dm)	
Rizaduras	
Depósito lineal (marcas de nivel)	
Lineas de finos	
Bandas de flotantes	
Grietas de desecación.	

Figura 20.- Clasificación de las formas fluviales asociadas a las crecidas y avenidas. Tomado de (Benito y Herrero, 2004).

4.3.6 Trabajos de campo para localización e identificación de las evidencias, formas y depósitos

El análisis geomorfológico se apoya en la visita de campo que ya se realizó cuando ocurrió la avenida, la cual ha permitido comprobar y caracterizar las diferentes unidades morfológicas que se definirán en la cartografía. Se había planeado una visita de campo para complementar la que ya se hizo con el fin de recabar datos actuales y acordes al

enfoque de este estudio que no ha sido posible llevar a cabo debido al confinamiento por la COVID-19.

La adquisición de datos en campo orientada a la modelización hidrológica-hidráulica debe consistir fundamentalmente en los siguientes aspectos, algunos de los cuales, pero no todos, fueron tenidos en cuenta en la primera visita, de ahí que se planteara una segunda visita que complementara a la inicial:

- Caracterización geomorfológica (formas de detalle asociadas a la inundación). Poniendo especial atención en el estudio de formas erosivas y sedimentarias.
- Localización de marcas y niveles históricos. Identificado en lo posible mediante escarpes o cambios de pendiente, terrazas, antiguos canales o zonas con diferente actividad fluvial.
- Análisis de depósitos paleohidrológicos y evidencias dendrogeomorfológicas (Díez-Herrero, 2015).
- Medidas hidromorfológicas: topografías de detalle y batimetrías.
- Estudio de rugosidad.
- Comprobación de estaciones de aforo y pluviométricas.
- Fotografías de campo.

4.3.7 Delimitación de niveles de máximas crecidas a partir de elementos geomorfológicos

El estudio y conocimiento de la disposición, distribución y formas del terreno permite establecer las áreas geomorfológicamente activas dentro del entorno fluvial. Al mismo tiempo, permite la cuantificación de parámetros como la profundidad de la lámina de agua, la velocidad y/o energía del flujo o la carga sólida transportada.

La datación de elementos geomorfológicos permite conocer cuantitativamente el tiempo transcurrido desde un determinado evento, pudiéndose de este modo contrastar a partir de información objetiva y cuantificable las estimaciones obtenidas a partir de cálculos o interpretaciones (Ballesteros Canovas *et al.*, 2011). Además, la geomorfología fluvial permite conocer la tendencia evolutiva del canal al considerar fenómenos que de otra forma no son evaluables como por ejemplo la migración natural de canal o los procesos de avulsión.

Al mismo tiempo, al conocer la evolución del canal fluvial, se puede validar la información cuantitativa obtenida a partir de métodos históricos, puesto que nos permite definir la evolución de la sección hidráulica del canal a partir de la reconstrucción de los procesos erosivos y sedimentarios que ha experimentado el mismo (Marquínez *et al.*, 2008).

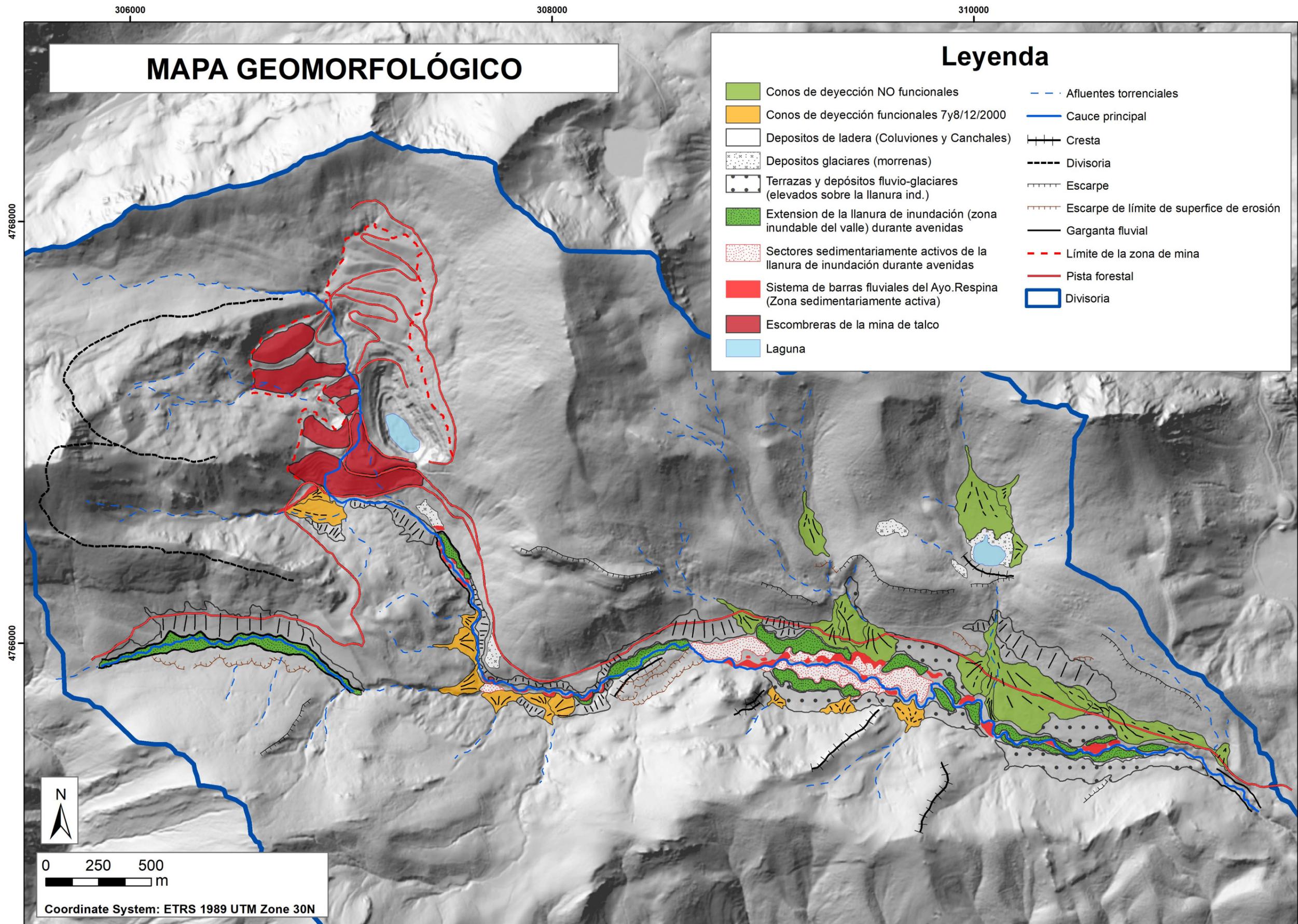


Figura 21.- Mapa geomorfológico de la parte alta de la cuenca del arroyo Respina. En la mitad oeste se puede observar la corta de las minas de talco.

4.4 Software de modelización IBER

IBER es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en ríos y estuarios promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua, y desarrollado en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (de la Universidad de A Coruña UDC), el Grupo FLUMEN (de la Universitat Politècnica de Catalunya UPC y de la Universitat de Barcelona UB) y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE (vinculado a la Universitat Politècnica de Catalunya UPC) (Bladé *et al.*, 2014).

Actualmente se encuentra operativa la versión IBER v 2.5.2 que cuenta con diversos módulos de cálculo siendo los más importantes y relevantes para el estudio: el módulo hidrológico, módulo hidrodinámico y el módulo de transporte de sedimentos (para la cuantificación de la evolución de la carga sólida, tanto por arrastre de fondo como en suspensión). Además, también es posible la utilización de un módulo de turbulencia, de roturas de presas y, en las últimas versiones se ha adicionado el módulo de calidad de aguas.

De esta forma IBER se presenta como un modelo numérico desarrollado directamente desde la administración pública española por lo que su utilización es gratuita y además presenta una gran flexibilidad respecto a las necesidades específicas que requieren las diferentes aplicaciones y estudios (Bladé *et al.*, 2014).

4.4.1 Capacidades

Las capacidades que más destacan de este modelo se focalizan en el esquema de resolución de las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales (esquemas explícitos en volúmenes finitos) lo cual permite dotar de gran robustez, fiabilidad y rapidez de cálculo al programa (Espejo Almodóvar, 2013).

Entre otras destaca: “Resolución integrada de las ecuaciones de Saint Venant 2D, esquemas explícitos en volúmenes finitos con mallas no estructuradas y capacidad de resolver flujo subcrítico y supercrítico, incluyendo resaltos hidráulicos móviles” (Espejo Almodóvar, 2013), además de la interfaz *user friendly* de pre y post-proceso, lo que se complementa con la integración en Sistemas de Información de Geográfica (SIG).

Resulta importante destacar que este modelo ha sido verificado y contrastado tanto con soluciones analíticas, como con otros modelos comerciales y de libre distribución, y más destacable aún, con ensayos de laboratorio y con medidas de campo.

4.4.2 Hidráulica

Los cálculos hidráulicos se ejecutan a través del módulo hidrodinámico, que deberá completarse posteriormente a la importación de la geometría.

El módulo hidrodinámico simplifica el proceso de introducción de los datos del problema. Este módulo se basa en la resolución de ecuaciones de aguas someras, también conocidas como ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad (Espejo Almodóvar, 2013).

4.4.3 Ecuaciones de Saint Venant

Si las leyes de la conservación de la masa y la energía son aplicadas a un fluido isotrópico e incompresible, como lo es el agua, resultan las ecuaciones de Navier-Stokes para el movimiento instantáneo del fluido. A partir de estas, es posible deducir las ecuaciones de Reynolds, y si estas son integradas en un flujo de agua en régimen libre con una profundidad determinada, se obtienen las ecuaciones de Saint Venant.

Dichas ecuaciones son válidas cuando el comportamiento que tiene el flujo es eminentemente bidimensional, con velocidades verticales despreciables, poca pendiente y en general cuando las dimensiones horizontales prevalecen sobre las verticales.

Las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant se pueden escribir en forma conservativa del siguiente modo:

$$\frac{\partial}{\partial t} U + \nabla F = H$$

Siendo U el vector de variables de flujo, F el tensor y H el término independiente.

$$U = \begin{pmatrix} h \\ h_u \\ h_v \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} h_u & h_v \\ h_u^2 + g \frac{h^2}{2} & h_{uv} \\ h_{uv} & h_u^2 + g \frac{h^2}{2} \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} 0 \\ g h (S_{0x} - S_{fx}) \\ g h (S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix}$$

Donde h es la altura de la lámina del agua. Se ha utilizado la notación x e y para las direcciones x_1 y x_2 , así como u y v para u_1 y u_2 .

La ecuación consta de tres términos: el primer término representa la variación temporal local de las variables hidráulicas: masa y cantidad de movimiento, el segundo término representa la variación espacial de los flujos de dichas cantidades y el tercer término (término independiente) representa la ganancia o pérdida de masa y cantidad de movimiento por unidad de tiempo en un volumen diferencial que se mueve con el fluido.

Claro está que la variación de masa debe de ser nula, así, la primera componente del vector de variables independientes resulta cero. Asimismo, existen las ecuaciones de Saint Venant en su forma unidimensional, las cuales pueden ser aplicadas en casos en los que prevalece la componente longitudinal de la velocidad del flujo. Estas ecuaciones pueden ser deducidas directamente desde de las leyes de cantidad de movimiento y la conservación de la masa.

4.4.4 Fricción de fondo

El fondo ejerce una fuerza de rozamiento sobre el fluido que resulta equivalente a la del rozamiento con una pared, con la singular característica de que, en general, en ingeniería hidráulica la rugosidad del fondo es elevada, como ocurre en los ríos.

La fricción del fondo tiene dos consecuencias sobre las ecuaciones de flujo, por un lado, provoca una fuerza de fricción que se opone a la velocidad media y, por otro lado, origina turbulencia.

En los modelos promediados en profundidad, como lo es el nuestro, no es posible calcular la velocidad de fricción por medio de funciones de pared estándar, tal y como se

hace en los contornos tipo pared, ya que las ecuaciones no se resuelven en la dirección vertical.

Por consiguiente, se necesita relacionar la velocidad de fricción con la velocidad media promediada en profundidad a través de un coeficiente de fricción.

IBER evalúa la fricción de fondo mediante la fórmula de Manning, la cual utiliza el coeficiente de Manning n como parámetro. La fórmula de Manning utiliza el siguiente coeficiente de rugosidad:

$$C_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}}$$

4.5 Generación del modelo e implementación de la simulación (preproceso)

En este apartado se describirá la metodología y los procedimientos empleados para la elaboración del modelo y su posterior implementación el software IBER. Antes de proceder a la ejecución de los modelos ha sido necesario desarrollar tareas de diferente índole con el fin de construir dichos modelos, teniendo en cuenta tanto las limitaciones como las capacidades del software empleado para la modelización.

Es importante destacar que se realizarán dos modelizaciones, una hidrológica con el fin de obtener el valor punta de caudal de la avenida que estamos estudiando, y una hidráulica para la determinación de los diferentes calados y velocidades que presentó el cauce durante la avenida en la zona de afección.

Aunque resulta habitual la utilización de modelos hidrológicos comerciales como HEC-HMS, el cual es un modelo agregado ya que discretiza el terreno a nivel de cuenca, se ha decidido emplear IBER para ambas simulaciones puesto que las ventajas de su utilización superan en gran medida a los inconvenientes que su uso puede plantear (Rincón *et al.*, 2017). Dichos inconvenientes pueden ser la elevada capacidad computacional requerida o el nivel de detalle de la información necesaria relativa a los parámetros físicos que describen la cuenca. Sin embargo, se presentan numerosas ventajas como pueden ser:

- ejecución de un modelo hidrológico distribuido en el cual la discretización de la cuenca aumenta en gran medida en comparación con un modelo agregado y además se implementa el tránsito de la avenida en el terreno real
- utilización de un único software para ambas modelizaciones por lo que las operaciones que requiere el montaje del modelo hidrológico pueden ser aprovechadas en el posterior modelo hidráulico
- misma interfaz de visualización de resultados; etc.

4.5.1 Geometría

Como se ha comentado anteriormente, IBER ejecuta los análisis 2D resolviendo las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant, mediante esquemas numéricos de volúmenes finitos, que exigen una discretización del dominio. Esta discretización se realiza mediante la generación de una malla, formada por cuadrados, triángulos o la combinación de ambos. En función de su forma y composición, puede ser estructurada o no estructurada y regular o irregular.

El punto inicial del proceso es la importación de la geometría de la cuenca de estudio, un punto importante ya que como objetivo secundario se plantea la determinación de la bondad de la utilización de diferentes MDTs implementados en los diversos modelos ejecutados.

Para el **modelo hidrológico** como punto de partida se ha tomado el MDT de tamaño de celda 5x5m disponible en el Centro Nacional de Información Geográfica, el cual se ha transformado a formato ASCII para su posterior importación en IBER. Para esta tarea se ha empleado la herramienta RTIN que permite crear una geometría compuesta por una red irregular de triángulos rectángulos (RTIN). Al generarla es necesario precisar la longitud mínima y máxima de lado de los triángulos que se formarán, además de una tolerancia (máxima distancia en vertical entre el MDT y la geometría creada) que debe de ser del orden de magnitud de la precisión altimétrica del MDT.

Con el objetivo de analizar cómo afecta el tamaño de paso de la malla que conforma la geometría del modelo hidrológico se han generado diversas geometrías con tamaños de malla diferentes y posteriormente se ha ejecutado el modelo evaluando los hidrogramas resultantes en tres secciones de la cuenca. Se ha elegido la lluvia correspondiente al periodo de retorno de 100 años en la zona de estudio (obtenida del

CAUMAX, (Álvarez, 2010))² resultando los siguientes valores de caudal para las diferentes secciones:

Tabla 3.- Caudales pico de los hidrogramas resultantes en el análisis del tamaño de malla de la geometría. Tamaño de malla expresado en m.

CAUDALES MÁXIMOS HIDROGRAMA			
(m³/s)			
MALLA	SEC01	SEC02	SEC03
5	217	182	18,2
7	217	189	17,5
8	224	189	16,8
9	224	189	19,6
10	238	203	18,9
15	231	196	21
20	231	175	18,2
25	231	196	14,7
30	189	154	20,3

En la siguiente figura, que muestra el valor del calado en una ejecución cualquiera de todas las llevadas a cabo para la elaboración de la tabla anterior, se puede ver donde se encuentran localizadas las secciones de donde se ha obtenido el hidrograma tras la ejecución del modelo.

² Dentro del ámbito del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, encargó al CEDEX mediante un Convenio de colaboración la elaboración de un mapa de los caudales máximos asociados a distintas probabilidades de recurrencia en la red de ríos que gestiona a través de las distintas Confederaciones Hidrográficas.

Este trabajo se presenta en la aplicación CAUMAX, integrada en un sistema de información geográfica, donde existe la posibilidad de consultar los caudales máximos instantáneos en régimen natural asociados a distintos periodos de retorno para los cauces con una cuenca superior a 50 km² y calcular estos caudales mediante el método racional modificado para cauces con cuencas inferiores a 50 km².

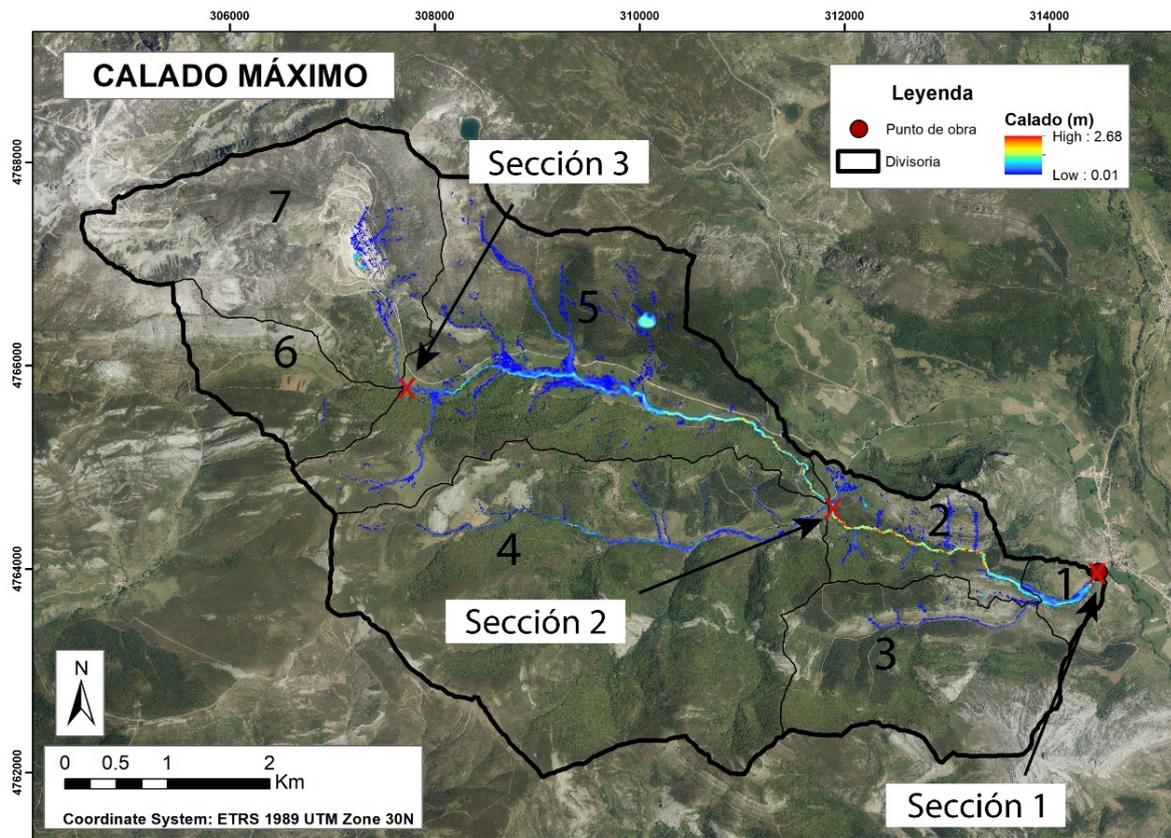


Figura 22.- Mapa de calado máximo para una ejecución cualquiera donde se localizan las secciones de medida.

El objetivo de conocer cómo afecta la precisión de la geometría en los valores de caudal resultantes es poder elegir el tamaño de malla óptimo para la ejecución de los modelos, teniendo en cuenta la elevada carga computacional que supone la ejecución de geometrías con un número elevado de elementos. Es necesario resaltar que esta carga computacional se traduce en un consumo de tiempo elevado en el cálculo, empleando ordenadores de potencia media, por lo que resulta necesario realizar este planteamiento inicialmente. Esta consideración también ha sido tenida en cuenta en trabajos similares como en (Espejo Almodóvar, 2013). Como orientación se muestra la siguiente tabla (Tabla 4) que relaciona el número de elementos que conforma la geometría generada en relación al tamaño de malla impuesto:

Tabla 4.- Número de elementos de cálculo en función del tamaño de malla.

TAMAÑO	ELEMENTOS
5	3021660
7	1547684
8	1185462
10	759770
15	340815
20	194530
25	126112
30	89614

Analizando los valores de caudal obtenidos de los hidrogramas que se muestran en un anexo al final de este trabajo (**Anexo: Hidrogramas resultantes, estudio de afección del tamaño malla**), se ha concluido que el tamaño de malla ideal para realizar la simulación es de 10x10 m. Una malla de 5x5 m supone multiplicar por 4 el número de elementos en la geometría respecto a la 10, siendo mínima la variación en los valores de caudal obtenidos, y el cálculo implicaría la generación de ficheros de resultados realmente pesados (siendo necesario ordenadores de altas prestaciones para su tratamiento) además de conllevar un tiempo de cálculo que supera las 24 h. Por otro lado, una malla de 15x15 m o 20x20 m pueden distorsionar en cierto modo los resultados al perder resolución y con la capacidad de computación de la que se dispone es viable ejecutar los modelos de tamaño de malla de 10x10 m.

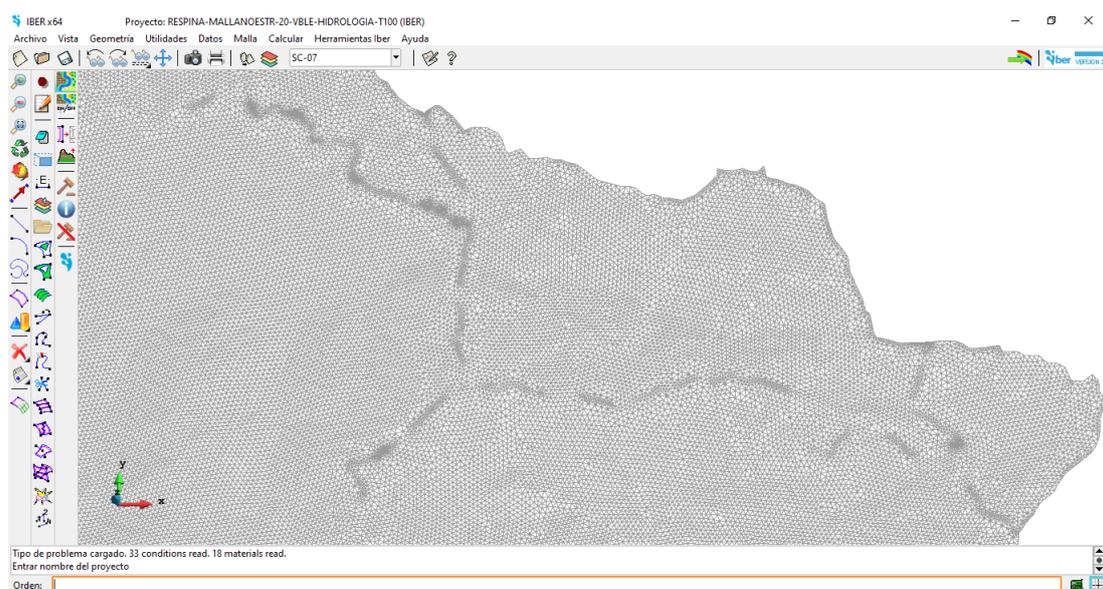


Figura 23.- Captura en el programa IBER de la malla no estructurada compuesta por una red irregular de triángulos rectángulos (RTIN) de la cuenca de estudio.

Para el **modelo hidráulico** se realizará la modelización únicamente en la zona de la cuenca afectada por la inundación, que comprende la llanura de inundación del arroyo Respina y sus alrededores. Por este motivo, en este caso ha sido posible generar un MDT de resolución 0,8x0,8 m a partir de la nube de puntos LIDAR de 1ª cobertura, empleando para ello únicamente los puntos clasificados como “suelo desnudo”. Posteriormente se ha generado una geometría de tamaño de malla análogo puesto que el modelo hidráulico ocupa un área muy pequeña (1,28 km²), por lo que el número de elementos de cálculo es del orden de los empleados en la geometría del modelo hidrológico, resultando en unos tiempos de cálculo aceptables.

4.5.2 Modelo de pérdidas

Para determinar la lluvia neta en el modelo hidrológico, es decir la parte de la lluvia que no se infiltra en el terreno y produce escorrentía, se ha empleado el método modificado que propuso (Témez, 1978) a partir del método del número de curva (“*The Runoff Curve Number method*”), del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (*Soil Conservation Service, SCS*), , el cual es un método ampliamente conocido y utilizado (Bosznay, 1989).

En dicha publicación, Témez emplea como referencia el umbral de escorrentía o P_0 ya que considera que tiene mayor sentido que el número de curva. Este parámetro P_0 es función de cinco variables:

- La pendiente del terreno
- Tipo de suelo según su facilidad de drenaje
- Uso del suelo
- Tipo de práctica con la que se cultiva el terreno
- Las condiciones de humedad del suelo

La relación existente entre estas variables y el umbral de escorrentía se presenta en forma tabular, por lo tanto, su cálculo se realiza mediante la superposición de los mapas correspondientes a cada una de las anteriores variables. Hoy en día, esta tarea en la que se requiere la realización de operaciones espaciales se ha visto altamente tecnificada mediante el empleo de los SIG.

El cálculo se realiza suponiendo condiciones medias de humedad en el suelo por lo que se elimina una de las variables anteriores. Por otro lado, la variable que Témez utiliza

como equivalente a la forma de cultivar la tierra (denominada características hidrológicas) es considerada despreciable por diversos autores (Ferrér *et al.*, 1995). Esta variable adquiere el valor N si el cultivo sigue las curvas de nivel y el valor R si el cultivo sigue la línea de máxima pendiente. Los valores del número de curva asociados a cada tipo no se diferencian mucho, por lo que en muchos casos se considera que toda el área de estudio tiende a cultivarse de una misma manera, a no ser que se tengan datos específicos.

Además, cabe destacar que existen otras expresiones que modifican el valor del número de curva en función de que las condiciones previas de humedad no sean las supuestas, es decir, se establecen varios escalones previos de humedad de mayor a menor grado.

El fundamento para la obtención del umbral de escorrentía mediante algebra de mapas se basa en ir asignando números primos para los valores de los tres mapas, pendientes, tipos de suelo y usos del suelo. Dichos números primos están tabulados según las distintas clasificaciones. Una vez que los mapas han sido transformados en rasters de números primos correspondientes con píxel de 5 m se multiplican entre sí. El resultado es un nuevo ráster con 22 números primos distintos ya que la multiplicación de números primos dará como resultado un número primo diferente para cada caso.

A cada uno de estos números primos que han resultado de la multiplicación de los anteriores le corresponde un número de curva que podemos deducir de los valores propuestos por Témez y reconstruir la tabla de igual modo que (Ferrér *et al.*, 1995). Una vez tenemos construida esta tabla, podemos reclasificar el producto original de números primos que hicimos y obtener finalmente el número de curva.

La siguiente expresión que relaciona el número de curva con el umbral de escorrentía:

$$CN = \frac{5000}{(50 - P_0)}$$

4.5.2.1 Mapa de pendientes

Las pendientes deben estar clasificadas en menos de 3% o mayores o iguales a 3%. Es necesario generar un ráster que al reclasificar asignemos el número 1 para pendientes de menos de 3 grados y el 2 para pendientes de 3 o más grados.

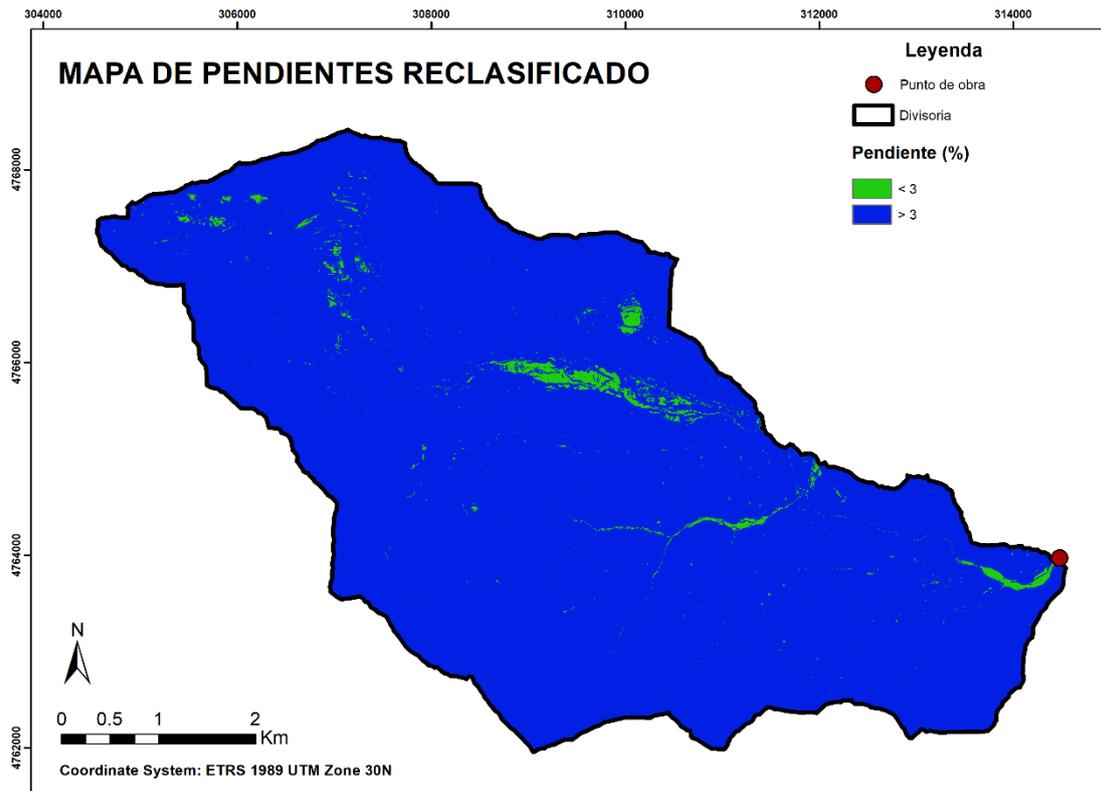


Figura 24.- Mapa de pendientes reclasificado en porcentaje.

4.5.2.2 Mapa de tipos de suelo

Se ha descargado el mapa de suelos de Castilla y León, disponible en la web del Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACYL) según el cual los suelos presentes en la cuenca de estudio son de textura gruesa (tipo A, numero primo 3) y Leptosoles líticos (tipo D y numero primo 11).

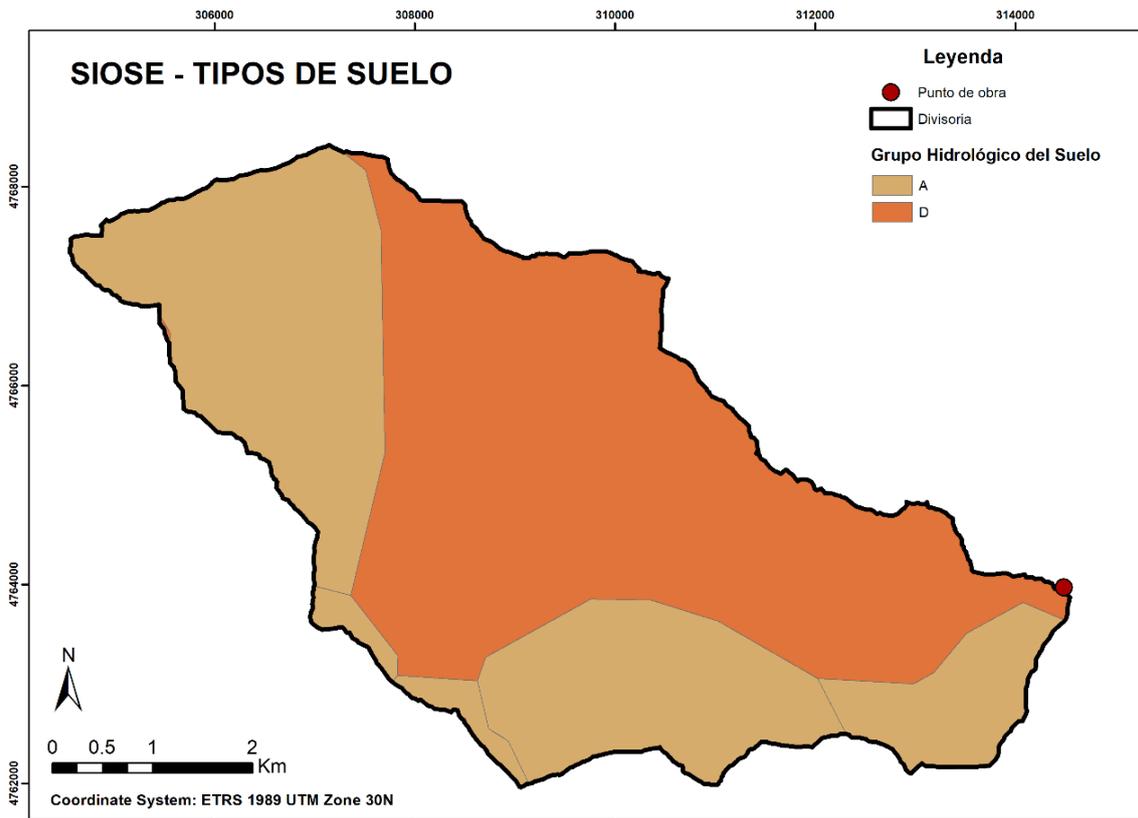


Figura 25.- Mapa de tipos de suelo según el grupo hidrológico: Fuente: ITACYL.

4.5.2.3 Mapa de usos del suelo

El mapa de usos del suelo empleado ha sido el Corine (versión CLC18), en cuya base de datos presenta los siguientes tipos que, correlacionándolos con los tipos de la Tabla 2 del trabajo (Ferrér *et al.*, 1995) se les han asignado los siguientes números primos:

Tabla 5.- Números primos asignados según el uso del suelo.

Tipo	Número primo
Zona de extracción minera	83
Tejido urbano discontinuo	89
Roquedo	83
Praderas	47
Pastizales naturales	53
Matorral boscoso de transición	61
Landas y Matorrales	61
Espacios con vegetación escasa	31
Bosque de frondosas	79

Los diferentes usos del suelo que se presentan en la cuenca de estudio han sido representados en el siguiente mapa:

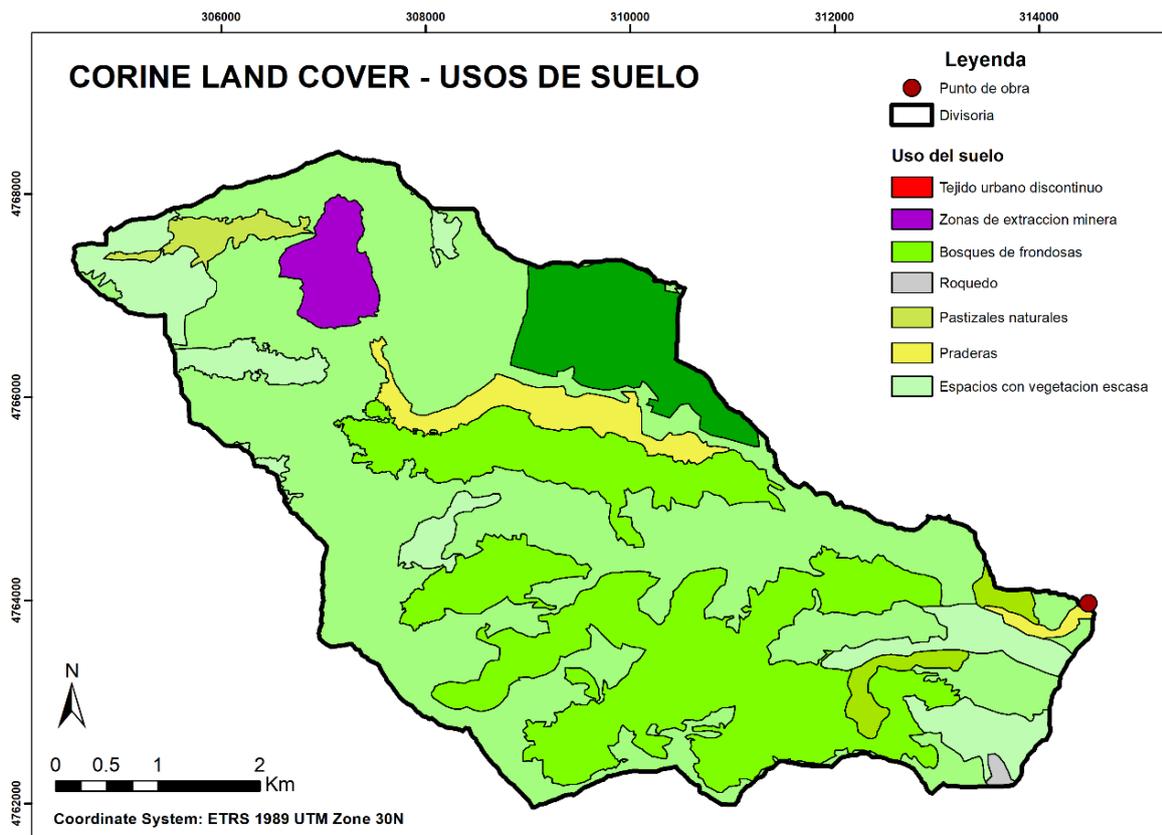


Figura 26.- Mapa de usos de suelo (CLC18) Fuente: CNIG.

4.5.2.4 Número de curva asignado

A continuación se muestra una tabla con los números de curva asignados en función del valor del producto de los números primos tras la superposición de los diferentes mapas elaborados.

Tabla 6.- Número de curvas resultantes tras el proceso de álgebra de mapas.

Pendiente	Grupo hidrológico	Usos del suelo	Producto	Número de curva
1	3	31	93	46
1	3	47	141	40
1	3	53	159	35
1	3	61	183	56
2	3	79	186	29
1	3	83	237	91
1	3	89	249	93

2	3	47	282	45
2	3	53	318	39
1	11	31	341	88
2	3	61	366	56
2	3	79	474	29
2	3	83	498	94
1	11	47	517	78
1	11	61	671	91
2	11	31	682	89
1	11	79	869	60
1	11	89	979	93
2	11	47	1034	83
2	11	61	1342	91
2	11	79	1738	60
2	11	89	1958	96

Por último, se ha elaborado un mapa para representar el número de curva asignado a cada recinto de la cuenca del estudio:

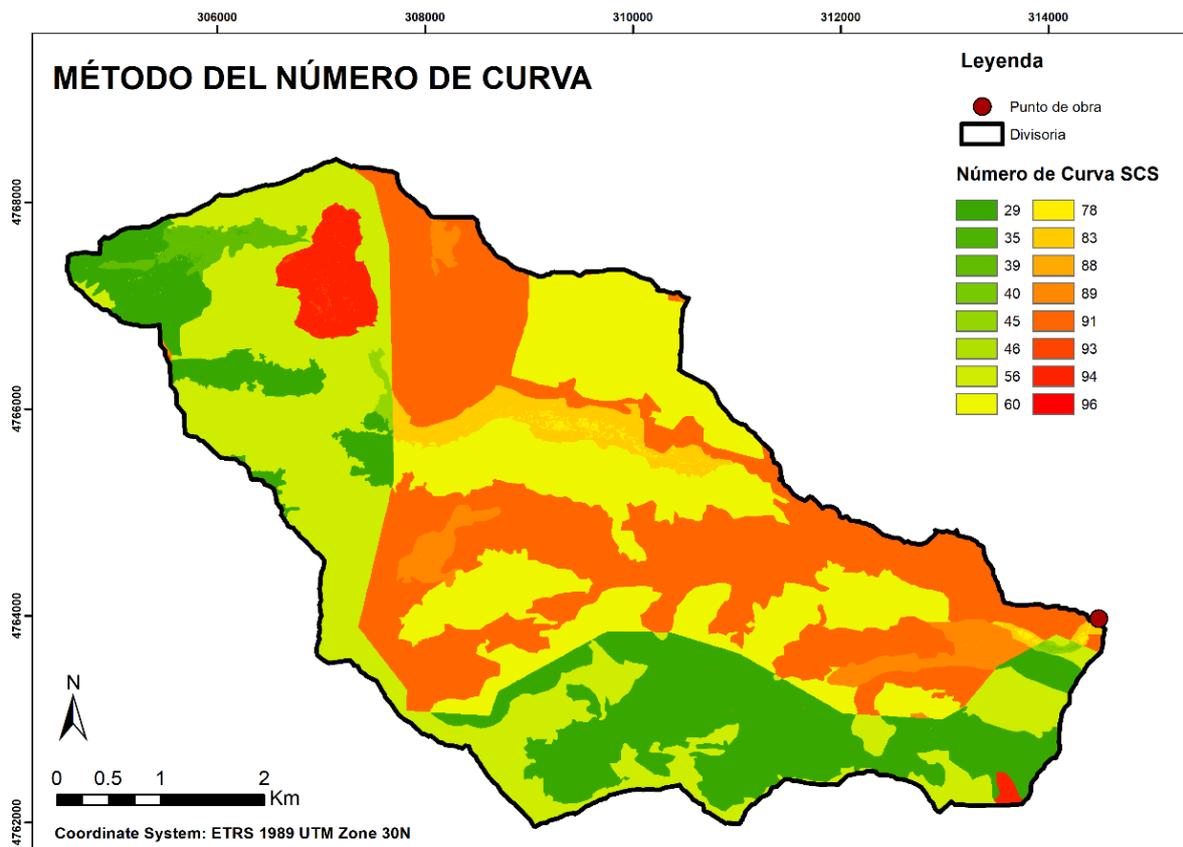


Figura 27.- Distribución del valor del número de curva en la cuenca.

4.5.3 Condiciones Hidrodinámicas de entrada y salida

Para el caso del modelo hidráulico es necesario establecer las condiciones de entrada del flujo lo cual supone la asignación en las entidades del contorno adecuadas, el caudal total que entra en el sistema. Para el presente trabajo se han establecido unas condiciones de entrada en régimen crítico/subcrítico donde tan solo es necesario introducir el valor del caudal (Q) en m^3/s aunque también se presenta la posibilidad de importar un hidrograma de forma que podríamos contemplar una simulación bidimensional en régimen variable.

Tanto para el modelo hidrológico como para el modelo hidráulico es necesario establecer las condiciones de contorno en la malla por lo que es necesario seleccionar las entidades del contorno que funcionan como salida del flujo, así como el régimen de dicho flujo. En este trabajo se ha seleccionado régimen supercrítico o crítico puesto que dicha casuística es la que se estima que se produzca a la salida del modelo, en el punto de obra.

4.5.4 Rugosidad

La rugosidad del terreno debe ser definida mediante el número de Manning para su posterior importación a IBER. El coeficiente de rugosidad de Manning ha sido calculado empleando la cobertura SIOSE disponible en la web del CNIG y siguiendo la Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables desarrollada por el MITECO (Sánchez y Lastra, 2011).

De la cobertura SIOSE se han extraído los polígonos que se encuentran dentro de la cuenca de estudio y posteriormente, empleando el código que identifica a cada polígono en función de los usos del suelo que lo componen, se ha calculado el número de Manning de cada uno de ellos de acuerdo con los valores que se indican en el Anejo V de la mencionada Guía. En la tabla (**Tabla 8**) adjunta en el Anexo “Número de Manning” se muestran los polígonos identificados en la cuenca con su correspondiente número de Manning de acuerdo con el uso del suelo que en cada uno de ellos existe.

Una vez definido el coeficiente de rugosidad, el proceso se reduce a la importación de estos datos al programa mediante una de las herramientas que este ofrece para hacerlo de forma automática, aunque en realidad, previamente es necesario generar un fichero ASCII que contenga los datos georreferenciados de los polígonos y otro fichero de tipo csv con la identificación de dichos polígonos y el número de Manning asignado.

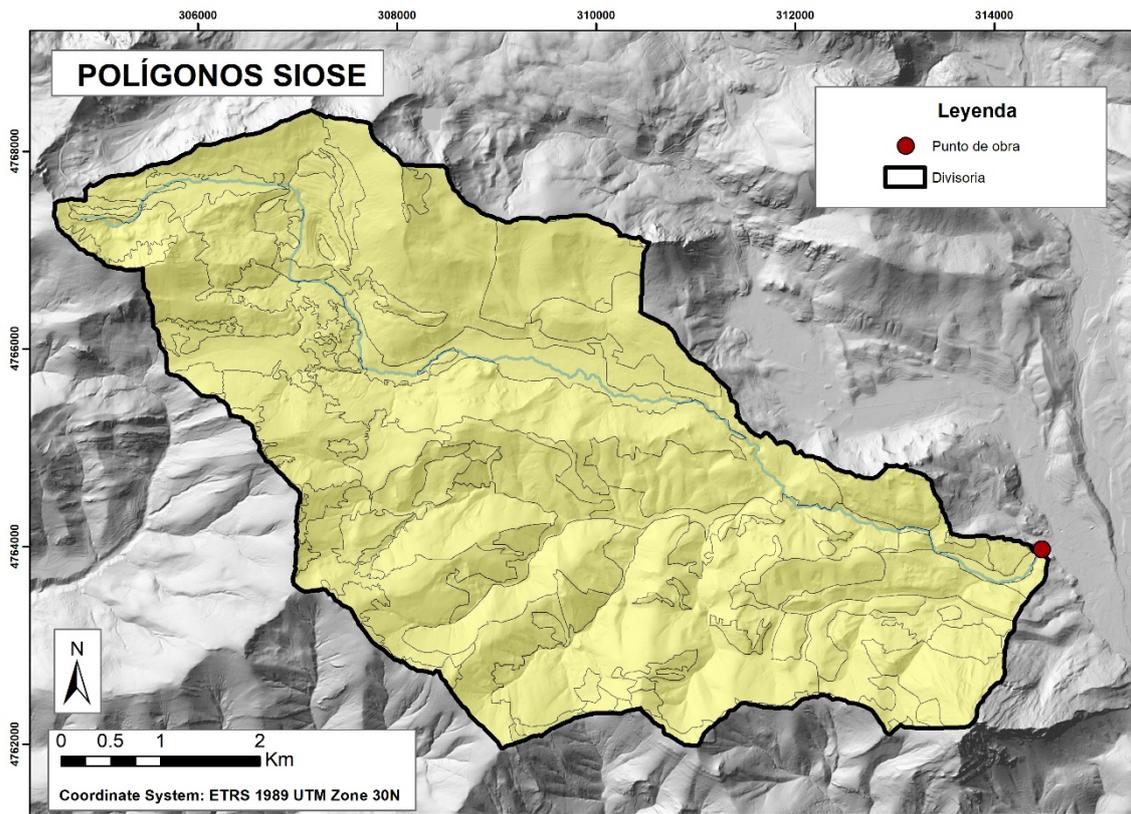


Figura 28.- Polígonos que definen los usos del suelo dentro de la cuenca de acuerdo a la cobertura SIOSE.

4.5.5 División en subcuencas

La cuenca de estudio ha sido dividida en 7 subcuencas siguiendo criterios hidrológicos y en base a la red hídrica de la misma con la finalidad de discretizar de manera coherente los afluentes más importantes del cauce principal. Además, esta división ha permitido incorporar en el modelo el número de curva correspondiente a cada subcuenca en vez de introducir un número curva medio para toda la cuenca.

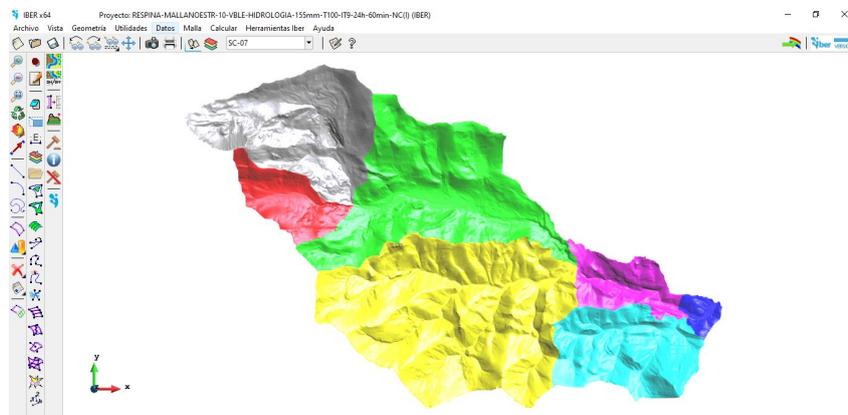


Figura 29.- Geometría creada en IBER con la discretización en subcuencas para introducir el Número de Curva en el modelo de pérdidas del módulo hidrológico.

El proceso seguido en la asignación ha sido: generar un fichero shape (ArcGIS) de subcuencas, mejorando en lo posible la topología (para ello ha sido necesario trabajar con las herramientas ArcGIS para la limpieza de duplicidades). Una vez importado este fichero shape en IBER, es necesario generar tantas capas como subcuencas y enviar cada subcuenca a su capa, esto nos permitirá seleccionarla posteriormente para caracterizarla con el número de curva por la imposibilidad de seleccionar por polígono. Generada la geometría a partir del fichero shape, la colapsamos para optimizarla, con esto también borramos duplicidades. Seleccionamos cada subcuenca y en el módulo de “procesos hidrológicos” le dotamos del número de curva siguiente:

Tabla 7.- Número de curva según las diferentes condiciones de humedad previas.

SUBCUENCA	ÁREA (km ²)	NC(II)	NC(III)
1	0,425	66,9	82,30
2	1,749	80,84	90,66
3	7,851	56,29	74,76
4	11,372	62,83	79,54
5	3,848	72,09	85,59
6	1,839	48,17	68,13
7	5,470	60,42	77,83
TOTAL	32,554		

El valor del número de curva NC(II) representa condiciones de humedad previas medias, y el número de curva NC(III) representa condiciones de humedad previas elevadas. Se han tenido en cuenta estos dos casos puesto que los días previos a la avenida se registraron números eventos lluviosos por lo que se pueden considerar ambas condiciones de humedad. Para realizar la conversión mediante cálculo sin necesidad de recurrir a tablas e interpolar, (Chow *et al.*, 1994) proponen la siguiente expresión:

$$CN(III) = \frac{23 \times CN(II)}{10 + 0,13 \times CN(II)}$$

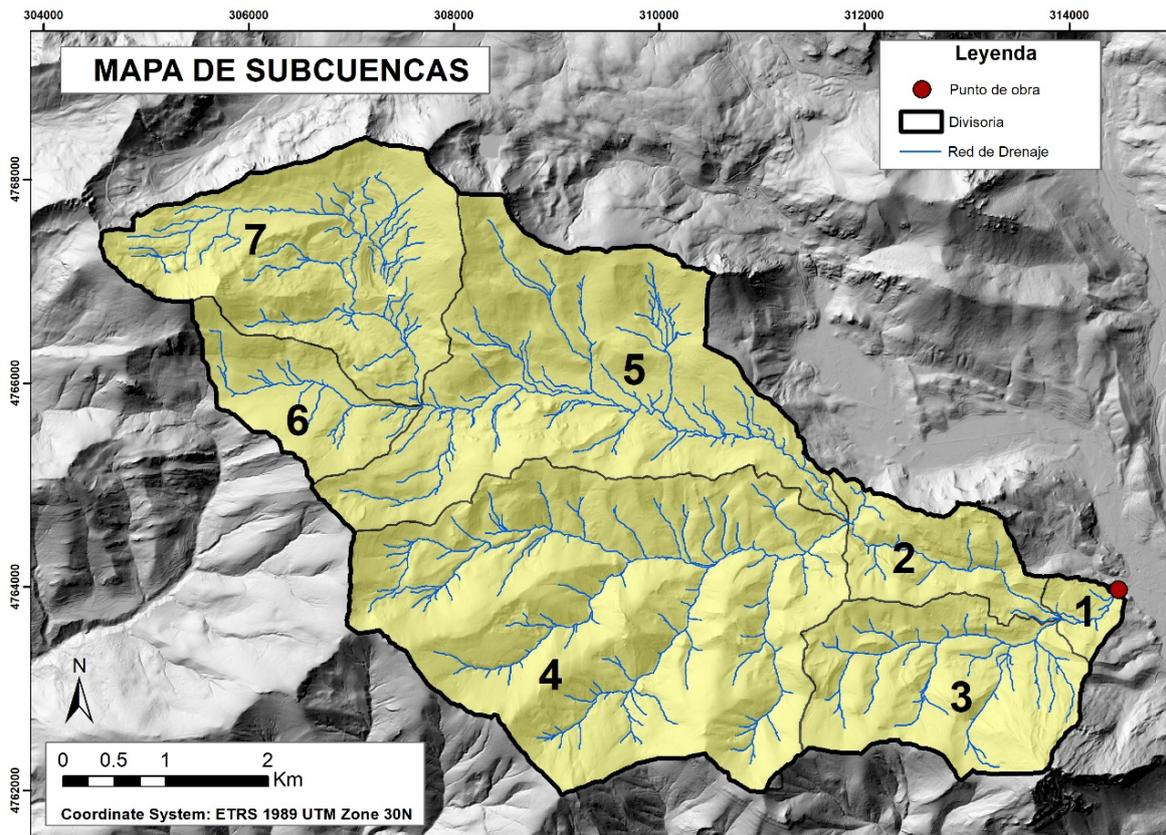


Figura 30.- División de la cuenca en subcuencas según la red hídrica de la misma.

5. La avenida del 7 de diciembre del 2000

El análisis de los datos de precipitaciones proporcionados por AEMET, para la estación del Puerto de San Isidro, durante los días 1 al 15 de diciembre del año en cuestión ponen de manifiesto los siguientes datos:

1) Las precipitaciones máximas se registraron durante el día 7 con una precipitación total diaria de 67,8 mm, con un pico de máxima de 36,9 mm durante la mañana (07-13h) del mismo día. Posteriormente durante los intervalos horarios de 13 a 18 h y de 18 a 24h tan solo se registraron 5,7 y 1,8 mm respectivamente.

2) Las intensidades máximas de precipitación también se registraron el día 7 a las 11:40 AM con un pico de 13,2 mm/h.

3) El episodio de tormenta que dio lugar a la avenida de la noche del 7 al 8 de diciembre comenzó entre las 0:00 y 07:00 h del día 7 cuando se registró una precipitación de 23,9 mm. No obstante, durante los dos días anteriores (5 y 6 de diciembre) ya se registraron precipitaciones significativas de 16,2 y 13,5 mm. Este último hecho induciría a una saturación previa del suelo, y una pérdida de capacidad de infiltración, que facilitaría la escorrentía superficial durante el posterior episodio de tormenta del día 7.

No obstante, ni los valores de precipitaciones máximas diarias (67,8 mm), ni de intensidades máximas de lluvia (13,2 mm/h), pueden justificar el proceso de crecida ocurrido el día 7. La estación meteorológica de San Isidro se encuentra situada en el Pto. de San Isidro, cercana a la cabecera del arroyo Respina, pero fuera de la zona de captación de su cuenca hidrográfica, a unos 4 km de distancia hacia el norte. De este modo puede ser que los datos, tanto cuantitativos, como horarios, de las precipitaciones registradas no fueran del todo representativos. Es decir, las precipitaciones e intensidades máximas no tienen por qué coincidir con el lugar donde está ubicada una estación meteorológica.

Este es un hecho que ha sido constatado por la comunidad científica en diversas ocasiones como por ejemplo en la avenida del valle de Arás, que arrasó el camping Las Nieves en la zona de Biescas (Pirineo Oscense) en agosto de 1996 (García-Ruiz *et al.*, 2004). Durante tal episodio, las estaciones que rodeaban la cuenca hidrográfica del barranco de Arás, distantes entre 8 y 15 km de ella, registraron valores moderados de precipitaciones máximas diarias de entre 39 y 58,1 mm, similares a los registrados en San Isidro para el caso que nos ocupa. Tan solo en la estación de Biescas, distante menos de 2 km de su cuenca, se registraron valores realmente representativos del evento de hasta 160 mm.

Posteriores análisis indirectos procedentes de estimaciones de caudales y de radares de tormenta concluyeron que las precipitaciones máximas alcanzaron los 172 mm y 180 mm respectivamente con intensidades máximas de hasta 322 mm/h, y que se centraron en una de las cuencas vertientes del Arás, no superior a los 4 km². Tal situación se ha vuelto a repetir en las crecidas de los arroyos Herradón y Cortos (Sistema Central, Ávila) en febrero de 1998 (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2013) y en la de Monserrat (Cataluña) en junio del 2000.

A tenor de los efectos geomorfológicos observados en el valle de Respina se puede decir que estamos ante una situación similar, la cual no se puede cuantificar en base a los

datos disponibles en la actualidad. Problema para el que se plantea en el presente trabajo la modelización basada en los índices geomorfológicos. No obstante, desde el punto de vista cualitativo y como primera impresión puede decirse que muy posiblemente el núcleo de precipitaciones máximas se situó sobre la vertiente sur del valle, que fue donde funcionaron activamente las cuencas vertientes afluentes reactivando los conos de deyección a su salida.

Teniendo en cuenta las dimensiones de la cuenca del Respina (*ca.* 18 km² en las subcuencas de la cabecera), similares a las del Arás (18,56 km²), el rango horario de precipitaciones e intensidades máximas tuvo que estar necesariamente desplazado hacia la tarde del día 7 de diciembre. De igual forma, teniendo en cuenta las dimensiones de la cuenca y del área efectivamente inundada durante el evento (< 0,5 km²) en el sector medio del Respina (ver mapa de situación, **Figura 11**) las precipitaciones máximas debieron sobrepasar los 67,8 mm registrados en San Isidro, pero difícilmente superarían los 75 - 80 mm.

Probablemente los datos de San Isidro puedan ser representativos para la cabecera y vertiente norte del Respina (zona más próxima a la estación), donde no se han observado efectos erosivos notables. En cualquier caso, si comparamos estos valores con los recogidos o estimados en el valle de Arás (160 - 180 mm), puede afirmarse que el evento del Respina que nos ocupa fue realmente moderado.

5.1 Hidrograma de avenida

Tras la realización de la consulta oportuna la Confederación Hidrográfica del Duero se han conseguido los datos horarios de la estación de aforo que se encuentra en el inicio del embalse del Porma. Esta estación de aforo recoge todas las aguas de la cuenca del Porma hasta ese punto que tiene un área aproximadamente de 145 km², incluyendo la aportación correspondiente a nuestra cuenca de estudio del arroyo Respina con 32,6 km².

Se han representado los datos horarios de caudal en esta estación para poder tener una referencia del pico de caudal que pudo circular por la cuenca de estudio al ser un afluente del Porma (**Figura 32**). También se ha empleado dicho hidrograma para conocer el tiempo de precipitación neta que pudo tener el episodio lluvioso que originó la avenida. Conocido el tiempo de concentración de la cuenca del Porma hasta el punto donde se

encuentra la estación de aforo y conocido el tiempo base del hidrograma, se puede estimar la duración de la precipitación neta.

Aplicando la ecuación para el cálculo del tiempo de concentración de Témez ya expuesta anteriormente se ha obtenido dicho parámetro para la cuenca del Porma, conocidos:

- $H_{\max} = 1914,34\text{m}$
- $H_{\min} = 1106,93\text{m}$
- Longitud del cauce = 19,62 km

Resultando un tiempo de concentración de 5,28 horas.

El tiempo base se ha estimado en 18 horas dibujando en el hidrograma el inicio de la curva de recesión o agotamiento como se muestra en el hidrograma de la figura (**Figura 32**). Por lo tanto, la duración de la precipitación neta será:

$$t_{p,neto} = t_b - t_{c,Porma}$$

Resultando la duración de la precipitación neta 12,72 horas por lo que para la modelización se tomará 15 horas como duración total de la precipitación.

Con el fin de visualizar el proceso seguido para estimar la duración de la lluvia y los parámetros que en el cálculo intervienen se ha tomado la siguiente figura (**Figura 31**) donde se representan los parámetros utilizados sobre un hidrograma tipo relacionado con el hietograma.

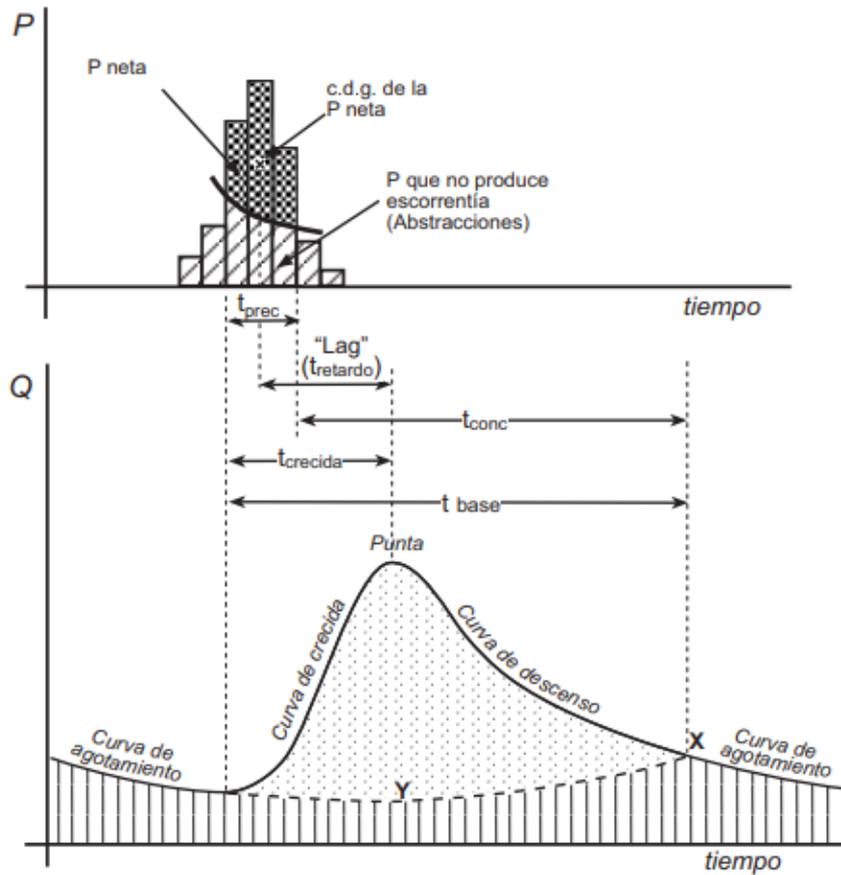


Figura 31.- Diagrama de transformación lluvia a caudal. Tomada de (Sánchez San Román, 2017)

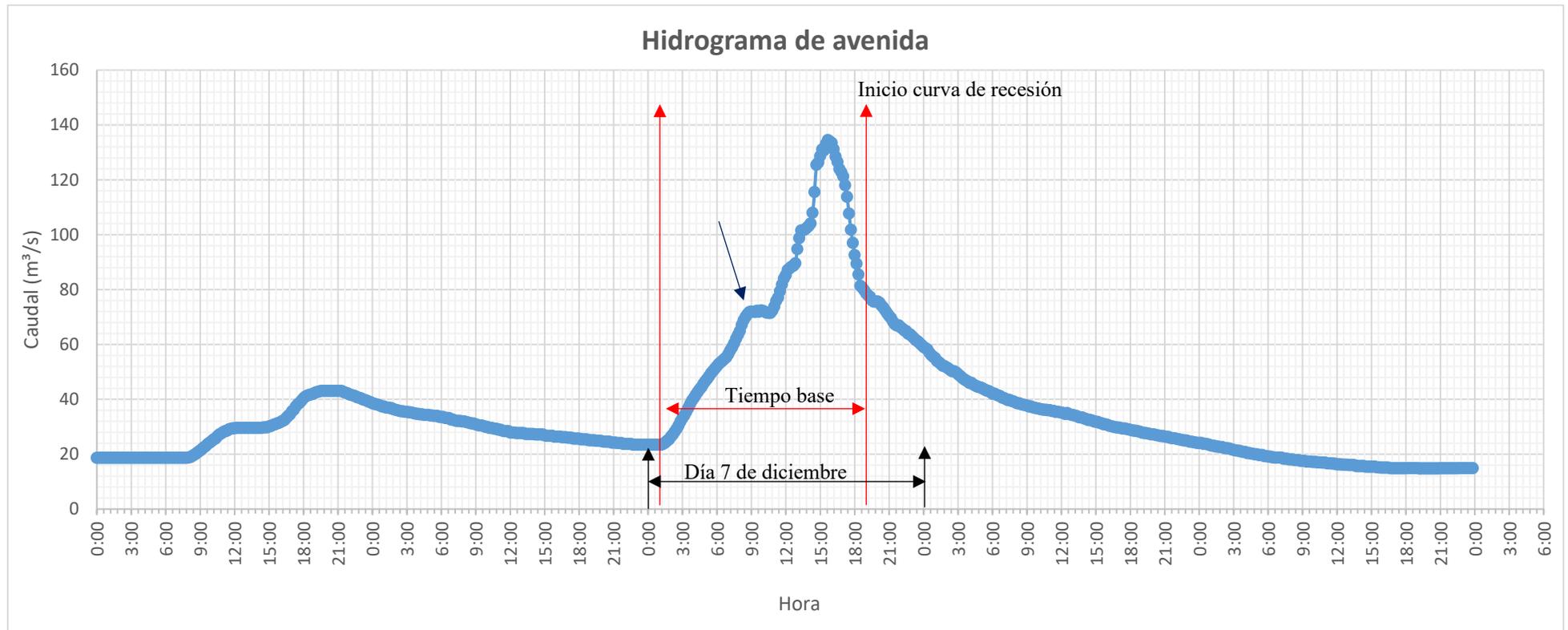


Figura 32.- Hidrograma de avenida en la estación de aforo del Embalse del Porma entre los días 5 y 9 de diciembre. La fecha azul oscuro indica el pico previo al máximo que se puede corresponder con la aportación de la cuenca de estudio. Fuente: Confederación Hidrográfica del Duero.

Para la determinación del punto de inicio de la curva de recesión se ha representado el hidrograma (los valores de caudal) en escala logarítmica. De esta forma, la curva de recesión se convierte en una recta de manera que será cuando ésta empiece a curvarse donde marcaremos el punto de comienzo de la curva. Aun empleando este método, no ha resultado sencillo determinar el punto exacto de comienzo de la curva recesión.

Como se puede ver, se alcanzó un pico de caudal de $133,96 \text{ m}^3/\text{s}$ el día 7 a las 15:50. Este pico se corresponde con el caudal máximo aportado por toda la cuenca del río Porma, no solo de la cuenca de estudio que nos atañe de ahí que este valor difiera del valor de caudal que se diera en el punto de obra seleccionado. Sin embargo, este valor supone un dato relevante que puede ser utilizado como referencia teniendo en cuenta el orden de magnitud de las dos cuencas (la del Porma y la de estudio) así como del hecho de que las precipitaciones se concentraron en el área de estudio y no en toda la cuenca del Porma. Es decir, las precipitaciones no fueron homogéneas en toda la cuenca como sabemos por los efectos erosivos que estas causaron únicamente en la cuenca de estudio durante este evento hidrológico.

Así mismo, se puede observar como el hidrograma presenta un pico previo antes del máximo absoluto a las 9:00 h del día 7 de diciembre. Este pico se puede corresponder con la aportación de la cuenca de estudio puesto que se sabe que las intensidades de lluvia más elevadas alcanzadas en la estación del Puerto de San Isidro se dieron entre las 7 h y las 13 h de ese mismo día. Además, el punto de obra de la cuenca de estudio se encuentra realmente próximo a la estación de aforo como se ha mostrado en los diversos esquemas realizados de la cuenca.

Por otro lado, se ha calculado la lámina de agua equivalente, es decir, la altura de la lámina de agua que resultaría si dividiésemos el volumen total de escorrentía de la avenida (obtenido del hidrograma) entre la superficie de la cuenca. Esto nos permite comparar la lámina de agua equivalente que se asimilaría a la precipitación neta con la precipitación neta obtenida tras aplicar el método del número de curva a los hidrogramas de proyecto.

Para realizar el cálculo anterior es necesario separar el flujo base del hidrograma de la avenida y así poder obtener el volumen total de escorrentía directa. A tal efecto se ha empleado el método que emplea una línea recta que une el punto de comienzo del pico con el punto de comienzo de la curva de recesión, de manera que, todo lo que queda por encima es escorrentía directa y lo que queda por debajo, flujo base.

Finalmente, se ha obtenido que el volumen total de escorrentía directa durante la avenida ha sido de $1,157 \text{ hm}^3$ en toda la cuenca del Porma hasta la estación de aforo, la cual tiene una extensión de $144,26 \text{ km}^2$. Sabiendo esto, y realizando el cociente entre estos dos valores se tiene que la lámina de agua equivalente es de $8,02 \text{ mm}$. Este valor será contrastado más adelante con los datos de precipitación neta de los hietogramas de proyecto.

5.2 Efectos erosivos y sedimentarios de la avenida y procedencia de los acarrees

El análisis de los efectos geomorfológicos causados por el proceso de avenida del 8 de diciembre del 2000, permiten subdividir el trazado del arroyo Respina en 5 tramos diferentes, localizados en los distintos sectores del mapa geomorfológico modificado del apartado del contexto geológico (ver mapa geomorfológico, **Figura 21**):

Tramo 1 (SECTOR A):

Corresponde al cauce modificado del Respina por el interior de la zona de minas. No se observa ningún indicio erosivo de entidad. Tan solo en un entubamiento de prevención previo al entubamiento principal de la escombrera (para prevenir su obturación) se observó un pequeño deslizamiento de menos de 1 m de longitud por $30\text{-}40 \text{ cm}$ de altura, posiblemente por desbordamiento. La entrada del arroyo a la zona de minas se efectúa mediante una pequeña cascada natural, labrada en roca caliza, de algo más de 3 m de altura. En su interior, próximo a su entrada en el tramo entubado que discurre por debajo de las escombreras existe otro salto, labrado en roca lutítica de tonos rojizos, de menor pendiente, pero con una altura de más de 7 m . Y por último, tras su salida del tramo entubado, existe un salto de unos 4 m hasta la balsa de sedimentación.

La disposición escalonada de este tramo previene la propagación de los efectos erosivos aguas arriba. En cualquier caso, cualquier material de gran calibre (bloques y gravas) que hubiera sido movilizado en este trazado hubiera quedado abandonado en la balsa de sedimentación final. No ocurre lo mismo con las gravas más finas de lutita roja ($< 1 \text{ cm}$ de diámetro) desprendidas del salto labrado en roca, que debido a su menor densidad específica pudieron sobrepasar la balsa. En los canales perimetrales y canal final de desagüe no se observaron indicios algunos de erosión, ni restauraciones recientes que pudieran enmascararlas. Por el contrario; se observa que en los márgenes de tales canales

existe vegetación herbácea que testifica (ver imagen inferior, **Figura 34**) su estabilidad o restauración reciente.



Figura 33.- Entubado final antes de la balsa de sedimentación.

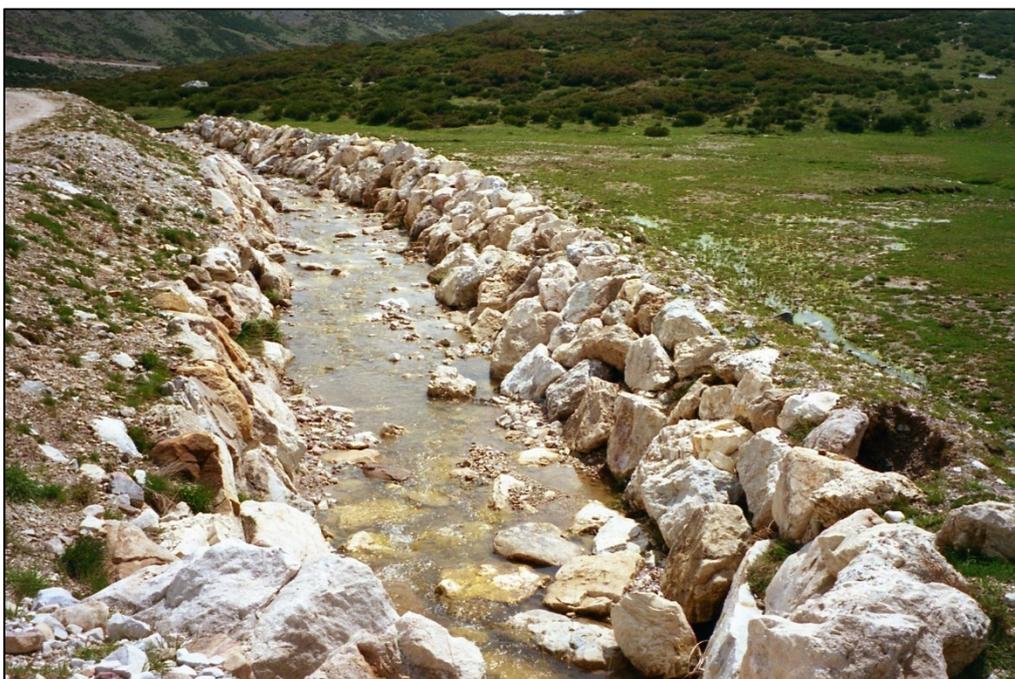


Figura 34.- Márgenes de los canales con vegetación herbácea.

Tramo 2 (SECTOR A):

Corresponde al tramo del Respina situado entre su salida de las escombreras y el lugar denominado Fuentes del Respina. En su mayor parte el curso discurre labrado en roca tan solo existiendo una delgada cubierta de suelo vegetal. En este sector, no se han observado más que deslizamientos decimétricos de poca envergadura de la cubierta vegetal. Este tramo tan solo recibe de una cuenca vertiente afluyente inmediatamente aguas abajo de la escombrera. Esta muestra signos de actividad escasos ya que el tramo del cauce del cono de deyección está modificado y entubado para salvar un camino.

En esta zona se observan indicios de erosión y encajamiento del cauce y formación de una lengua de bloques y gravas angulosos de cuarcita y calizas oscuras (Calizas de Montaña), a su pie de algo más de 300 m de longitud por 10-4 m de anchura (**Figura 35**) que bien pudo alcanzar el cauce del Respina. En cualquier caso, el cono de deyección no funcionó (desbordó) en toda su entidad, sino tan solo en su porción canalizada lo que nos indica el carácter más bien moderado de las precipitaciones en este sector.



Figura 35.- Formación de una lengua de gravas y bloques angulosos.

Tramo 3 (SECTOR A):

Este tramo se desarrolla entre Fuentes de Respina y la morrena glaciár terminal que semi-confina el valle. En este sector la llanura de inundación del valle es muy estrecha no llegando a superar los 80 m de anchura y el cauce posee una elevada pendiente. Es en este tramo donde comienzan a evidenciarse los procesos erosivos más importantes.

Fundamentalmente el sector inicial de este valle presenta una erosión de los márgenes continua, pero alternante en ambos lados de acuerdo con los arcos de curvatura del arroyo (**Figura 36**). En todo su recorrido se observan deslizamientos y desplomes,

por socave basal del arroyo, de orden métrico. En algunos puntos donde la curvatura del cauce es elevada se observan deslizamientos de hasta 7-8 m de longitud por 5-6 m de altura, que como testigo dejaron suspendidas en el aire vallados y alambradas (**Figura 37**). En este tramo, no se produjo sedimentación relevante durante la avenida sino procesos erosivos de carácter continuo que ampliaron la sección o anchura del cauce (en algunos puntos hasta 3 m) incorporando gran cantidad de carga sólida al flujo de agua y funcionando por tanto como área productora principal de sedimentos durante el proceso de avenida. En el sector terminal de este tramo se sitúan además las desembocaduras de dos sistemas torrenciales por su margen derecha que muestran signos evidentes de acarreo de gravas, bloques y ramaje. Estos también se incorporaron al cauce del Respina y funcionaron como fuente secundaria de sedimentos (**Figura 12**).



Figura 36.- Erosión alternante en los márgenes del arroyo según sus arcos de curvatura.



Figura 37.- Alambrado suspendido en el aire tras los grandes deslizamientos ocurridos.



Figura 38.- Evidencia de un gran deslizamiento ocurrido debido a la mayor curvatura del cauce en este punto.

Tramo 4 (SECTOR B):

Tal y como se ha indicado en este tramo se produce el desconfinamiento del valle, una reducción muy significativa de la pendiente del cauce y el desarrollo de una más o menos extensa llanura de inundación, que como su nombre indica constituye la zona inundable (ver perfiles longitudinales, **Figura 19**) del valle durante procesos de avenida como los ocurridos en diciembre del 2000.

En este sector se produjo el desbordamiento del cauce, acompañado por procesos de bifurcación (**Figura 39**), cambios de curso por corte de meandros (**Figura 40**), incisiones verticales del cauce de hasta 1,5 m de profundidad (Figura 42) y, aunque de forma más discontinua deslizamientos y desplomes métricos y decimétricos de los márgenes del cauce. Incisiones y deslizamientos fueron especialmente relevantes en aquellas zonas donde se había modificado artificialmente el nivel del arroyo mediante la construcción de azudes para el riego de pastos (**Figura 41**).



Figura 39.- Desbordamiento del cauce y procesos de bifurcación.



Figura 40.- Cambio de curso por corte de meandros.



*Figura 41.- Incisión vertical en el margen derecho del cauce con evidencia de
desbordamiento y sedimentación de los acarreos transportados durante la avenida.*



Figura 42.- Deslizamiento vertical del cauce con aporte de carga de sedimentaria.



Figura 43.- Incisión vertical del cauce de 1m de altura aproximadamente.

El análisis de fotogramas aéreos correspondientes a los años 1983 y 1998, indica la existencia de un antiguo (muy anterior a 1983, quizá histórico) cauce del Respina que circulaba por la margen derecha (ver mapa geomorfológico, **Figura 21**), mientras que el actual circula por su margen izquierda. De esta forma el centro de la llanura de inundación queda elevada entre 1 y 1,7 m por encima de los dos cauces que la bordean (el antiguo y el moderno). Así pues, en cualquier proceso de avenida, el agua al desbordarse por desconfinamiento comenzará también a circular por el antiguo paleocauce y si este desbordamiento se prolonga ambos cauces terminan fusionándose, dando lugar a la inundación total del valle. Además, el propio cauce actual del Respina muestra numerosos canales de crecida adicionales, que solo son funcionales durante procesos de avenida. Las bifurcaciones y cortes de meandro observadas (cambios de cauce) aprovecharon canales de crecida ya existentes y no pueden considerarse hechos de especial relevancia en la dinámica de un río de montaña, ya que estos se producen comúnmente cada vez que hay una avenida de cierta importancia.

Los acarrees fluviales depositados en este sector del valle no fueron de gran importancia. Tal y como se señala en el gráfico que ilustra el perfil del río (**Figura 19**), existe una zona al comienzo de este sector donde se depositaron cordones de arenas por desbordamiento de la margen derecha hacia el antiguo cauce del arroyo (**Figura 44**). Estas son formaciones naturales, en concreto barras transversales de refluo.

Por otro lado, la zona afectada no alcanza más de 300 m de longitud. El siguiente tramo donde se produjo un depósito algo más relevante de gravas, bloques y ramaje (**Figura 45**) fue en la zona central de este sector del valle donde el cauce adquiere mayor sinuosidad. No se puede decir que tales acarrees obturaron el cauce, el cual se observa (aunque seco) en la actualidad, sino más bien que durante el descenso de las aguas el arroyo se canalizó por uno de los cauces adicionales de crecida que ya existían, provocando un corte de meandro de no más de 400 m por incisión y la formación de una barra de gravas y bloques (formación de origen natural) entre el nuevo curso del arroyo y el previo a la avenida. (**Figura 46**)



Figura 44.- Cordones de arena por desbordamiento.



Figura 45.- Depósito de gravas, bloques y flotantes.



Figura 46.- Corte de meandro por formación de barra de bloques y nuevo curso del arroyo.

Por otro lado, la tipología y naturaleza litológica (tipo de rocas) de las gravas y bloques abandonados por el arroyo en la mencionada barra, en nada difieren de los que se observan en los márgenes del cauce producto de anteriores inundaciones (**Figura 47**). Los acarrees observados en la barra están constituidos por bloques y gravas subangulosos y sub-redondeados, con bordes engastados (**Figura 48**) compuestos fundamentalmente por cuarcitas, calizas y pizarras (mayoritariamente procedentes de la vertiente sur).

Como se ha apuntado antes, estos proceden mayoritariamente de las fuentes de sedimentos citadas en el punto anterior, es decir de la removilización de los antiguos depósitos torrenciales y fluvio-glaciares que rellenan el valle del Respina, así como de los existentes en su propio cauce antes de la avenida. No existe ningún dato objetivo que permita asegurar que los acarrees dejados por el río procedan de las escombreras de las Minas de talco ya que las escombreras están constituidas por gravas y bloques muy angulosos procedentes de los estériles de la extracción (fundamentalmente pizarras y calizas dolomitizadas de tonos claros). Tan solo en los acarrees observados se observan cantos de pequeño tamaño, y no muy numerosos, que proceden de la cascada sobre lutitas rojas que existe en el interior de la zona de minas, es decir de los materiales rocosos por los que discurre el río.



Figura 47.- Gravas y bloques en los márgenes del cauce procedentes de inundaciones previas.



Figura 48.- Acarreos observados en la barra.

Por último, la mencionada barra con una anchura de no más de 50 m de anchura y por unos 400 m de longitud, no es volumétricamente un porcentaje representativo del material removilizado y erosionado por el propio cauce en tramos situados aguas arriba, que si se cuantificara adecuadamente resultaría mucho mayor (ver mapa geomorfológico, **Figura 21**).

Tramo 5 (SECTOR C):

Constituye un tramo donde el cauce vuelve de nuevo a estrecharse, encajándose directamente en el sustrato rocoso de la zona, desapareciendo la llanura de inundación y conformando una pequeña garganta fluvial hasta su desembocadura con el río Celorno y arroyo Rebueno en las proximidades de la Ermita de Peñas Rubias. Este sector del valle funciona a modo de cuello de botella, favoreciendo la inundación del sector anterior y el represamiento prolongado de las aguas por disminución de la sección del valle.

6. Resultados

En los estudios hidrológicos no solo es necesario conocer la cantidad de lluvia de un episodio tormentoso, sino que además, resulta necesario conocer la distribución de la intensidad de lluvia en el tiempo. Por este motivo se confeccionan los hietogramas correspondientes a las lluvias de proyecto, es decir, las lluvias asociadas a un determinado periodo de retorno T o como en este caso, la lluvia real que provocó la avenida que estamos estudiando. Como la lluvia real no es conocida puesto que carecemos de registros pluviométricos dentro de la cuenca, y solo contamos con el registro de una estación fuera de ésta, se propondrán lluvias de proyecto estimadas teniendo en cuenta este registro y en base a las evidencias geomorfológicas recogidas.

Los hietogramas se han calculado de acuerdo a la Norma 5.2-IC Drenaje Superficial publicada por el Ministerio de Fomento, en su versión más reciente del año 2017 (aprobada por la Orden FOM/185/2017, de 10 de febrero) que tiene por objeto establecer reglas generales y definir prescripciones para el correcto proyecto, construcción y conservación de las distintas obras, elementos y sistemas de drenaje superficial de la Red de Carreteras del Estado.

Conocida la precipitación total acumulada del evento lluvioso y su duración total, se calcula la intensidad de lluvia para las barras del hietograma que representan los intervalos de tiempo seleccionados (60 min en nuestro caso) mediante la siguiente expresión:

$$I_t = I_d \times \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{3,5287 - 2,5287 \times t^{0,1}}$$

Donde I_t es la intensidad de lluvia para el tiempo requerido, t el tiempo requerido (en horas), I_d es la intensidad en 24 h y el cociente I_1/I_d es el índice de torrencialidad que relaciona la intensidad de 1 hora con la de 24 horas. Este cociente se obtiene del mapa que aparece publicado en la norma, por lo que depende de la situación geográfica y tiene un valor de 9 para la cuenca estudio.

Una vez obtenidos los valores de cada barra del hietograma, y puesto que ordenadas de mayor a menor no representa la distribución de precipitaciones típicas de las tormentas, se ha aplicado la técnica de los bloques alternos. Esta técnica consiste en ordenar las barras o bloques de tal forma que la intensidad máxima o la precipitación máxima

aparezca en el centro de la duración de la tormenta y las siguientes barras alternativamente a la derecha y a la izquierda.

6.1 Escenarios

Con el objetivo de encontrar la precipitación que más se aproxime a la que tuvo lugar el día de la avenida, se han planteado diferentes escenarios. Dentro de estos escenarios se han definido episodios de lluvia asociados a un periodo de retorno conocido para estudiar la respuesta de la cuenca ante otros posibles eventos hidrológicos extremos como lo son los definidos por la aplicación CAUMAX (Álvarez, 2010). Esta aplicación fue encargada por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente al Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX³ dentro del ámbito del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.

Los escenarios propuestos son los siguientes:

- **Primer escenario:** Corresponde a la lluvia registrada durante el día de la avenida en la estación del Puerto de San Isidro. La precipitación acumulada en 24 horas fue 67,8 mm aunque el registro muestra que casi la totalidad se recogió durante las primeras 13 horas del día. Por este motivo se ha tomado este valor como precipitación total para las 15 horas de duración del evento lluvioso que ocasionó la avenida, obtenido del hidrograma en apartados anteriores. El hietograma confeccionado es el siguiente:

³ El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) es un organismo público que proporciona apoyo multidisciplinar en las tecnologías de la ingeniería civil, la edificación y el medio ambiente, y asiste tanto a las administraciones e instituciones públicas como a empresas privadas.

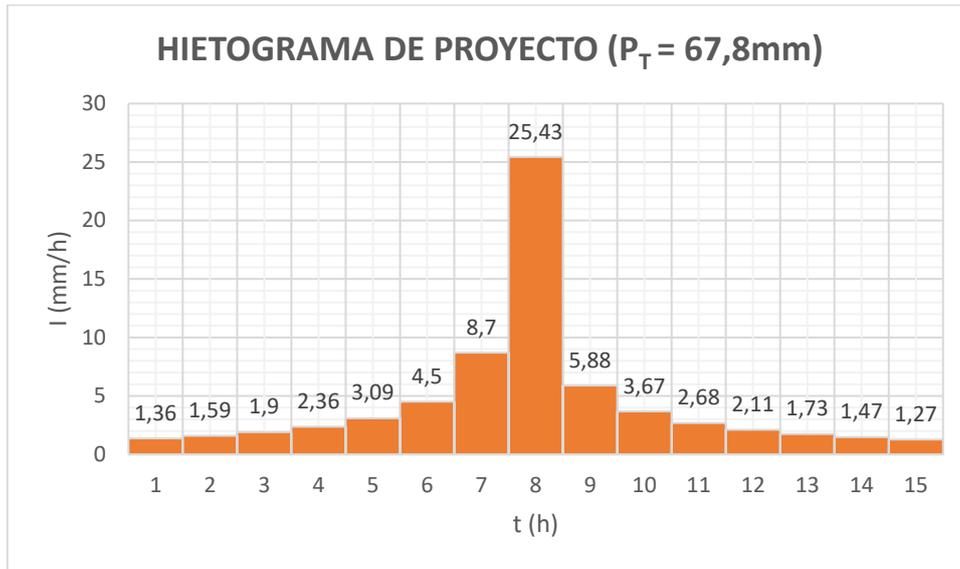


Figura 49.- Hietograma de proyecto escenario 1.

- Segundo escenario:** Corresponde a la lluvia de periodo de retorno 25 años obtenida de la aplicación CAUMAX para la zona geográfica donde se encuentra la cuenca de estudio. Esta aplicación proporciona los valores de la precipitación máxima en 24 h en función del periodo de retorno, siendo para este caso de 122 mm. Tras aplicar la metodología explicada, el hietograma construido es el siguiente:

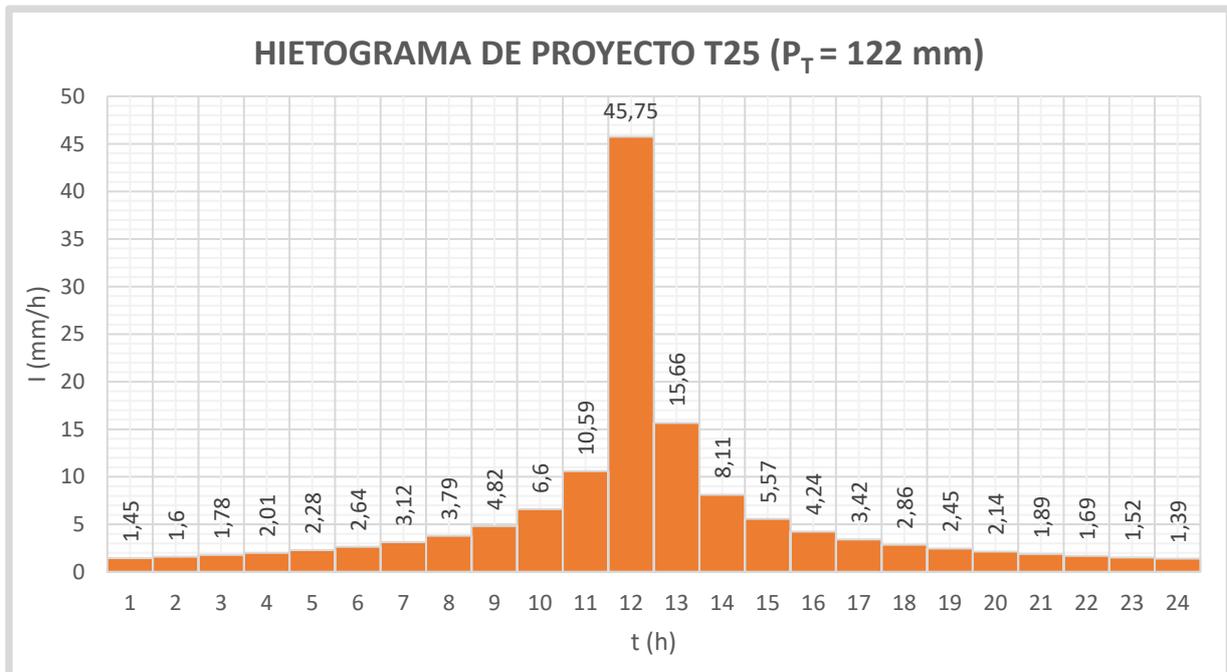


Figura 50.- Hietograma de proyecto escenario 2.

- **Tercer escenario:** Corresponde a la lluvia de periodo de retorno de 100 años obtenida de la aplicación CAUMAX para la zona geográfica donde se encuentra la cuenca de estudio. En este caso el valor de la precipitación máxima en 24 h para este periodo de retorno es de 155 mm. Tras aplicar la metodología explicada, el hietograma construido es el siguiente:

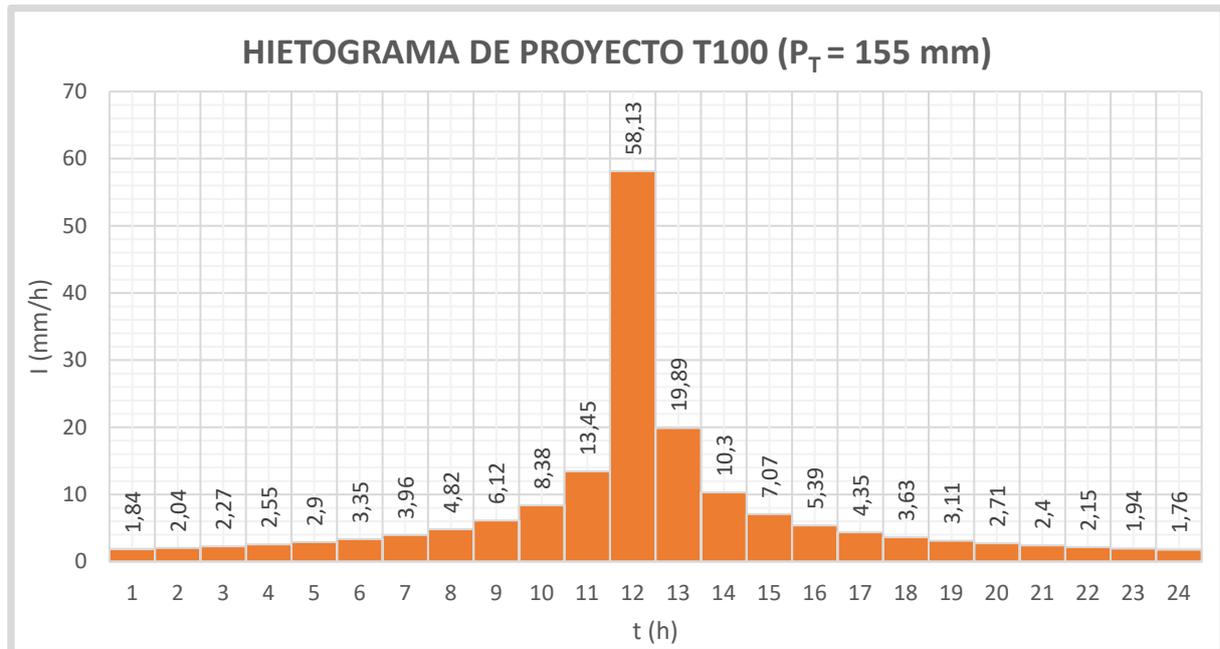


Figura 51.- Hietograma de proyecto escenario 3.

- **Cuarto escenario:** Corresponde a la lluvia estimada teniendo en cuenta el registro de San Isidro y en base a las evidencias geomorfológicas observadas. También se han estudiado casos de avenidas de características similares como la del Barranco de Arás (Gutiérrez *et al.*, 1998) para realizar una estimación que se ajuste lo máximo posible a la precipitación real que tuvo lugar el día de la avenida. Tras la ejecución de los modelos hidrológicos de prueba con diversas lluvias, se ha estimado que la precipitación total acumulada fue de aproximadamente 75 mm en un episodio tormentoso que duró 15 horas como se ha calculado a partir del hidrograma de la estación de aforo del Embalse del Porma. El hietograma construido es el siguiente (**Figura 52**) y como se verá en el siguiente apartado, los resultados del modelo con esta lluvia son los que más se aproximan a lo ocurrido el día de la avenida.

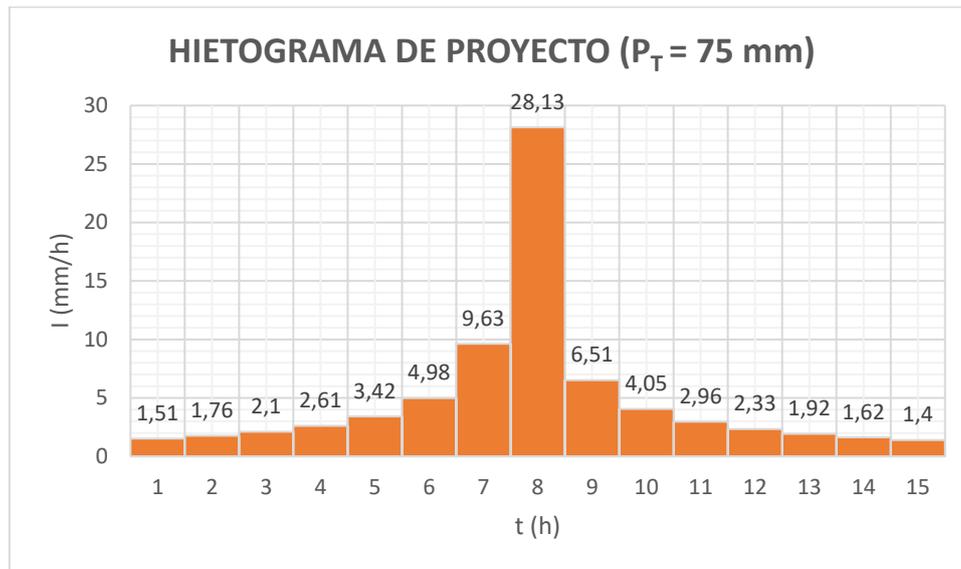


Figura 52.- Hietograma de proyecto escenario 4.

6.2 Modelización hidrometeorológica

Los resultados de la modelización hidrometeorológica realizada con IBER para los escenarios expuestos anteriormente se exponen a continuación mediante el hidrograma de salida y el mapa de caudal específico (m^2/s) para cada escenario.

En los mapas, el caudal específico se representa en m^2/s ya que con IBER se integra sobre la sección transversal elegida para calcular el caudal en m^3/s , es decir se calcula por m lineal de la sección transversal seleccionada. Cualitativamente, representa dónde se acumula la mayor cantidad de flujo en una sección transversal, y lo representa así porque este software está pensado para estudios hidráulicos que determinan las zonas de flujo preferente, MCO, DPH, etc. Es importante resaltar que en los mapas está representado el caudal específico máximo obtenido tras la simulación del modelo, es decir, se representa este parámetro para el instante de la simulación donde se ha alcanzado el máximo.

En este sentido, los modelos han sido ejecutados con un periodo de simulación de 30 horas para los escenarios 2 y 3 puesto que la lluvia tenía una duración de 24 horas, mientras que para los escenarios 1 y 4 el periodo de simulación ha sido de 20 horas. Para todos los escenarios, el intervalo de guardado de los resultados ha sido de 10 min.

● ESCENARIO 1

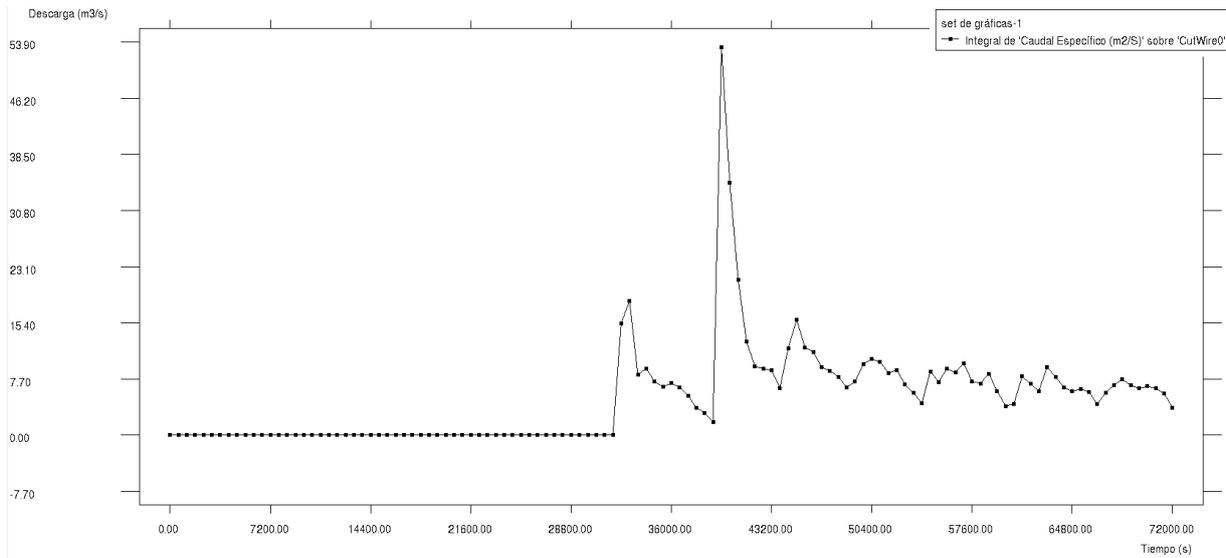


Figura 53.- Hidrograma de salida del modelo hidrológico para la lluvia propuesta en el
escenario 1 ($P_T = 67,8 \text{ mm}$). Pico del hidrograma: $53,90 \text{ m}^3/\text{s}$.

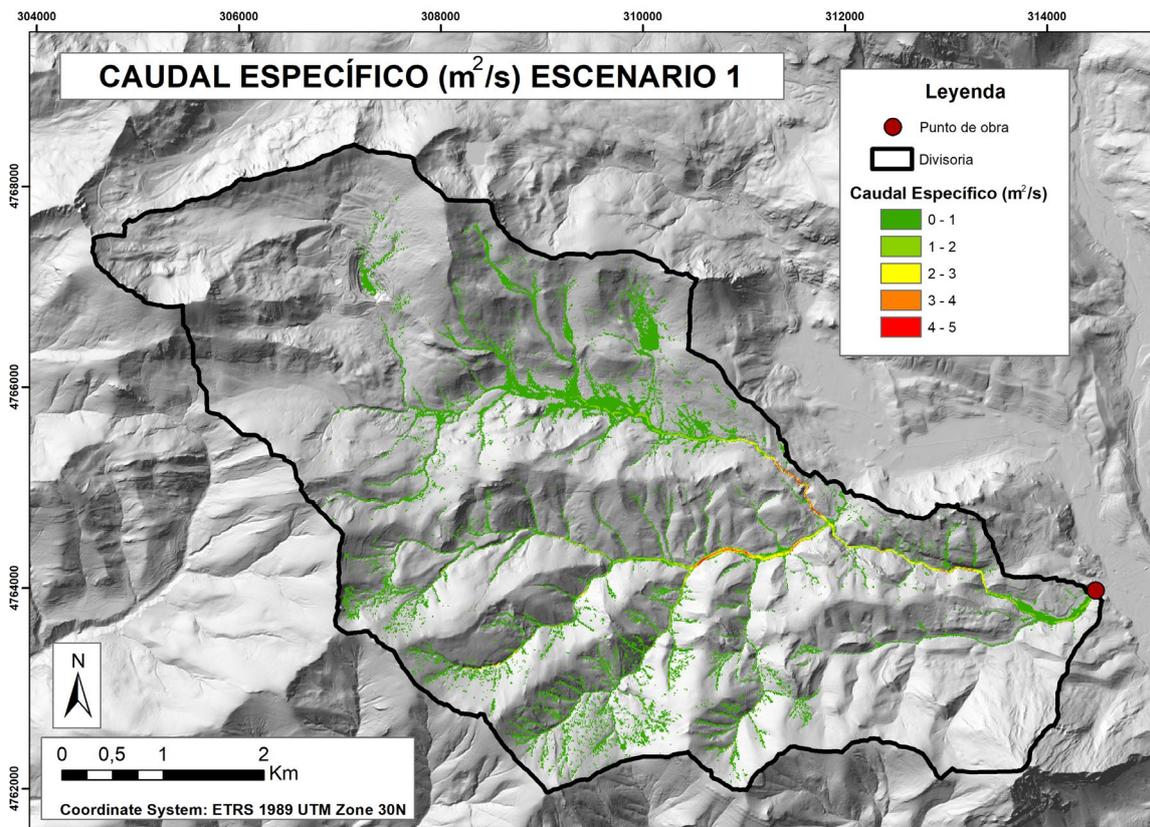


Figura 54.- Mapa de caudal específico máximo para el modelo hidrológico del escenario 1.

● ESCENARIO 2

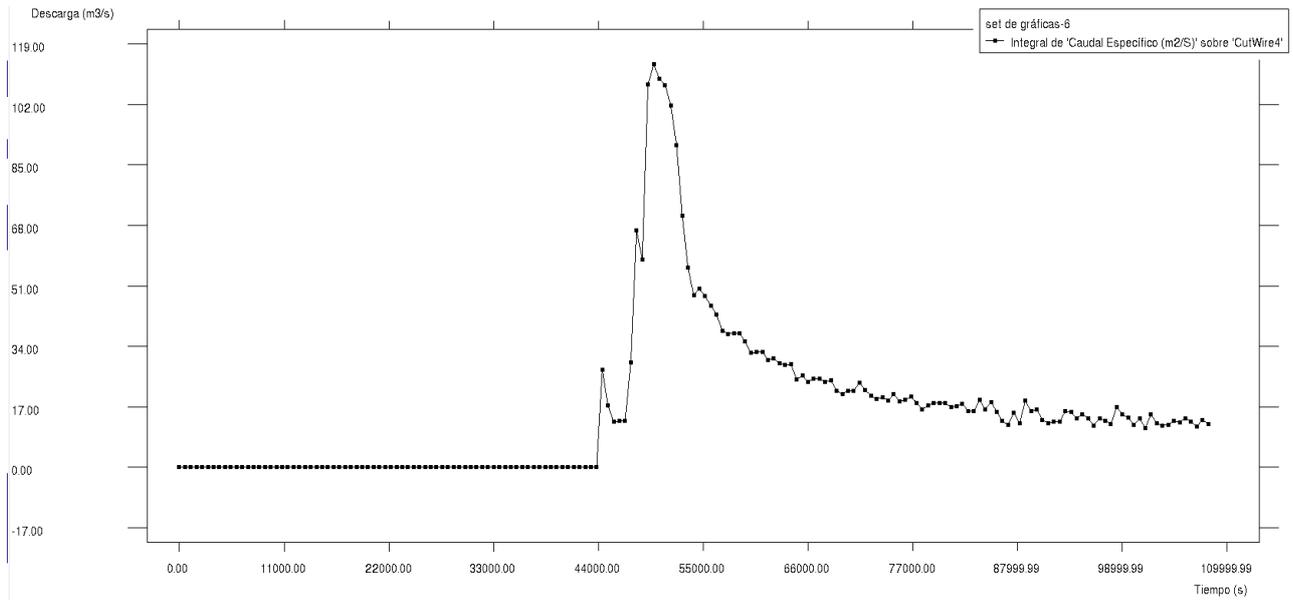


Figura 55.- Hidrograma de salida del modelo hidrológico para la lluvia propuesta en el
escenario 2 ($T = 25$ años; $P_T = 122$ mm). Pico del hidrograma: $119 \text{ m}^3/\text{s}$.

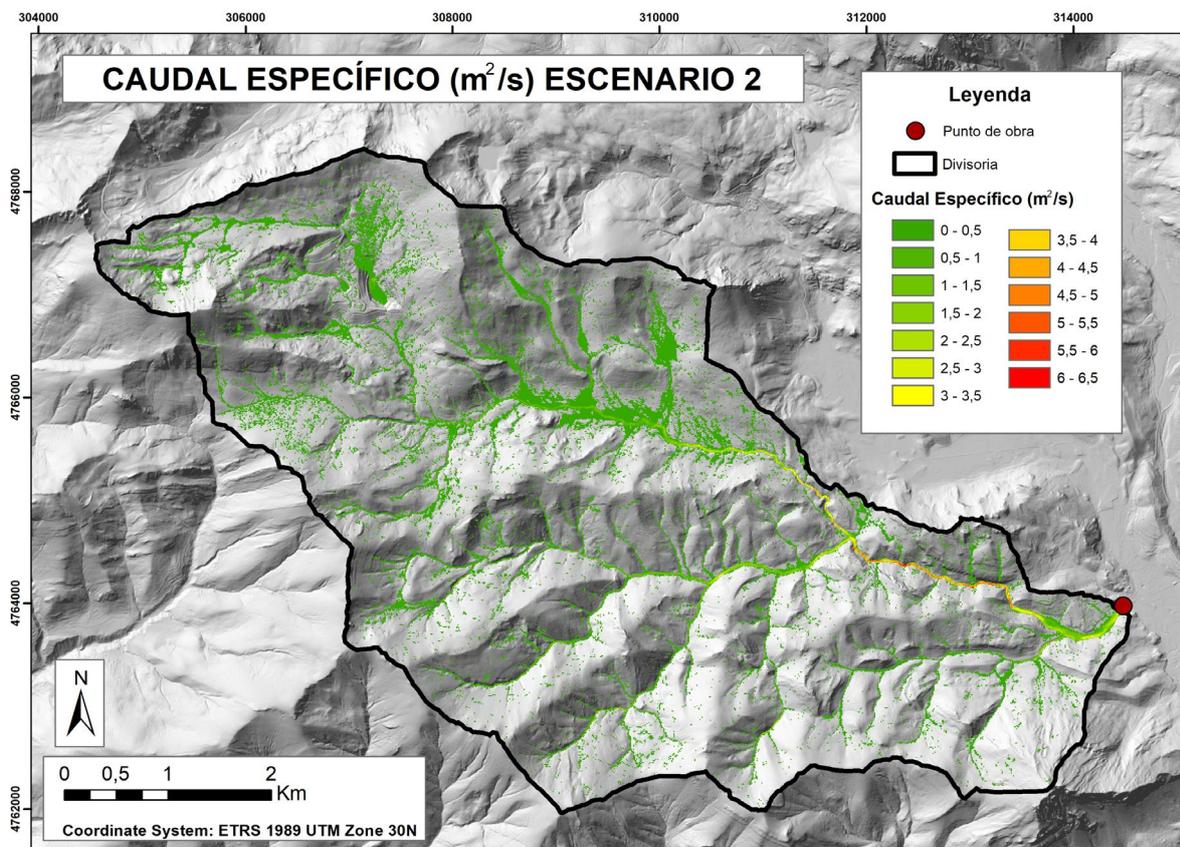


Figura 56.- Mapa de caudal específico máximo para el modelo hidrológico del escenario 2.

● ESCENARIO 3

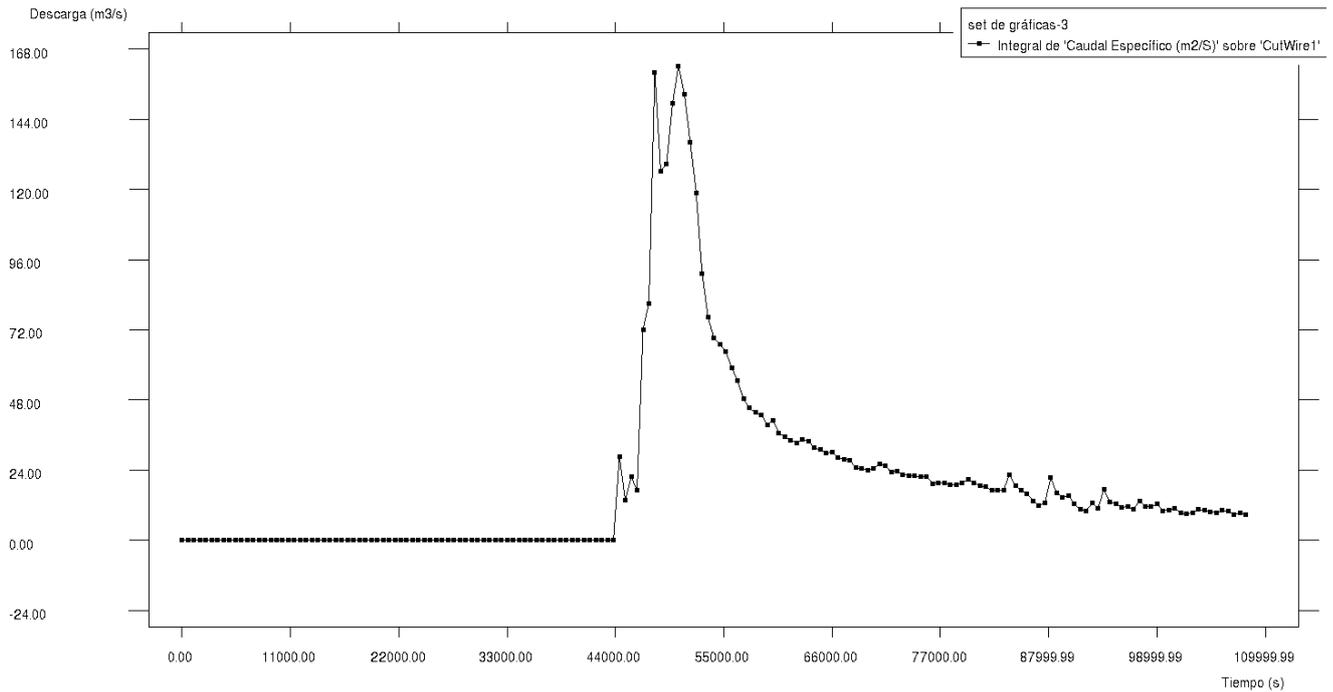


Figura 57.- Hidrograma de salida del modelo hidrológico para la lluvia propuesta en el escenario 3 ($T = 100$ años; $P_T = 155$ mm). Pico del hidrograma: $168 \text{ m}^3/\text{s}$.

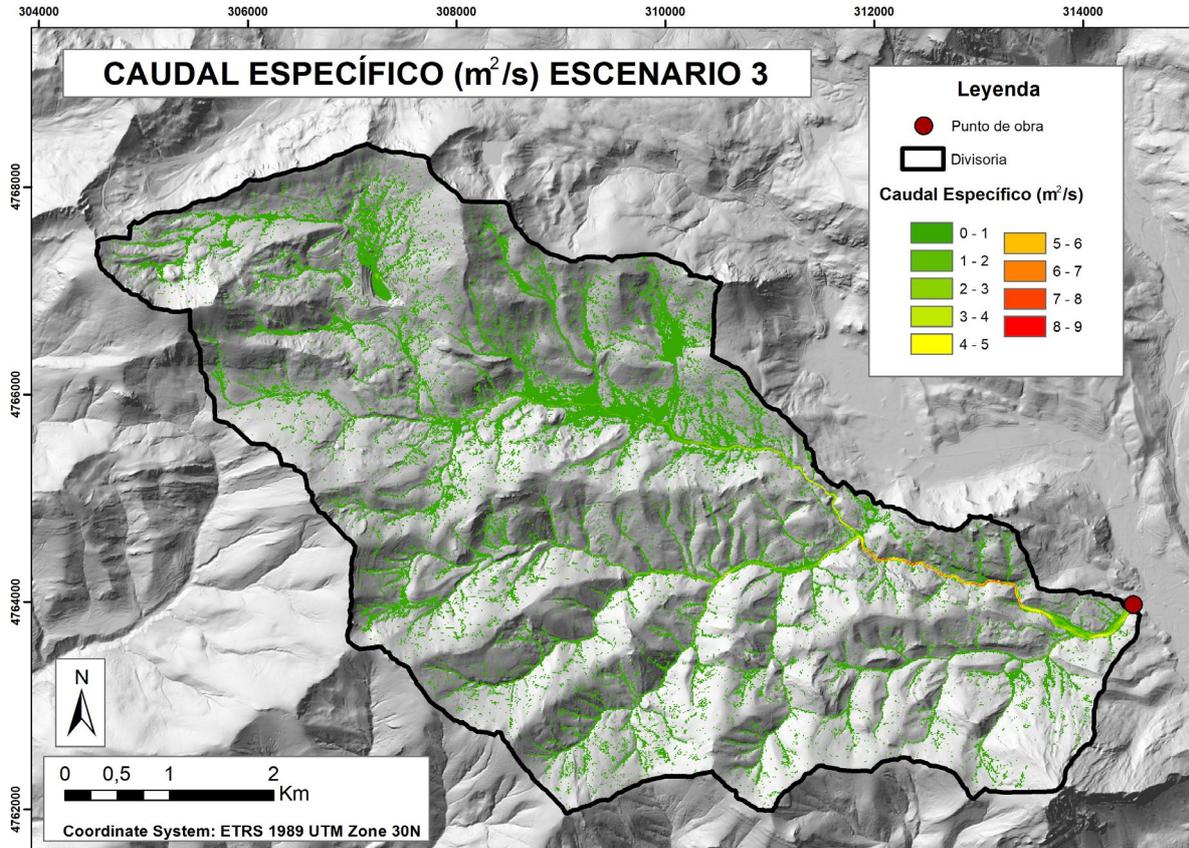


Figura 58.- Mapa de caudal específico máximo para el modelo hidrológico del escenario 3.

• ESCENARIO 4

En este escenario para representar lo ocurrido durante la avenida de estudio, se presentan, además del hidrograma de salida del modelo, los hidrogramas en las secciones fijadas en el apartado referente a la geometría del modelo. La sección 1 se sitúa en la salida de la cuenca, la 2 en la confluencia de las subcuencas 4 y 5 y la sección 3 en la confluencia de las subcuencas 6 y 7 (**Figura 30**). De este modo, se puede analizar en el siguiente punto como ha sido la influencia de los afluentes torrenciales a lo largo del cauce.

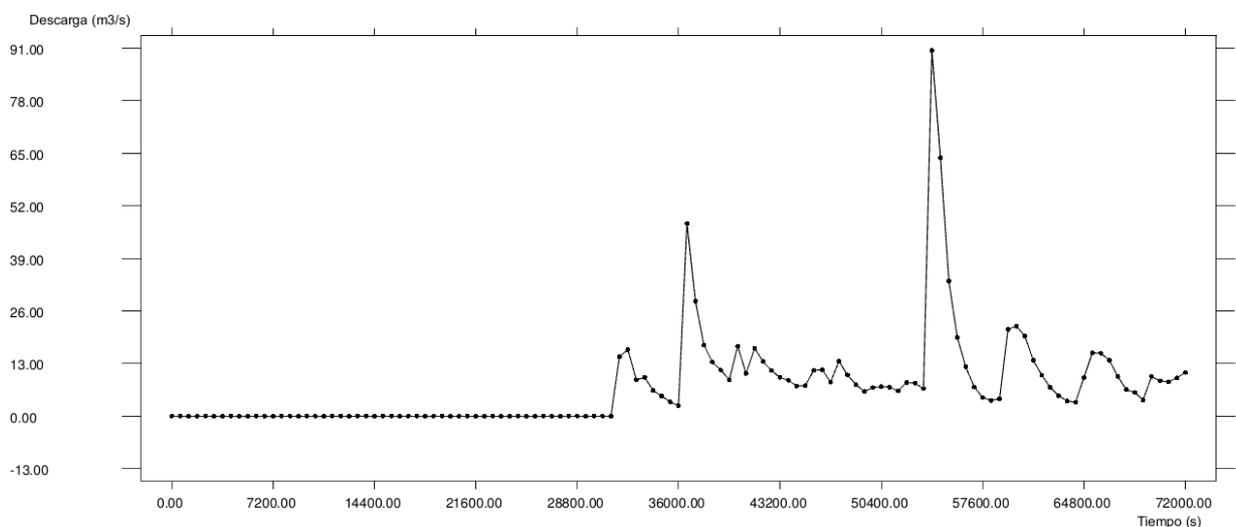


Figura 59.- Hidrograma de salida (sección 1) del modelo hidrológico para la lluvia propuesta en el escenario 4 ($P_T = 75$ mm). Pico del hidrograma: 91 m³/s.

Como se discutirá en el siguiente apartado, este hidrograma es el que mejor se ajusta al pico detectado en el hidrograma obtenido de la estación de aforo del Porma, que fue expuesto en el punto anterior. Este pico se evaluó en torno a los 80 m³/s por lo que se ajusta perfectamente al resultado de este hidrograma, ya que desde la sección donde se toma este hidrograma a la sección donde se encuentra localizada la estación de aforo del Porma, el cauce reduce considerablemente la pendiente, existiendo una pequeña llanura de inundación donde el pico del hidrograma se vio laminado.

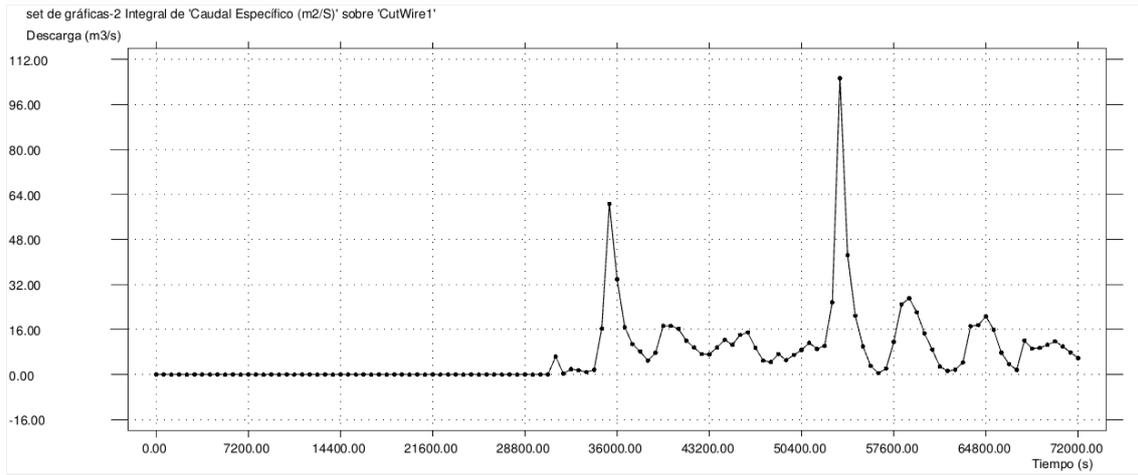


Figura 60.- Hidrograma en la sección 2 del modelo hidrológico para la lluvia propuesta en el escenario 4 ($P_T = 75 \text{ mm}$). Pico del hidrograma: $112 \text{ m}^3/\text{s}$.

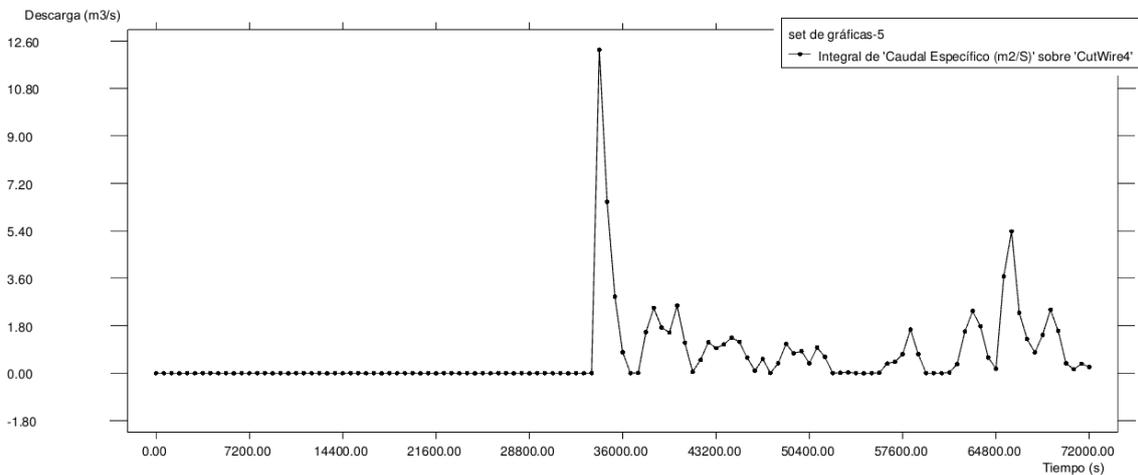


Figura 61.- Hidrograma en la sección 3 del modelo hidrológico para la lluvia propuesta en el escenario 4 ($P_T = 75 \text{ mm}$). Pico del hidrograma: $12,80 \text{ m}^3/\text{s}$.

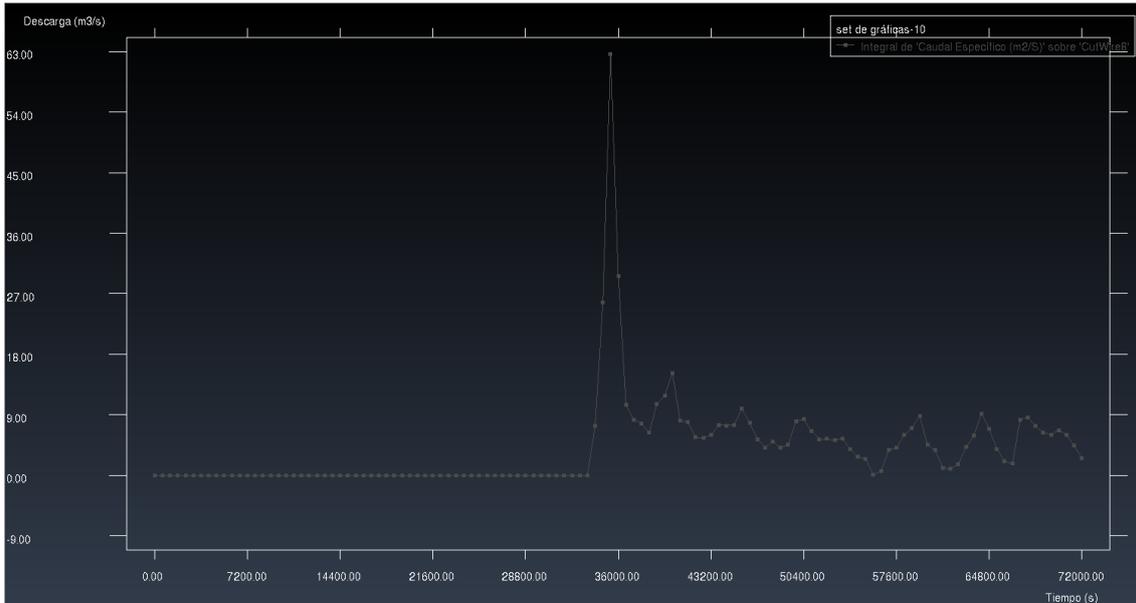


Figura 62.- Hidrograma de salida en la sección donde acaba la geometría del modelo hidráulico propuesto. Pico del hidrograma: $63 \text{ m}^3/\text{s}$.

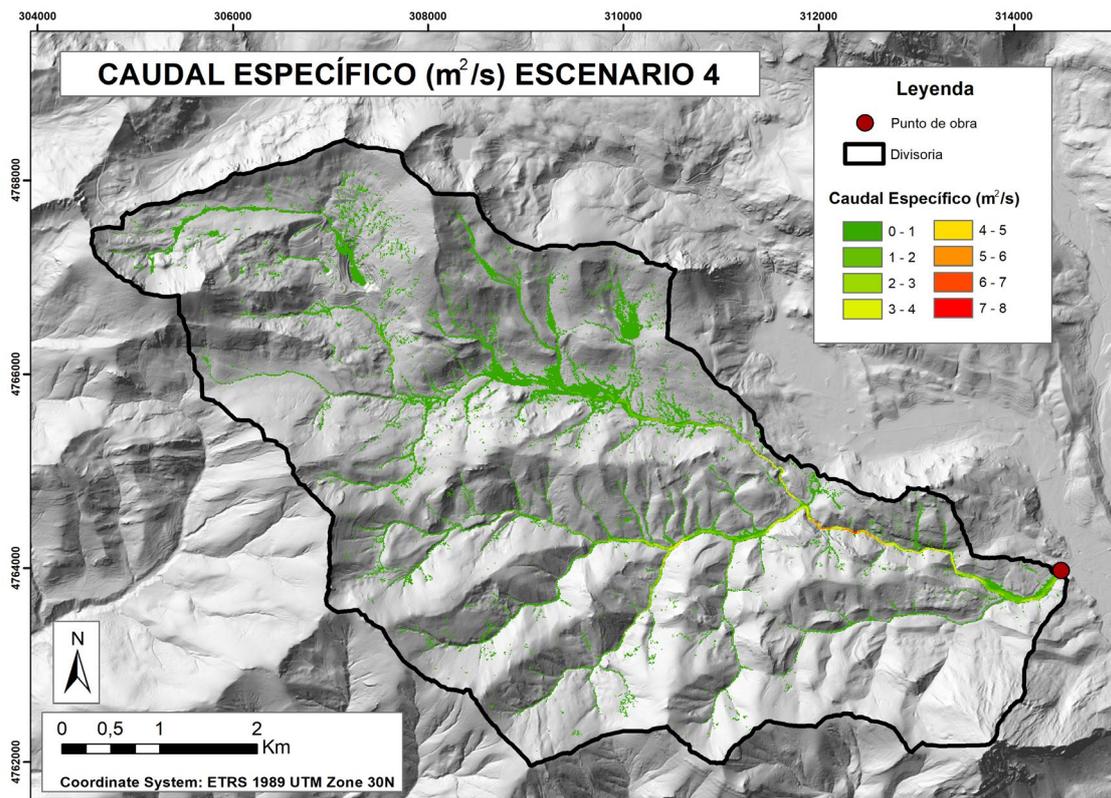


Figura 63.- Mapa de caudal específico máximo para el modelo hidrológico del escenario 4.

6.3 Modelización hidráulica

El modelo hidráulico ha sido simulado para el caudal obtenido del modelo hidrológico del escenario 4 que es el escenario que mejor representa lo ocurrido el día de la avenida tal como se ha explicado en el apartado correspondiente a este escenario. El caudal ha sido calculado en la sección donde acaba la geometría empleada para el modelo hidráulico que como se ha explicado en apartados anteriores es diferente de la empleada para el modelo hidrológico (**Figura 62**). El tiempo de simulación empleado ha sido 6000 s mientras que el intervalo de resultados ha sido 60 s.

A continuación se muestran los mapas de calados y velocidades máximas alcanzados en la simulación del modelo hidráulico, es decir, los valores máximos de estos parámetros del flujo durante la avenida estudiada. Estos mapas serán fundamentales para el posterior análisis de los resultados y comparación con los datos geomorfológicos recogidos a efectos de determinar la idoneidad del modelo hidráulico.

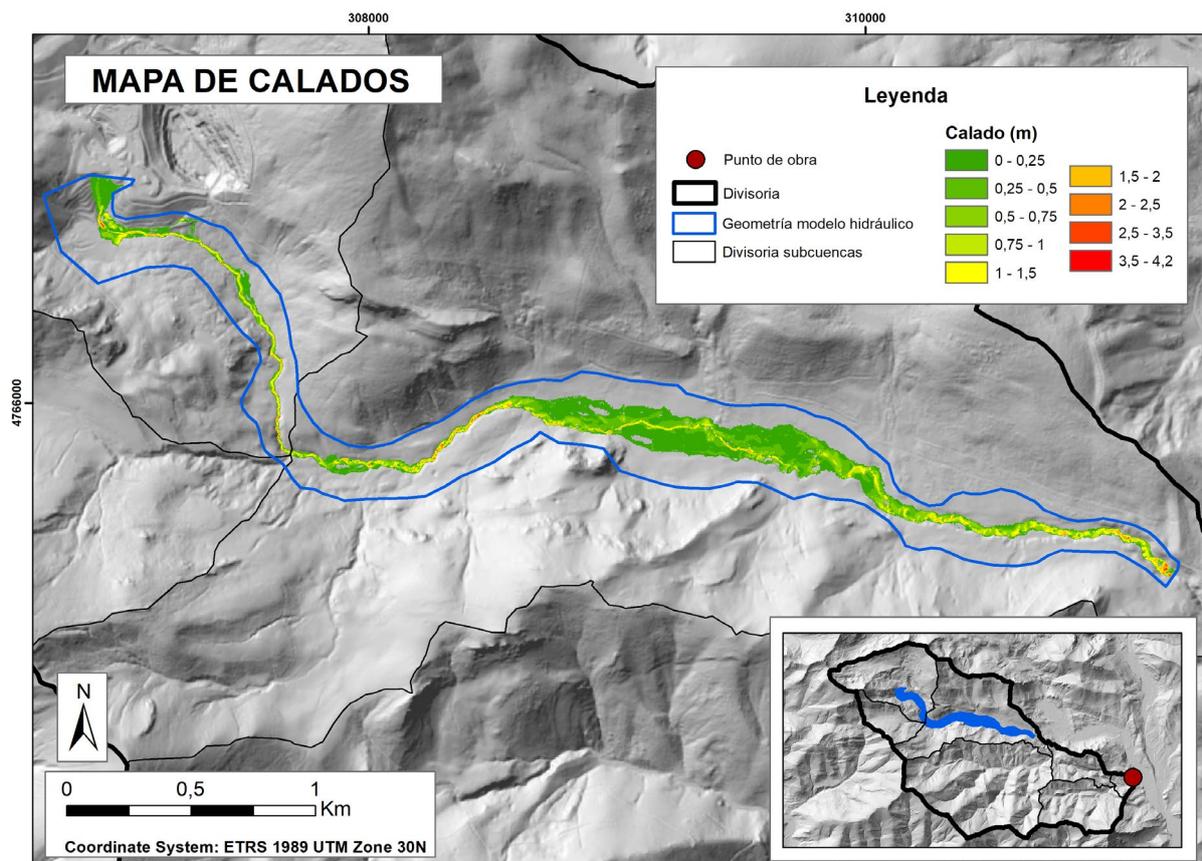


Figura 64.- Mapa de calados máximos obtenidos en el modelo hidráulico para un caudal de entrada de $63 \text{ m}^3/\text{s}$ (escenario 4).

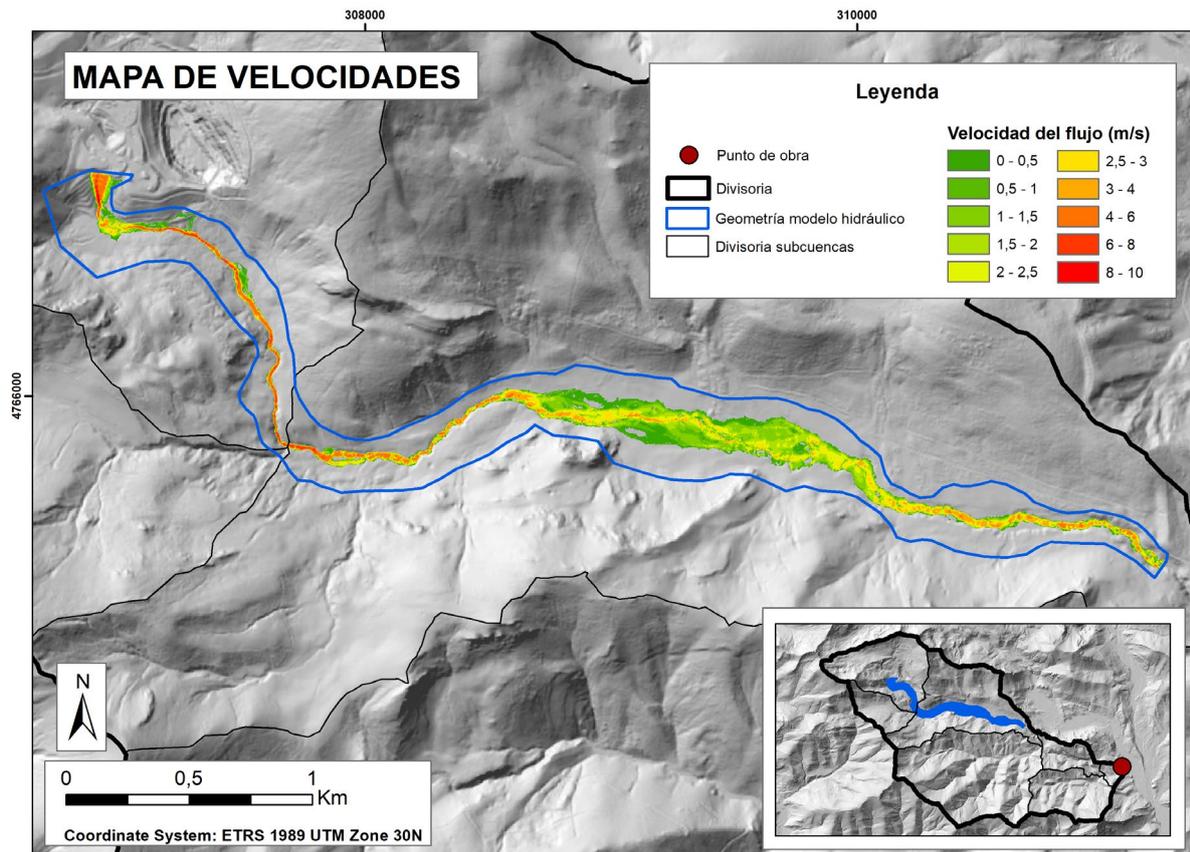


Figura 65.- Mapa de velocidades de flujo máximas obtenidas en el modelo hidráulico para un caudal de entrada de $63 \text{ m}^3/\text{s}$ (escenario 4).

7. Discusión de resultados

En este apartado se analizan y se discuten los resultados obtenidos en los diferentes escenarios y modelizaciones mostrados en el apartado anterior. Estos resultados se analizan conjuntamente con las evidencias geomorfológicas halladas siguiendo la metodología expuesta y mostradas a lo largo del trabajo. Posteriormente se deducirán las conclusiones de todo el trabajo en conjunto.

7.1 Comparación de escenarios

Los resultados obtenidos de la modelización en el escenario 1 (lluvia registrada en la estación de San Isidro) no son representativos de lo ocurrido puesto que los valores de caudal resultantes no se corresponden con el hidrograma de salida registrado en el Porma. Sin embargo, en el escenario 4, que es el que más se acerca a lo ocurrido, no tiene una precipitación total acumulada muy diferente a la del escenario 1 (tan solo 7,2 mm). Este hecho demuestra que la precipitación no fue homogénea en toda la cuenca, como se ha considerado en la modelización hidrológica, sino que tuvo que concentrarse de forma muy marcada en las vertientes que presentaban evidencias geomorfológicas de actividad. Es decir, la precipitación total se distribuyó de forma heterogénea en la cuenca, alcanzándose valores de precipitación e intensidad de lluvia elevados en las vertientes que resultaron activas y valores pequeños de estos parámetros en las vertientes no funcionales. No obstante, una lluvia con un valor medio distribuida homogéneamente en toda la cuenca (donde toda la cuenca aporta de igual forma) puede provocar caudales de salida equivalentes a los que produciría una lluvia heterogénea como la que tuvo lugar durante la avenida de estudio.

En los escenarios 2 y 3 correspondientes a las lluvias de periodo de retorno 25 y 100 años respectivamente, se obtienen caudales de salida considerablemente mayores a los obtenidos para la lluvia que tuvo lugar el día de la avenida (en torno a 30 y 70 m³/s). Esto nos demuestra que el evento que tuvo lugar el día de la avenida no fue un evento especialmente extremo, sin embargo, diversas simulaciones hidráulicas de prueba con caudales más elevados al del día de la avenida, confirman que las velocidades que alcanza el flujo aumentan muy levemente en comparación con el aumento de caudal introducido. Es decir, el comportamiento erosivo del río en el cauce alcanza su máximo una vez se llena el canal que conforma el cauce y comienza a desbordar, lo cual ocurre para eventos hidrológicos comunes.

Si nos fijamos en los hidrogramas de salida de los escenarios 1 y 4, se puede ver como existen diversos picos previos al pico máximo del hidrograma. Esto corresponde a la llegada de las aportaciones de las diversas subcuencas que incorporan al cauce volúmenes de agua importantes antes de que alcanzar el pico mayor una vez que el suelo se ha saturado y la avenida alcanza su máximo. Es interesante ver como en los escenarios 2 y 3, con intensidades de lluvia más elevadas, esto no ocurre de forma similar y el agua llega de forma agolpada al punto de obra de la cuenca. Probablemente es debido a que, para lluvias de pequeña entidad la cuenca es capaz de abstraer parte de la precipitación y el cauce es capaz de laminar y desaguar parte de la avenida mientras que para lluvias de mayor intensidad la respuesta de la cuenca es diferente y el pico de la avenida se alcanza cuando el agua llega a la salida de forma agolpada.

En referencia a los hidrogramas obtenidos de las diferentes secciones en el escenario 4, se puede ver como el pico alcanzado en la sección 2, que se encuentra aguas arriba de la sección 1 situada en la salida del modelo, es mayor que el pico alcanzado en el hidrograma de este punto. La explicación para esta situación se encuentra en que en la sección 2 el cauce se encuentra muy encajado en el terreno existiendo posteriormente una pequeña llanura donde el arroyo puede desbordarse y el hidrograma se lamina, reduciendo su pico máximo. Por otro lado, el pico del hidrograma en la sección 3 situada en la zona de minas no supera los $13 \text{ m}^3/\text{s}$ y es posible afirmar que con este valor de caudal no se pudieron erosionar las escombreras de la mina incorporando carga sólida al cauce.

En los escenarios 2 y 3 con intensidades de lluvia más elevadas se puede comprobar como el pico máximo de la avenida se alcanza más pronto que en los escenarios 1 y 4 puesto que la saturación del suelo y posterior generación de escorrentía se produce más tarde en estos últimos escenarios.

En los mapas se puede ver como el flujo se concentra de forma muy marcada en aquellos tramos donde el cauce está muy encajado en el terreno y se dispersa, observándose valores de caudal específico menores, en aquellos tramos donde el cauce atraviesa zonas con menor pendiente. Estas zonas son la llanura de inundación principal y la llanura que existe antes del punto de obra de la cuenca. Atendiendo a estos mapas, también se puede visualizar como existen numerosos cauces de menor entidad que confluyen con el arroyo Respina en la zona previa a la llanura de inundación y en la propia

llanura. Estos cauces representan arroyos torrenciales que, como se ha expuesto, pueden suponer aporte de carga sólida por su carácter torrencial.

7.2 Comparación con los datos geomorfológicos observados

Para la comparación de los resultados del modelo hidráulico con las evidencias geomorfológicas recogidas resulta preciso emplear el siguiente diagrama (**Figura 66**) con el fin de analizar los resultados y tratar de explicar lo ocurrido el día de la avenida, así como deliberar acerca de la idoneidad de los modelos y su aproximación a la realidad.

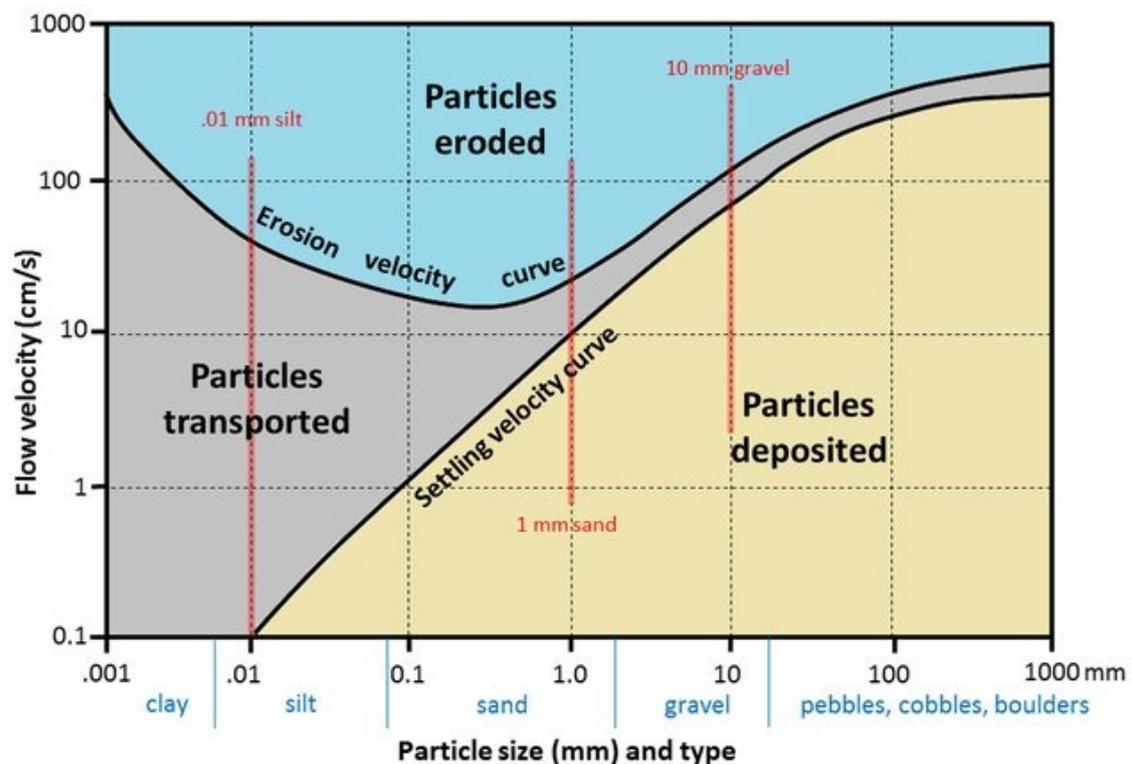


Figura 66.- Diagrama representativo de los procesos erosivos y sedimentarios en el cauce en función de la velocidad del flujo y el tamaño de las partículas. Imagen tomada del trabajo Tyler-Walters et al. (2018) y generada a partir de Hjulström y Trask (1939).

La combinación de numerosas evidencias de índole geológico y geomorfológico junto con los resultados de la modelización hidrológico-hidráulica permiten argumentar desde un punto de vista objetivo los siguientes puntos:

- 1) Los acarreos fluviales (bloques, gravas y arenas) depositados durante el proceso de inundación de diciembre proceden fundamentalmente de cuatro fuentes de sedimentos:
 - a) La removilización y reorganización de los propios materiales del cauce del río por encajamiento, que en algunos puntos superaban 1 m de tamaño como demuestran las velocidades alcanzadas en el cauce. La velocidad del flujo superó los 9 m/s en numerosas zonas, por lo que de acuerdo al diagrama de Hjulström (**Figura 66**), se movilizaron materiales de dimensiones mayores a los 100 cm que fueron depositados allí donde la velocidad del flujo se redujo a los 5-6 m/s.
 - b) Deslizamientos y desplomes de orden métrico y decimétrico de los márgenes del cauce por socavamiento basal que incorporaron al cauce gran cantidad de carga sólida. De acuerdo al mapa de velocidades obtenido del modelo hidráulico se comprueba como las mayores velocidades del flujo se alcanzaron en la zona central del cauce y en sus márgenes, lo que provocó estos deslizamientos y desplomes como se ha mostrado en las imágenes.
 - c) Generación de nuevos cauces y escalones de erosión de aproximadamente hasta 1,5 m de profundidad que también aumentaron la carga sólida. En aquellas zonas donde la velocidad del flujo estuvo entre los 2 y 4 m/s se movilizaron partículas de hasta 10-12 cm de diámetro.
 - d) Aportes laterales procedentes de los afluentes torrenciales que delimitan su margen derecha (vertiente sur) que, aunque en menor medida, también contribuyeron a aumentar la carga sólida del río.
- 2) Como se puede ver en el mapa geomorfológico, existen numerosos sectores sedimentarios activos en la llanura de inundación donde se acumulan arenas que son transportadas por el flujo durante las avenidas. Este hecho ha sido contrastado con el modelo hidráulico ya que como se puede ver en el mapa de velocidades, en estos sectores se alcanzan velocidades de hasta 1 m/s que serían capaces de movilizar partículas de 1 cm de diámetro. Por este motivo, los depósitos de arena encontrados que indicaban el desbordamiento del arroyo se corresponden a la perfección con las velocidades obtenidas en el modelo hidráulico.
- 3) En el mapa geomorfológico se han identificado zonas sedimentariamente activas que corresponden a los sistemas de barras fluviales del arroyo Respina descritos anteriormente. Se sabe que los materiales que las conforman fueron removilizados

durante la avenida y este hecho también se corresponde con lo obtenido en el modelo hidráulico. Los vectores velocidad del flujo se acentúan (incrementan su módulo) en las zonas identificadas como barras fluviales.

- 4) En el sentido del punto anterior, se ha observado una importante erosión alternante en los márgenes del arroyo según sus arcos de curvatura (**Figura 36**) que puede ser relacionada y contrastada con el módulo de los vectores velocidad del flujo en estas zonas. La velocidad del flujo se ve incrementada en los arcos de curvatura del cauce, lo que se corresponde con la adaptación del flujo a la morfología de éste, originando esta marcada erosión que provoca aporte de carga sólida.
- 5) Existen depósitos de ladera formados por coluviones y canchales situados en el tramo donde descargan varios conos de deyección (los funcionales durante la avenida) que también han sido identificados en el mapa geomorfológico y que pudieron sufrir una removilización de sus materiales de acuerdo con las velocidades alcanzadas en esta zona (4-6 m/s y en algunos puntos concretos entre 6 y 8 m/s).

7.3 Mapas de peligrosidad de inundaciones

Como complemento al estudio realizado sobre la inundación en la cuenca y aprovechando los escenarios planteados para lluvias de periodo de retorno de 25 y 100 años se han elaborado los correspondientes mapas de peligrosidad ofrecidos por IBER: En estos mapas se clasifica la peligrosidad del evento en base a un índice elaborado por la Agencia Catalana del Agua (ACA) (Fleta *et al.*, 2006). La peligrosidad se evalúa en función del calado y de la velocidad del flujo de acuerdo a los siguientes criterios: (Gomariz, 2016).

CRITERIOS DE PELIGROSIDAD EN IBER:

- Peligrosidad ALTA si:

$$y > 1m ; v > 1 m/s ; vy > 0,5 m^2/s$$

- Peligrosidad MODERADA si:

$$0,5 m < y < 1 m ; 0,5 m/s < v < 1 m/s ; 0,25 m^2/s < vy < 0,5 m^2/s$$

- Peligrosidad BAJA si:

$$y < 0,5 m ; v < 0,5 m/s ; vy < 0,25 m^2/s$$

Donde v es el calado y v la velocidad del flujo.

En el mapa de peligrosidad se le asignan los valores siguientes:

- ✓ ALTA = 1,25
- ✓ MODERADA = 0,75
- ✓ BAJA=0,25

Este criterio peligrosidad ha sido empleado en diversos estudios de peligrosidad y evaluación de pérdidas por inundaciones como en el trabajo de Russo *et al.* (2013) o Gomariz (2016).

La máxima peligrosidad según la ACA para los escenarios 2 y 3 (T25 y T100) ha sido representada en los siguientes mapas:

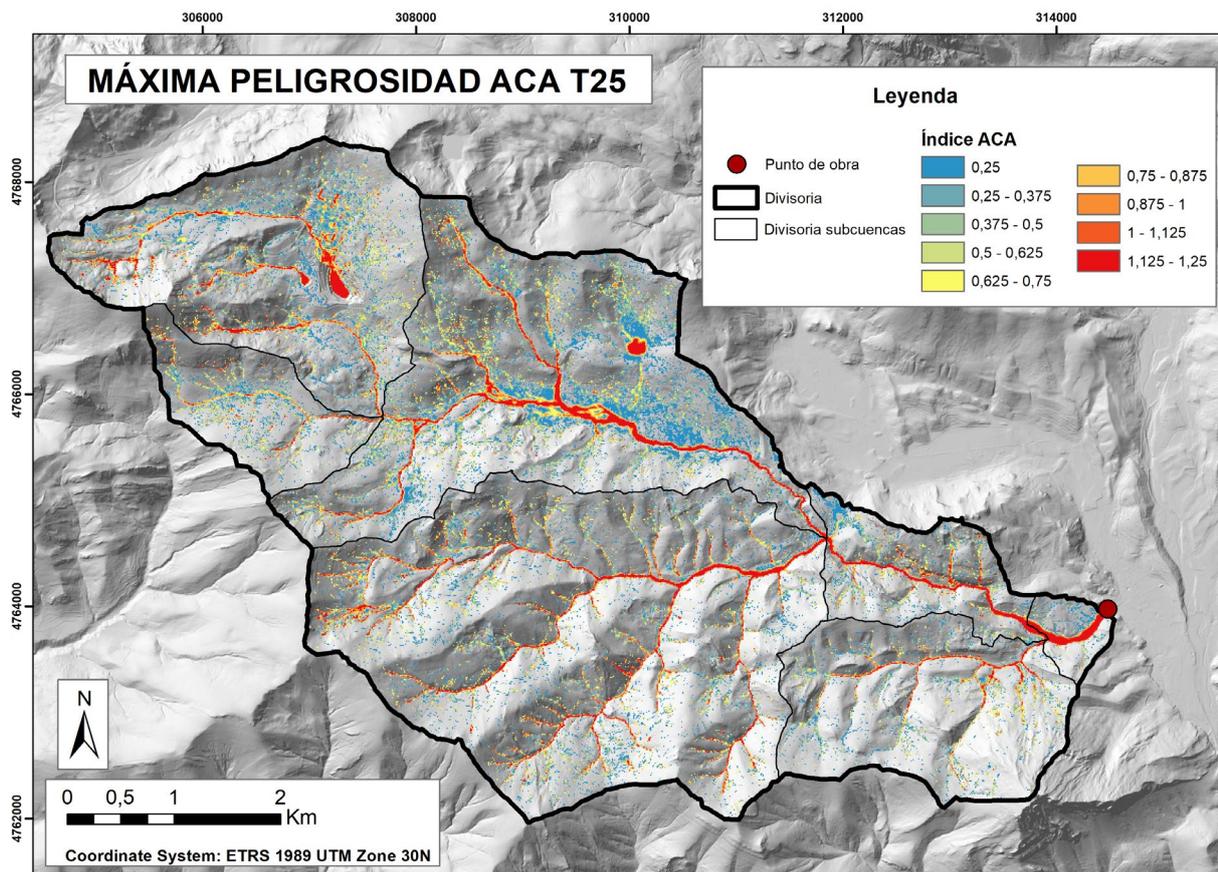


Figura 67.- Mapa de máxima peligrosidad ACA para una lluvia de periodo de retorno de 25 años.

Se puede ver como en las zonas donde la peligrosidad es mayor, bien por la velocidad del flujo o el calado alcanzado, o bien por la combinación de ambos, son la llanura

principal donde se ha realizado el modelo hidráulico y la llanura que existe antes del punto de obra y antes de la población de Puebla de Lillo. En el resto de zonas, la mayor peligrosidad se alcanza en los propios cauces y en sus márgenes. También se aprecia una peligrosidad elevada en la zona de minas, ya que la corta actualmente se encuentra anegada y supone un sumidero y, en la laguna al norte de la parte central de la cuenca.

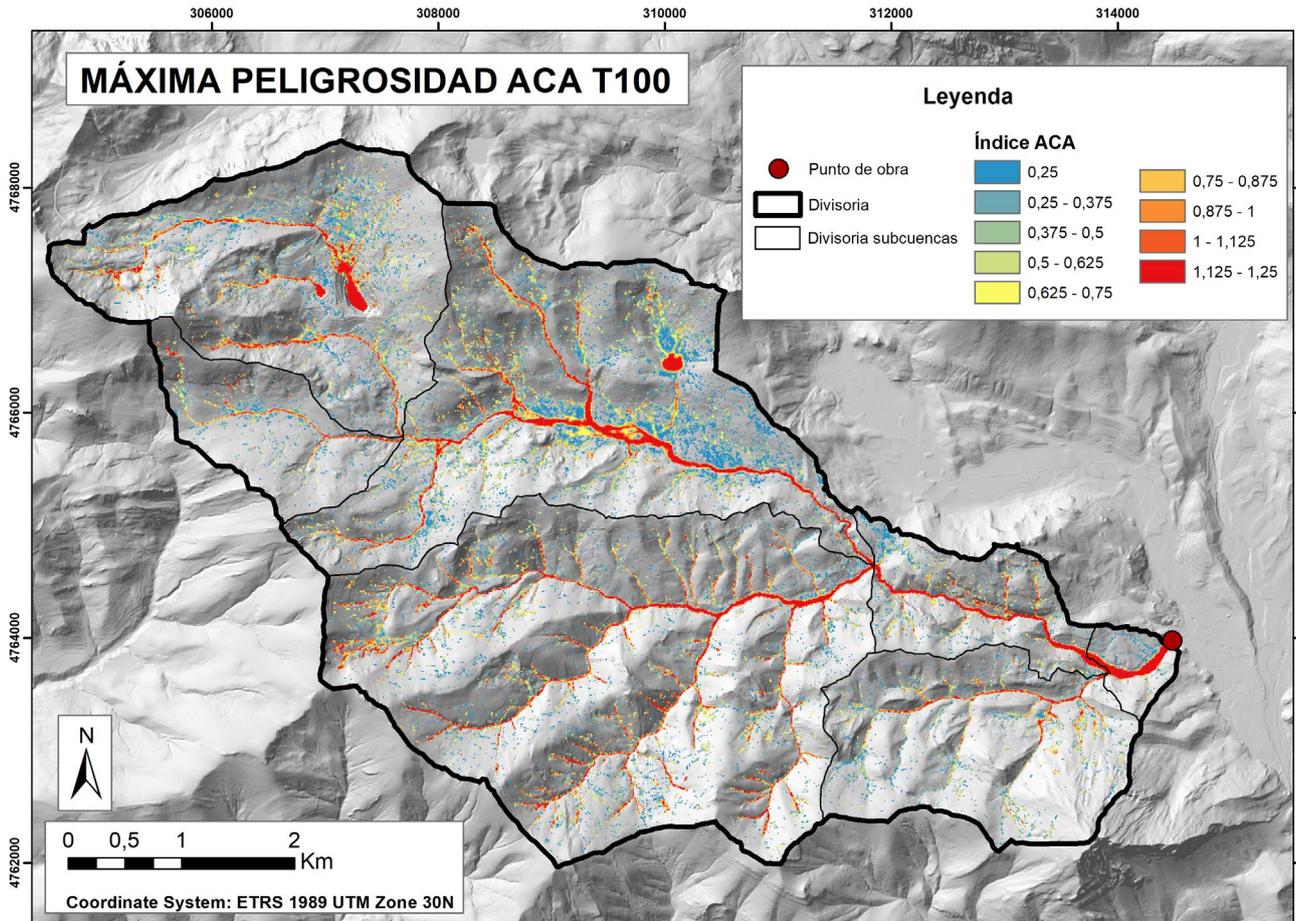


Figura 68.- Mapa de máxima peligrosidad ACA para una lluvia de periodo de retorno de 100 años.

Para este escenario ($T = 100$ años), el análisis de la peligrosidad es análogo al del escenario de periodo de retorno de 25 años, salvo que al ser un evento más extremo, la peligrosidad aumenta su extensión y su magnitud en las zonas indicadas anteriormente.

8. Conclusiones

El análisis de los resultados de los modelos ejecutados de manera conjunta con los datos geomorfológicos da lugar a la exposición de conclusiones interesantes que serán mostradas a continuación. La recopilación de nuevos datos del día del 7 de diciembre del 2000, día de la avenida, y la elaboración de la cartografía temática presentada ha permitido enriquecer y aumentar estas conclusiones.

No existe ningún dato objetivo que permita asegurar que los acarreoos dejados por el río procedan en exclusiva de las escombreras de las minas de talco. Éstas están constituidas por gravas y bloques muy angulosos procedentes de los estériles de la extracción (fundamentalmente pizarras y calizas dolomitizadas de tonos claros). Por el contrario, los acarreoos observados en el cauce están constituidos por bloques y gravas sub-angulosos y sub-redondeados, con bordes desgastados, compuestos fundamentalmente por cuarcitas, calizas negras y pizarras (mayoritariamente procedentes de la vertiente sur). Como se ha apuntado antes, éstos proceden mayoritariamente de las fuentes de sedimentos citadas en el punto anterior, es decir de los antiguos depósitos torrenciales y fluvio-glaciares que rellenan el valle del Respina.

Los cambios de cauce y bifurcaciones experimentadas por el propio cauce son procesos comunes durante episodios de avenida en ríos de montaña. De hecho, el análisis de los fotogramas aéreos de distintas fechas delatan cambios de curso anteriores del propio Respina mucho más notables que los experimentados durante diciembre del 2000 (Silva 2000).

Aunque de indudable impacto socioeconómico para la zona afectada, el proceso de avenida ocurrido no puede catalogarse desde el punto de vista geomorfológico como catastrófico. Por el contrario, el proceso no fue especialmente extremo. La generación y bifurcación de nuevos cauces afectó a un tramo de no más de 500 m de los 5 km de cauce que existen en el área en el que se ha desarrollado la modelización hidráulica. Además, la zona donde se produjeron los mayores depósitos de acarreoos posee una longitud aproximada de 200 m y una anchura máxima de hasta 50 m.

La dinámica de los procesos sedimentarios y erosivos estuvo mayormente controlada por factores naturales como pueden ser los cambios de pendiente del cauce del arroyo en sus diferentes tramos. No es posible afirmar que la ubicación de las escombreras de la

mina interfiriera en el proceso. La acumulación de flujo en la zona de escombreras (cabecera de la cuenca) no resulta potencialmente erosiva como se ha visto en los hidrogramas de la sección situada más arriba. De hecho, los efectos erosivos más notables se produjeron aguas arriba de aquellas zonas donde el perfil del cauce ha sido modificado artificialmente mediante la construcción de azudes para riego de pastos.

En cuanto a las precipitaciones causantes de la avenida durante la noche del 7 al 8 de diciembre, parece que se centraron fundamentalmente en las cuencas vertientes meridionales (margen derecha) del valle del Respina. Este hecho está probado por los acarreo de gravas, flotantes y hojarasca superficial hallados en los conos de deyección que son alimentados por los afluentes de esta vertiente. Todos ellos están situados aguas abajo de la zona de minas y escombreras. Esta situación no se ha observado en los afluentes de la vertiente norte (margen izquierda) del valle, incluyendo el tramo de cabecera del propio Respina que atraviesa la zona de minas. (Ver mapa geomorfológico, **Figura 21**)

Las precipitaciones (67,8 mm) e intensidades de lluvia (13,2 mm/h) máximas registradas en la estación meteorológica del Puerto de San Isidro, situada a unos 4 km. al NO de la cabecera del Respina y de la zona de minas, durante los días 7 y 8 de diciembre del 2000, no justifican el proceso de avenida ocurrido. Probablemente estos valores puedan ser representativos de la vertiente norte del Respina situada más próxima a ella, pero de ninguna manera de los de la vertiente sur situados aguas abajo de la zona de minas, como se ha discutido en la comparación de los escenarios. En esta vertiente sur, de haber existido registros, los valores de precipitaciones máximas deberían haber estado en torno a los 90 mm.

En referencia a la problemática que existió con la mina y que ha sido expuesta al inicio del trabajo, no se observaron signos notables de erosión en los taludes de las escombreras, balsas de decantación de sólidos y canalizaciones de desagüe, que deberían haberse formado en el caso de desbordamiento prolongado de los canales perimetrales de cierre (Silva 2000). A tales efectos, también se puede afirmar que no se observó ninguna labor de restauración reciente que delatara tales daños, ni en los taludes ni en los elementos hidráulicos artificiales anejos.

Respecto a la modelización, en arroyos de montaña donde el cauce está muy encajado en el terreno y éste tiene dimensiones reducidas, como sucede en este estudio,

se hace necesario la elaboración de un MDT de gran resolución que represente perfectamente la morfología del cauce con el fin de obtener resultados certeros en la modelización hidráulica. Si el tamaño de píxel supera la anchura del cauce, los resultados pueden verse altamente distorsionados puesto que se desvirtúa por completo la morfología original del cauce y con ello el modo en el que el flujo se distribuye por el terreno. Es decir, las velocidades y calados que puedan resultar tras la modelización no serían representativas de la realidad.

También respecto a la modelización realizada en el ámbito hidrológico, se puede afirmar que los modelos hidrológicos distribuidos utilizados no son los suficientemente precisos para conseguir una reproducción fiel de eventos lluviosos de corta duración con gran intensidad de lluvia y muy concentrados en un área geográfica. En primer lugar se requiere un MDT de gran calidad y con alta resolución que se ajuste lo mejor posible a la morfología del terreno real. En segundo, se debería implementar un modelo de pérdidas (infiltración) distribuido que considere humedades previas del suelo y que tenga en cuenta la intensidad de lluvia de la precipitación. Por último, para calcular los modelos con esta precisión y atendiendo a las numerosas variables que se han presentado, es necesario disponer de una elevada capacidad computacional que haga factible la ejecución de estos modelos.

Realizando una visión global del trabajo y visualizando los efectos que esta avenida provocó, se pone de manifiesto la necesidad de la monitorización de cuencas potencialmente peligrosas en el sentido de la afección a poblaciones y bienes materiales que este tipo de eventos pueden originar. Como ha sucedido en este estudio, es realmente complicado plantear escenarios para analizar eventos pasados cuando no se dispone de registros de precipitaciones o valores de caudal en los cauces estudiados. Sin embargo, la investigación de eventos hidrológicos extremos y las conclusiones que se pueden extraer de su análisis resultan fundamentales a la hora de elaborar planes de prevención y minimización de los impactos y afecciones que estos generan. En este marco, la recogida de evidencias geomorfológicas y la elaboración de un contexto geomorfológico completo del área de estudio complementa y enriquece la modelización y el análisis de escenarios futuros y pasados.

9. Referencias

- Alcoverro, J., Corominas, J. y Gómez, M. (1999): The Barranco de Arás flood of 7 August 1996 (Biescas, Central Pyrenees, Spain). *Engineering Geology*, 51(4): 237-255.
- Álvarez-Marrón, J., Pérez-Estaún, A., Aller, J. y Heredia, N. (1990): Mapa Geológico Nacional a escala 1: 50000. Hoja nº 79 (Puebla de Lillo). IGME, Madrid.
- Álvarez, A.J. (2010): Mapa de caudales máximos. Memoria Técnica. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Madrid.
- Asensio Amor, I. y Gómez Miranda, M.J. (1983): La dinámica de los ríos de montaña: el Suarón (Asturias). 8474921988.
- Balairón Pérez, L. (2002): Gestión de recursos hídricos. Edicions UPC, Barcelona.
- Ballesteros Canovas, J.A., Eguibar, M., Bodoque, J., Díez-Herrero, A., Stoffel, M. y Gutiérrez-Pérez, I. (2011): Estimating flash flood discharge in an ungauged mountain catchment with 2D hydraulic models and dendrogeomorphic palaeostage indicators. *Hydrological Processes*, 25(6): 970-979.
- Benito, G. (2014): Estudios de paleoinundaciones en España: Origen, evolución y estado actual. *Geoecología, cambio ambiental y paisaje: homenaje al profesor José María García Ruiz*: 65-78.
- Benito, G. y Herrero, A.D. (2004): Riesgos naturales y antrópicos en geomorfología. Los autores.
- Benito, G., Lang, M., Barriendos, M., Llasat, C., Francés, F. y Ouarda, T. (2004): Use of Systematic, Palaeoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation. Review of Scientific Methods. *Natural Hazards*.
- Benn, D. y Evans, D.J. (2010): *Glaciers and glaciation*. Routledge, 816 pp.
- Bermúdez, F.L. y Díaz, M.A.R. (1992): Génesis y consecuencias erosivas de las lluvias de alta intensidad en la región mediterránea. *Cuadernos de investigación geográfica/Geographical Research Letters*(18): 7-28.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J. y Coll, A. (2014): Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1): 1-10.
- Bosznay, M. (1989): Generalization of SCS curve number method. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 115(1): 139-144.

- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., Santos G, G.n.R. y Saldarriaga, J.G. (1994): Hidrología aplicada. McGraw-Hill, Santafé de Bogotá.
- Cunha, N.S., Magalhães, M.R., Domingos, T., Abreu, M.M. y Küpfer, C. (2017): The land morphology approach to flood risk mapping: An application to Portugal. *Journal of Environmental Management*, 193: 172-187.
- Danis-Álvarez, P.J. y Santos-González, J. (2017): Glacial influence on drainage network: Respina and rebueno valleys (upper porma basin, Cantabrian mountains, Northwest Spain). *Cuadernos de Investigacion Geografica*, 43(1): 269-291.
- del Pozo, J.M.B., Herrero, A.D., Gilsanz, J.d.P. y Duque, J.F.M. (2006): Estimación de la carga sólida en avenidas de derrubios mediante modelos geomecánicos, hidrológicos e hidráulicos combinados: Venero Claro (Ávila), Geomorfología y territorio: actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología, Santiago de Compostela, 13-15 de septiembre de 2006. Universidade de Santiago de Compostela, pp. 483-496.
- Díez-Herrero, A. (2015): Buscando riadas en los árboles: Dendrogeomorfología. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23(3): 272.
- Díez-Herrero, A., Ballesteros, J., Bodoque, J., Eguíbar, M., Fernández, J., Génova, M., Laín, L., Llorente, M., Rubiales, J. y Stoffel, M. (2007): Mejoras en la estimación de la frecuencia y magnitud de avenidas torrenciales mediante técnicas dendrogeomorfológicas. *Boletín Geológico y Minero*, 118(4): 789-802.
- Espejo Almodóvar, F. (2013): Cartografía de zonas inundables, análisis de sensibilidad de distintas fuentes cartográficas en el resultado de simulaciones hidráulicas, aplicación al estudio de rotura de balsas. *info:eu-repo/semantics/masterThesis* Thesis.
- Ferrér, M., Rodríguez, J. y Estrela, T. (1995): Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica. *Ingeniería del agua*, 2(4): 43-58.
- Fleta, J., Godé, L., Gomà, J.L., Gracia, À., Gracia, J., Martínez, J., Marturià, J., Palma, J.J., Pardo, M. y Paz, A.d. (2006): Cartografía de zonas inundables y análisis de riesgo en Cataluña (Plan Inuncat).
- Francés, J.M.D.U. y Ojeda, A.O. (2000): Criterios y propuestas para la ordenación de áreas fluviales. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales (CyTET)*, 32(126): 689-710.
- García-Ruiz, J.M., White, S., Martí Bono, C.E., Valero-Garcés, B.L., Errea, M.P. y Gómez-Villar, A. (1996): La catástrofe del barranco de Arás (Biescas, Pirineo

- Aragonés) y su contexto espacio-temporal. CSIC-Instituto Pirenaico de Ecología (IPE).
- García-Ruiz, J.M., White, S., Martí-Bono, C., Valero, B., Errea, M. y Gómez Villar, A. (2004): La avenida del barranco de Arás y los riesgos hidrológicos en el Pirineo central español. *Geografía física de Aragón. Aspectos generales y temáticos, Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico, Zaragoza.*
- Gomariz, E.M. (2016): Inundaciones urbanas: criterios de peligrosidad y evaluación del riesgo para peatones y vehículos, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- Guerra Hernández, E.A. y Cruz Flores, G. (2017): Capítulo IV Geomorfología y clasificación de arroyos y ríos. In: U.N.A.d. México (Ed.), Ecosistemas ribereños de montaña: Descripción y estudio, México, D.F., pp. 53.
- Gutiérrez, F., Gutiérrez, M. y Sancho, C. (1998): Geomorphological and sedimentological analysis of a catastrophic flash flood in the Aras drainage basin (central Pyrenees, Spain). *Geomorphology*, 22(3-4): 265-283.
- Hjulström, F. y Trask, P. (1939): Transport of detritus by moving water recent marine sediments, Recent Marine Sediments, A Symposium. American Association of Petroleum Geologists, Reprinted 1968 by Dover ..., pp. 3-31.
- Lastra, J., Fernández, E., Díez-Herrero, A. y Marquínez, J. (2008): Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: An example in the Northern Iberian Peninsula. *Natural Hazards*, 45(2): 277-293.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G. y Miller, J.P. (1995): Fluvial processes in geomorphology. Courier Corporation.
- Lopetegi, A.Z. (2005): Análisis de la respuesta hidro-sedimentaria en pequeñas cuencas de Gipuzkoa, Universidad del País Vasco, Leioa, Guipuzkoa.
- Magalhães, L.A. (2010): Evolución climático-hidrológica reciente y cambios en los usos del suelo en diversas cuencas de cabecera de los ríos Duero y Tajo. *info:eu-repo/semantics/doctoralThesis* Thesis.
- Marquínez, J., Díez Herrero, A., Fernández, E., Lastra, J. y Llorente, M. (2008): Aspectos geomorfológicos en la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico y el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. *Trabajos de Geomorfología en España 2006-2008, X Reunión Nacional de Geomorfología*: 377-380.
- Merino-Tomé, O., Suárez Rodríguez, A. y Alonso Alonso, J.L. (2014): Mapa Geológico Digital continuo E. 1 : 50.000, Zona Cantábrica (Zona 1000). in GEODE.

- Ministerio de Economía y Competitividad: Instituto Geológico y Minero de España, IGME, Madrid.
- Ortega Villazán, M.T. y Morales Rodríguez, C. (2015): El clima de la Cordillera Cantábrica castellano-leonesa: diversidad, contrastes y cambios. *Investigaciones Geográficas*, 63: 23.
- Passmore, D.G. y Waddington, C. (2009): Paraglacial adjustment of the fluvial system to Late Pleistocene deglaciation: the Milfield Basin, northern England. *Geological Society, London, Special Publications*, 320(1): 145-164.
- Pérez, C.R. (1995): Estudio geomorfológico del puerto de San Isidro. *Ería: Revista cuatrimestral de geografía*(36): 63-88.
- Radice, A., Rosatti, G., Ballio, F., Franzetti, S., Mauri, M., Spagnolatti, M. y Garegnani, G. (2013): Management of flood hazard via hydro-morphological river modelling. The case of the Mallero in Italian Alps. *Journal of Flood Risk Management*, 6(3): 197-209.
- Rickenmann, D. (1991): Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of hydraulic engineering*, 117(11): 1419-1439.
- Rico, M.T. y Benito, G. (2002): Estimación de caudales de crecida en pequeñas cuencas de montaña: revisión metodológica y aplicación a la cuenca de Montardit (Pirineos Centrales, España). *Cuaternario y Geomorfología*, 16: 127-138.
- Rincón, C., Pérez, M., Delfín, G., Freitez, C. y Martínez, F. (2017): Análisis comparativo entre los modelos HEC-RAS e IBER en la evaluación hidráulica de puentes. *Gaceta Técnica*, 17(1): 9-28.
- Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Eguibar, M.A. y Pardo-Iguzquiza, E. (2013): Reconstruction of a flash flood with large wood transport and its influence on hazard patterns in an ungauged mountain basin. *Hydrological Processes*, 27(24): 3424-3437.
- Russo, B., Suñer, D. y Velasco, M. (2013): Estudio de la peligrosidad por inundaciones en el Raval (Barcelona) mediante modelo 1D-2D, III Jornadas de Ingeniería del Agua. La protección contra los riesgos hídricos, pp. 635-642.
- Sánchez, F. y Lastra, J. (2011): Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Madrid.
- Sánchez San Román, F.J. (2017): Hidrología Superficial y Subterránea, 414 pp.

- Silva , P.G. (2000): Informe sobre los procesos sedimentarios y erosivos ocurridos en el valle del arroyo Respina (Puebla de Lillo, León) durante las inundaciones de Diciembre del 2000, Ávila.
- Smart, G. y Jaeggi, M. (1983): Sediment transport on steep slopes. VAW Mitteil *Hidrologie und Glaziologie, ETH*, 64.
- Témez, J.R. (1978): Cálculo Hidrometeorológico de Caudales de Avenida en Pequeñas Cuencas Naturales. Ministerio de Obras Públicas (MOPU), Madrid.
- Tyler-Walters, H., Tillin, H., D'Avack, E. y Perry, F. (2018): Marine Evidence -based Sensitivity Assessment (MarESA) -A Guide.
- Vega, J.M.R., Herrero, E.A., de Celis, A.J.G., Gómez-Villar, A., Gutiérrez, R.B.G. y González, J.S. (2014): Huellas glaciares a baja altitud en los valles cantábricos meridionales, Geoecología, cambio ambiental y paisaje: homenaje al profesor José María García Ruiz. Instituto Pirenaico de Ecología, pp. 103-116.
- Vélez Upegui, J.I. (2013): Estrategia de simulación hidrológica distribuida: integración conceptual de hidrología, hidráulica y geomorfología. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37: 393+.

Índice de figuras

Figura 1.- Mapa de situación geográfica.....	11
Figura 2.- Esquema general de la cuenca de estudio.	12
Figura 3.- Fotografía de la entrada a la mina. Fuente: Cañón, 2009.....	13
Figura 4.- Fotografía desde el mirador de la corta hacia la cabecera de la cuenca. Fuente: Sanchis, 2018.....	14
Figura 5.- Canal del aliviadero hasta la restitución al arroyo. Fuente: Sanchis, 2018	14
Figura 6.- Mapa general de la cuenca de estudio con la red de drenaje.....	15
Figura 7.- Mapa topográfico de la cuenca de estudio. Fuente: CNIG	16
Figura 8.- Distribución mensual de las precipitaciones en la estación pluviométrica de Puebla de Lillo. Modificado de Magalhães (2010).....	18
Figura 9.- Esquema topográfico de los cambios producidos en la red de drenaje hasta la situación actual (B) desde la teórica situación inicial (A) durante la glaciación. Tomada de Danis-Álvarez y Santos-González (2017)	21
Figura 10.- Mapa geológico de la zona de estudio (Merino-Tomé et al., 2014). Fuente: IGME.....	22
Figura 11.- Esquema por sectores de la parte oeste de la cuenca del arroyo Respina.	23
Figura 12.- Confluencia de un sistema un torrencial por la margen derecha con evidencia de acarreo de gravas, bloques y ramaje al cauce principal.....	24
Figura 13.- Sedimentos finamente laminados depositados por inundaciones anteriores.	24
Figura 14.- Gráfico de barras que muestra el porcentaje de área por alturas de la cuenca.	28
Figura 15.- Mapa de hipsometría de la cuenca representado por escala de colores.	29
Figura 16.- Gráfico que representa la curva hipsométrica de la cuenca.	30
Figura 17.- Orden de la red de drenaje según Strahler.....	33
Figura 18.- Perfil longitudinal del cauce principal.	34
Figura 19.- Perfil longitudinal del arroyo Respina. Tomado de (Silva 2000)	35
Figura 20.- Clasificación de las formas fluviales asociadas a las crecidas y avenidas. Tomado de (Benito y Herrero, 2004).	41

Figura 21.- Mapa geomorfológico de la parte alta de la cuenca del arroyo Respina. En la mitad oeste se puede observar la corta de las minas de talco.....	44
Figura 22.- Mapa de calado máximo para una ejecución cualquiera donde se localizan las secciones de medida.	51
Figura 23.- Captura en el programa IBER de la malla no estructurada compuesta por una red irregular de triángulos rectángulos (RTIN) de la cuenca de estudio.	52
Figura 24.- Mapa de pendientes reclasificado en porcentaje.	55
Figura 25.- Mapa de tipos de suelo según el grupo hidrológico: Fuente: ITACYL.	56
Figura 26.- Mapa de usos de suelo (CLC18) Fuente: CNIG.	57
Figura 27.- Distribución del valor del número de curva en la cuenca.	58
Figura 28.- Polígonos que definen los usos del suelo dentro de la cuenca de acuerdo a la cobertura SIOSE.	60
Figura 29.- Geometría creada en IBER con la discretización en subcuencas para introducir el Número de Curva en el modelo de pérdidas del módulo hidrológico.	60
Figura 30.- División de la cuenca en subcuencas según la red hídrica de la misma.	62
Figura 31.- Diagrama de transformación lluvia a caudal. Tomada de (Sánchez San Román, 2017)	66
Figura 32.- Hidrograma de avenida en la estación de aforo del Embalse del Porma entre los días 5 y 9 de diciembre. La fecha azul oscuro indica el pico previo al máximo que se puede corresponder con la aportación de la cuenca de estudio. Fuente: Confederación Hidrográfica del Duero.	67
Figura 33.- Entubado final antes de la balsa de sedimentación.	70
Figura 34.- Márgenes de los canales con vegetación herbácea.....	70
Figura 35.- Formación de una lengua de gravas y bloques angulosos.....	72
Figura 36.- Erosión alternante en los márgenes del arroyo según sus arcos de curvatura.	73
Figura 37.- Alambrado suspendido en el aire tras los grandes deslizamientos ocurridos.	74
Figura 38.- Evidencia de un gran deslizamiento ocurrido debido a la mayor curvatura del cauce en este punto.	74
Figura 39.- Desbordamiento del cauce y procesos de bifurcación.	75
Figura 40.- Cambio de curso por corte de meandros.	76

Figura 41.- Incisión vertical en el margen derecho del cauce con evidencia de desbordamiento y sedimentación de los acarreo transportados durante la avenida.....	76
Figura 42.- Deslizamiento vertical del cauce con aporte de carga de sedimentaria.	77
Figura 43.- Incisión vertical del cauce de 1m de altura aproximadamente.....	77
Figura 44.- Cordones de arena por desbordamiento.	79
Figura 45.- Depósito de gravas, bloques y flotantes.....	79
Figura 46.- Corte de meandro por formación de barra de bloques y nuevo curso del arroyo.....	80
Figura 47.- Gravas y bloques en los márgenes del cauce procedentes de inundaciones previas.....	81
Figura 48.- Acarreo observados en la barra.	81
Figura 49.- Hietograma de proyecto escenario 1.	85
Figura 50.- Hietograma de proyecto escenario 2.	85
Figura 51.- Hietograma de proyecto escenario 3.	86
Figura 52.- Hietograma de proyecto escenario 4.	87
Figura 53.- Hidrograma de salida del modelo hidrológico para la lluvia propuesta en el escenario 1 ($P_T = 67,8$ mm). Pico del hidrograma: $53,90$ m ³ /s.....	88
Figura 54.- Mapa de caudal específico máximo para el modelo hidrológico del escenario 1.	88
Figura 55.- Hidrograma de salida del modelo hidrológico para la lluvia propuesta en el escenario 2 ($T = 25$ años; $P_T = 122$ mm). Pico del hidrograma: 119 m ³ /s.	89
Figura 56.- Mapa de caudal específico máximo para el modelo hidrológico del escenario 2.	89
Figura 57.- Hidrograma de salida del modelo hidrológico para la lluvia propuesta en el escenario 3 ($T = 100$ años; $P_T = 155$ mm). Pico del hidrograma: 168 m ³ /s.	90
Figura 58.- Mapa de caudal específico máximo para el modelo hidrológico del escenario 3.	90
Figura 59.- Hidrograma de salida (sección 1) del modelo hidrológico para la lluvia propuesta en el escenario 4 ($P_T = 75$ mm). Pico del hidrograma: 91 m ³ /s.	91
Figura 60.- Hidrograma en la sección 2 del modelo hidrológico para la lluvia propuesta en el escenario 4 ($P_T = 75$ mm). Pico del hidrograma: 112 m ³ /s.	92
Figura 61.- Hidrograma en la sección 3 del modelo hidrológico para la lluvia propuesta en el escenario 4 ($P_T = 75$ mm). Pico del hidrograma: $12,80$ m ³ /s.	92

Figura 62.- Hidrograma de salida en la sección donde acaba la geometría del modelo hidráulico propuesto. Pico del hidrograma: 63 m ³ /s.	93
Figura 63.- Mapa de caudal específico máximo para el modelo hidrológico del escenario 4.	93
Figura 64.- Mapa de calados máximos obtenidos en el modelo hidráulico para un caudal de entrada de 63 m ³ /s (escenario 4).	94
Figura 65.- Mapa de velocidades de flujo máximas obtenidas en el modelo hidráulico para un caudal de entrada de 63 m ³ /s (escenario 4).	95
Figura 66.- Diagrama representativo de los procesos erosivos y sedimentarios en el cauce en función de la velocidad del flujo y el tamaño de las partículas. Imagen tomada del trabajo Tyler-Walters et al. (2018) y generada a partir de Hjulström y Trask (1939).	98
Figura 67.- Mapa de máxima peligrosidad ACA para una lluvia de periodo de retorno de 25 años.	101
Figura 68.- Mapa de máxima peligrosidad ACA para una lluvia de periodo de retorno de 100 años.	102

Índice de tablas

Tabla 1.- Resultados de los parámetros morfométricos de la cuenca de estudio.	31
Tabla 2.- Fuentes de información geográfica empleadas.	36
Tabla 3.- Caudales pico de los hidrogramas resultantes en el análisis del tamaño de malla de la geometría. Tamaño de malla expresado en m.	50
Tabla 4.- Número de elementos de cálculo en función del tamaño de malla.	52
Tabla 5.- Números primeros asignados según el uso del suelo.	56
Tabla 6.- Número de curvas resultantes tras el proceso de álgebra de mapas.	57
Tabla 7.- Número de curva según las diferentes condiciones de humedad previas.	61
Tabla 8.- Coeficiente de rugosidad de Manning asignado a cada polígono de la cobertura SIOSE.	115

Anexo: “Número de Manning”

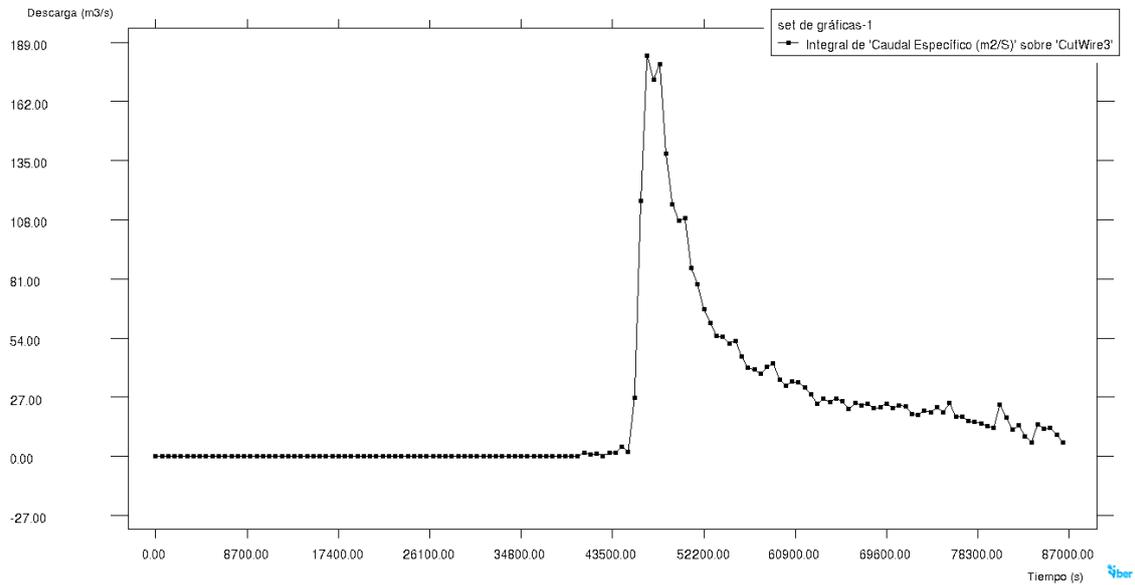
Tabla 8.- Coeficiente de rugosidad de Manning asignado a cada polígono de la cobertura SIOSE.

SIOSE CODE	SUPERFICIE (HA)	Manning
A(80PSTam_20MTR)	22,7488	0,0405
A(75PSTam_25MTR)	11,1722	0,0419
A(85MTR_10PSTam_05SDN)	18,9930	0,0550
A(70PSTam_30MTR)	15,1282	0,0433
A(70MTR_30PSTam)	23,5747	0,0543
A(80PSTam_15MTR_05ARR)	23,8486	0,0386
A(75PSTam_25MTR)	60,0627	0,0419
UCS(45EDFva_25ZAU_25VAP_05SNE)	11,1647	0,0945
A(55MTR_25SDNze_20PSTam)	4,7468	0,0489
PMX(SNE)	9,2244	0,0400
A(85FDC_10MTR_05PSTam)	78,7857	0,0675
A(90ARR_10MTR)	2,3980	0,0288
A(45MTR_25PSTam_25FDC_05SDNze)	25,1579	0,0559
A(65PSTam_30MTR_05CNFpl)	8,6153	0,0450
A(85MTR_15PSTam)	4,5398	0,0584
A(95PSTam_05MTR)	35,1980	0,0364
A(70PSTam_25MTR_05ARR)	43,3961	0,0414
A(40MTR_35SDNze_25PSTam)	13,9412	0,0443
A(85PSTct_10PSTam_05MTR)	3,6288	0,0364
A(70ARR_25SDNze_05PSTam)	2,7864	0,0268
PMX(LAA)	2,2752	0,0250
A(90ARR_10MTR)	8,8748	0,0288
A(70ARR_20MTR_05SDNze_05CCH)	191,2737	0,1908
A(90MTR_10PSTam)	9,9152	0,0288
A(90MTR_05PSTam_05SDNze)	6,6386	0,0595
A(90ARR_10MTR)	2,1030	0,0288
A(40ARR_30PSTam_25MTR_05SDNze)	32,3678	0,1276
A(80PSTam_20MTR)	6,2564	0,0405
A(85MTR_10PST_05SDNze)	132,9704	0,0550
A(70ARR_30MTR)	28,2299	0,0363
A(75MTR_20PSTam_05ARR)	233,2459	0,0551
A(90FDC_05PSTam_05MTR)	2,7804	0,0679
A(70SDNze_15ARR_10MTR_05PSTam)	115,0327	0,0328
ALG	1,5768	0,0250
A(60MTR_20PSTam_15ARR_05SDNze)	16,2325	0,0498
A(45ARR_40PSTam_10MTR_05FDC)	5,1767	0,0350
A(70MTRfc_20PSTam_10SDNze)	65,4670	0,0538
A(55CNFpl_40MTR_05VAP)	43,4496	0,0685
A(50MTR_35SDNze_15PSTam)	59,9898	0,0470

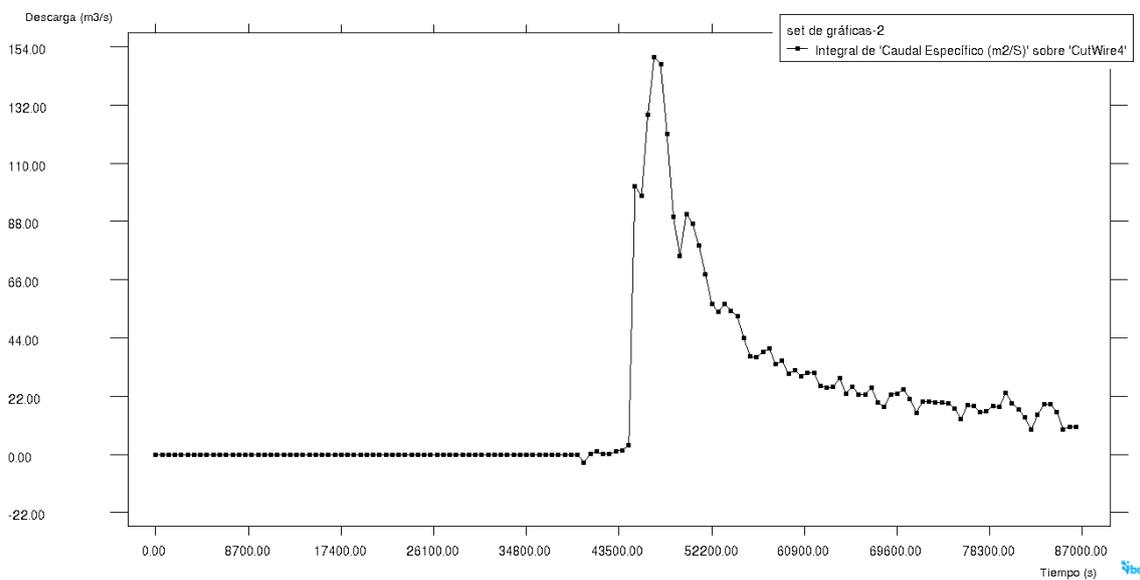
A(60MTR_40PSTam)	11,3610	0,0515
A(70ARR_15MTR_05PSTam_05SDNze_05CCCH)	75,3742	0,0319
A(70FDC_25MTR_05SDNze)	37,2563	0,0661
A(75CNFpl_15MTR_10PSTam)	107,5296	0,0654
A(65ARR_20SDNze_10MTR_05PSTam)	15,6357	0,0303
A(70MTR_25PSTam_05SDNze)	70,7789	0,0540
A(80CNFpl_15PSTam_05MTR)	12,8566	0,0644
A(60PSTam_35MTR_05ARR)	22,7157	0,0441
PMX(80ZEV_20SNE)	46,5136	0,0400
A(60CNFpl_25FDC_10SDNfzze_05PSTam)	31,9711	0,0643
A(70SDNze_15MTR_10ARR_05PSTam)	65,0267	0,0346
A(40PSTam_40ARR_20MTR)	123,7055	0,0365
A(90SDNze_05PSTam_05ARR)	21,4526	0,0300
A(80MTR_15SDNze_05PSTam)	92,6691	0,0563
A(65MTR_30PST_05SDNze)	117,3877	0,0526
A(95PRDsc_05MTR)	95,3837	0,0364
A(65MTR_30PST_05SDNze)	402,0006	0,0526
SDNze	4,0026	0,0300
A(80PSTam_20MTR)	3,1950	0,0405
A(70ARR_15PSTam_15MTR)	3,5861	0,0321
A(65ARR_20MTR_10PSTam_05SDNze)	49,8910	0,0338
A(65ARR_20MTR_10CCH_05SDNze)	32,5919	0,0338
A(80PSTam_20MTR)	5,3526	0,0405
A(40PSTct_40MTR_15SDNze_05PSTam)	39,7973	0,0466
A(60MTR_20PSTam_10FDC_10ARR)	6,4170	0,0540
A(55MTR_20PSTam_20ARR_05SDNze)	2,6279	0,0479
A(80PSTam_20MTR)	4,1789	0,0405
A(90MTR_05PSTam_05SDNze)	6,7454	0,0595
A(70MTR_25PSTam_05FDC)	3,0829	0,0560
A(55MTR_35PSTam_10SDNze)	91,2264	0,0496
A(85PRDsc_15FDCfr)	11,9950	0,0403
A(80MTR_10PSTam_10FDC)	3,2095	0,0605
A(65PSTam_25MTR_10SDNze)	14,2166	0,0414
A(50PSTam_50MTR)	12,5303	0,0488
A(55MTR_35SDN_10PSTam)	7,3862	0,0484
PMX(SNE)	6,7920	0,0400
A(75ARR_10MTR_10SDNze_05PSTam)	60,0367	0,0298
A(75ARR_10PSTam_10SDNze_05MTR)	4,8922	0,0284
A(65PSTct_20PSTam_15MTR)	6,2615	0,0350
A(90ARR_10MTR)	16,7369	0,0288
A(65MTR_20PSTam_10ARR_05SDNze)	9,4007	0,0516
A(50SDNze_35PSTam_10MTR_05ARR)	25,4498	0,0348
A(65MTR_20PST_10ARR_05SDNze)	125,5157	0,0516
A(70FDC_25MTR_05SDNze)	90,8506	0,0661

A(95PSTam_05MTR)	39,1022	0,0364
A(45PSTam_40MTR_15SDNze)	467,9301	0,0453
A(60FDC_30MTR_05PSTam_05SDN)	48,5837	0,0640
A(80ARR_10MTR_05SDNze_05CCH)	8,5176	0,0295
A(90MTR_05PSTam_05SDNze)	2,5994	0,0595
A(95MTR_05SDNze)	5,1993	0,0609
A(45CNFpl_35MTR_15SDNze_05PSTam)	128,0121	0,0561
A(70FDC_20MTR_05SDNze_05ARR)	31,4565	0,0643
A(55SDNze_25PSTam_15MTR_05ARR)	12,0754	0,0359
A(70FDC_20MTR_05PSTam_05SDNze)	390,5199	0,0648
A(65PSTam_20MTR_10SDNze_05ARR)	26,8175	0,0395
A(50MTR_40SDNze_10PSTam)	66,3658	0,0468
A(95PSTam_05MTR)	34,8423	0,0364
A(75PSTam_20MTR_05ARR)	16,2377	0,0400
PMX(SNE)	12,0567	0,0400
A(85MTR_10SDNze_05FDCpl)	2,0176	0,0596
A(60MTR_40PSTam)	2,3966	0,0515
A(50FDC_40MTR_05PSTam_05SDNze)	15,4570	0,0633
A(75PSTam_15MTR_10PSTct)	21,5705	0,0391
A(70ARR_20MTR_05PSTam_05FDC)	2,4333	0,0353
A(70FDC_25MTR_05SDNze)	4,4038	0,0661
A(70ARR_25SDNze_05PSTam)	4,5804	0,0268
A(65MTR_25PSTam_10ARR)	20,4962	0,0519
A(60SDNze_35PSTam_05MTR)	6,4187	0,0334
PSTam	33,2673	0,0350
A(60MTR_25PSTam_10SDNze_05ARR)	25,6892	0,0505
A(85MTR_15PSTam)	105,2551	0,0584
A(75SDNze_15ARR_10PSTam)	10,6155	0,0298
A(90ARR_10MTR)	8,2165	0,0288
A(75ARR_10PSTam_10SDN_05MTR)	144,0787	0,0284
A(70MTR_20PSTam_05SDNze_05ARR)	102,2134	0,0535
A(90FDC_05PSTam_05MTR)	217,1995	0,0679
A(90MTR_05PSTam_05SDNze)	16,3595	0,0595
A(70MTR_15CNFpl_10SDNze_05PSTam)	16,9871	0,0590
A(90PSTam_10MTR)	3,0333	0,0378
A(70FDC_20MTR_05PST_05SDNze)	20,8484	0,0783
A(60MTR_35PSTam_05CNFpl)	10,0823	0,0533
A(55SDNze_30MTR_10PSTam_05ARR)	22,8302	0,0400
A(70MTR_30PSTam)	14,1985	0,0543
A(65MTR_35PSTam)	7,5455	0,0529
A(85SDNze_05PSTam_05MTR_05ARR)	4,6399	0,0316

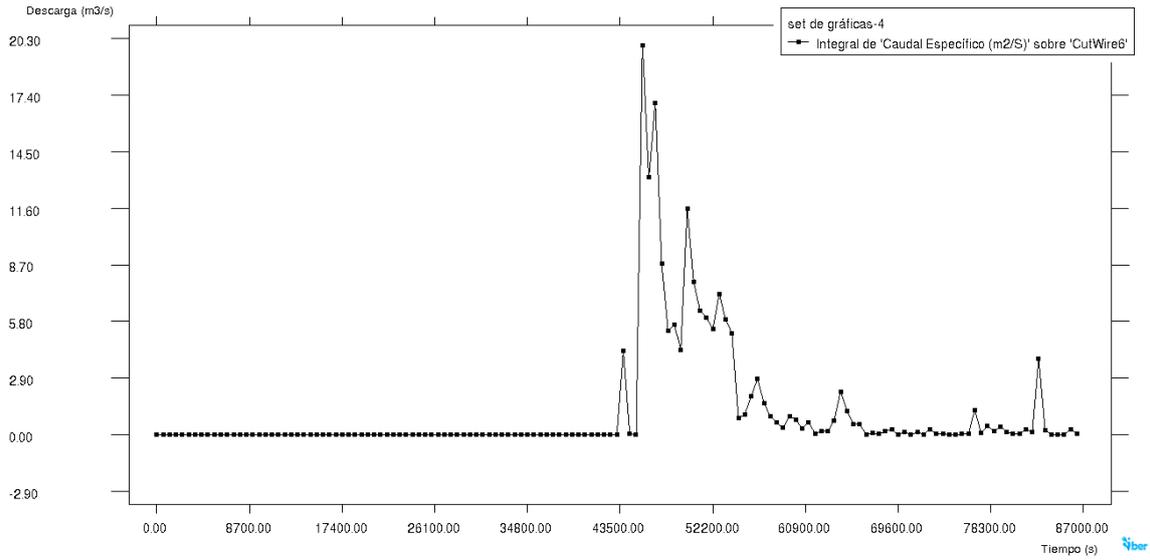
Anexo: Hidrogramas resultantes, estudio de afección del tamaño malla



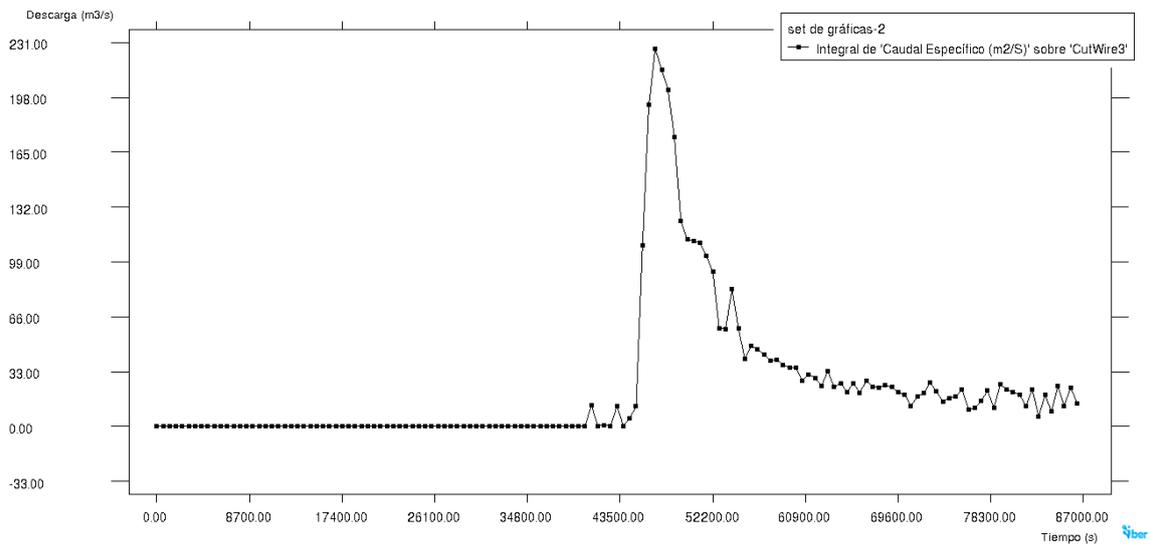
MALLA30-SECCIÓN01-SC01



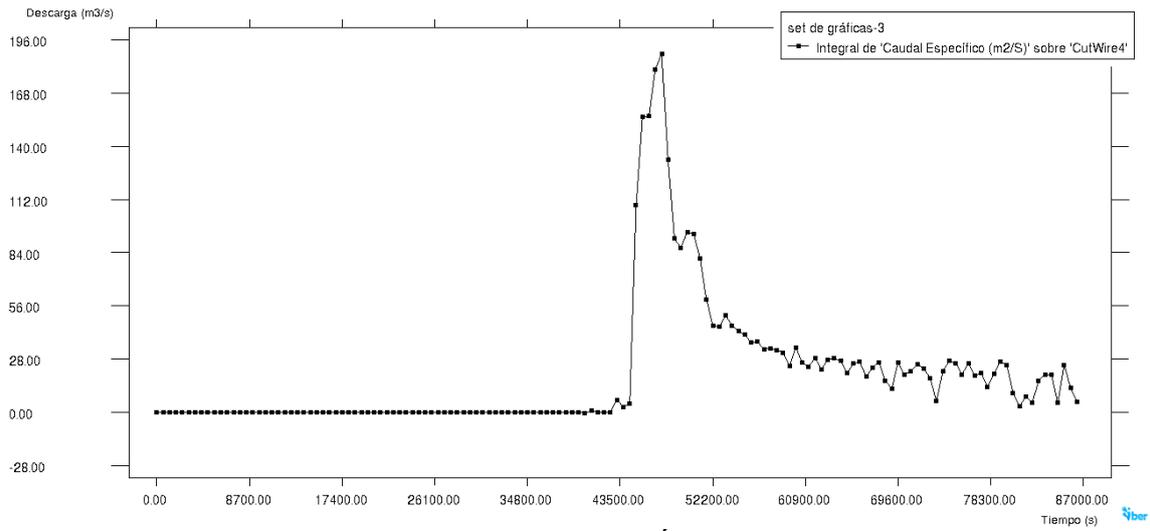
MALLA30-SECCIÓN02-SC02



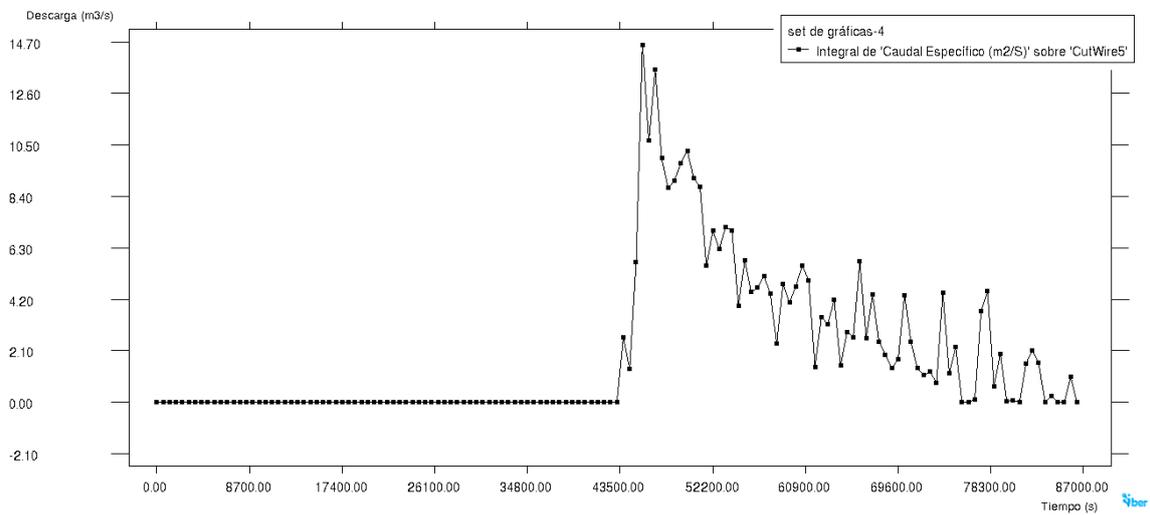
MALLA30-SECCIÓN03-SC05



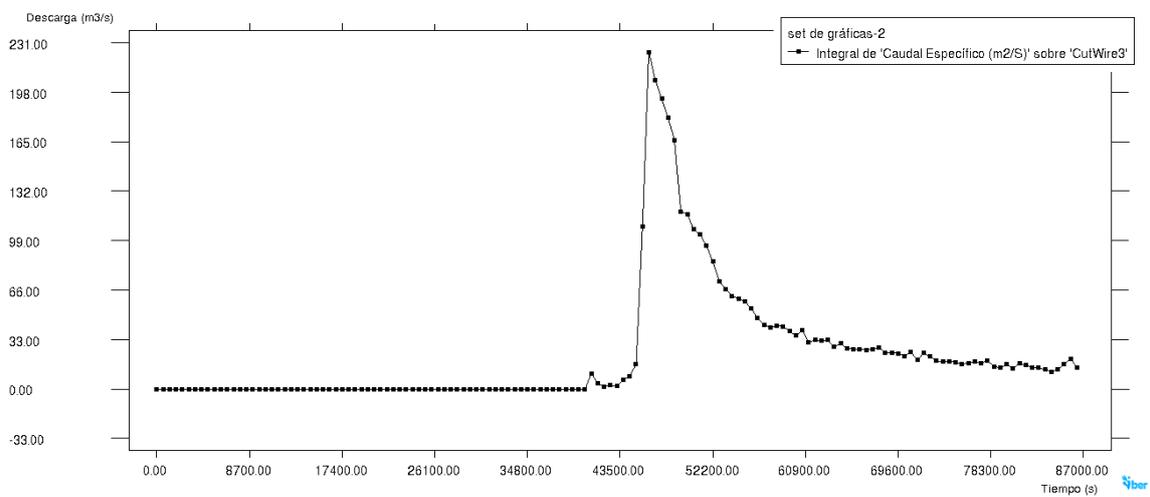
MALLA25-SECCIÓN01-SC01



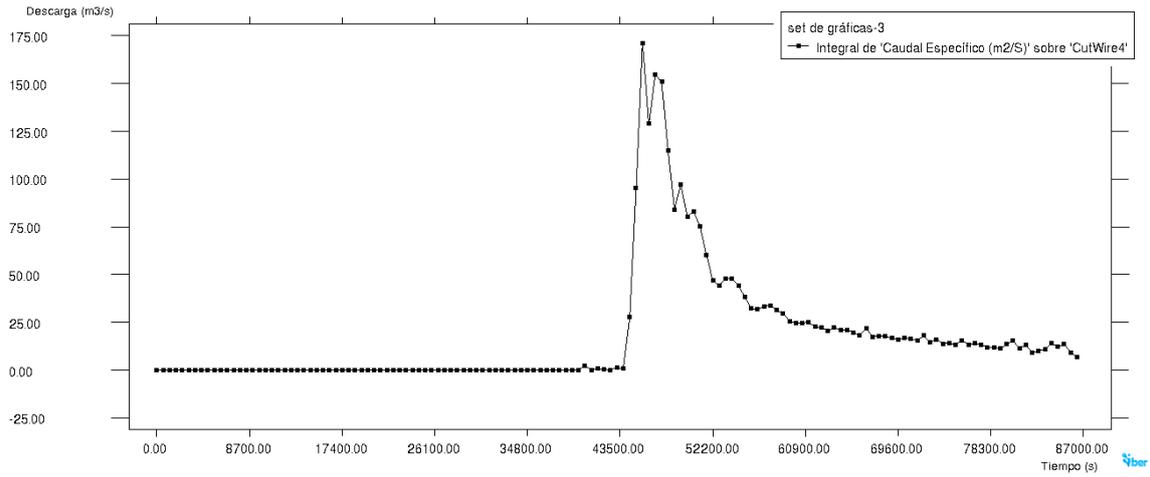
MALLA25-SECCIÓN02-SC02



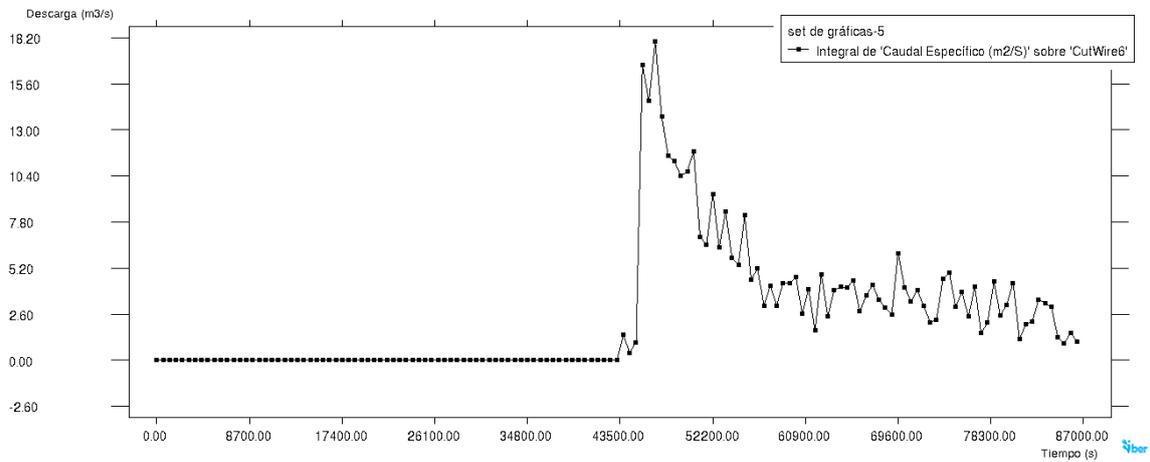
MALLA25-SECCIÓN03-SC05



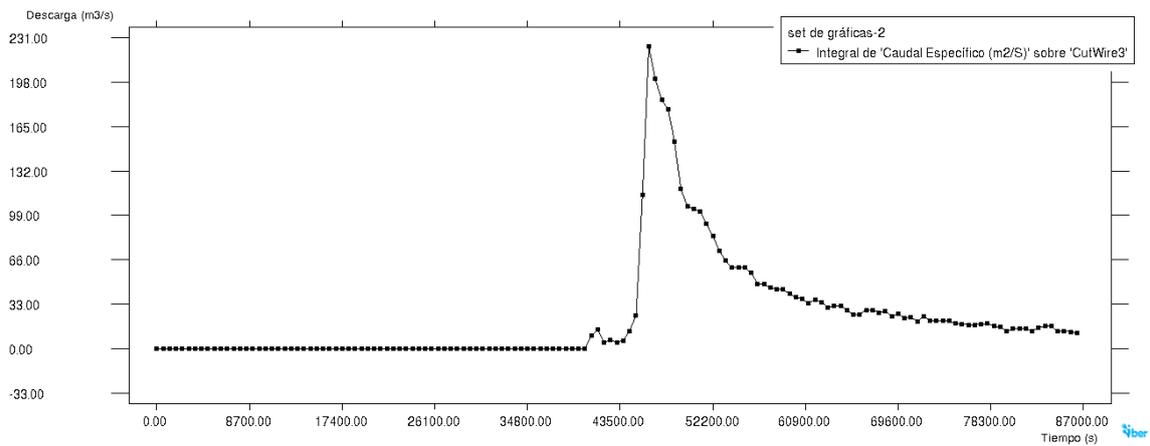
MALLA20-SECCIÓN01-SC01



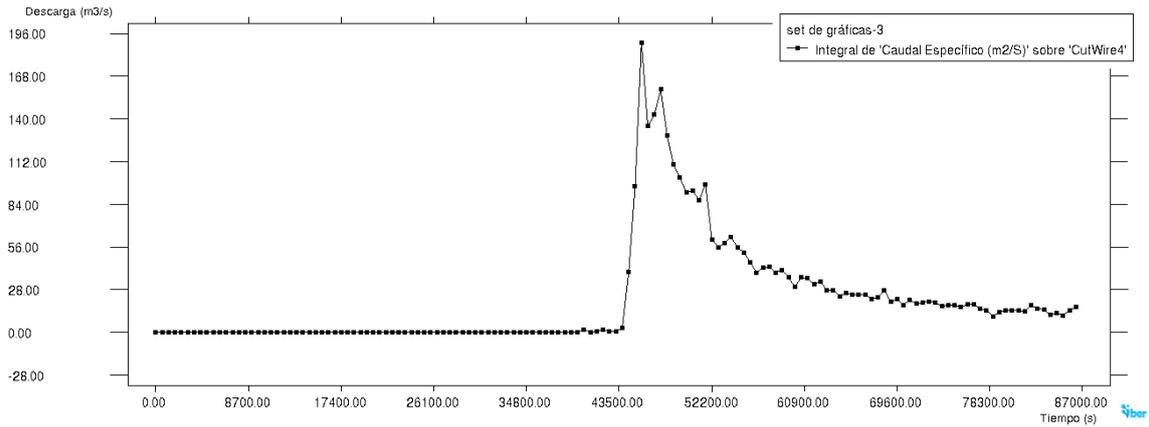
MALLA20-SECCIÓN02-SC02



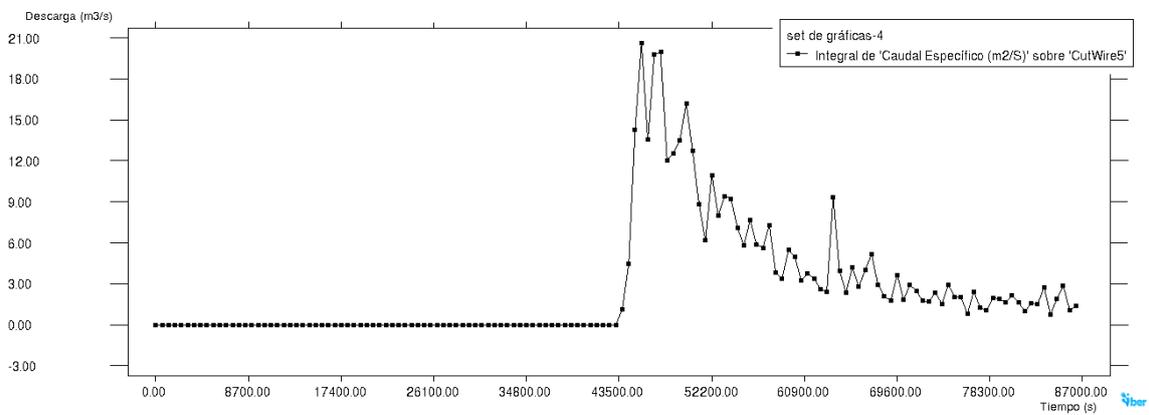
MALLA20-SECCIÓN03-SC05



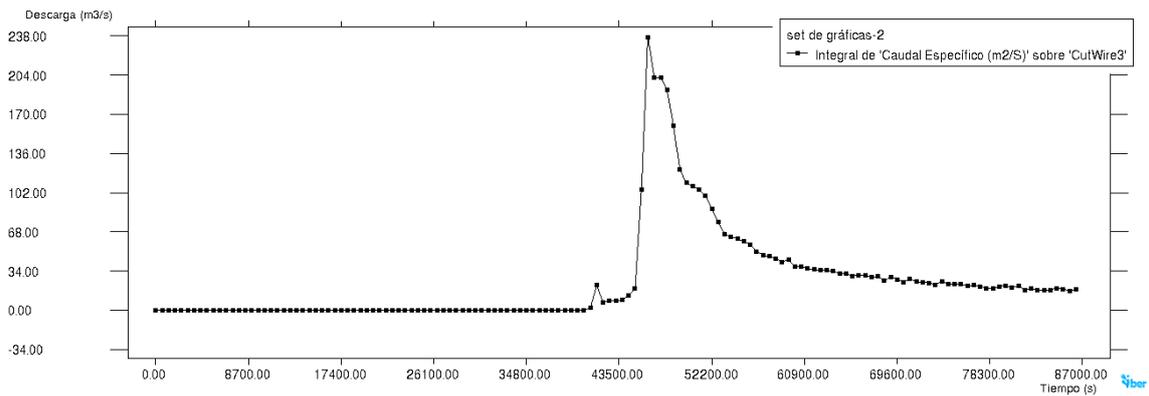
MALLA15-SECCIÓN01-SC01



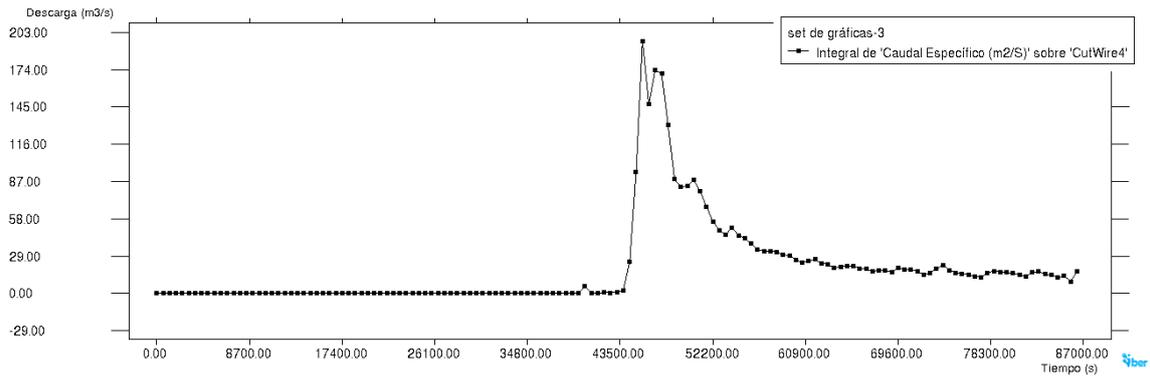
MALLA15-SECCIÓN02-SC02



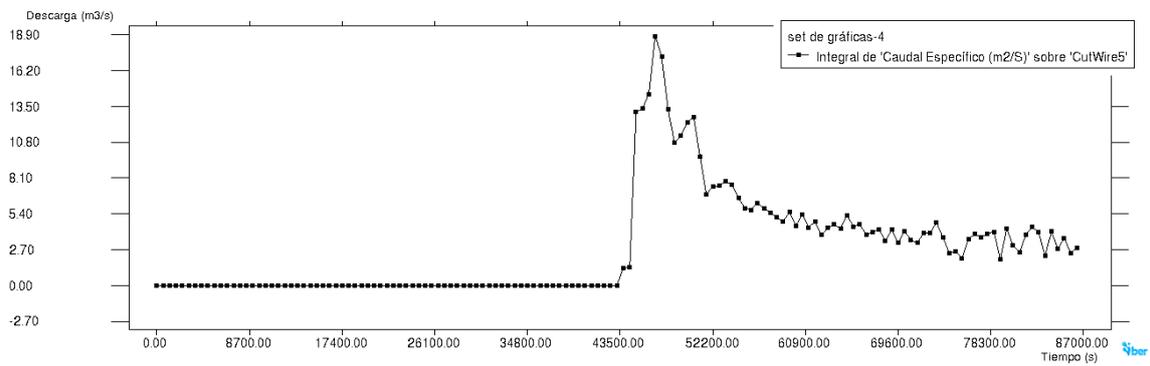
MALLA15-SECCIÓN03-SC05



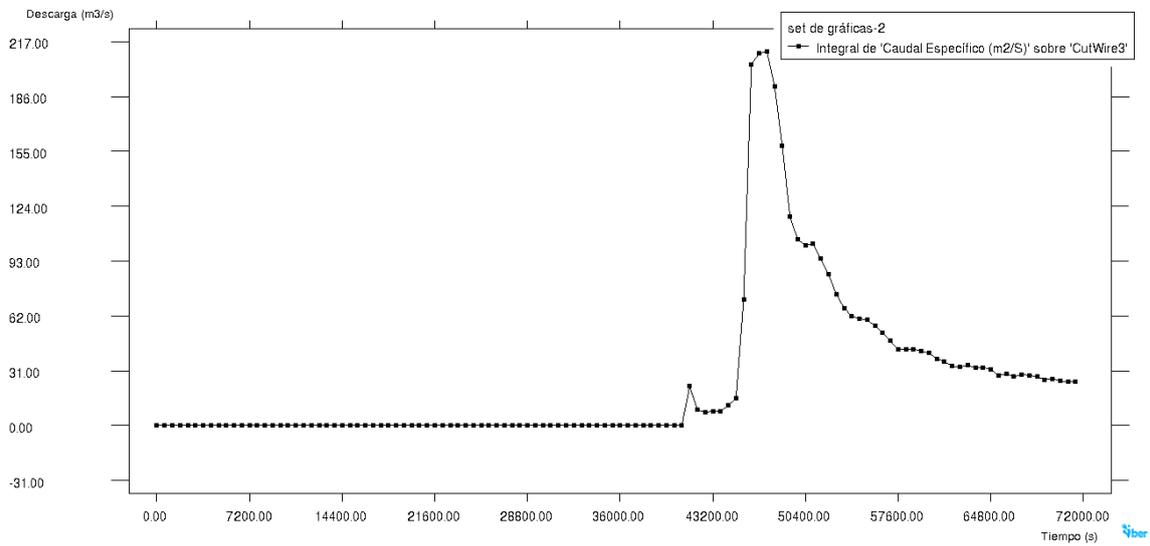
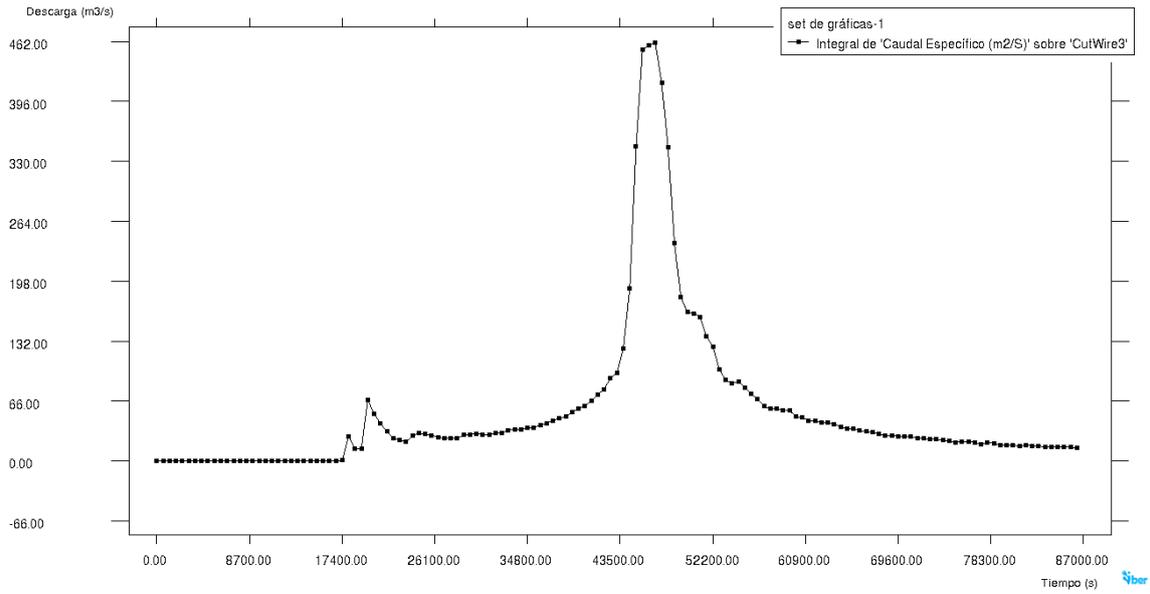
MALLA10-SECCIÓN01-SC01



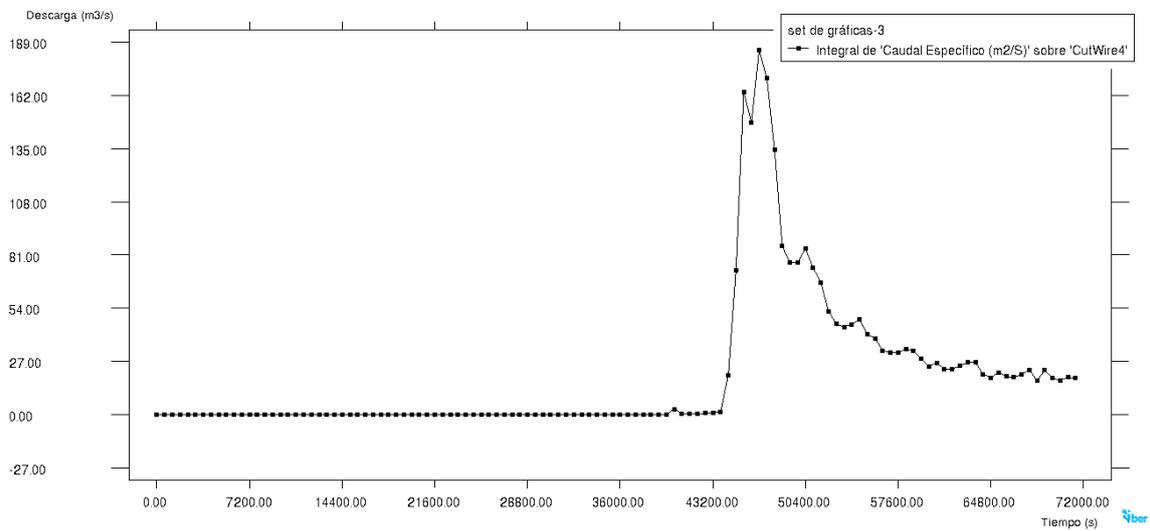
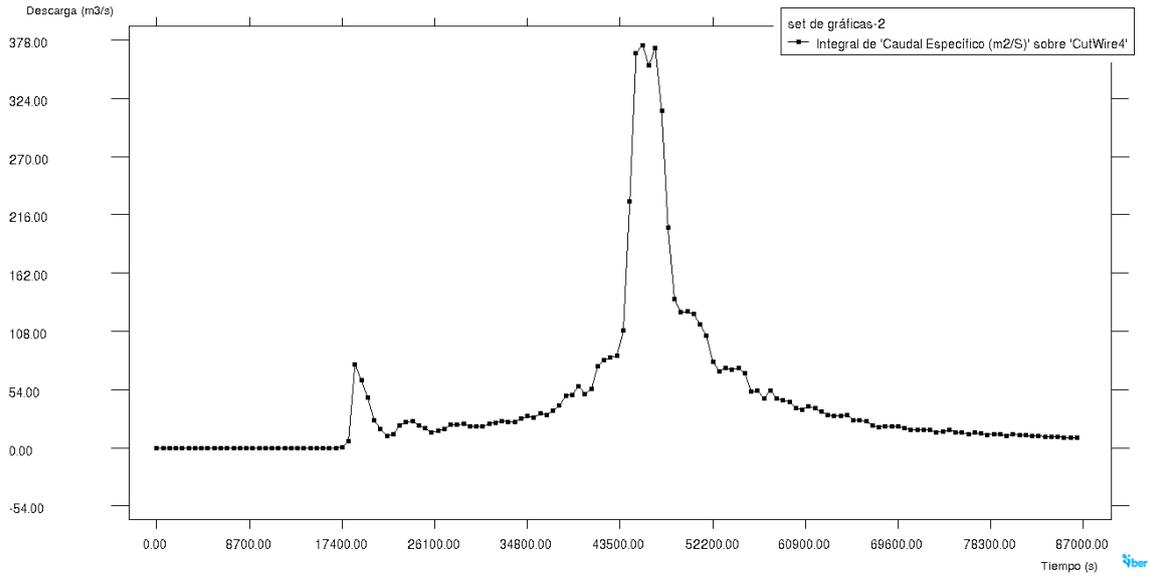
MALLA10-SECCIÓN02-SC02



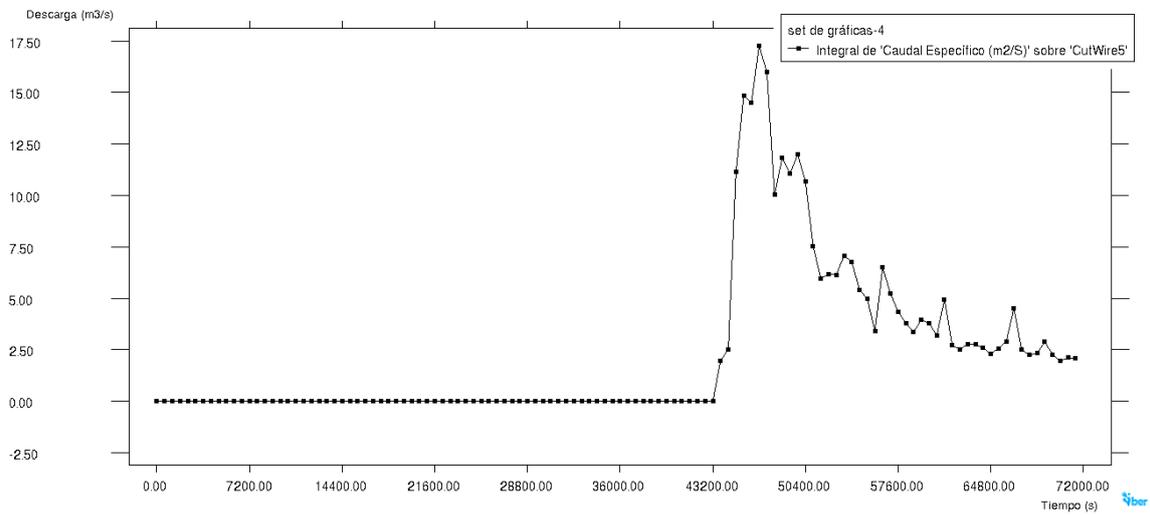
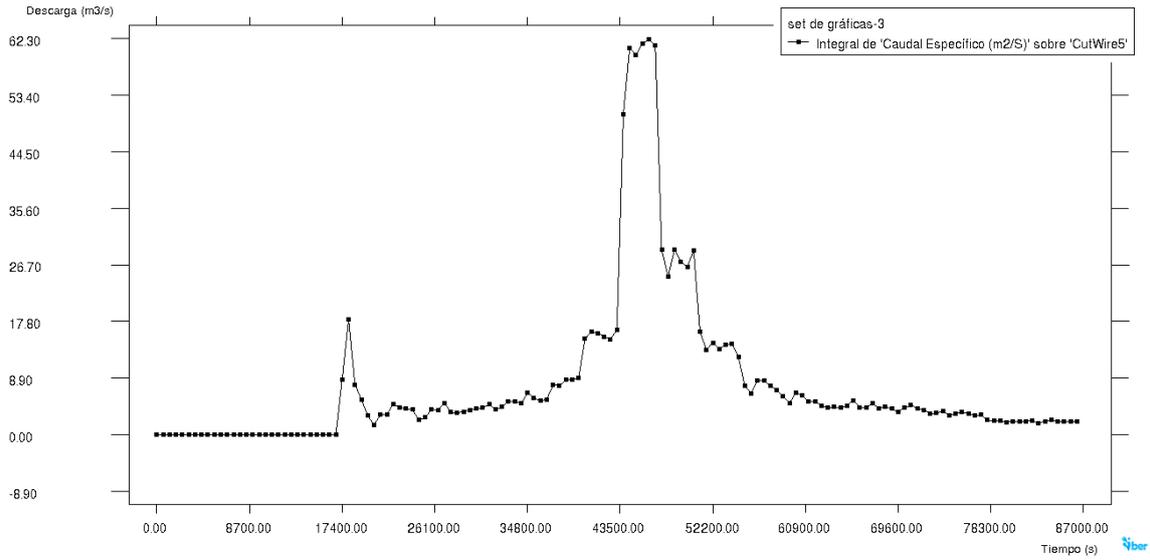
MALLA10-SECCIÓN03-SC05



MALLA7-SECCIÓN01-SC01

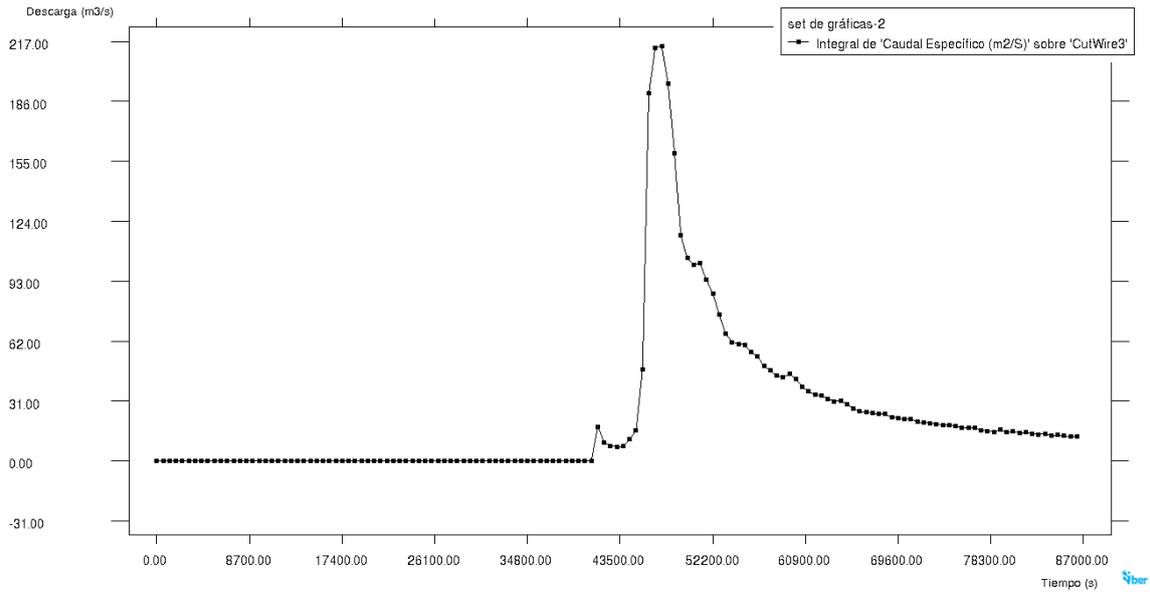


MALLA7-SECCIÓN02-SC02

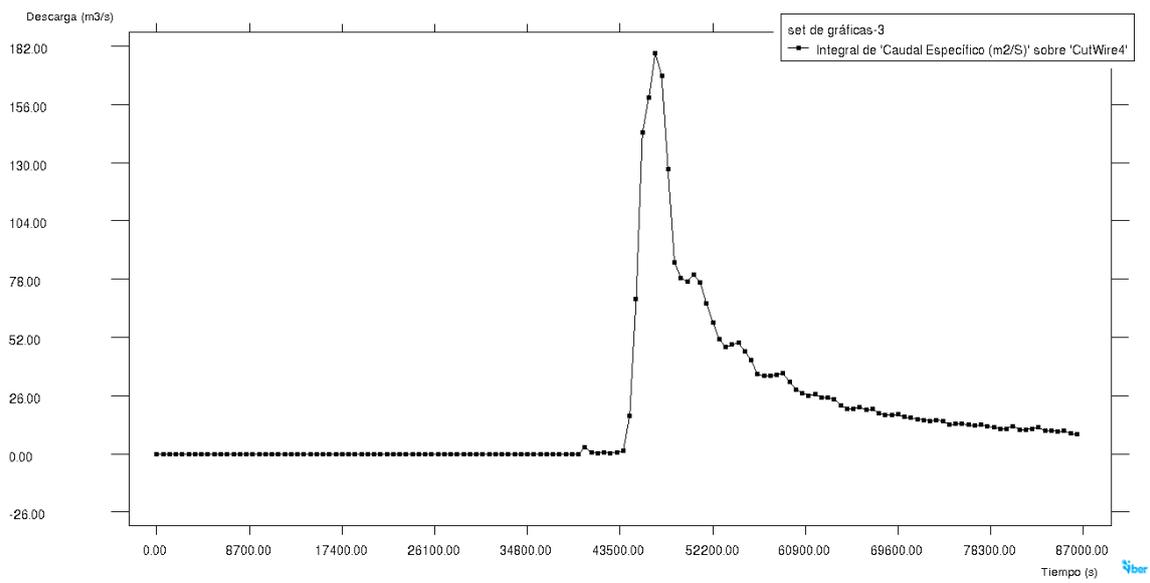


MALLA7-SECCIÓN03-SC05⁴

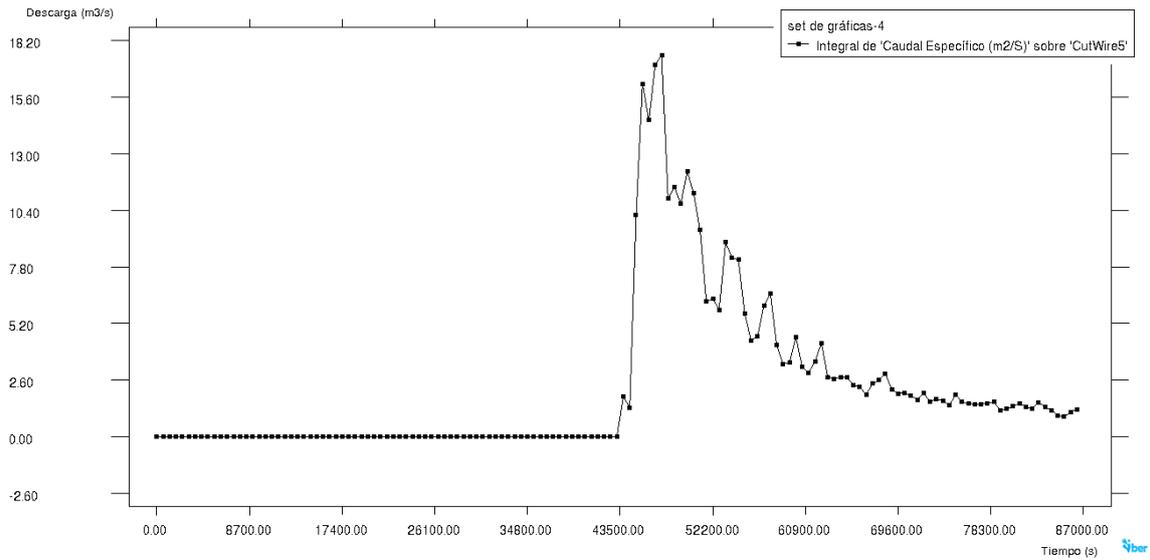
⁴ Las diferencias se justifican por la selección de un modelo de pérdidas distinto, cómo es Horton. Es probable que exista un bug en la transformación de los modelos desde la versión 2.4.3. a la 2.5.2.



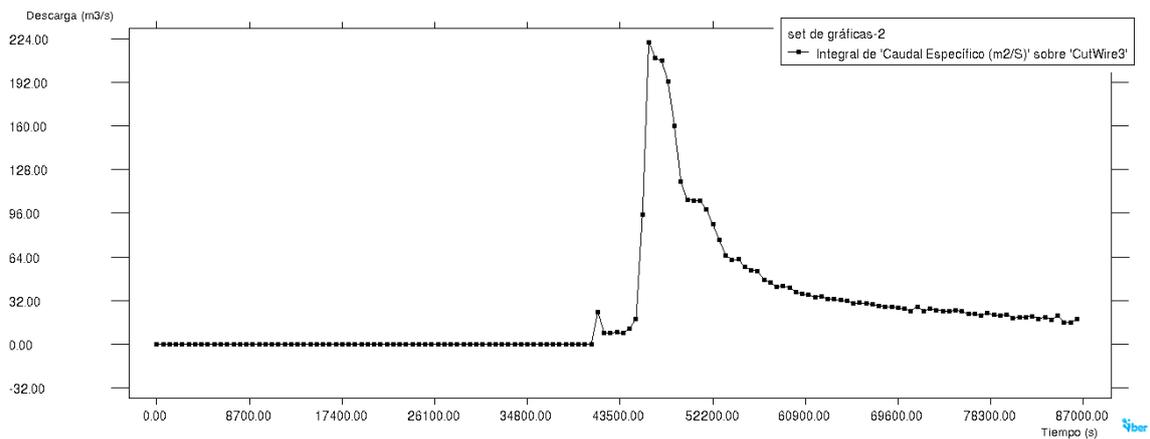
MALLA5-SECCIÓN01-SC01



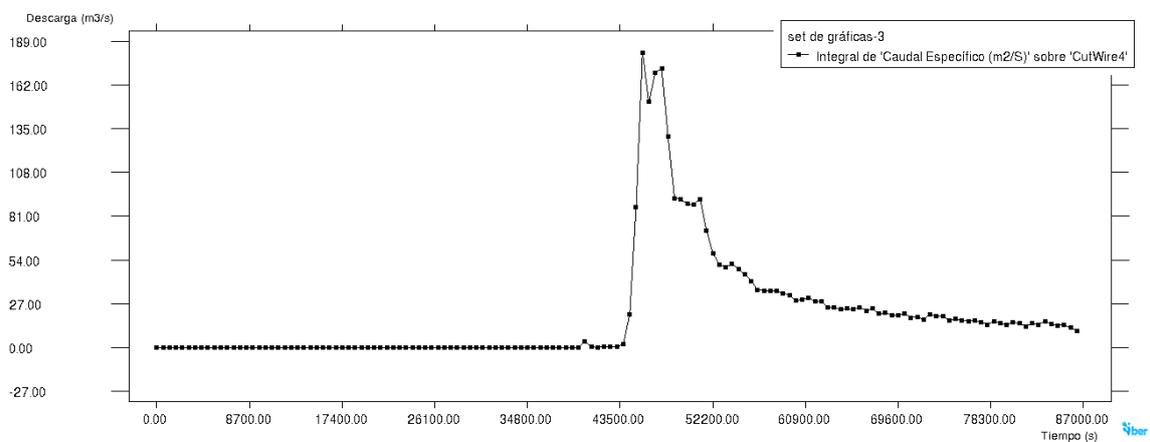
MALLA5-SECCIÓN02-SC02



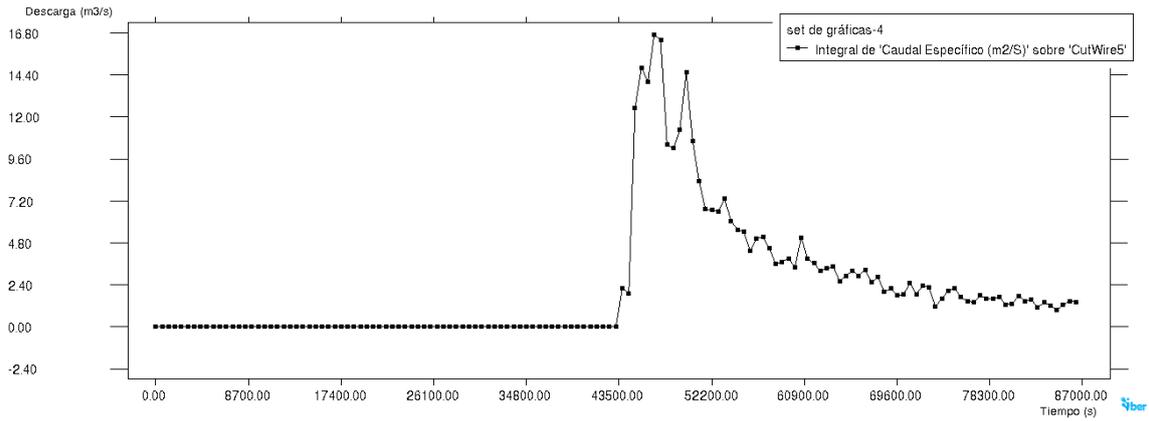
MALLA5-SECCIÓN03-SC05



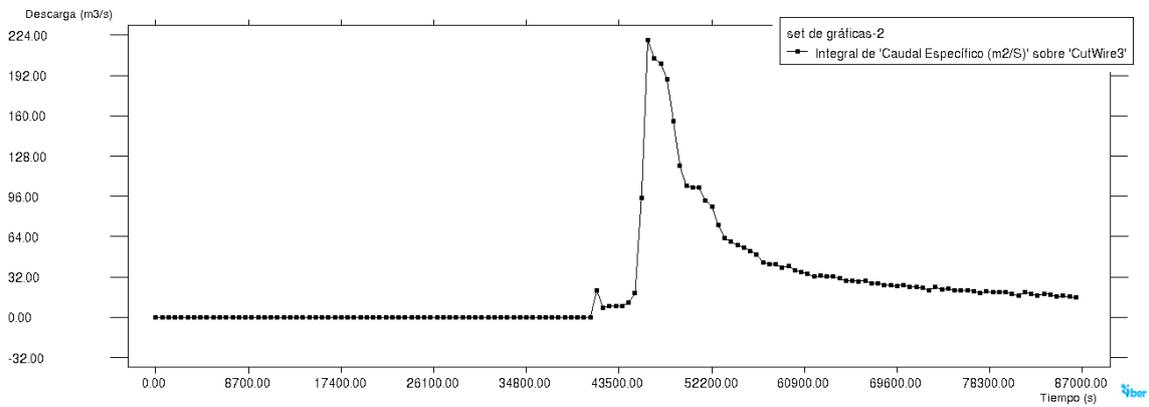
MALLA8-SECCIÓN01-SC01



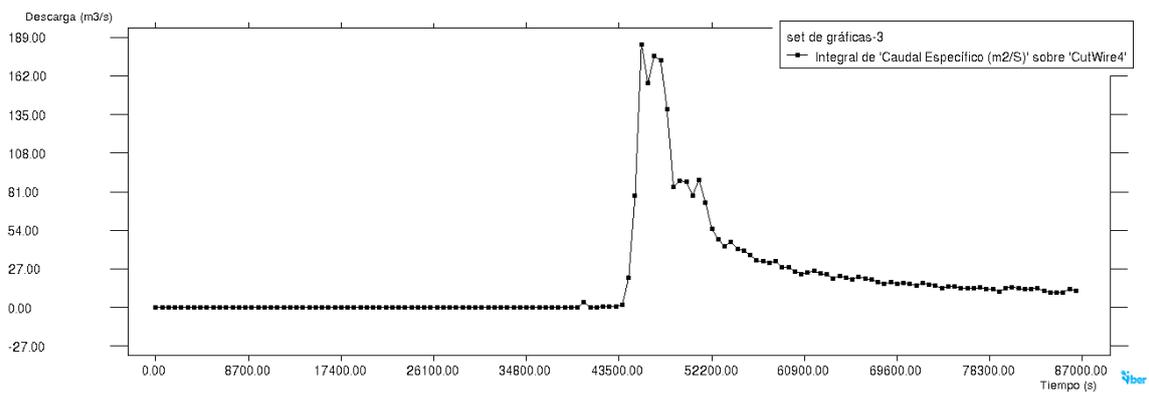
MALLA8-SECCIÓN02-SC02



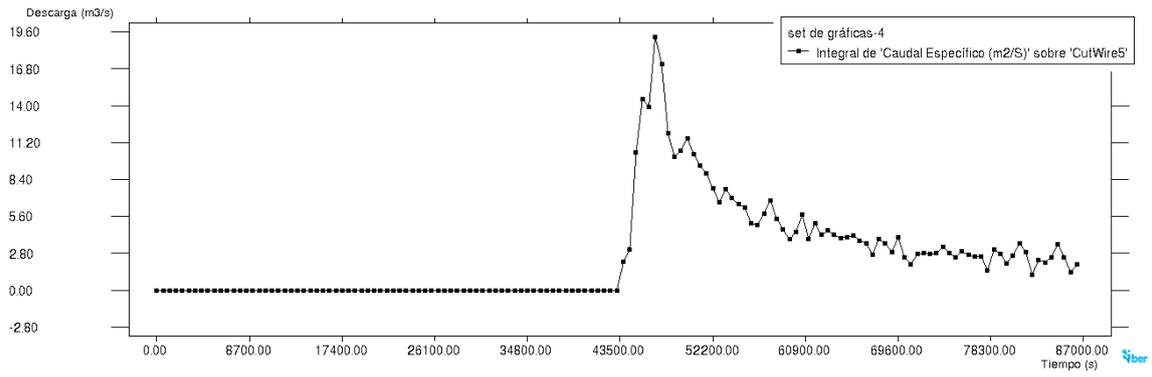
MALLA8-SECCIÓN03-SC05



MALLA9-SECCIÓN01-SC01



MALLA9-SECCIÓN02-SC02



MALLA9-SECCIÓN03-SC05