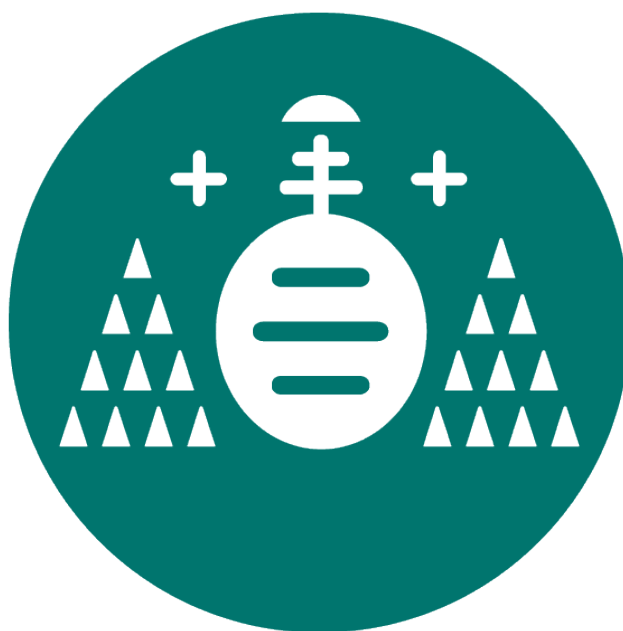


ESTUDIO PRELIMINAR Y DESARROLLO DE UN SIG PARA PREVENCIÓN Y GESTIÓN DE RIADAS



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

TRABAJO FINAL DE MÁSTER EN
TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Guillermo Naveiras Llorente

julio 2014

Proyecto realizado para la empresa:

LOCIS Cartografía y Medio Ambiente

Avenida de la Argentina 132

33213 Gijón

Principado de Asturias

www.locis.es



Con la colaboración de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico



Índice

Resumen.....	4
Abstract	4
Glosario	5
Introducción	7
Antecedentes	10
La prevención de riadas en la UE y España	10
Las ARPSIS	15
El trabajo de Máximo Calvo Ordás en 2013	18
Objetivos del trabajo.....	25
Procedimiento.....	26
Área de estudio	26
Software empleado.....	30
Acopio de datos.....	31
Procedimiento para simulación de inundación.....	41
Desarrollo de una herramienta de gestión del caudal.....	60
Resultados finales	63
Conclusiones	75
Bibliografía y páginas web.....	79

Resumen

Los Sistemas de Información Geográfica o SIG son un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes (usuarios, hardware, software, procesos) que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelado de grandes cantidades de datos de índole espacial.

El presente estudio tiene como objetivo el desarrollo de un SIG que pueda ser utilizado para la prevención y análisis del alcance espacial de las riadas fluviales en el tramo medio del río Nalón, entendiendo como este al situado entre el embalse de Tanes y Rioseco (Sobrescobio) y el de Priañes (Las Regueras). Para ello se han de considerar los datos conocidos de precipitación, caudal fluvial, actividades antrópicas, datos espaciales y características del medio natural.

Abstract

The Geographyc Information Systems (GIS) can be defined as the tools that combining the use of different components (users, hardware, software, proceses) allow the organization, storage, manipulation, analyse and modeling of big amounts of spatial nature.

This project pretends to develop a GIS that can be used for the prevention and study of the spatial significance of the river floods in the middle section of the river Nalón, considering the section placed between the reservoir of Tanes and Rioseco (Sobrescobio) and the Priañes one (Oviedo). In that way we will consider the information relative to precipitation, river flow, human activities, spatial information and the characteristics of the environment.

Glosario

En este apartado se definen de forma detallada y rigurosa algunos de los términos que van a ser más comúnmente empleados en el transcurso del presente trabajo.

Riada: inundación provocada por el desbordamiento de las aguas de un río con respecto de su cauce habitual. También “avenida”.

Caudal: volumen de agua que avanza por el río por unidad de tiempo, normalmente expresado en m^3/s

Caudal ecológico: volumen de agua que arrastra una corriente de agua fluvial para preservar las funciones ecológicas del río.

Periodo de retorno: periodo de tiempo determinado para el que se considera la máxima precipitación posible que se estima se dará lugar en el mismo, normalmente cien años o quinientos años.

Evapotranspiración: pérdida de humedad de una superficie por combinación de los procesos de evaporación directa y transpiración de la vegetación, pudiendo ser entendida como potencial (ETP) o real (ETR)

Usos del suelo: categorías en las que se clasifica el uso que se hace de la tierra y que influirá de forma importante en la capacidad de retención de agua y evapotranspiración de las diferentes superficies.

Antrópico: relacionado con el ser humano.

Antropizado: modificado de forma significativa por la acción humana.

Cauce: también lecho fluvial es el confín físico de un curso de agua en condiciones normales.

Llanura de inundación: denominada tradicionalmente como “vega” es la parte orográfica que contiene a un cauce y que puede ser inundada por los desbordamientos de este.

Cuenca hidrográfica: territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir todo el territorio cuyas aguas fluyen hacia el mismo río o sus afluentes.

Hec Ras: programa informático de acceso libre desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América, diseñado para la modelización de flujos de agua en cauces naturales o canales antrópicos.

Hec-GeoRas: herramienta que permite el preprocesado de los datos espaciales en software SIG antes de su procesamiento con Hec Ras y su posterior representación gráfica.

Estación de aforo: instalación que permite el control casi en tiempo real de la evolución de los caudales de un río a través de la medición de la altura de la lámina de agua y el caudal volumétrico del mismo.

Bosque de ribera: formaciones vegetales que se ubican a lo largo de los cauces de ríos y lagos y que están caracterizados por su vinculación a este.

TIN: acrónimo del inglés *Trianguled Irregular Network*, que es una representación de la morfología del relieve a través de nodos de altura y triángulos entre estos.

MDE: modelo digital de elevaciones, es una representación de la superficie terrestre en función de la altura de sus puntos.

Consuntivo (uso): referido a masas de agua, aquel uso que implica el gasto o destrucción de un volumen de la misma (consumo humano, regadíos, vertidos...)

No consuntivo (uso): referido a masas de agua, aquel uso que NO implica el gasto o destrucción de un volumen de la misma (deportes acuáticos, uso recreativo...)

Introducción

Las riadas son uno de los fenómenos más destructivos de la naturaleza, debido a su capacidad para causar daños en infraestructuras, pérdida de cosechas, daños en el patrimonio y sobre todo su potencial capacidad de provocar la pérdida de vidas humanas. Por todo ello las riadas pueden suponer una seria interrupción en el funcionamiento normal de las comunidades afectadas, que debido a los daños sobre el patrimonio material, ecológico y humano, en ocasiones exceden la capacidad de la comunidad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos e incluso ocasionar daños irreparables sobre esta.

Aunque se trata de fenómenos naturales y su causa primordial, que es la caída de grandes volúmenes de precipitación en periodos de tiempo cortos, escapa por completo al control humano, fuera de su predicción, ciertas actuaciones humanas actúan a favor del agravamiento de las consecuencias negativas de las riadas, como pueden ser la deforestación de los bosques de rivera y de las laderas de las cuencas vertientes, la ocupación de llanuras de inundación por estructuras humanas, el desvío de cauces de su ubicación natural, la carencia de sistemas efectivos de predicción y actuación frente a estos fenómenos etc.

En la Unión Europea las riadas son el fenómeno natural con mayor impacto por su capacidad destructiva y su trascendencia económica. Según datos del Consorcio para la Compensación de Seguros, en nuestro país las cuantías pagadas por el Consorcio de Compensación de Seguros debidas a riadas representan más del 90% de las correspondientes a desastres naturales (fuente: Plan de Protección Civil ante el Riesgo de Riadas en la Comunidad Autónoma de Castilla y León, 2010)

Tabla 2. Inundaciones en Europa			
Inundaciones	1989-2008	Media por año	Porcentaje desastres naturales %
Número	212	11	26
Víctimas	2930	150	3,3
Afectados	7,8M	0,4 M	27
Daños económicos Me€	82.400	4.120	40

Tabla de efectos de las riadas en Europa entre 1989 y 2010. Fuente: Revista de Obras Públicas nº 3.520

En España estos fenómenos normalmente se asocian a la conocida como gota fría, que es característica de las zonas mediterráneas, aunque las provincias del norte no están exentas de sufrir los daños propios del agua. En la historia reciente de las riadas en la comunidad autónoma del Principado de Asturias son de especial significancia las riadas acaecidas en el mes de junio del 2010, que dejaron imágenes imborrables en la memoria de los afectados y provocaron cuantiosos daños materiales y económicos. Estas riadas, las mayores en cien años, dejaron una factura que casi alcanzó los 120 millones de euros. En total se estima que durante ese mismo año la cuantía de los daños económicos provocados por riadas e riadas en España alcanzó la cifra de 301 millones de euros, según datos del Consorcio de Compensación de Seguros.



(Vista aérea de las riadas en la localidad asturiana de Arriondas. Fuente: El País, 2010)

Existe un consenso de que los riesgos derivados de fenómenos hidrológicos extremos van en aumento. Este punto de vista se alimenta de pruebas tanto de los recientes cambios en la frecuencia y la gravedad de las riadas y las sequías y

las salidas de los modelos climáticos que predicen aumentos en la variabilidad hidrológica.

Aunque las riadas son fenómenos que no se pueden evitar, sí que existen una serie de medidas estructurales y no estructurales para la minoración y control de los daños y efectos producidos por las mismas. Estas medidas incluyen el estudio y predicción anticipada de los fenómenos de gota fría, la delimitación de áreas de potencial riesgo de inundación y la adecuación del planeamiento urbanístico a este, y el desarrollo de planes de actuación frente a riadas. Otras medidas pueden ser de índole estructural como la canalización de ríos, adecuación de sus cauces o el levantamiento de diques y presas.

Una de las medidas no estructurales para la reducción del riesgo es la delimitación de las zonas propensas a riadas. Se trata de modelar la compleja interacción de los sistemas hidráulicos de caudal de los ríos con características topográficas y de uso de la tierra de las llanuras de inundación. Para ello es fundamental el conocimiento de las áreas de potencial riesgo de inundación y la capacidad de establecer herramientas que permitan relacionar de forma fiable y precisa la relación entre las precipitaciones y el alcance espacial de las riadas provocadas por estas.

Antecedentes

La prevención de riadas en la UE y España

En la Unión Europea y Estados Unidos se han desarrollado sistemas de alerta temprana, que mediante la informatización de los cauces de los ríos permiten anticiparse en medida de lo posible a procesos de riadas, ayudando esta herramienta a la toma de decisiones por parte de las fuerzas de seguridad del estado en cuestión.

Al tratarse este de un proyecto enclavado en la comunidad autónoma del Principado de Asturias se van a hacer especial hincapié en las actuaciones llevadas a cabo por la Unión Europea, el gobierno español, la Confederación Hidrográfica del Cantábrico y el gobierno del Principado de Asturias.

Las confederaciones hidrográficas tienen dispuesto a lo largo de los cauces de los ríos estaciones de aforo que permiten el control y seguimiento del caudal y la altura de la lámina de agua en ciertos puntos estratégicos, lo que ha ayudado a la gestión de los ríos de manera histórica, estos datos han sido liberados y puestos a disposición del Centro de Estudios Y Experimentación de Obras Públicas (en adelante CEDEX), el cual ha publicado en su página web los anuarios históricos donde se recogen los datos recogidos por las distintas estaciones de aforos dispuestas a lo largo de toda la península ibérica.

Los datos disponibles para toda la población son de la serie histórica comprendida entre los años 1912 y 2009, los datos más recientes han de ser liberados por parte de los organismos que gestionan las distintas cuencas antes de su inclusión en los anuarios, es por ello por lo que podemos encontrar zonas donde los datos disponibles alcanzan hasta finales de 2010 y en otras se quedan en el año 2009, para la consulta de datos más recientes se ha de recurrir a las confederaciones hidrográficas las cuales pueden tenerlos disponibles de cara al público en su página web o bien dar acceso a ellos mediante petición personal.

Las mediciones que están a disposición de los usuarios en el CEDEX son:

- Alturas y caudales medios diarios
- Caudales máximos medios de cada mes
- Alturas y caudales máximos instantáneos de cada mes y anual
- Caudales mínimos medios de cada mes y anual

- Aportaciones mensuales en Hm3
- Caudales mensuales en m3/s
- Caudales instantáneos mensuales en m3/s

También se puede acceder a los datos históricos máximos y extremos así como a los datos volumétricos de los embalses. Junto a estos datos también podemos acceder a la ficha de las estaciones de aforo, donde se muestra su numeración, propietario, coordenadas y ubicación de la misma, además de sus características de construcción con un esquema representativo de la sección de la estación en el río, todo ello acompañado por una foto ilustrativa.

También se recogen dentro de la ficha el resumen estadístico histórico de los datos de caudales, aportaciones, y demás variables medidas por la estación, lo que permite a simple golpe de vista ver la evolución del río en esa zona a lo largo de los años y los últimos meses.

De toda esa serie de datos disponibles y compilados por el CEDEX se publica en Septiembre de 2012 la aplicación CAUMAX, que se trata de un SIG que permite consultar los caudales máximos para distintos periodos de retorno en todos los ríos de la península ibérica. Los periodos de retorno disponibles son 2, 5, 10, 25, 100 y 500 años.

A nivel estatal aunque gestionado de manera individual por cada una de las cuencas hidrográficas nos encontramos con otro tipo de actuación en lo referente a los procesos de riadas, estamos hablando de los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH).

Los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica de las Confederaciones Hidrográficas son el resultado de un Programa de la Dirección General del Agua (DGA) del Ministerio de Medio Ambiente para su desarrollo en todas las cuencas intercomunitarias, iniciado en la del Júcar (1983) y actualmente en avanzado estado de ejecución.

El SAIH puede definirse como un Sistema de Información en tiempo real, basado en la captura, transmisión y procesado de los valores adoptados por las variables hidrometeorológicas e hidráulicas más significativas, en determinados puntos geográficos de las cuencas hidrográficas sensorizadas.

Proporciona información relativa a los niveles y caudales circulantes por los principales ríos y afluentes, el nivel y volumen embalsado en las presas, el

caudal desaguado por los aliviaderos, válvulas y compuertas de las mismas, la lluvia en numerosos puntos y los caudales detraídos por los principales usos del agua en cuenca.

Los objetivos primordiales del SAIH son servir de sistema de información en tiempo real para:

- Gestión en avenidas: minimización de daños por una mejor gestión de las infraestructuras hidráulicas y por un aumento en el plazo y en la garantía de los avisos a Protección Civil y a la Unidad Militar de Emergencia (UME), aumento de la información relativa a la seguridad de las presas y el mantenimiento de los resguardos.
- Gestión de sequías: facilita el seguimiento de la sequía y de las medidas tomadas, vigilancia de dotaciones y control de caudales en las tomas.
- Gestión de riegos: vigilancia del cumplimiento de las dotaciones acordadas, modificación de los caudales por cambio de condiciones, por ejemplo un episodio de lluvia y ahorro del recurso por una mejor gestión.
- Gestión de caudales ecológicos: permite conocer el cumplimiento de los caudales ecológicos y anticipar posibles problemas.
- Gestión de la calidad del agua: suministra los datos de caudal, elemento básico de la calidad.
- Gestión del conocimiento: mejora el conocimiento de la cuenca que repercute en numerosas actividades de planificación y explotación.

Cada SAIH funciona de manera autónoma en cada una de las Confederaciones Hidrográficas, sin perjuicio de que exista, en un futuro, un denominado Centro Nacional con funciones de seguimiento en tiempo real y estadística.

Por otro lado, a lo largo de los años de su existencia, el programa SAIH ha ido incorporando las nuevas tecnologías que se han desarrollado en los diversos sectores involucrados, lo que ha hecho variar el enfoque de algunos de los criterios iniciales de diseño.

Por esta causa, coexisten en la actualidad, por ejemplo, sistemas que transmiten la información vía radio terrestre con sistemas que se comunican a través del satélite HISPASAT, puesto en órbita por España en 1.992.

Puede decirse que el Sistema SAIH de cada cuenca hidrográfica CAPTA los datos por medio de distintos dispositivos sensorizados y los TRANSMITE a través de una red de comunicaciones, dentro de un sistema jerarquizado en dos/tres niveles:

- Puntos de control.
- Puntos de concentración/explotación.
- Centro de proceso.

Para la determinación de una estimación suficiente de la lluvia total, y de su distribución, se requiere el concurso tanto de los datos proporcionados por los pluviómetros instalados por el SAIH disponibles en tiempo real pero con representatividad espacial limitada, como de la información proveniente de radares meteorológicos que proporciona el INM.

La Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC) cuenta con este sistema, así como con la red SAICA (Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas) que está en desarrollo en esta confederación y ROEA (Red Oficial de Estaciones de Aforo). Los datos procedentes de las estaciones de control tanto de aforo, como meteorológicas o de calidad se gestionan en el centro de cuenca (CECU) que se encuentra en Oviedo, en el que se reciben tanto los datos hidrológicos y meteorológicos como de calidad de las aguas.

Los datos del SAIH están disponibles para el público en las páginas web de las propias confederaciones. Donde se puede ver la altura actual de la lámina de agua y su evolución a los largo de días anteriores, también se puede consultar caudal estimado y apreciar los niveles de prealerta establecidos para esa zona. Los datos son actualizados cada 15 minutos. Según el tipo de estación también podrán ser consultados los datos meteorológicos de la zona, en concreto temperatura y pluviometría.

En el caso de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico los datos de las estaciones foronómicas están accesibles mediante mapas interactivos. Seleccionando la zona de interés tendremos acceso a las estaciones de aforo disponibles. Donde se pueden ver los últimos datos disponibles de altura del nivel de agua y caudal de cada una de las estaciones sin necesidad de acceder de manera individual a ellas.

Si se accede de manera individual a cada una de las estaciones se podrá observar una ficha de la estación de aforo, los datos a tiempo real que está captando, y un resumen histórico de los mismos.

El tipo y número de datos disponibles dependerá del instrumental científico que posea la estación en cuestión. Si la estación de aforo toma datos meteorológicos además de los hidrológicos e hidráulicos estos también estarán disponibles en la página individual de cada estación.

La Confederación Hidrográfica del Cantábrico tiene establecido un sistema con tres tipos de alerta en función de la altura del nivel de agua en cada estación. La altura a la cual se sitúan los distintos tipos de alertas varía en cada estación de aforo y responde a las características de la cuenca y su entorno, el primer nivel es denominado “de seguimiento”, el segundo “prealerta” y el tercero “alerta”.

Existe la posibilidad de disponer de una gráfica en tiempo real donde se enfrenta la altura y el tiempo, la cual sirve tanto para ver la evolución del río en ese punto (ya que incluye los registros de la última semana) así como para saber donde se sitúan los distintos niveles de alerta, conociendo en todo momento cuan lejos se encuentra el nivel del río de ellos.

El conocimiento en todo momento del estado del cauce fluvial hace que se puedan anticipar como ya se han comentado las actuaciones para prevenir riadas.

Las ARPSIS

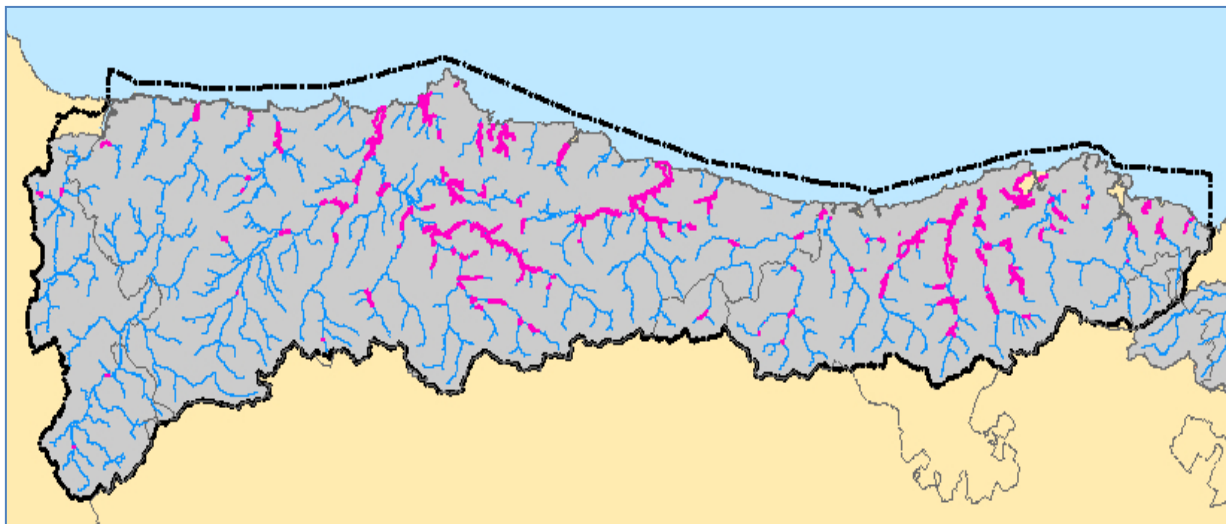
Existen zonas que por sus características son más sensibles que otras a sufrir procesos de inundación, el mejor conocimiento de estas zonas hará que las medidas de prevención sean más eficaces. Para ello se ha desarrollado en España el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI).

El servicio de ÁREAS DE RIESGO POTENCIAL SIGNIFICATIVO DE INUNDACIÓN (ARPSIS) contiene la información cartográfica y alfanumérica de aquellos tramos de cauces de las zonas que han recibido dicha calificación dentro del proceso de implantación de la Directiva 2007/60 de evaluación y gestión del riesgo de inundación, transpuesta al ordenamiento jurídico por el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión del riesgo de inundación.

Tal y como establece el real decreto las ARPSIS son determinadas por el procedimiento de Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación, cuya metodología viene definida en el mismo real decreto. Este proceso consta, explicada de forma resumida, de seis pasos fundamentales:

1. Recopilación de información.
2. Identificación de zonas de peligrosidad de inundación.
3. Estimación de daños y valoración de impactos.
4. Identificación de zonas de riesgo potencial.
5. Análisis de posibles modificaciones del riesgo debidas a obras de defensa o cambios en el uso del suelo.
6. Definición de umbrales y selección de las ARPSIS.

El Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), en su versión para la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental En la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental se han identificado un total de 110 ARPSIS repartidas en las Comunidades Autónomas de Galicia (4), Asturias (60), Cantabria (45) y Castilla - León (1).



Distribución de las ARPSIs en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental. Fuente: Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables en la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental

El Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables recoge la existencia de cuatro ARPSIS dentro de los confines de lo que consideramos como nuestro área de estudio, a saber el tramo alto – medio de la cuenca del río Nalón entre las presas de Rioseco y Priañes. Las ARPSIS recogidas en este son las siguientes, tal y como figuran en la memoria de SNCZI.

CODIGO	PROVINCIA	MUNICIPIO	CAUCE
ES017-AST-29-1	ASTURIAS	Oviedo	NALON - TRAMO MEDIO
ES017-AST-30-1	ASTURIAS	Langreo, San Martín del Rey Aurelio, Laviana	RIO NALON - TRAMO ALTO

A continuación se muestra un croquis de la distribución de las dos ARPSIS con respecto al tramo del río que es objeto de este estudio:



Fuente: elaboración propia

El trabajo de Máximo Calvo Ordás en 2013

En el pasado año 2013, el alumno del Máster de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica de la Universidad de Oviedo, Don Máximo Calvo Ordás, realizó como trabajo de fin de máster la tarea de realizar un desarrollo previo sobre la posibilidad de pergeñar un SIG para la simulación de zonas de inundación en un pequeño tramo del río Nalón situado aguas abajo de la presa de Rioseco y que fue presentado bajo el título de “Desarrollo de un GIS para gestión de riadas utilizando GvSIG” y que fue presentado en la Escuela Politécnica de Mieres.

En este trabajo se planteaba la necesidad de construir un modelo teórico en base a la conjunción de tres sub-modelos que serían:

- Modelo del terreno.
- Modelo hidrológico/hidráulico.
- Modelo meteorológico.

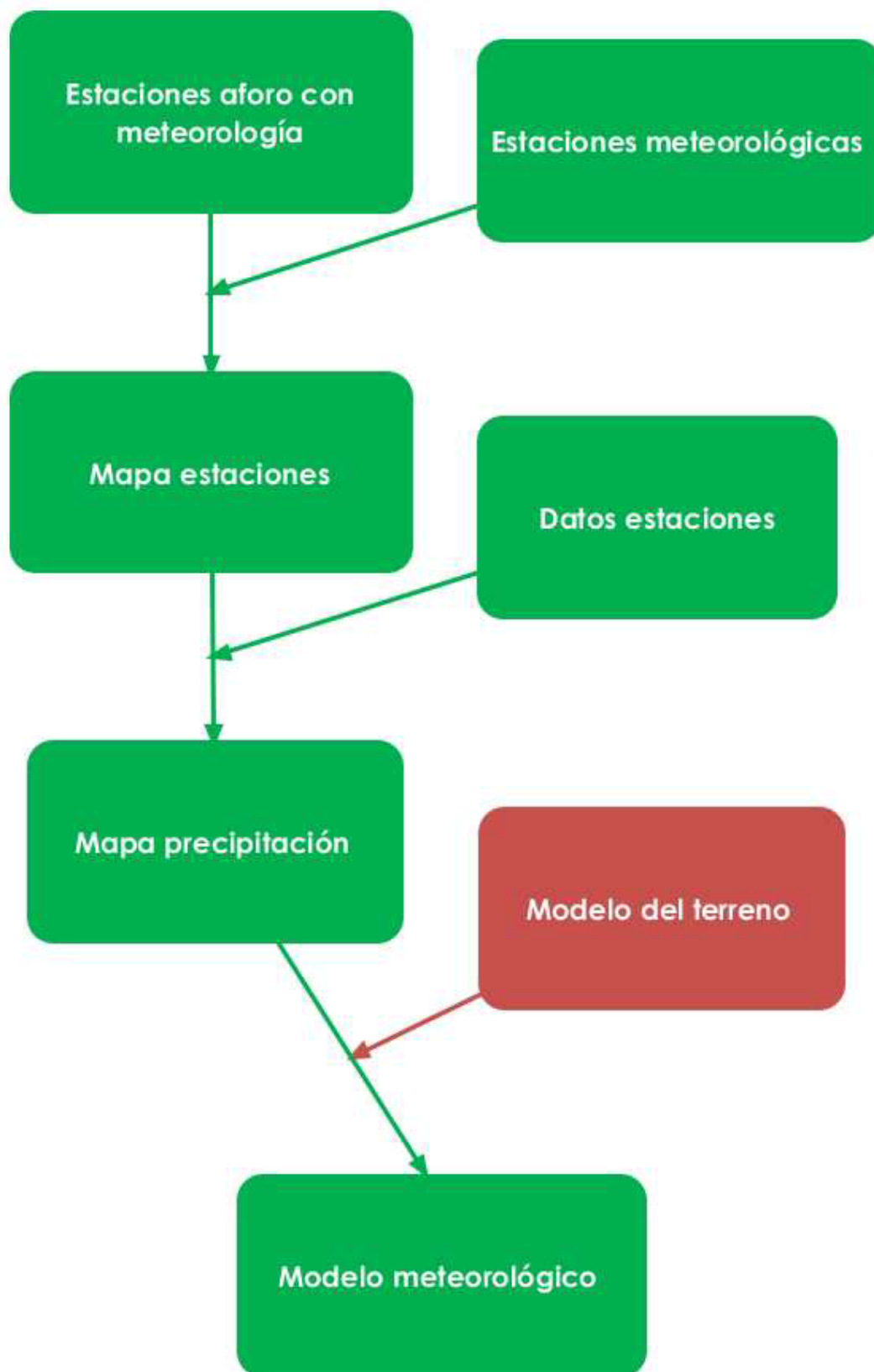
De estos modelos únicamente el modelo de terreno tendría un carácter estático, siendo el de los otros dos, el hidrológico/hidráulico y el meteorológico de carácter dinámico.

Este modelo teórico ideal en la práctica resultaba ser demasiado ambicioso por su complejidad técnica y el volumen de trabajo que representaba su elaboración, además de la imposibilidad de acceder a parte de la información necesaria a través de herramientas de acceso libre y gratuito. En la práctica el trabajo acabó desarrollando un modelo mucho más sencillo. El modelo finalmente empleado por Máximo Calvo desechaba totalmente el modelo meteorológico, debido a la falta de acceso abierto a datos de precipitaciones, y también el componente hidrológico del modelo hidrológico/hidráulico, que necesitaba del meteorológico para hacerse efectivo.

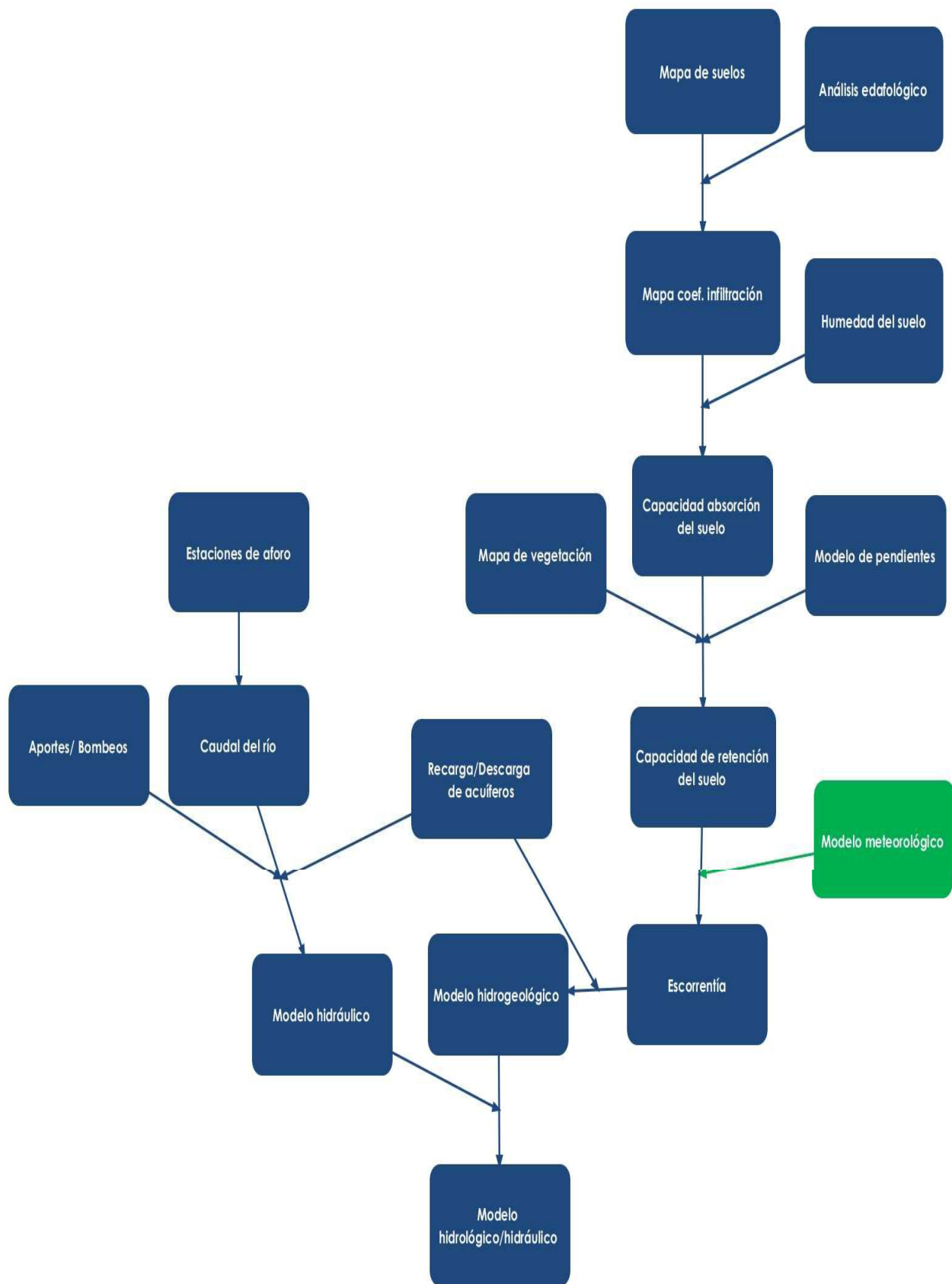
A continuación se incluyen los esquemas gráficos de los tres modelos:



Modelo de terreno. Fuente: Máximo Calvo Ordás 2013



Modelo meteorológico. Fuente: Máximo Calvo Ordás, 2013



Modelo hidrológico/hidráulico. Fuente: Máximo Calvo Ordás, 2013.

En definitiva Máximo Calvo utiliza la conjunción del modelo de terreno con el modelo hidráulico del río en cuestión para la creación de un modelo final de riadas.

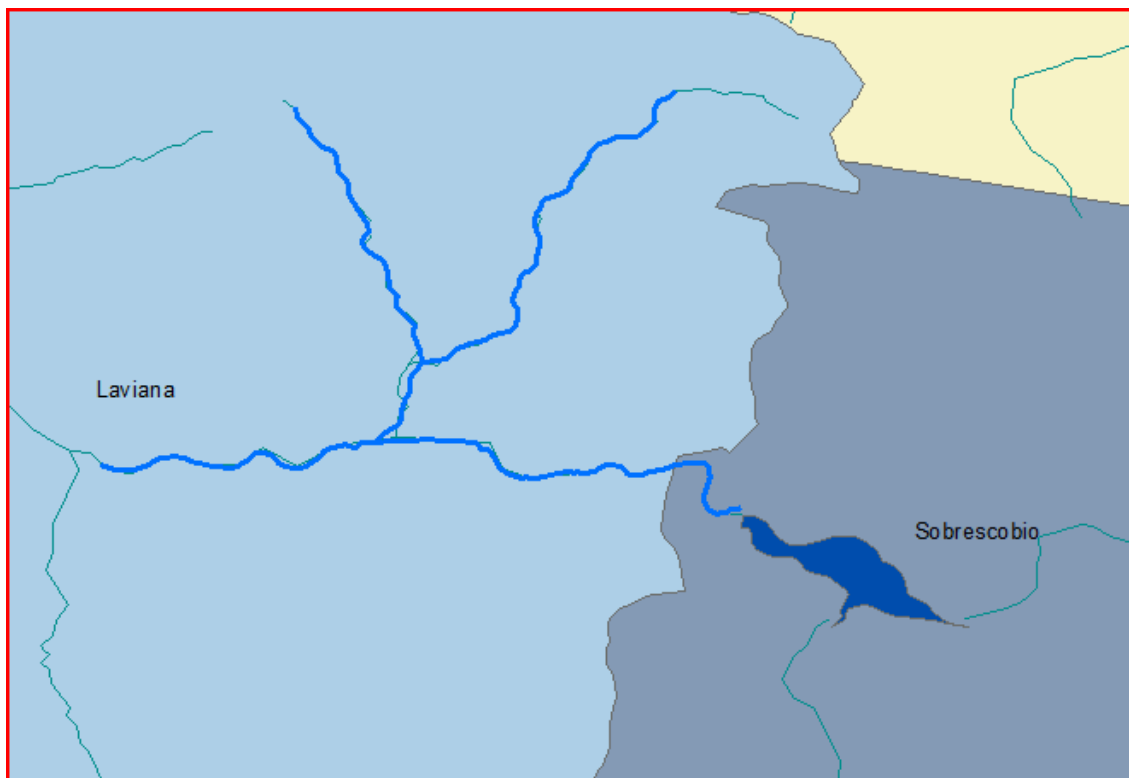
En lo que al desarrollo práctico de la simulación de riadas se refiere, Máximo escogió para el mismo la utilización de la herramienta de software libre Hec Ras, desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América. Este programa, utilizado en conjunción con software de GIS, permite la recreación de condiciones de flujo en cauces naturales y canales artificiales a través del siguiente proceso (expuesto aquí de forma resumida, se detalla más adelante):

- Pre-procesado de la información en Hec Geo Ras: determinación de la geometría del curso fluvial, cauce y llanuras de inundación. Creación de líneas de corte y conjunción de la información geométrica con el modelo de terreno. Esta información geométrica en conjunción con la correspondiente a elevaciones se combina para crear dos capas: un perfil del río en 3D y las líneas de corte también en 3D, que son las capas con las que trabajará el software de simulación. Exportación de datos a Hec Ras.
- Procesado de los datos en Hec Ras: importación de datos del pre-procesado. Introducción de las condiciones de altura y volumen de flujo. Computación de la simulación. Exportación a GIS.
- Representación gráfica: importación de datos desde Hec Ras. Representación gráfica de la simulación con respecto al modelo de terreno.

La zona de estudio elegida por Máximo Calvo fue un pequeño tramo del río Nalón sito justo a la salida de las aguas de la presa de Rioseco, junto con dos de sus afluentes, el reguero Comillera y la vallina Bustovellín.



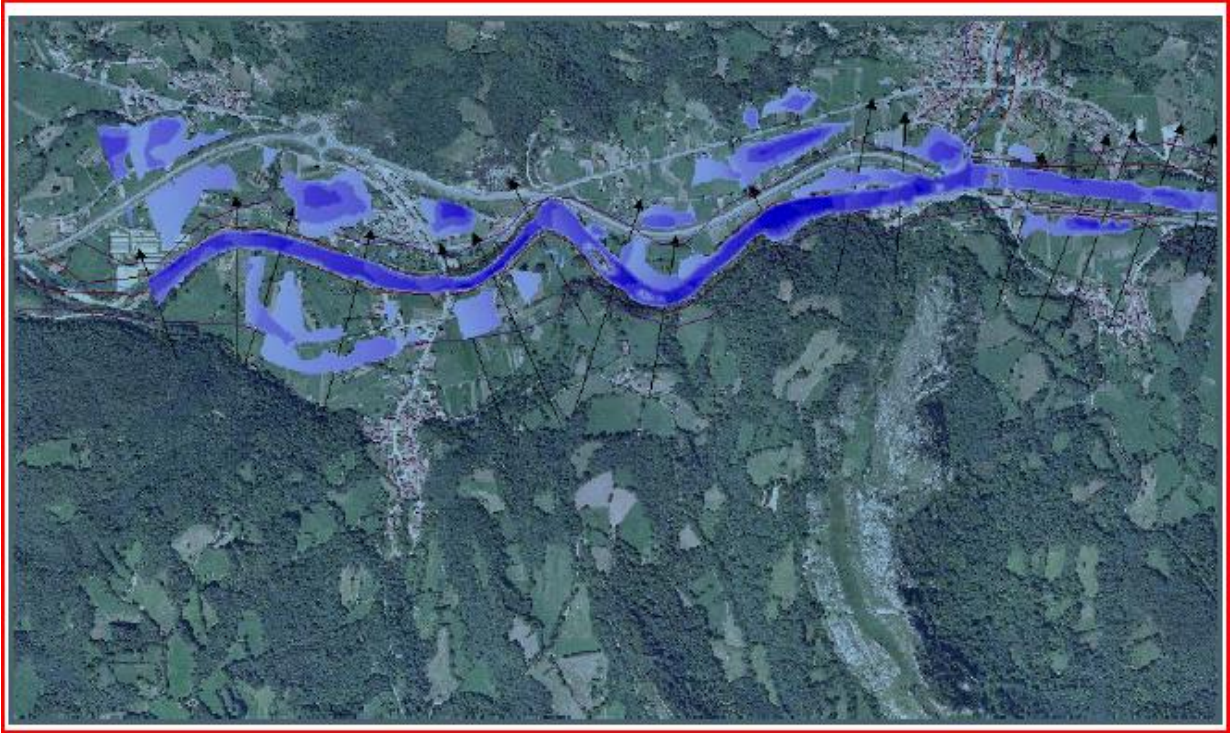
Esquema de la localización del tramo estudiado en el trabajo de Calvo en la comunidad. Fuente: elaboración propia.



Esquema de tramo fluvial del trabajo de Máximo Calvo, con el embalse de Rioseco. Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos por Calvo eran prometedores, en tanto que consiguió realizar simulaciones de inundación para periodos de retorno de 100 y 500 años y también para condiciones normales. El principal problema que planteaba el estudio de los resultados del trabajo consistía en la irregularidad de la capa que

representaría la lámina de agua, la cual en lugar de materializarse como una lámina continua, que es lo que se esperaría por simple lógica, la superficie inundada se representaba a base de parches, tal y como se muestra en la figura siguiente, extraída del trabajo de Calvo:



Representación de la lámina agua de inundación. Fuente: Máximo Calvo, 2013

En el propio trabajo se planteaban una serie de hipótesis sobre las posibles causas y soluciones del problema:

- Utilización de un TIN de mayor resolución.
- Aumento del número de líneas de corte transversales.
- Reducción de los márgenes de la llanura de inundación.

En conclusión en trabajo de fin de máster de Calvo dejaba sentadas las bases para la realización simulaciones de inundación y planteaba incluso su posible utilidad comercial como herramienta de gestión de los procesos de suelta de aguas en las presas situadas aguas arriba de la zona estudiada, dejando abierta la puerta a trabajos posteriores en pro de la ampliación geográfica del área de estudio y a la corrección de la fenomenología de los parches de agua en el resultado final.

Objetivos del trabajo

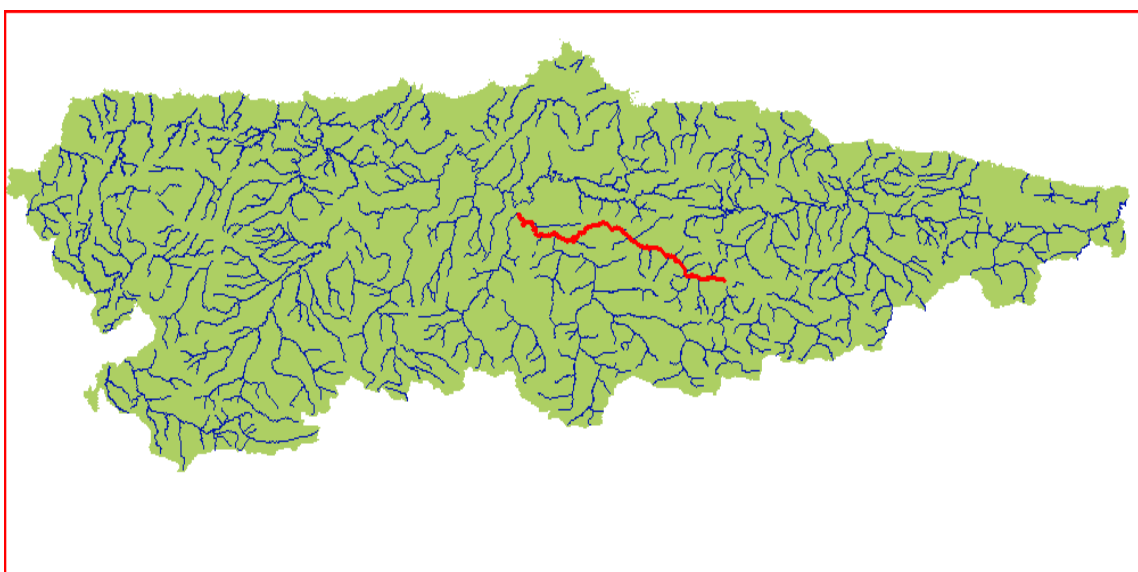
De acuerdo con los antecedentes expuestos en este estudio relativos a la importancia de la gestión del riesgo de inundación, la información disponible, la catalogación de Áreas de Riesgo Potencial de Inundación y el trabajo realizado por el alumno del máster de Teledetección y SIG de la Universidad de Oviedo, Máximo Calvo, en el año 2013; el presente estudio enfocado al desarrollo de un SIG para la gestión de riadas, nace con los siguientes objetivos primordiales:

- Recreación del procedimiento de simulación de inundación llevado a cabo por Máximo Calvo.
- Elaboración de un protocolo para la realización de simulaciones de inundación lo suficientemente detallado, exhaustivo e inteligible como para permitir a cualquier persona con conocimientos muy básicos de SIG poder realizar el mismo proceso en el mismo río u otros cualesquiera. Este objetivo es especialmente importante debido a la escasez de información disponible en castellano en la Red.
- Estudio de la información disponible a fin de determinar la posibilidad de acceder a información meteorológica en tiempo real que permitiera la integración del modelo meteorológico en el modelo de riadas.
- Ampliación de la zona geográfica de estudio con respecto de la tratada en el trabajo de Máximo Calvo para cubrir todo el tramo medio del río Nalón.
- Estudio y corrección de la fenomenología de aparición de parches de agua en la representación gráfica de las zonas inundadas.
- Creación de una herramienta de gestión que, combinando los datos conocidos de precipitación y caudal, y en base a las simulaciones realizadas, permita facilitar la normalización de la gestión de la suelta de aguas en las presas con respecto de sus posibles consecuencias sobre el desbordamiento del cauce.

Procedimiento

Área de estudio

Nuestra área de estudio se define como el tramo medio y alto de la cuenca del río Nalón, en el tramo comprendido entre las presas de Rioseco, sita en el concejo de Sobrescobio, y el embalse de El Furacón, sito dentro del término municipal del concejo de Oviedo.



Ubicación de nuestro entorno de estudio en la comunidad autónoma. Fuente: elaboración propia

Nuestra zona de estudio comienza justo en la desembocadura de la presa de Rioseco, que junto con la de Tanes forma uno de los embalses de mayor importancia de la comunidad. Se trata de una presa de titularidad privada, gestionada actualmente por la empresa Hidroeléctrica del Cantábrico (filial de Energías de Portugal) con una cuenca receptora de 337 Km², situada en el concejo de Sobrescobio a una cota de 370 m sobre el nivel del mar. Su embalse cuenta con una capacidad de unos 5 Hm³, según datos del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.

Si nuestra zona de estudio comienza en cabecera en la presa de Rioseco, termina en el embalse de El Furacón, que forma la presa de Priañes, sito en el término municipal de Oviedo. Se trata de un embalse con una cuenca receptora

de 340 Km², situado a una altitud de 83m². Su capacidad aproximada es de 2 Hm³.

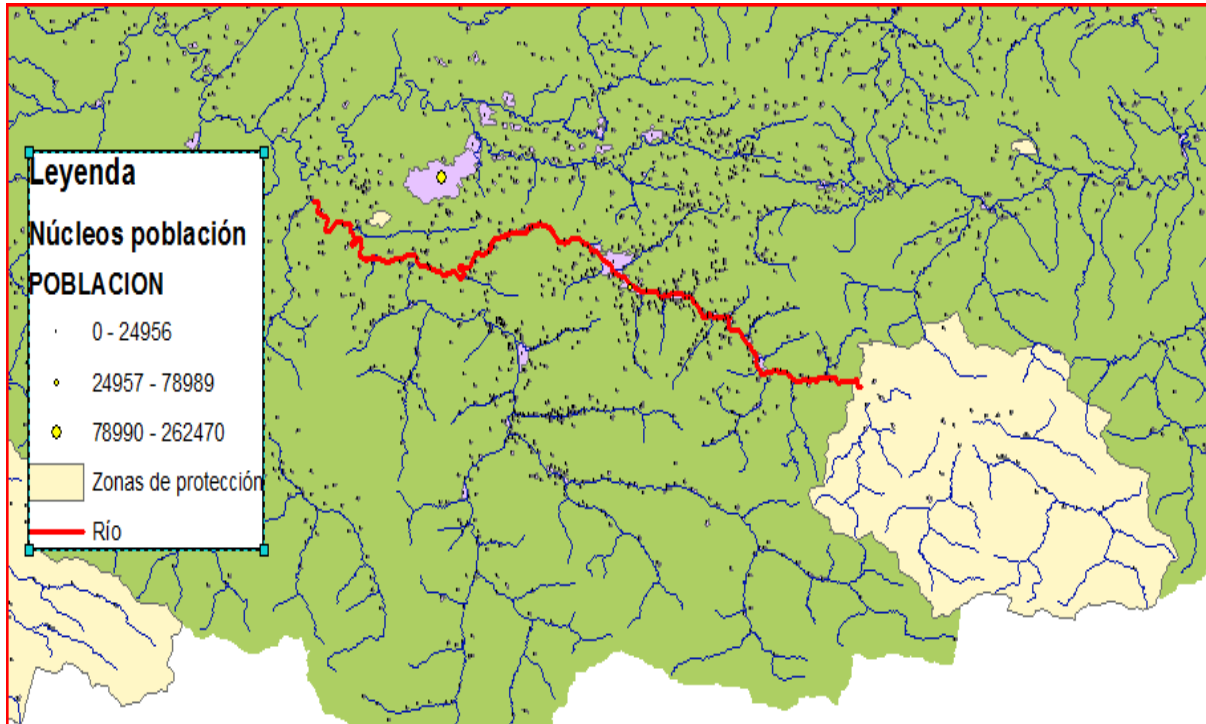
Ambas presas juegan un papel muy importante en la regulación del cauce, pues dependiendo de la política de suelta y reserva del agua retenida en las mismas dependerá en gran medida el volumen de agua que circule por el cauce del río y su variabilidad temporal.

Se trata de un tramo de río cuya cuenca drenante ocupa una superficie aproximada de 340 Km² y tiene cabida en los municipios de Sobrescobio, Laviana, San Martín del Rey Aurelio, Langreo, Oviedo y Ribera de Arriba, tal y como se aprecia en la siguiente figura:



Esquema de los municipios en los que se comprende el área de estudio. Fuente: elaboración propia.

El tramo del río está ubicado en la zona central de Asturias, con gran cercanía a multitud de núcleos de población y lindando por su extremo de cabecera con una zona de especial protección como es el Parque Natural de Redes.



Ubicación del tramo del río con respecto a núcleos de población y espacios protegidos. Fuente: elaboración propia

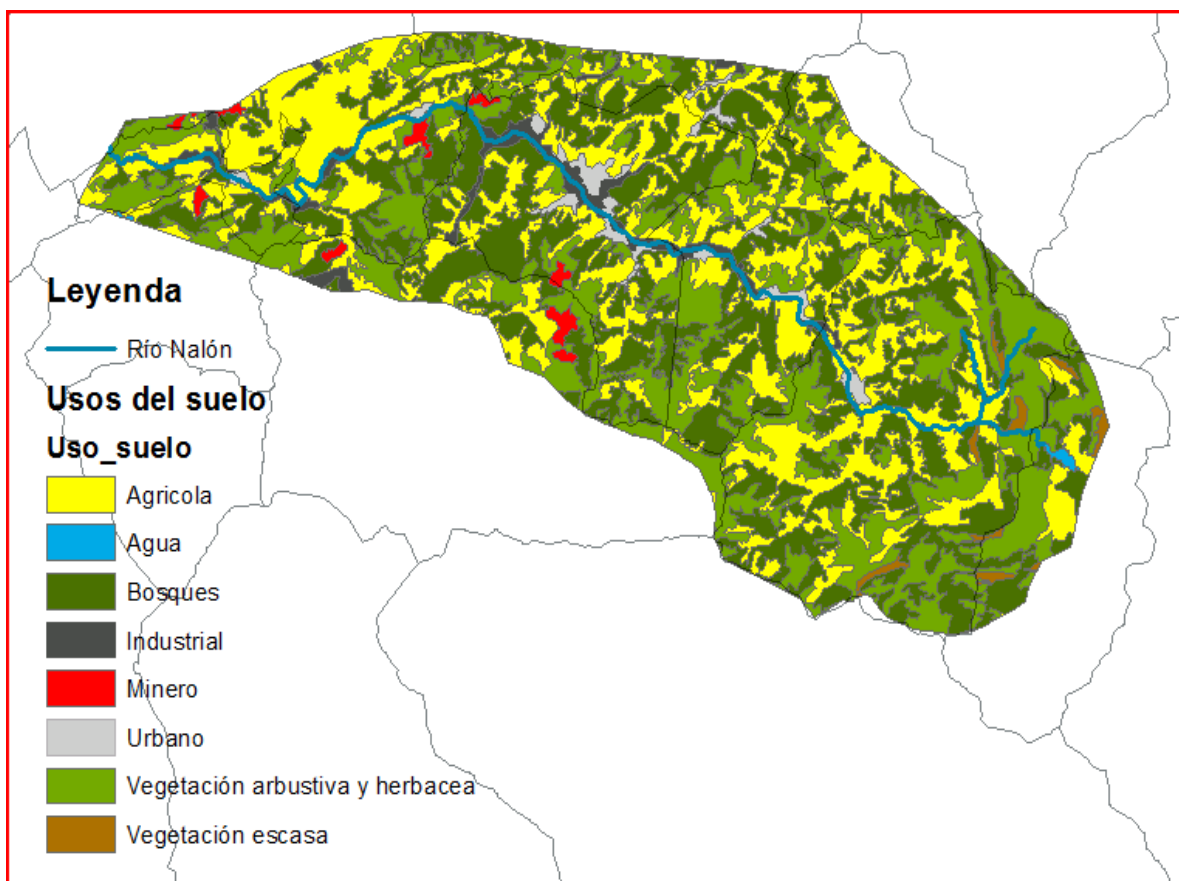
A nivel **geológico** la cuenca del Nalón se encuentra enclavada en se encuentra enclavada dentro del denominado Macizo Ibérico, una unidad geológica que se extiende por buena parte de la Península Ibérica y que está formado por rocas precámbricas y paleozoicas emplazadas durante el ciclo orogénico hercínico. Desde un punto de vista estrictamente litológico, la Demarcación del Cantábrico Occidental está formada en su mayor parte por rocas sedimentarias mixtas (mezcla de materiales siliciclásticos y carbonatados).

A nivel **socioeconómico** se debe de mencionar que los municipios del área de estudio alcanzan en conjunto una población total de unos 266.021 habitantes, aproximadamente un 25,1% de toda la población de la comunidad autónoma, aunque también es importante destacar que una parte muy importante de esa población es la que corresponde a la de la ciudad de Oviedo, que se encuentra situada relativamente alejada del cauce del río y por tanto de las potenciales áreas de inundación.

En lo que se refiere a los **usos del suelo**, tal y como se aprecia en el siguiente esquema, aunque el uso principal que reciben las superficies de los municipios de la cuenca drenante es de tipo agrícola o forestal/vegetativo, existe un fuerte componente urbano e industrial en los suelos que rodean el cauce del río. Además se pueden localizar varias zonas de uso destinado a la explotación

minera en terrenos muy próximos al cauce del río y coincidentes con espacios catalogados como Áreas de Riesgo Potencial de Inundación.

A continuación se incluye un croquis sobre la distribución espacial de los diferentes usos del suelo en los terrenos próximos al cauce del río en el área de estudio:



Fuente: elaboración propia

Software empleado

Para la realización de las simulaciones de inundación de este trabajo no es suficiente con la utilización de herramientas de SIG como podrían ser el programa GvSIG o ArcGIS, sino que necesitamos un software específico con capacidad para procesar los datos relativos a la altura y volumen de los flujos de agua y hacer computaciones en base al régimen hidráulico escogido y a las características del entorno biótico y abiótico.

En base al precedente sentado por el trabajo de Máximo Calvo y a los numerosos estudios que avalan esta decisión, se ha decidido emplear el software libre denominado HecRas y su extensión para SIG Hec Geo Ras.

HEC-RAS, modelo público desarrollado del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU., es un programa de hidráulica para modelizar el comportamiento de un caudal artificial o en un cauce natural.

HEC-RAS tiene una interfaz gráfica de usuario que facilita las labores de preproceso y postproceso, así como la posibilidad de intercambio de datos con el sistema de información geográfica ArcGIS mediante HEC-GeoRAS. El modelo numérico incluido en este programa permite realizar análisis del flujo permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre.

La información y documentación relativa a este programa disponible en la red es escasa, especialmente cuando se trata de encontrarla en lengua castellana, en la cual las únicas referencias a su utilización se encuentran en los manuales publicados por el Área de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Granada. Por este motivo es especialmente importante cumplir con el objetivo, de entre los expuestos anteriormente en este trabajo, de desarrollar un protocolo de utilización de Hec Ras y Hec Geo Ras para la realización de simulaciones de inundación.

Acopio de datos

Para la recopilación de los datos necesarios para el desarrollo del presente trabajo se han recurrido a diversas fuentes y organismos oficiales, dependiendo del área de estudio del presente trabajo, consideración en torno a la cual vamos a estructurar este apartado.

A modo resumen, los diferentes aspectos sobre los que tenemos que recopilar información son:

- Datos en tiempo real y series históricas de caudal y nivel del río.
- Datos de precipitaciones, históricos y en tiempo real, para la posible elaboración del Modelo Meteorológico.
- Modelo digital de elevaciones.
- Modelo TIN del terreno.
- Ortofotografías.
- Cartografía de usos del suelo.
- Cartografía básica ríos y embalses.

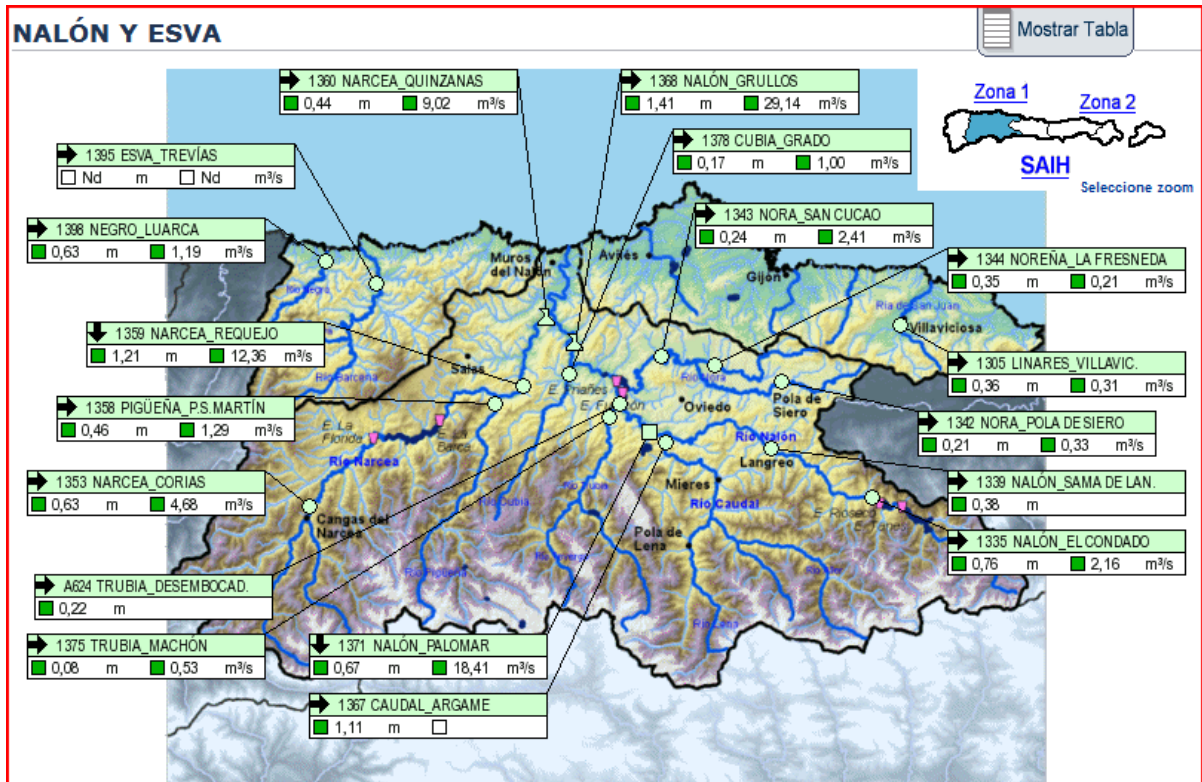
A continuación se expone como se ha obtenido la información de cada uno de los puntos anteriores.

Anuario de aforos

El Anuario de Aforos se viene realizando desde el año hidrológico 1953-54, para lo cual es necesario realizar las siguientes actividades:

- Recepción y tratamiento de la información de los distintos datos de cada embalse, canal y estación evaporimétrica.
- Cálculo y elaboración de datos diarios de cada estación de aforos, embalse y canal.
- Cálculo de los resúmenes de la serie de años de los datos de cada estación de aforos, embalse y canal
- Confección de los cuadros de datos de las estaciones evaporimétricas.
- Elaboración de anuario.

La red de estaciones de control SAIH cantábrico dispone de cuatro estaciones en el río Nalón, cuya información está accesible en la página web <http://saih.chcantabrico.es/cantabrico/index.php?url=/datos/mapas/mapa:H13/area:HID/acc:0>, tal y como figura en la siguiente captura de pantalla:



Esquema de las estaciones de aforo de la red SAIH Cantábrico en la zona. Fuente: saih.cantabrico.es

Las estaciones por tanto que son de consideración para nuestra zona de estudio son:

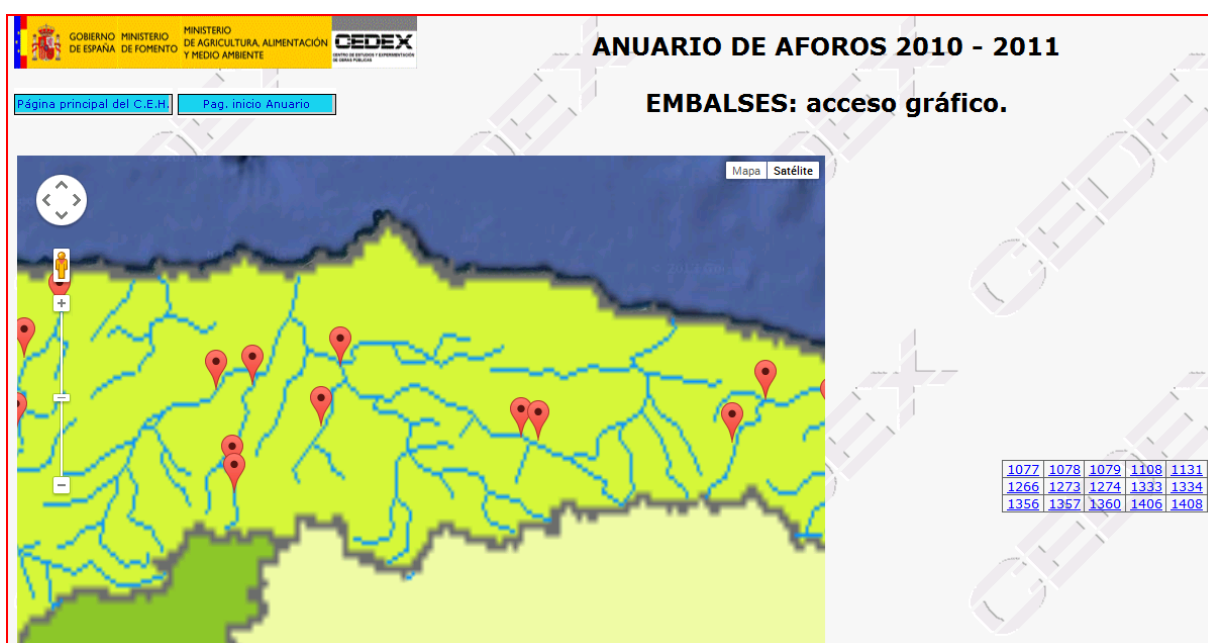
- El Condado (Laviana)
- Puente de Sama (Langreo)
- Palomar (Ribera de Arriba)

A continuación se exponen algunos de los datos característicos de estas estaciones:

Estación	Código	Cota (m)	Inicio	Pluviómetro	Tipo sensor
El Condado	1335	366	1912	Sí	Limnígrafo
Puente de Sama	1339	213	2011	No	-
Palomar	1371	165	2004	No	Radar

En la página web del SAIH Cantábrico anteriormente citada se puede acceder a la información relativa a la altura del nivel del agua y al caudal transportado por el río, ambos datos actualizados en tiempo real cada 15 minutos. En esta página web no están disponibles no obstante datos históricos de caudales o nivel de agua.

Otra fuente disponible de datos es la que pone a disposición pública el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) organismo autónomo adscrito a los ministerios de Fomento y Medio Ambiente. En la página web <http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/default.asp> se pone a disposición del ciudadano información relativa a datos históricos de caudales diarios y mensuales de las distintas estaciones de aforo de la red SAIH cantábrico, así como también numerosa y valiosa información sobre datos diarios y mensuales de entrada y salida para los embalses de la zona de estudio. La información sobre las diferentes estaciones de aforo o los embalses es accesible mediante mapas sensibles tal y como se muestra en la figura siguiente:



Mapa sensible de acceso a embalses. Fuente: Anuario de aforos 2010-2011 CEDEX

Otro recurso de inestimable importancia para la recopilación de datos procedentes de las estaciones de aforo y embalses de la zona de estudio es la dispuesta por el MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente) a través del visor SIG accesible mediante el enlace <http://sig.magrama.es/aforos/> donde se puede visualizar y descargar abundante cantidad de datos históricos del Anuario de Aforos.

Estaciones de aforo en ríos

Estación	1335 RIO NALON EN CONDADO, EL
Estado	ALTA
RIO	NALON
Superficie aguas arriba (km2)	343
Superficie del tramo del río (km2)	4.866
Altitud (m)	366
Altitud máxima (m)	2.104
UTM X H30 ETRS89	297.926
UTM Y H30 ETRS89	4.789.562
Hoja 1:50.000	RIOSECO
Confed. Hidrográfica	CANTABRICO
Municipio	LAVIANA
Provincia	ASTURIAS
Autonomía	ASTURIAS, PRINCIPADO DE
Observaciones	

Estadísticas de caudales de la serie histórica:

Advertencia

Datos generales
Caudales medios
Caudales medios mensuales

Cuantiles

Datos generales

Número total de años hidrológicos con datos	48
Número de años hidrológicos con datos completos	41
Número de años hidrológicos con datos incompletos	7
Año inicial de la serie	1912
Año fin de la serie	2010

Fotografía

Sección

Plano

Exportar a excel

Exportar a PDF

Ver Informe

Seleccione entre las siguientes opciones para ver los datos específicos que desee consultar:

Periodo seleccionado

Año hidrológico inicial:

Año hidrológico final:

Datos a mostrar

Datos diarios

Datos mensuales

Datos anuales

Memorias Anuarios

Mostrar datos

Ejemplo de información disponible de la estación de El Condado en Laviana. Fuente: Visor SIG MAGRAMA

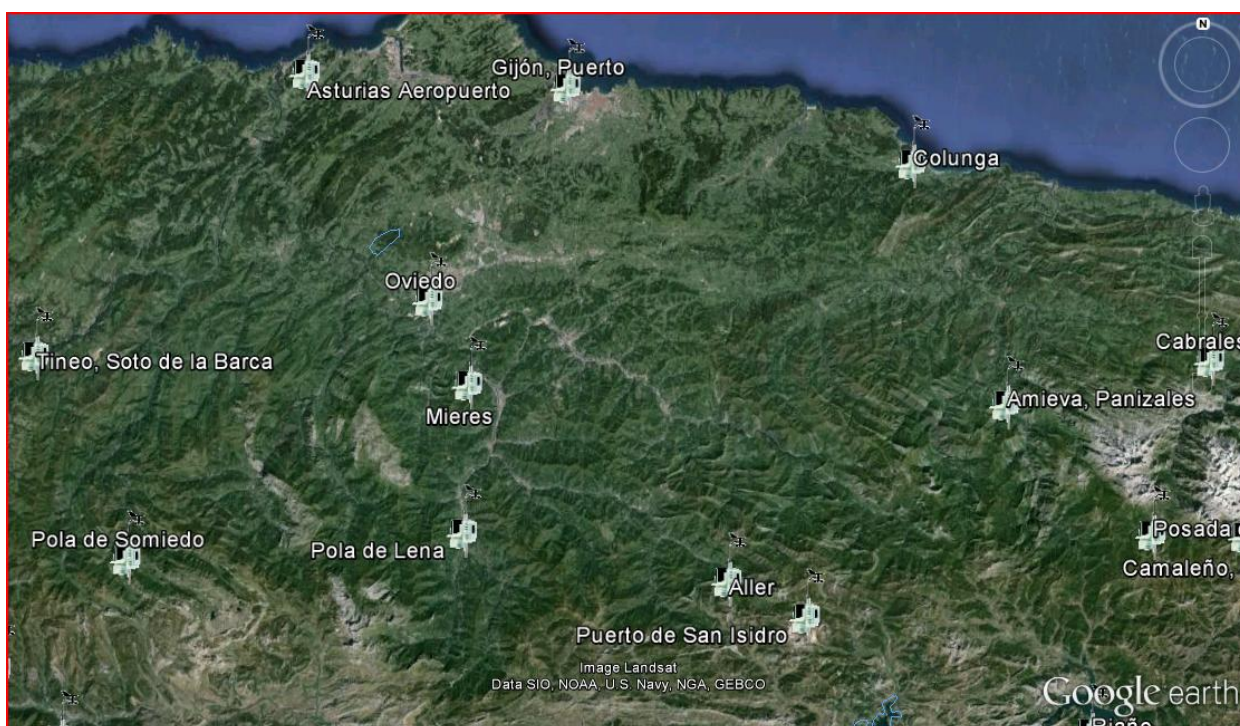
El último método empleado para la obtención de datos del Anuario de Aforos ha sido el de la solicitud directa de los datos a la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, para lo cual ha bastado con una llamada telefónica y una solicitud por correo electrónico especificando los datos requeridos y las estaciones para los que se solicitaban. Así por este método se han obtenido los datos de toda la serie histórica para las estaciones de El Condado, Puentes de Sama y Palomar.

Modelo meteorológico

Para la realización de un modelo meteorológico lo fundamental es poder disponer de datos de precipitación, tanto históricos como en tiempo real. Actualmente se pueden disponer de este dato de precipitación actualizado cada 15 minutos de las estaciones de aforo de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, muchas de las cuales disponen de un pluviómetro incorporado.

En lo que respecta a la posibilidad de obtención de datos de la Agencia Estatal de Meteorología existen dos limitaciones importantes. La primera es que desde

2012 el acceso a los datos, que antes estuvieron durante varios años abiertos al público de forma gratuita, se ha restringido y ahora solamente son accesibles previo pago de una cantidad económica de acuerdo a las tarifas establecidas. La segunda es la ausencia de Estaciones de Medición Automática en todo el territorio de la cuenca media-alta del Nalón, tal y como se aprecia en la siguiente captura de pantalla de Google Earth:



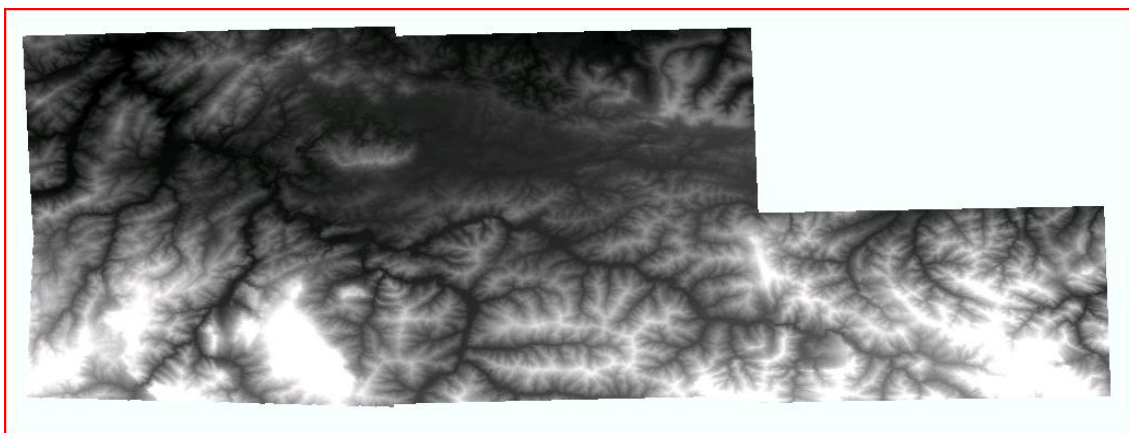
Esquema de localización de EMAs de la AEMET. Fuente: foro.tiempo.com

La cartografía básica para la realización de este estudio ha sido obtenida por descarga directa del Centro de Descargas de la página web del Instituto Geográfico Nacional, en adelante IGN. De ahí se han obtenido los modelos digitales de elevaciones, en adelante MDE.

Se ha seleccionado el de mayor resolución posible, el MDT05-LIDAR, que es un modelo digital del terreno con paso de malla de 5 m, con la misma distribución de hojas que el MTN50. Formato de archivo ASCII matriz ESRI (.asc). Sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM en el huso correspondiente a cada hoja. Según la hoja de que se trate, el MDT05 se ha obtenido de una de las dos siguientes formas: por estereocorrelación automática de vuelos fotogramétricos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con resolución de 25 a 50cm/píxel, revisada e interpolada con líneas de ruptura

donde fuera viable, o bien por interpolación a partir la clase terreno de vuelos LIDAR del PNOA.

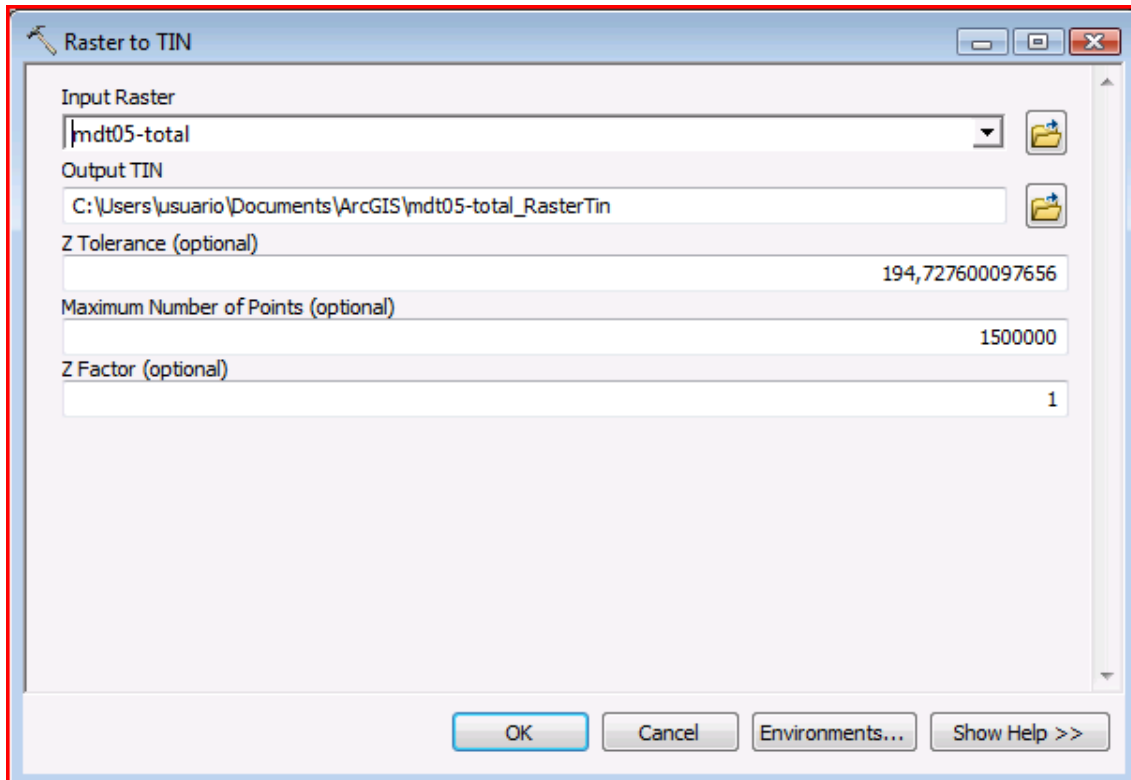
El MDT marcará mucho la precisión del modelo, es por ello por lo que sería deseable contar con un modelo digital del terreno de la mayor resolución posible, en este caso el modelo de mayor resolución disponible para el público es el de 0.5, consta que a día de hoy en Asturias se están realizando vuelos LIDAR sobre zonas recogidas en los ARPSIs con el fin de obtener modelos digitales del terreno de gran precisión, y es esperable que en un futuro no muy lejano estuviesen disponibles al público en general.



Mosaico compuesto por las hojas descargadas del MDT05-LIDAR. Fuente: elaboración propia

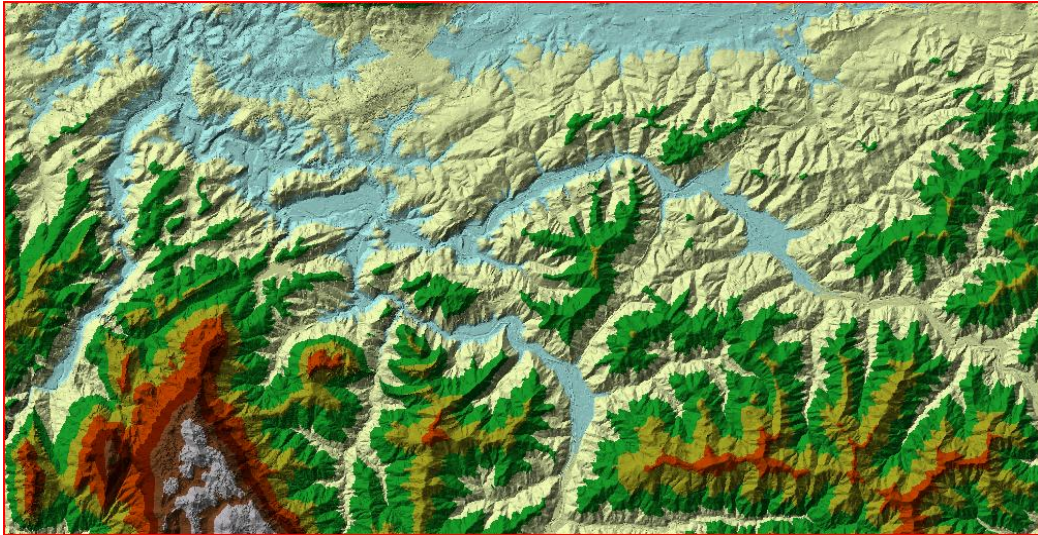
Para la obtención del modelo TIN (acrónimo del inglés Triangulated Irregular Network) del terreno partiremos del MDE generado anteriormente. El TIN es una representación de superficies continuas derivada de una estructura de datos espacial generada a partir de procesos de triangulación. Una malla TIN conecta una serie de puntos a través de una red de triángulos irregulares cuyos vértices se corresponden con dichos puntos, los cuales tienen las coordenadas x, y y z de donde se localizan. La teselación resultantes configuran el modelo de superficie.

Como hemos indicado para la obtención del TIN de la zona partiremos del MDE obtenido por composición de las hojas del MTN05-LIDAR descargadas. Sobre este ejecutaremos la herramienta de ArcToolBox 3D Analyst Tools/Conversion/From Raster/Raster to Tin.

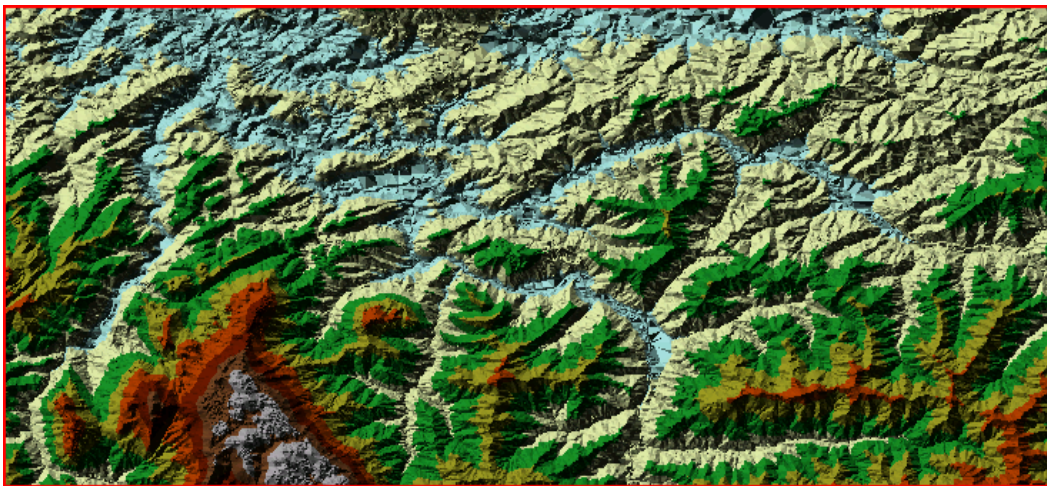


Recorte de pantalla de la herramienta para la creación del TIN. Fuente: elaboración propia.

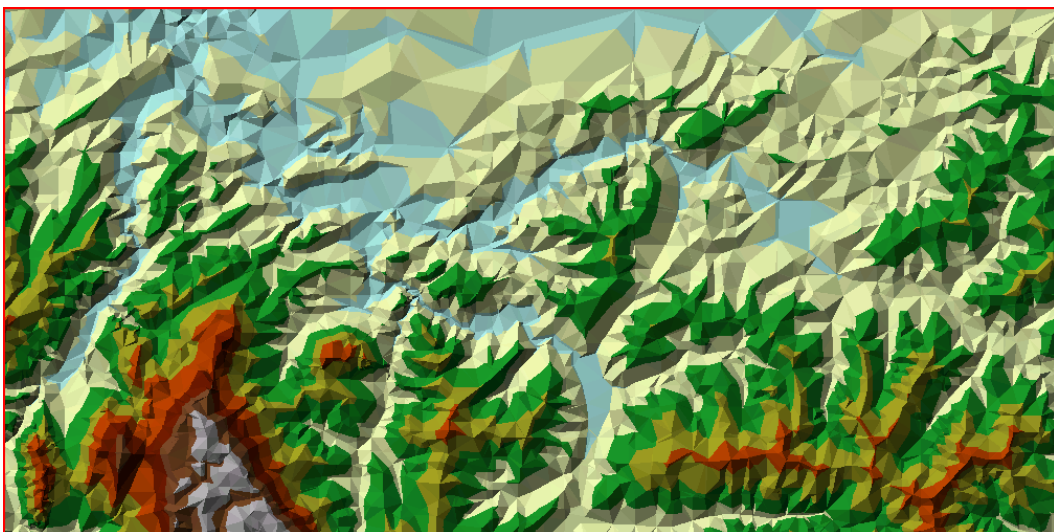
Dependiendo de la tolerancia Z y del número máximo de nodos que le otorguemos, el TIN tendrá un mayor o menor ajuste al modelo real del terreno. A continuación se expone algunos de los TIN con diferentes números de nodos utilizados:



Ejemplo TIN 10.824.218 nodos. Fuente: elaboración propia.



Ejemplo TIN de 1.329.387 nodos. Fuente: elaboración propia.



Ejemplo TIN 30.608 nodos. Fuente: elaboración propia.

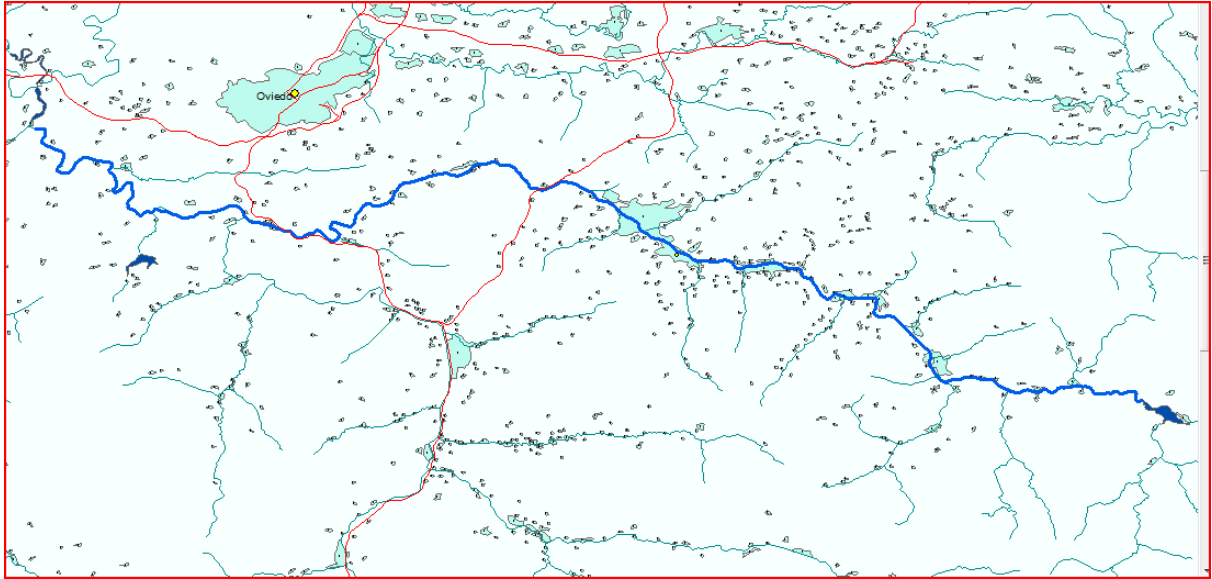
En lo que se refiere a las ortofotografías, éstas proceden PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) están en formato ECW, sistema geodésico dereferencia ETRS89 y proyección UTM en su huso correspondiente. La unidad de distribución y descarga es la hoja del MTN50 (Mapa Topográfico Nacional 1:50.000), resultado de componer un mosaico con las ortofotos correspondientes a cada hoja del MTN50. Un mosaico de Máxima Actualidad por hoja MTN50 se forma seleccionando de entre toda la información de ortofotografía PNOA disponible, aquella que tenga una fecha de referencia más reciente, y en caso de coincidencia, se seleccionará la que tenga un tamaño de píxel menor. Cada mosaico va acompañado de un archivo de metadatos (xml) y un archivo shape (comprimido en formato zip) formado por recintos que indican, para cada píxel del mosaico, la resolución geométrica y la fecha de toma de la ortofotografía.

Las hojas del MDT y las ortofotos corresponden a las hojas número 28, 29, 52, 53 y 54 del Mapa Topográfico Nacional 1:50.000

Para la obtención de un mapa de usos del suelo recurriremos a la cartografía del Corine Land Cover, sistema geodésico ETRS89 (en Canarias, WGS84/REGCAN95) y proyección UTM huso 30 (en Canarias, huso 28), que está disponible de ser descargado en la página web del IGN. A los usos del suelo les asociaremos un coeficiente de rugosidad de Manning para su posterior incorporación al modelo de riadas final, estos datos se pueden encontrar en el Anejo V de la guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables.

En lo que respecta a la cartografía de cursos fluviales y embalses, recurrimos al BCN200 del IGN. La Base Cartográfica Numérica a escala 1:200.000 (BCN200) es un conjunto de datos geográficos vectoriales obtenido por digitalización y edición de la información originalmente contenida en la serie de Mapas Provinciales a escala 1:200.000 del IGN, posteriormente enriquecida y actualizada mediante la generalización de los datos de BCN25.

Esta cartografía incluye diversas capas con información geográfica de elementos tales como ríos, embalses, núcleos urbanos, vías de comunicación, centrales eléctricas y otros. A continuación se muestra un croquis de ejemplo de algunas de las capas disponibles en esta cartografía para la zona de estudio, incluyendo ríos, embalses, autovías y núcleos de población.



Ejemplo de la cartografía BCN200 disponible para la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

Procedimiento para simulación de inundación

Como se citó en el apartado de objetivos, uno de los mismos para este trabajo consiste en la redacción de un protocolo para la realización de simulaciones de inundación con Hec Ras, de tal forma que estas puedan ser replicadas o realizadas por una persona con conocimientos muy básicos de manejo de un SIG.

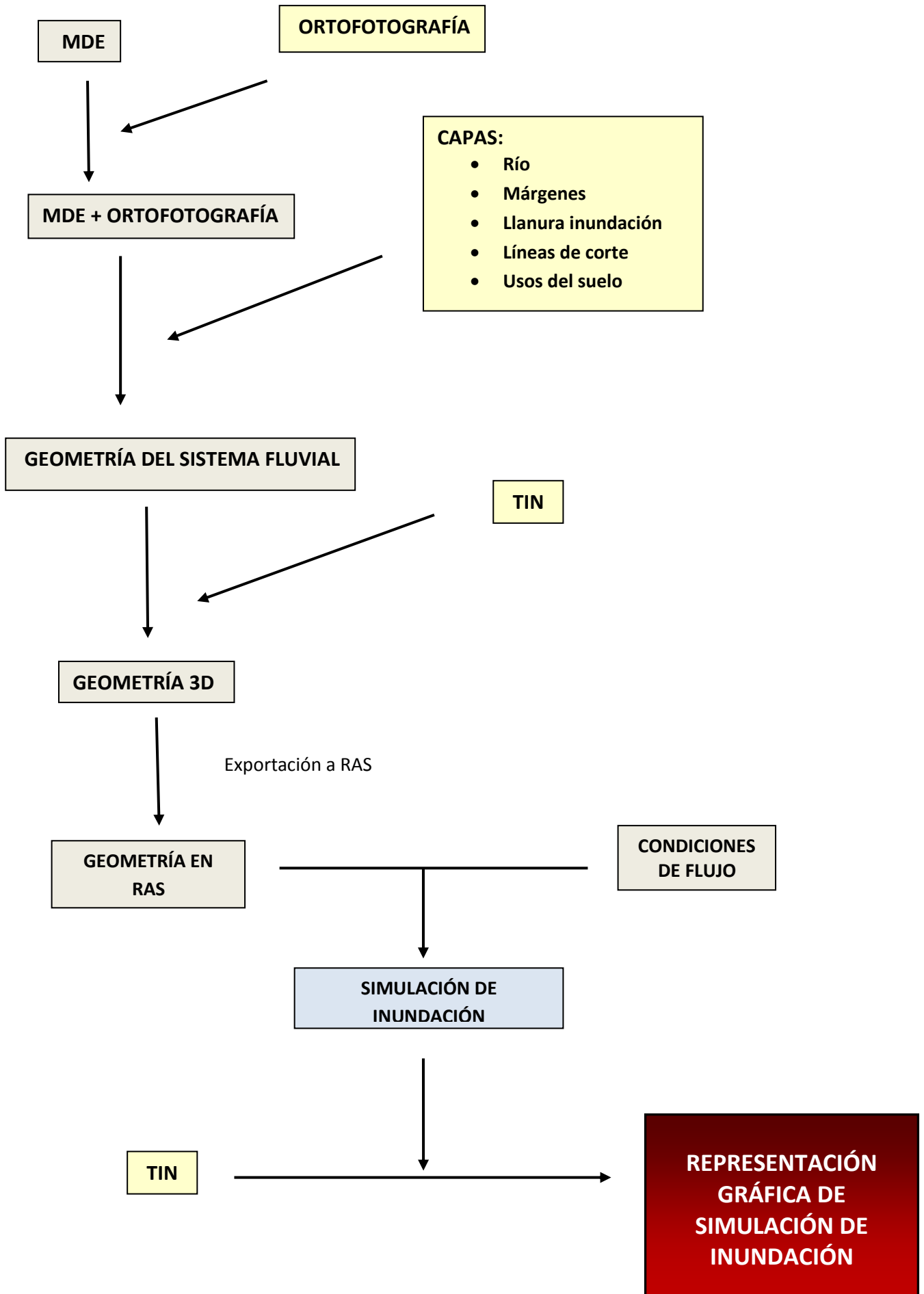
En primer lugar vamos a describir el proceso de simulación de inundación de forma resumida.

En primer lugar deberemos de crear las cinco capas básicas de la geometría del sistema fluvial, que son Río, Márgenes, Llanura de inundación, Usos del suelo y Líneas de corte. Partiendo de la información disponible en el modelo digital de elevaciones y las ortofotos, por proceso de edición, obtendremos digitalizando la geometría de las cinco capas.

Sobre la geometría ya creada y con la información disponible en el TIN, crearemos las capas con información sobre elevación, con lo que ya tendremos la geometría del sistema fluvial en tres dimensiones. Utilizando la aplicación Hec-GeoRas prepararemos el material para la exportación a HecRas, donde le introduciremos las condiciones de flujo para los diferentes tramos de la geometría y podremos computar la simulación de inundación.

Los resultados de la simulación los exportaremos nuevamente a ArcMap mediante Hec-GeoRas y procedemos al cruzamiento de los datos de altura de la lámina de agua con los de altura del terreno, generándose automáticamente la superficie de inundación.

A continuación se muestra el modelo esquematizado de este proceso:



El programa empleado para el cómputo de la simulación es el HecRas4.1.0, si bien el preprocesado de los datos geométricos previo al cómputo de la simulación, y también su representación gráfica postprocesado, han de hacerse en el visor de ArcMap a través de la herramienta HecGeoRas, que es una extensión de HecRas diseñada para integrarse en la interfaz de ArcMap como barra de tareas. Por tanto las herramientas de *software* a utilizar son:

- ArcMap 10, y dentro de esta principalmente la barra de herramientas HecGeoRas
- HecRas 4.1.0

Como se deduce del párrafo anterior, el proceso de simulación puede ser dividido en tres subprocesos, que representan las siguientes etapas del conjunto:

1. Preprocesado de los datos: que comprende la representación geométrica de los diferentes elementos de la zona a estudiar, como el cauce río, el modelo de elevaciones, las zonas potencialmente inundables, estructuras de origen antrópico. Estos datos espaciales serán transformados a un formato compatible con HecRas y preparados para su exportación al mismo.
2. Computo de la simulación: realizada en HecRas, en el que se dota a la geometría importada desde el GIS de los datos necesarios para la realización de la simulación y posteriormente se consuma la misma. Los datos resultantes serán exportados nuevamente al GIS, previa re-transformación a un formato compatible.
3. Postprocesado y representación gráfica de los datos: en donde se plasma en ArcMap el resultado de la simulación importado desde HecRas, para su representación gráfica.


La descripción del procedimiento de trabajo la vamos a estructurar en consecuencia a estos tres pasos generales.

1. Preprocesado en ArcMap utilizando HecGeoRas

Abrimos la herramienta ArcMap 10, a través de su acceso directo en el Escritorio del ordenador.

Desdeñamos la posibilidad que nos ofrece el programa de abrir proyectos antiguos y abrimos un proyecto nuevo (en blanco)

Guardamos el proyecto con el nombre que consideremos oportuno, preferentemente incluyendo una referencia a la fecha y a la zona de estudio. Es aconsejable crear una carpeta específica donde guardar el proyecto, pues así nos aseguraremos de tener recopilados todos los archivos secundarios que se nos vayan generando.

En la pestaña “Catálogo”, ubicada normalmente en el borde derecho del visor (si no está desplegado puede accederse a través del icono ) de la barra de herramientas superior, en la opción “Conexiones a carpetas”, buscamos la carpeta que queramos utilizar como área de trabajo, entre las que tenemos ya conectadas. Si no tenemos una ya conectada podemos hacerle mediante la opción “Conectar carpeta...” accesible mediante click derecho con el puntero del ratón sobre “Conexiones a carpetas”.

Aún en la pestaña de “Catálogo”, sobre la carpeta de trabajo escogida en el paso anterior, creamos una nueva geodatabase con click del botón derecho del ratón seleccionamos la opción “Nuevo/Geodatabase de archivos”. Sobre la geodatabase ya creada y visible en Catálogo, hacemos click derecho y escogemos la opción “Generar geodatabase predeterminada”, con lo que especificaremos al programa que esta va a ser nuestra geodatabase de trabajo por defecto para este proyecto.

Sobre la geodatabase ya creada, de nuevo con botón derecho del ratón, escogemos la opción “Nuevo/Dataset de entidades...”. Se nos abrirá una ventana de diálogo en la que tendremos que escoger el nombre del dataset y lo que es más importante, tendremos que definir el sistema de coordenadas de proyección del mismo, en nuestro caso a través de la siguiente ruta: “Projected Coordinate Systems/ UTM / Europe / ETRS 1989 UTM Zone 30”. La ventana de diálogo nos ofrece también la posibilidad de establecer el sistema de coordenadas verticales y la tolerancia XY pero lo desdeñamos.

(Ya tenemos lista la conexión a la carpeta de trabajo, con una geodatabase ya definida por defecto y un dataset de entidades con un sistema de coordenadas horizontales establecido. Sobre este dataset realizaremos la mayor parte del trabajo en ArcMap.

Antes de abandonar la pestaña de catálogo, navegaremos hasta la carpeta donde tengamos el modelo digital de elevaciones (MDE) en formato TIN que deseemos emplear para la representación gráfica de las alturas de los diferentes puntos del terreno. Cargamos el TIN en cuestión en el proyecto, seleccionándolo con el puntero del ratón y arrastrándolo hasta el visor. En la pantalla del mismo se nos desplegará la visualización del TIN, así como aparecerá una referencia al mismo como Capa en la Tabla de Contenidos a la izquierda del visor. En esta tabla podemos desactivar la visualización de la capa para evitarle al programa el esfuerzo de cargar la representación de la capa y a nosotros el tiempo que tarda en hacerlo.

Ya podemos empezar a trabajar con la barra de herramientas de HecGeoRas, que encontraremos en la parte superior del visor. El primer paso será el de crear las siguientes capas (en el orden aquí especificado):

- River
- Banks
- Flowpaths
- XSCutLines
- LandUse

Sobre la pestaña “RAS Geometry” seleccionamos “Create RAS Layers / Stream Centerline”. En el cuadro de diálogo que se nos abrirá le asignamos como nombre “River” y aceptamos. Continuando en la pestaña RAS Geometry, seleccionamos “Create RAS Layers / Bank Lines”. Asignamos nombre Banks a la capa y aceptamos.

De nuevo en la pestaña Ras Geometry, seleccionamos “Create RAS Layers / Flow Path Centerlines”. Asignamos nombre “Flow Paths” y aceptamos.

Pestaña RAS Geometry, seleccionamos “Create RAS Layers / XS Cut Lines”. Asignamos nombre XSCutLines y aceptamos.


Por último, de nuevo en “RAS Geometry/Create RAS Layers / Landuse Areas”. Asignamos nombre LandUse y aceptamos.

Ya tenemos creadas las cinco capas en el dataset de trabajo que representarán la geometría del área de estudio. Estas capas están desprovistas todavía de contenido geométrico, por lo cual no poseen elementos que representar en el visor y los registros de su tabla de atributos están vacíos. En este punto se nos abren dos posibles vías, entre las que escogeremos dependiendo de la naturaleza de nuestro trabajo:

- Crear la nueva geometría para las capas, utilizando las herramientas de la barra de HecGeoRas habilitadas a tal efecto. Esta opción es imprescindible cuando es la primera vez que trabajamos en la zona o necesitamos una geometría nueva.
- Importar la geometría de otras capas ya creadas en otros proyectos anteriores. Esta opción la utilizaremos cuando ya tenemos creada la geometría de la zona en cuestión. Esta es la opción que seguiremos desarrollando en este protocolo.

Para importar la geometría el procedimiento es el siguiente:

- En la ventana de “Catalogo” (la que habíamos utilizado para crear la conexión a la carpeta, la geodatabase y el dataset) buscamos las cinco capas antiguas de las que queremos extraer la geometría, correspondientes a las cinco capas que hemos creado para el presente proyecto.
- Cargamos las capas en el proyecto, arrastrándolas hasta la pantalla del visor o la Tabla de Contenidos. Las capas, al estar dotadas de geometría, mostrarán su contenido y podremos interactuar con él. Para evitar confusiones con las capas nuevas es conveniente tener las antiguas apiladas en la parte inferior de la tabla de contenidos, y si eso modificar su nombre en esta para saber diferenciarlas (el cambio de nombre solamente afectará a este proyecto en cuestión, quedando las capas intactas en su dataset de origen)
- A continuación vamos a la barra de herramientas del “Editor” y seleccionamos “Comenzar la edición”. El cuadro de diálogo nos preguntará sobre que capa queremos trabajar, seleccionaremos la capa nueva a la que queremos dotar de geometría.

- Con el proceso de edición abierto, utilizando el puntero de selección  seleccionamos aquellos elementos geométricos de la capa antigua que queremos extraer. (Para ello es conveniente haber desactivado la visualización de las otras capas en la Tabla de Contenidos)
- En la barra de herramientas estándar, en la pestaña Editar seleccionamos la opción Copiar (Ctrl+c) y posteriormente la opción Pegar (Ctrl+v). Un cuadro de diálogo nos preguntará la capa en la que queremos pegar los elementos copiados, donde escogeremos la capa nueva, homóloga a la antigua, en la que queremos importar la geometría.

(IMPORTANTE: para poder pegar las entidades en la capa nueva, esta deberá de estar activada en la Tabla de Contenidos situada a la izquierda del visor de ArcMap)

- Salvamos y cerramos el proceso de edición, en la pestaña del Editor, y repetimos el proceso para las siguientes cuatro capas.

(IMPORTANTE: la importación de la geometría debe de hacerse en el mismo orden recomendado en el punto para la creación de las capas, a saber: River, Banks, Flowpaths, XSCutLines y LandUse).

Ya tenemos importadas la geometría de las capas, que deberán de tener el siguiente aspecto:

- River: esta capa mostrará el cauce del río principal así como de sus afluentes, divididos tanto uno como los otros en diferentes tramos.



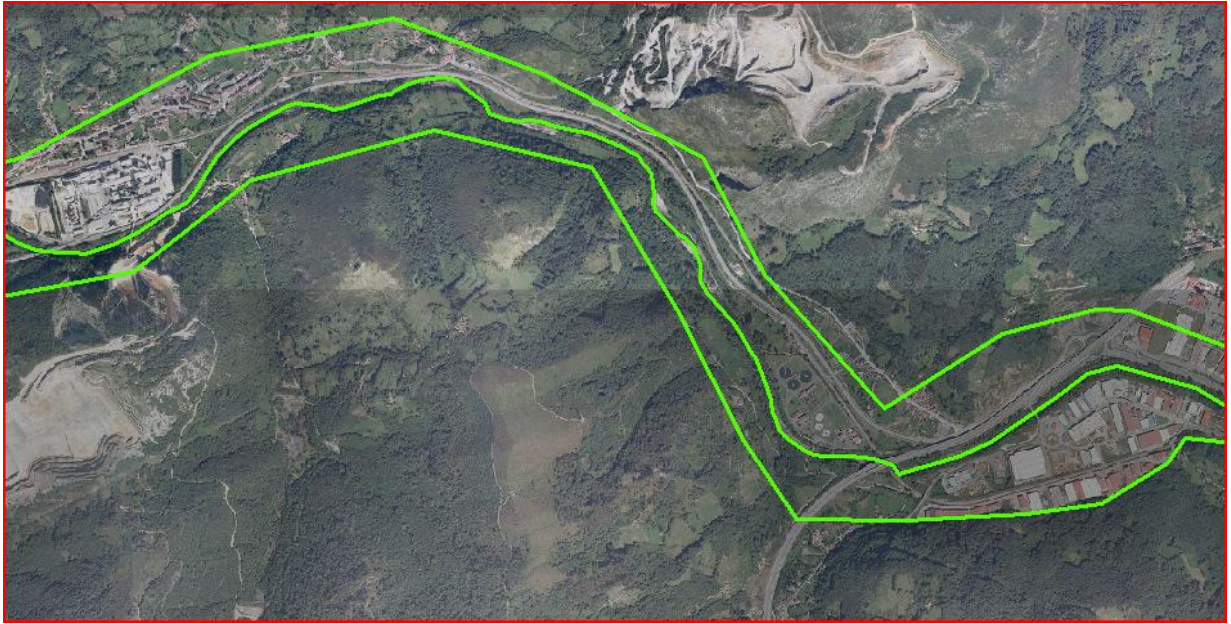
Ejemplo aspecto capa River. Fuente: elaboración propia.

- Banks: esta capa representa los márgenes derecho e izquierdo del cauce del río (por donde fluye el agua en condiciones normales)



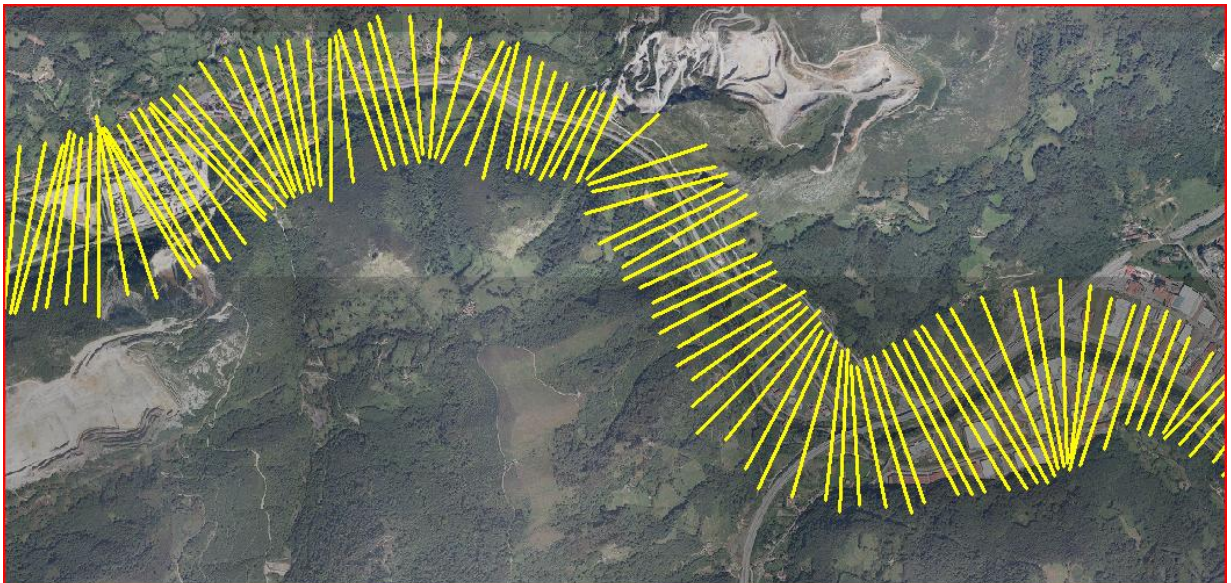
Ejemplo aspecto capa Banks. Fuente: elaboración propia.

- Flowpaths: esta capa define el centro y los márgenes de la zona que consideramos como la llanura de inundación habitual del río.



Ejemplo aspecto capa Flowpaths. Fuente: elaboración propia.

- XSCutLines: esta capa representa las líneas de corte transversales al cauce del río y cuya longitud es equivalente al ancho del área que consideramos susceptible de poder inundarse.



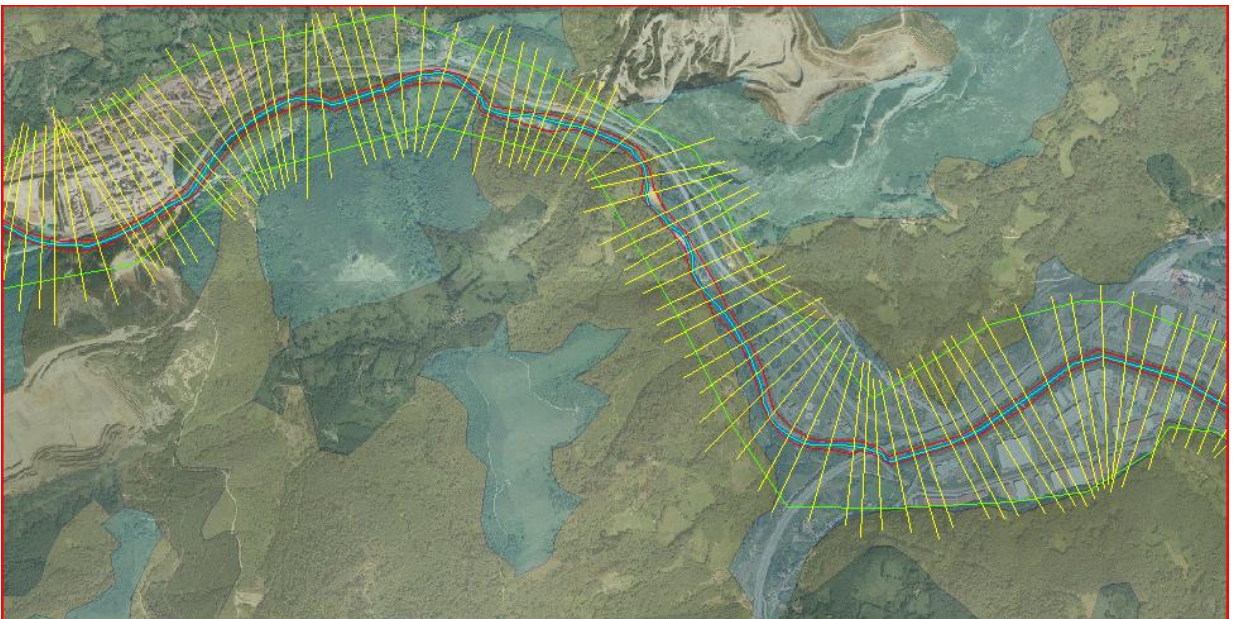
Ejemplo aspecto capa XSCutlines. Fuente: elaboración propia.

- LandUse: esta capa, la única cuya entidad es de tipo Polígono, en lugar de Línea como todas las anteriores, representa las diferentes áreas de usos del suelo y tiene asociados unos coeficientes de rugosidad necesarios para que el programa pueda determinar el comportamiento del agua sobre esa superficie.




Ejemplo aspecto capa LandUse. Fuente: elaboración propia


A continuación se muestra un extracto de una zona del río, incluyendo las capas River, Banks, Flowpaths, XSCutlines y LansUse; a modo de ejemplo del aspecto que deberá presentar una vez la geometría ya esté lista.



Geometría de las capas de un tramo del río en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia

Aunque la geometría ya está creada, si estudiamos las tablas de atributos asociadas a algunas de las capas observaremos que tienen atributos cuyos registros están sin cumplimentar, pero para poder dotarlos de contenido primero debemos de identificar los tramos de la capa River y Flowpaths como se especifica en los dos siguientes punto.

En la barra de herramientas de Hec GeoRas utilizaremos la herramienta “Assign RiverCode and ReachCode to River”, identificada con el siguiente símbolo . Esta herramienta nos servirá para codificar los diferentes ríos y sus tramos en nuestro sistema, para lo cual nos bastará con seleccionar el tramo en cuestión con el puntero de la herramienta.

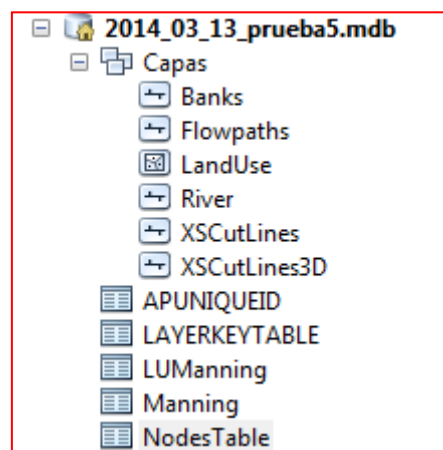
A continuación utilizamos la herramienta Select Flowpath and Assign line Type Attributes, símbolo , para asignar a las diferentes líneas del Flowpath su condición de margen derecho, izquierdo o cauce central, para lo cual basta con seleccionar el elemento en cuestión y escoger de entre las tres opciones en el cuadro de diálogo.

Con los márgens definidos y los tramos del río identificados ya podemos utilizar las herramientas automáticas que HecGeoRas nos brinda para asignar atributos a River y XSCutlines. En la pestaña de Ras Geometry, seleccionamos la opción “Stream Centerline attributes/All” generándose después un mensaje de éxito en la operación.

En la pestaña RAS Geometry de nuevo, seleccionamos la opción “XSCutLines attributes/All” debiendo generarse de nuevo un mensaje de éxito. Se creará de forma automática una nueva capa en el dataset de trabajo llamada “XSCutLines3D”.

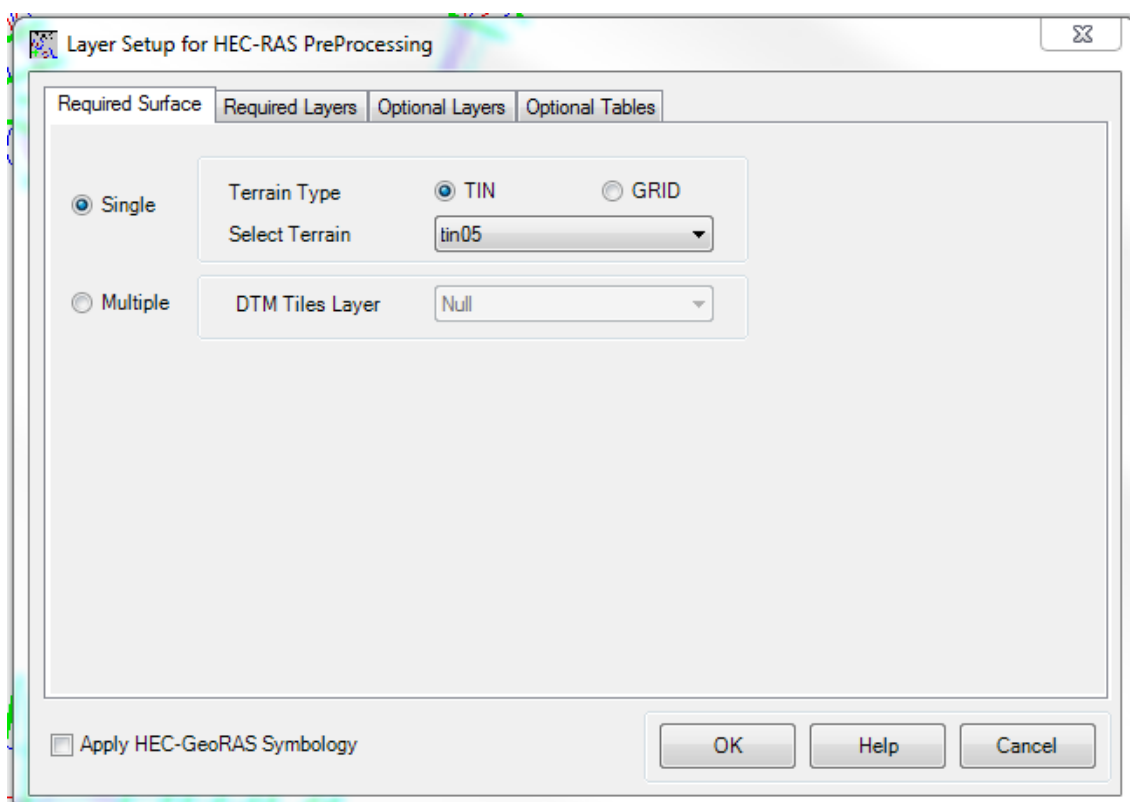
En la pestaña de RAS Geometry una vez más, en la opción Manning’s n Values seleccionamos las opciones create LU-Manning Table y Extract N values.

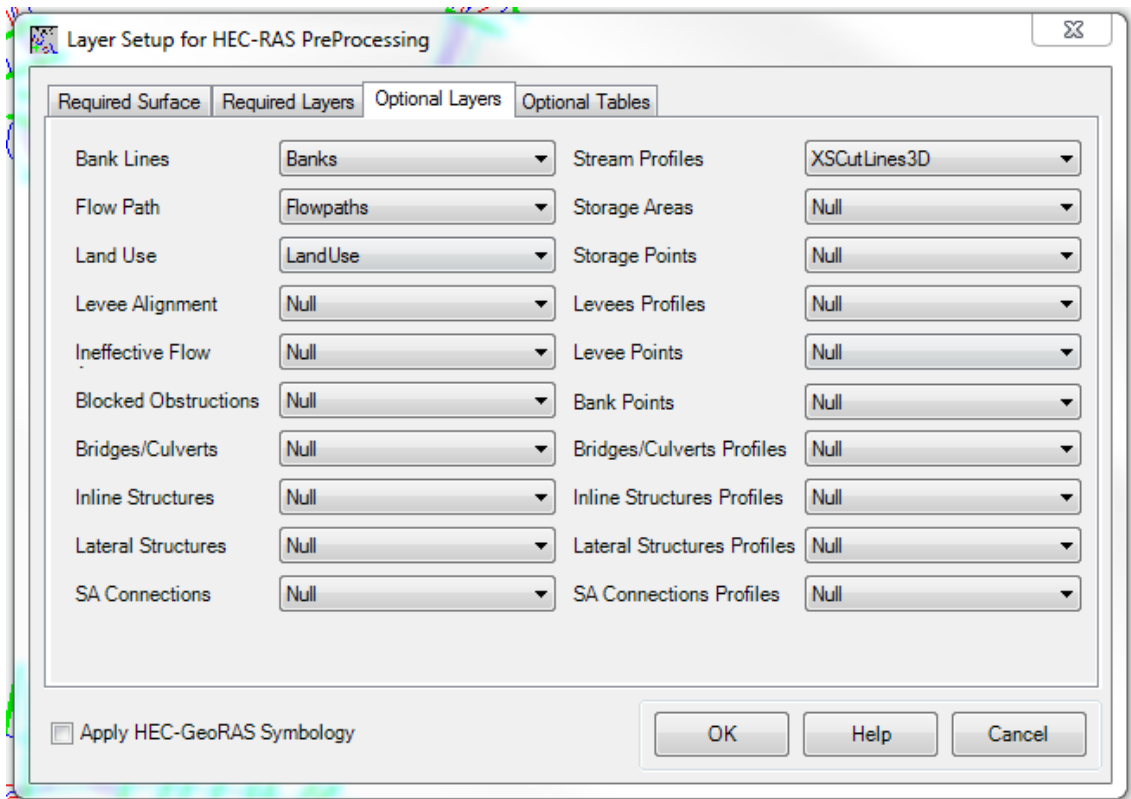
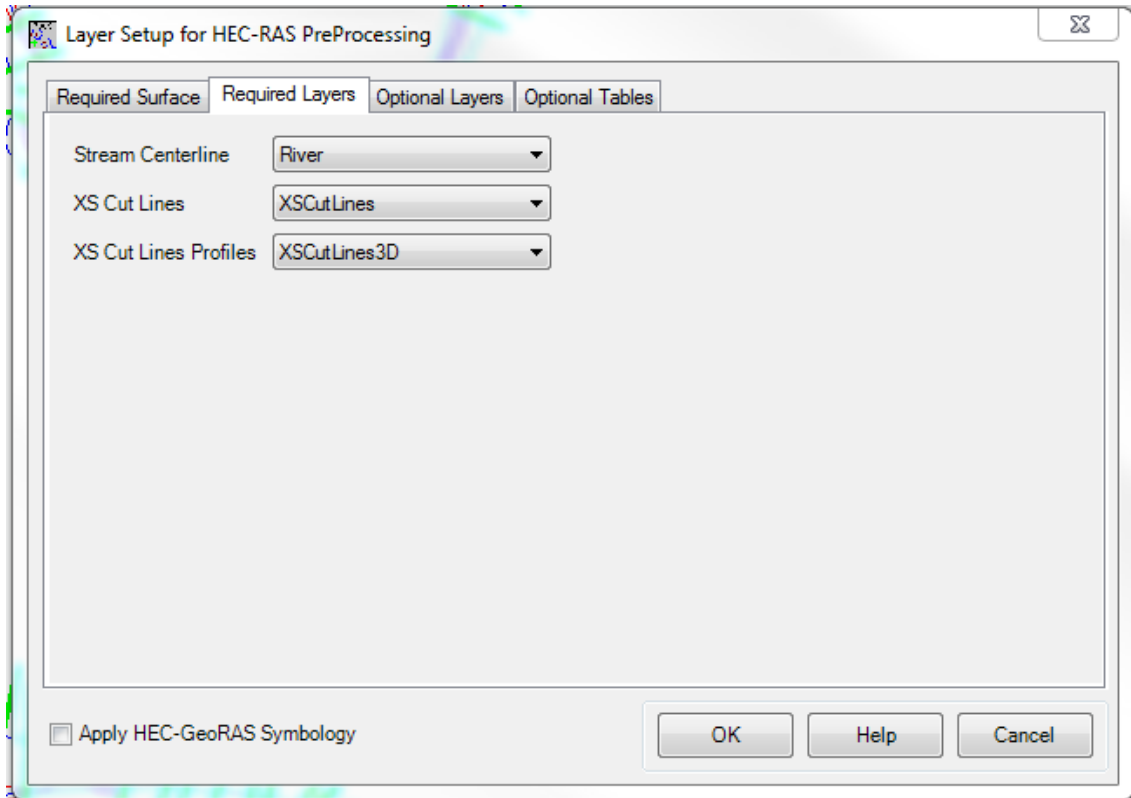
Observamos que el programa ha creado de forma automática una serie de tablas dentro de la geodatabase pero fuera del dataset.

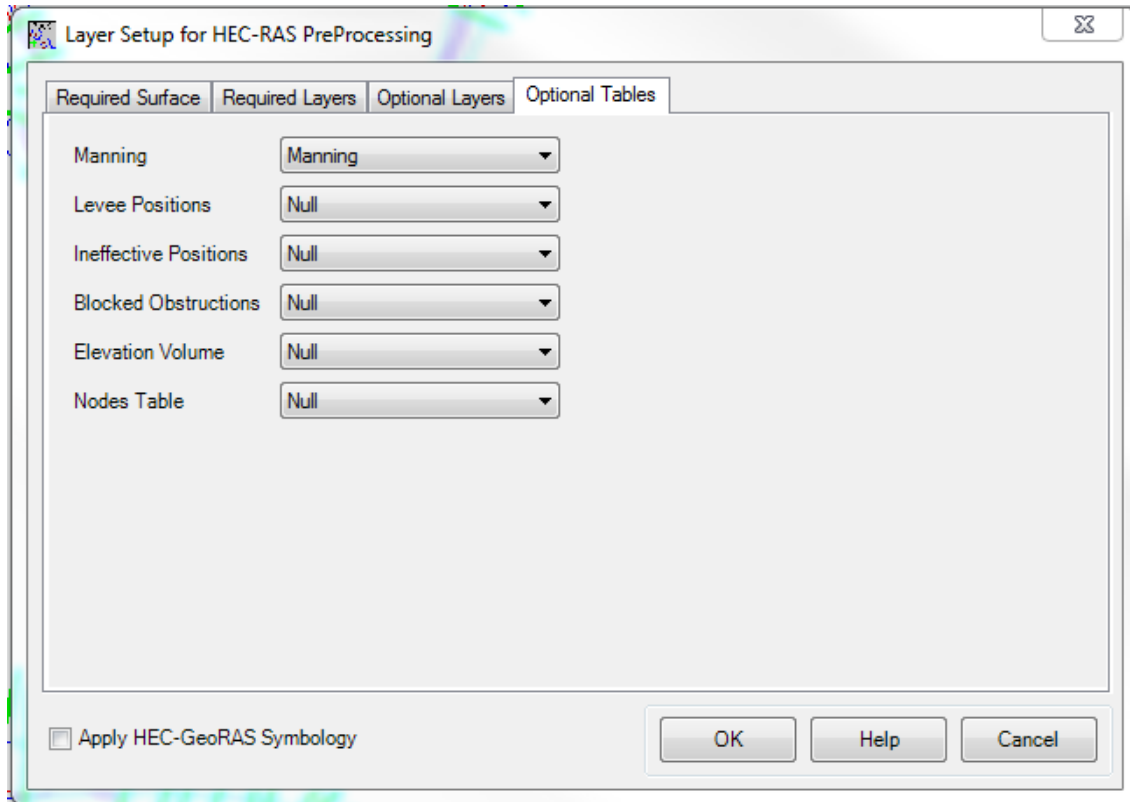


Ya tenemos preparada la geometría para su carga en HecGeoRas y su exportación a HecRas.

Para cargar las capas en HecGeoRas vamos a RAS Geometry / Layer Setup, le iremos indicando al programa que capas queremos cargar de la siguiente manera:







Una vez cargadas las capas a HecGeoRas podemos exportar a HecRas simplemente ejecutando RAS Geometry / Export RAS Data.

Cerramos ArcMap.

2. Simulación con HecRas

Abrimos HecRas 4.1.0 desde el acceso directo del escritorio.

Establecemos el Sistema Internacional como sistema de unidades de trabajo en la pestaña de la barra general: Options / Unit system (US Customary / SI)

En la pestaña "File / New Project" creamos un nuevo proyecto. Se nos abre un cuadro de diálogo en el que definiremos la ubicación del proyecto, el título del proyecto y el nombre del archivo.

Ya tenemos el proyecto creado y preparado para importarle la geometría. Haciendo *click* en la pestaña "Edit / Geometric Data" se nos abre una nueva ventana de trabajo llamada "Geometric Data".

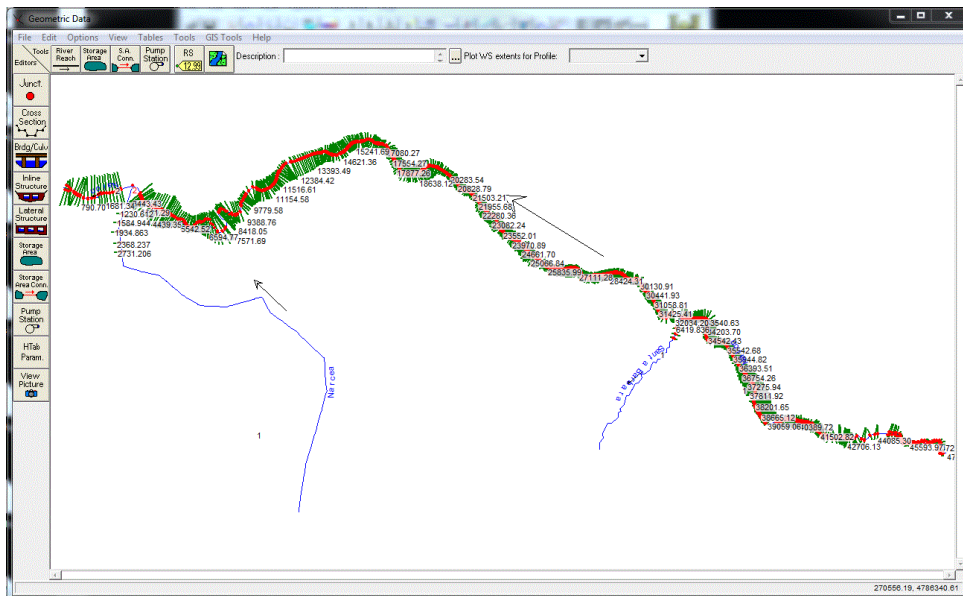
En la nueva ventana de trabajo, en la pestaña File seleccionamos "Import geometric data / GIS format". Se nos abrirá un cuadro de diálogo en el que

buscaremos y seleccionaremos para su importación el archivo *.sdf* que generamos en el punto 1.26.

De nuevo se nos abrirá un cuadro de diálogo en el que podremos y editar la información que vamos a importar.

- En la pestaña “Intro” podremos escoger entre el sistema americano de unidades y el internacional (escogeremos el internacional)
- En la pestaña “Cross Sections and IB Nodes” seleccionamos la parte de la geometría que queremos importar (por ríos o tramos). Además debemos de redondear la información de la tabla de la columna “Import as” a través del botón “Round”.
- Una vez ya estemos listos para importar le daremos al botón “Finished – Import data”

Si hemos realizado de forma correcta todos los pasos anteriores deberemos visualizar un modelo geométrico donde se puedan apreciar los tramos de los diversos cauces con su nombre, la dirección de flujo, los nodos, y los cortes transversales; algo parecido a esto:



Ejemplo aspecto geometría importada. Fuente: elaboración propia.

Una vez importada correctamente la geometría la guardaremos, a través de la pestaña “File / Save Geometric data”, en donde especificaremos la ubicación del archivo de geometría y su nombre.

A continuación procederemos a introducir los datos de flujo para el análisis. En la pestaña “Edit” podremos elegir entre “Steady flow data” (para flujo continuo) Quasi-unsteady flow data (para flujo semi-discontinuo) o “Unsteady flow data” (para flujo discontinuo). En nuestro caso vamos a trabajar con un flujo que consideramos constante, por lo que escogemos “Steady flow data”

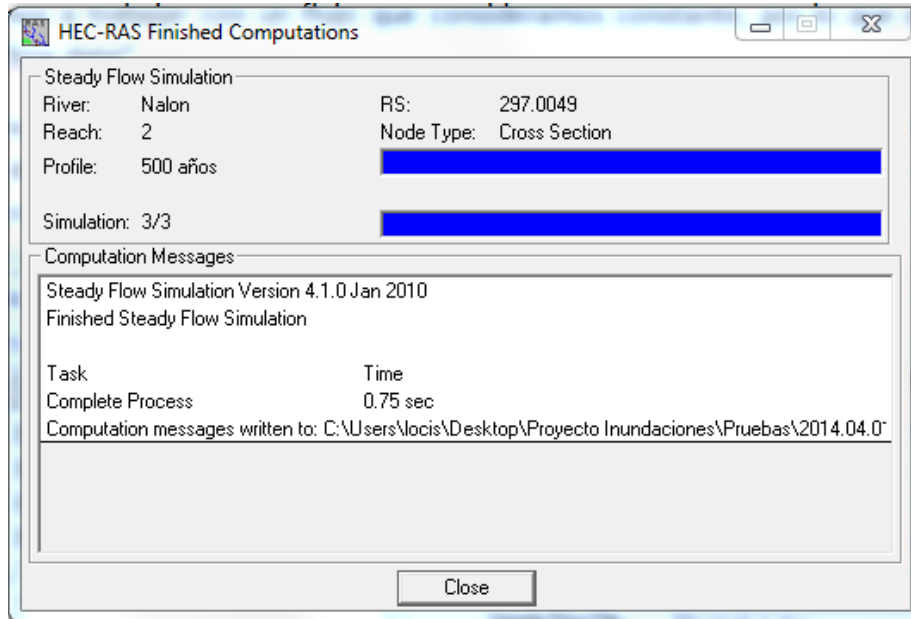
Se nos abrirá un cuadro de diálogo llamado “Steady flow data” donde introducimos el número de perfiles que queremos calcular y el caudal volumétrico en m³/s que hemos escogido para cada uno de ellos. Sin salir del cuadro de diálogo, pinchamos en el botón “Reach boundary conditions” donde nos aparecerá una tabla con los diversos cauces y sus tramos, aguas arriba y aguas abajo (upstream y downstream). Vemos que en esta tabla algunos de los registros ya están cumplimentados, en los que no seleccionaremos la opción “Known W.S.” que es la que nos permite introducir la altura de la lámina de agua para los tres perfiles a estudiar.

Una vez introducidos los datos de flujo los guardaremos en “File / Save Flow data”, indicando de nuevo la ubicación del archivo y su nombre.

Ya podemos proceder a la realización del análisis. En la ventana general del programa, de título Hecras 4.1.0, iremos a “Run / Steady Flow Analysis”, que nos llevará a un nuevo cuadro de diálogo, donde cargaremos el archivo de geometría y el de datos de flujo creados en los pasos anteriores. En Flow Regime, escogemos la opción “Supercritical”.

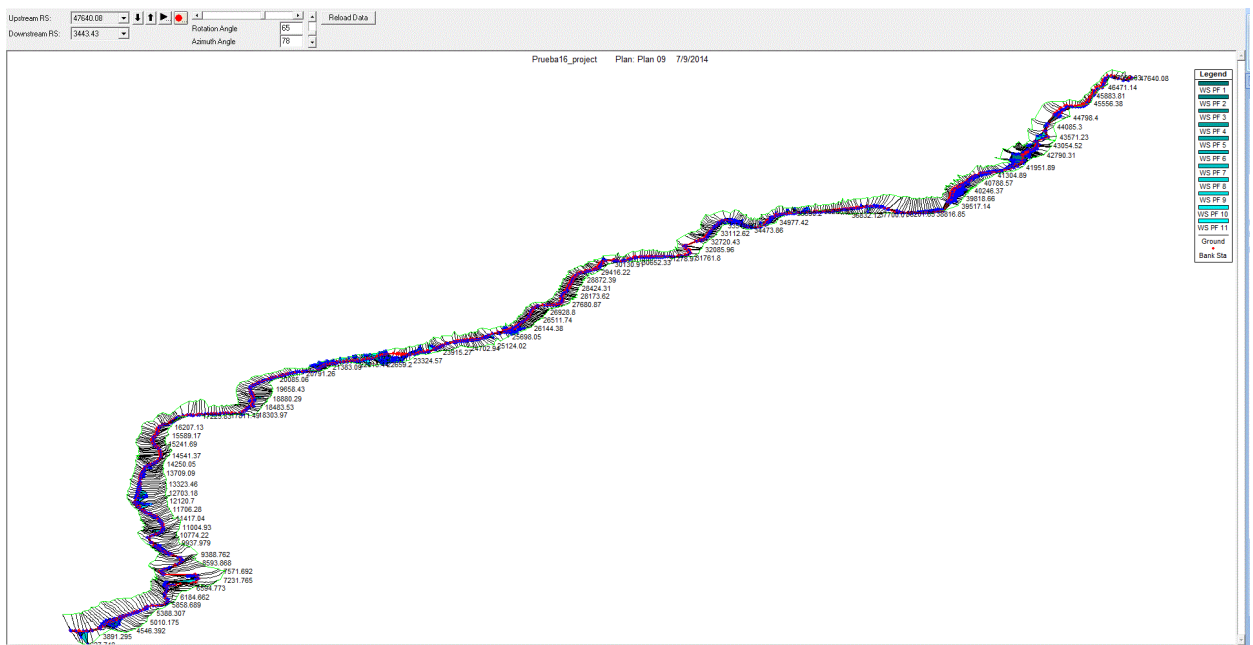
Antes de proceder a realizar el análisis, en la pestaña “Options” escogemos “Flow Distribucion Locations” que nos llevará a un nuevo cuadro de diálogo donde en la sección “Ste Global Subsection Distrinution” podremos ajustar el peso del flujo en los márgenes y el centro del cauce. Estableceremos un valor de 5 para los márgenes derecho e izquierdo y un valor de 10 para el centro, y aceptamos.

De vuelta en la ventana de Steady Flow Analysis, pinchamos en el botón “Compute” para proceder a realizar el análisis. Si no hemos introducido información suficiente el programa nos avisará del error, de lo contrario obtendremos un mensaje tal que así:



Una vez realizado el análisis ya podemos exportar los resultados para su visualización en ArcMap. Para ello vamos a la ventana general HecRas 4.1.0 y en la pestaña “File” seleccionamos la opción “Export GIS Data”, generando un archivo *.sdf*

Antes de abandonar Hec Ras tenemos la opción de visualizar el resultado en dimensiones X-Y-Z de la simulación de inundación en el propio programa.




Captura de pantalla de simulación de inundación. Fuente: elaboración propia.

Cerramos HecRas.

3. Visualización de la simulación en ArcMap

Abrimos la herramienta ArcMap 10, a través de su acceso directo en el Escritorio del ordenador. Podemos crear un proyecto nuevo y guardarlo o bien trabajar sobre el que utilizamos en la primera etapa.

En el proceso anterior hemos generado un archivo .sdf con HecRas, pero para poder trabajar con él en ArcMap tendremos que convertirlo a un archivo .xml. Para ello sobre la barra de herramientas de Hec-GeoRas, pulsamos el botón “Import RAS SDF file”, con el símbolo . Se nos abrirá un cuadro de diálogo donde especificaremos el archivo que queremos convertir y la ubicación del archivo de salida.

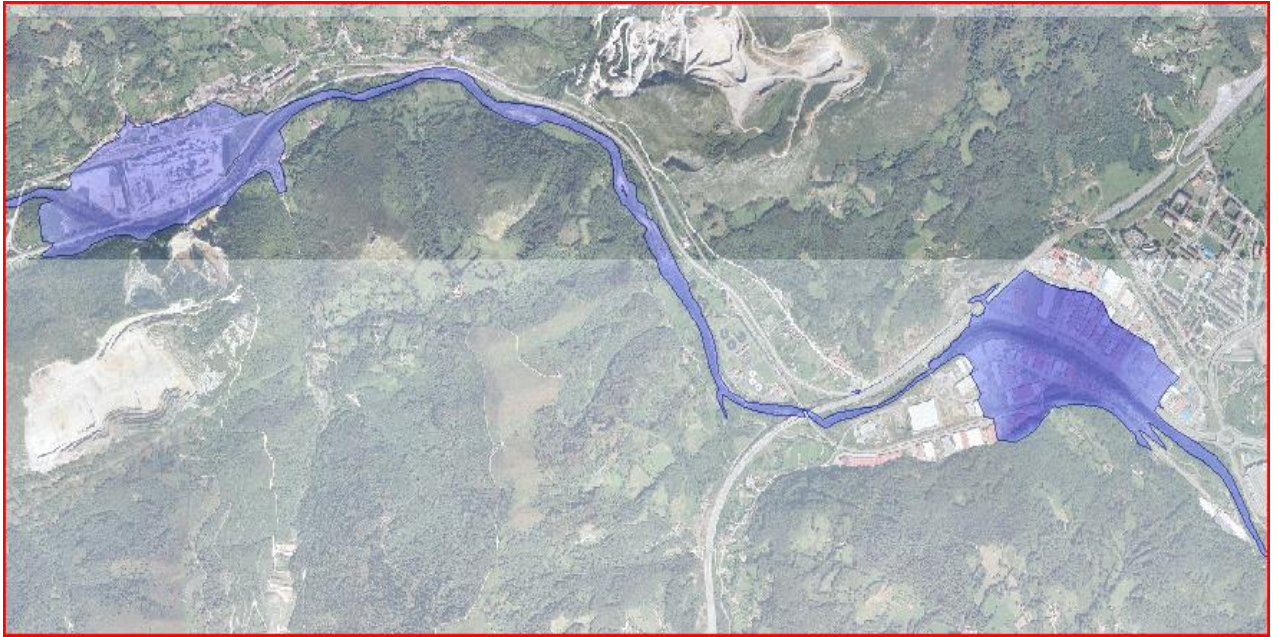
Una vez convertido, vamos a la pestaña “RAS Mapping”, y pulsamos sobre la opción “Layer setup”. En la ventana subsiguiente cargaremos las capas de trabajo para la representación de la inundación.

Una vez cargadas las capas le damos a la opción “RAS Mapping / Import RAS data” y esperamos a que la ventana de estado nos confirme la culminación con éxito del proceso.

Para generar la representación de la inundación deberemos seguir los dos siguientes pasos:

- En la pestaña “RAS Mapping” escogemos la opción “Inundation Mapping / Water surface generation”. Se nos abrirá una ventana de diálogo donde escogeremos el periodo de retorno para el que queremos generar la lámina de agua.
- De nuevo en “RAS Mapping / Inundation Mapping” escogemos esta vez la otra opción disponible “Floodplain Delineation Using Rasters”, donde nos dará a escoger entre los periodos de retorno para los cuales hayamos previamente generado lámina de agua.

Una vez hecho esto se nos visualizará la lámina de agua sobre la ventana del visor.



Ejemplo de representación de la lámina de agua. Fuente: elaboración propia.

Desarrollo de una herramienta de gestión del caudal

Uno de los objetivos del presente estudio es sentar las bases para el posible desarrollo de una herramienta, de vocación comercial, que permitiera, a la entidad gestora de las presas del río o a la administración local y/o regional, la predicción de la aparición del fenómeno de inundación y su gestión. Hablando de forma más concreta, podemos aventurar que la empresa responsable de gestión de los embalses podría adecuar las sueltas de agua de estos en función de las previsiones de inundación, y que la administración podría adaptar a las predicciones dadas por esta herramienta los sistemas de alerta temprana ante riadas o la planificación de los usos consuntivos y no consuntivos de los cauces.

La base de la herramienta es el conocimiento o previsión de las precipitaciones en un periodo de tiempo determinado a partir del momento de uso de la herramienta. El usuario por tanto, escogería entre diferentes modalidades de cuantía de precipitación (ausencia, poca, mucha o torrencial) y un periodo de tiempo determinado (12, 24, 36 ó 48 horas) La herramienta funciona como una tabla de dos entradas, en cuyo eje horizontal superior estaría la precipitación esperada y en el eje vertical izquierdo el periodo de tiempo.

Basándonos en las series históricas de precipitación, caudal y nivel del agua para las estaciones de la red SAIH Cantábrico en El Condado (Laviana), Puente de Sama (Langreo) y Palomar (Ribera de Arriba), hemos obtenido por estimación los valores de nivel del río en metros y los caudal en metros cúbicos por segundo, que suponemos podrían obtenerse para una precipitación estimada en un periodo de tiempo dado.

Es importante destacar que aunque los valores obtenidos tienen una base real obtenida de datos fiables proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, han de ser tomados como datos obtenidos de forma estimativa. Un estudio con vocación realista y definitiva requeriría un estudio exhaustivo enfocado exclusivamente a la obtención de los mismos.

La herramienta debería funcionar de la siguiente manera:

Una vez el usuario hubiera introducido la precipitación prevista para un tiempo determinado, el programa, basándose en los datos de nivel y caudal establecidos en la tabla de valores, los utilizaría para realizar una simulación en Hec Ras, generando un archivo exportable a formato GIS donde se podría realizar la visualización gráfica de las zonas que se espera serían susceptibles de sufrir inundación.

Por supuesto la herramienta sólo podría ser susceptible de ser utilizada para ríos en los que ya se hubiera desarrollado la geometría del sistema fluvial, con sus capas de curso del río, márgenes del cauce, llanura de inundación, usos del suelo y líneas de corte transversal; como hemos visto en apartados anteriores.

El río ha sido dividido en tres tramos que representan zonas en el que le asignamos un caudal y un nivel de altura del agua diferente. El tramo 1 corresponde al que se localiza entre el embalse de Rioseco y la desembocadura del río Santa Bárbara, el tramo iría desde este punto a la desembocadura del río Narcea, y el tramo 3 correspondería con el último tramo del río en la zona estudiada, entre la confluencia con el Caudal y el embalse de Priañes.



Esquema de la división en tramos del río en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

A efectos prácticos sin embargo se ha constatado que el caudal registrado por la estación de Puente de Sama es muy similar al registrado en El Condado. Es la estación de Palomar la que muestra diferencias muy significativas de caudal y altura del agua, debido sin duda al gran aporte de aguas que realiza el río Caudal en su desembocadura en el Nalón.

A continuación se muestra la tabla de valores estimados de caudal y nivel del río en función de la precipitación prevista para periodos de tiempo concretos:

APORTACIÓN AL CAUDAL	Variable	SIN PRECIPITACIÓN (calibrado)			POCA PRECIPITACIÓN (0 – 10 mm)			MUCHA PRECIPITACIÓN (10 – 17mm)			PRECIPITACIÓN TORRENCIAL (17 – 25mm)		
		Tramo	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
12 HORAS	Caudal (m ³ /s)	7,0	15	23	12,5	20	27	37,5	43	50	50	65	82
	Nivel (m)	1,0	1,12	1,13	1,12	1,13	1,14	1,42	1,46	1,5	1,5	1,6	1,77
24 HORAS	Caudal (m ³ /s)	7,0	15	23	25	30	37	75	150	254	100	250	580
	Nivel (m)	1,0	1,25	1,13	1,14	1,26	1,27	1,8	2,2	2,92	2,58	3	4,32
36 HORAS	Caudal (m ³ /s)	7,0	15	23	37,5	43	50	112.5	200	395	150	400	910
	Nivel (m)	1,9	1,25	1,13	1,42	1,44	1,5	2,53	3	3,59	2,97	3,8	5,33
48 HORAS	Caudal (m ³ /s)	7,0	15	23	50	65	82	150	300	910	200	500	1080
	Nivel (m)	1,0	1,25	1,13	1,5	1,6	1,77	2,97	3,6	5,33	3,45	4	5,7

Resultados finales

En este punto desarrollamos el proceso de simulación de inundación en el tramo estudiado de la cuenca del río Nalón, para los caudales y niveles de agua obtenidos en la matriz base para la posible herramienta de gestión de caudales.

Así pues procedemos a realizar la simulación, introduciendo en Hec Ras los valores de flujo en cuanto a caudal volumétrico y altura longitudinal, generando 11 perfiles en la creación de las condiciones de flujo (hay que tener en cuenta que algunas condiciones de flujo se repiten en la matriz de condiciones de flujo obtenida).

Procedemos a su representación gráfica, sobreponiendo la malla de valores de altura de la lámina de agua sobre el MDT05-LIDAR, que como ya sabemos es el MDE de mayor resolución del que disponemos, y generamos la representación gráfica de la lámina de agua.

Los resultados nos permiten saber para qué condiciones de flujo (caudal y altura) se produce desbordamiento y que áreas resultan afectadas y para cuales no se llega a producir.

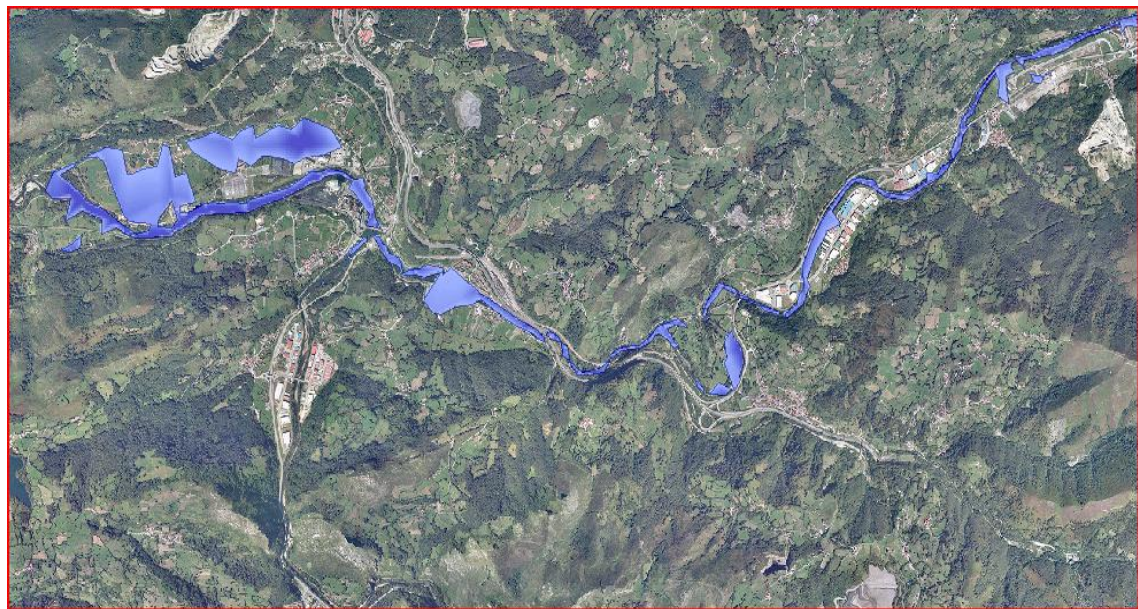
Por ello al final la división de la zona del río a estudiar se ha efectuado en dos tramos, juntando los numerados como tramos 1 y 2 en la figura anterior en uno solo.

A continuación mostramos algunos de los resultados obtenidos para las diferentes condiciones de flujo de la matriz. Todos los resultados que se muestran están obtenidos por representación sobre un TIN de 1.329.387 nodos:

Caudal (m ³ /s)	Tramo 1	200
	Tramo 2	3,45
Nivel (m)	Tramo 1	1080
	Tramo 2	5,7



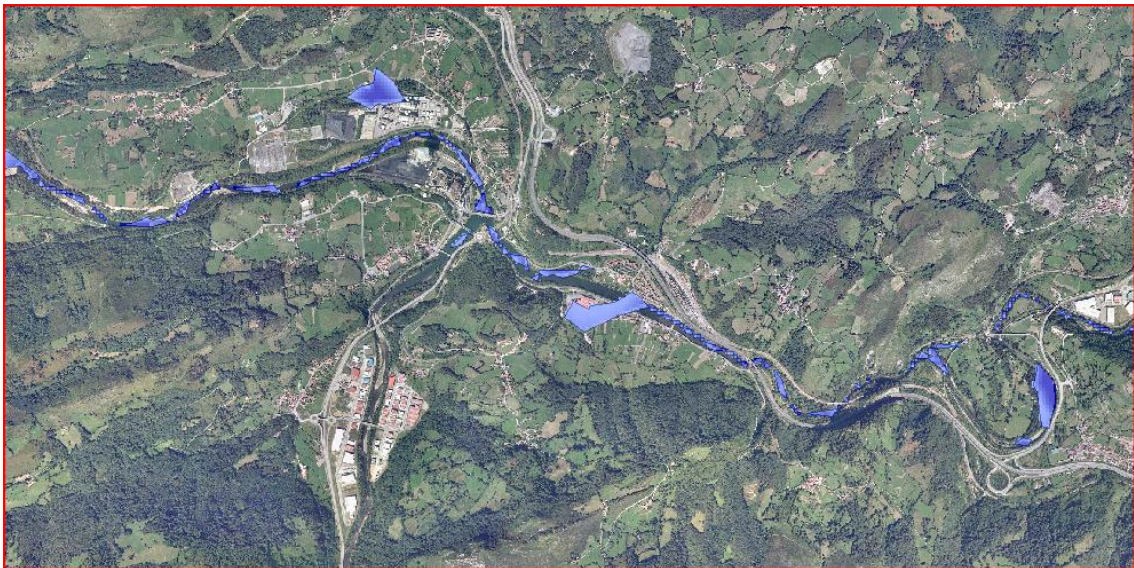
Caudal (m ³ /s)	Tramo 1	150
	Tramo 2	2,97
Nivel (m)	Tramo 1	910
	Tramo 2	5,33



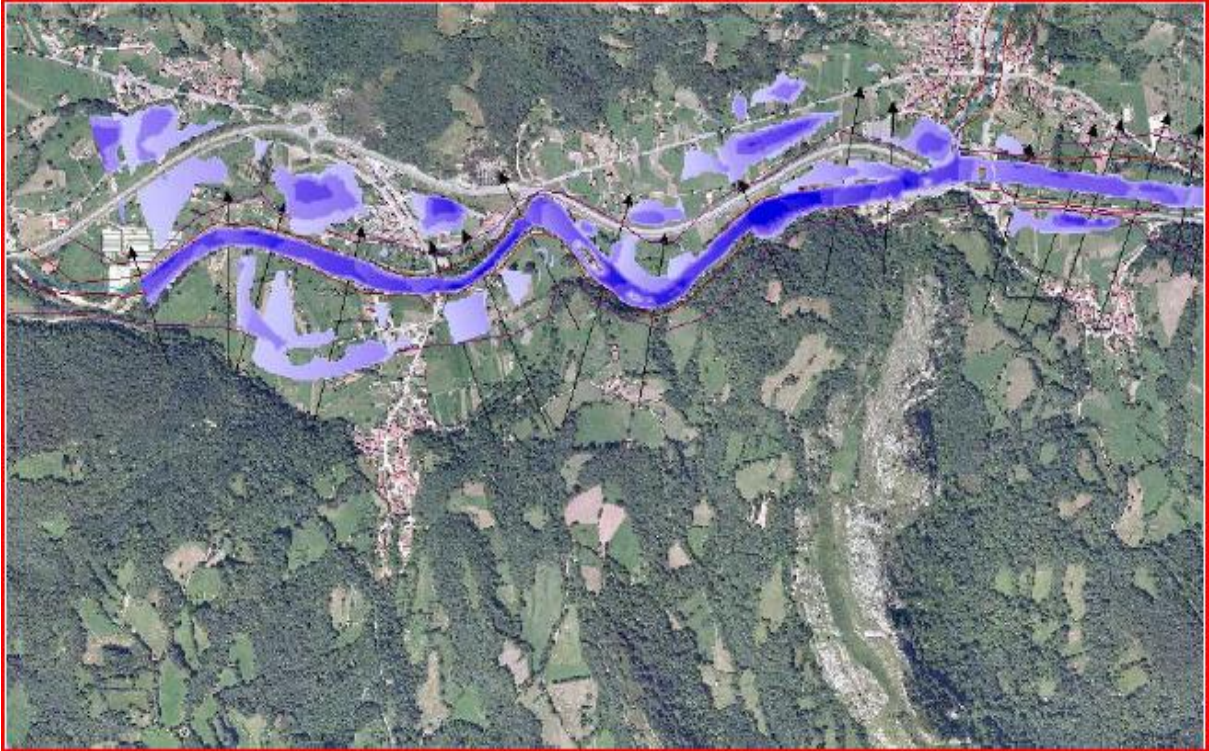
Caudal (m ³ /s)	Tramo 1	75
	Tramo 2	1,8
Nivel (m)	Tramo 1	254
	Tramo 2	2,92



Caudal (m ³ /s)	Tramo 1	12,5
	Tramo 2	1,12
Nivel (m)	Tramo 1	27
	Tramo 2	1,14



Uno de los principales problemas que se planteaban en el trabajo de fin de máster 2013 de Máximo Calvo era la representación por parte de Hec Geo Ras de la lámina de inundación en forma de parches de agua, en lugar de representando una lámina continua.

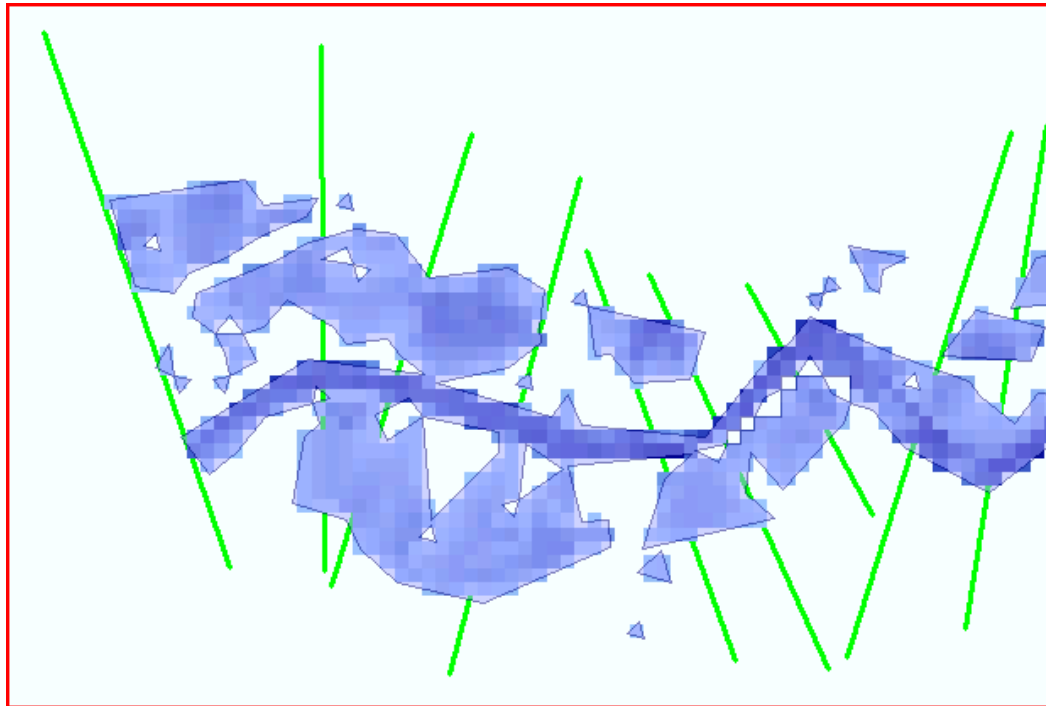


Representación de la lámina de inundación. Fuente: Calvo, 2013

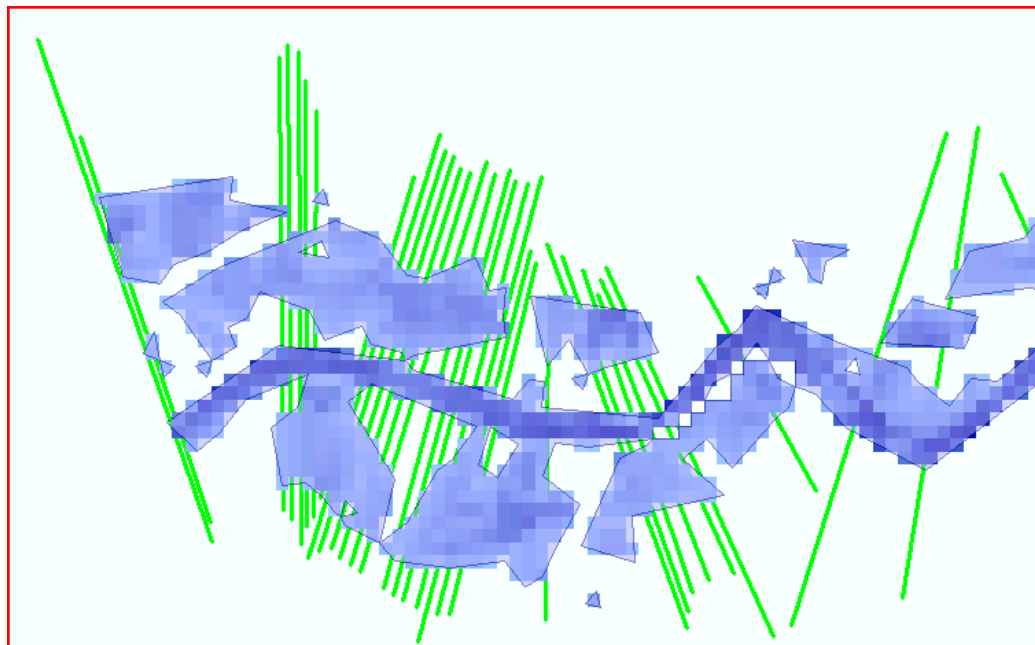
Este resultado es obviamente erróneo, y en el propio trabajo de Calvo se planteaba la necesidad de corregir este fenómeno en trabajos posteriores.

Una de las hipótesis sobre la forma de solucionarlo que se planteaba era la de aumentar el número de líneas de corte transversal (XSCutlines) empleadas en la construcción del modelo geométrico del sistema fluvial. Esta opción *a priori* podría tener sentido, pues el programa Hec Geo Ras se vale de las líneas de corte para extraer información de los márgenes, llanura de inundación, usos del suelo y características altimétricas del sistema fluvial; por lo que parece lógico que aumentando el número de líneas de corte aumente el conocimiento del programa sobre el sistema a representar y por tanto mejore su representación.

Se ha procedido a estudiar esta posible solución haciendo una prueba sobre una sección del área de trabajo original de Calvo, aumentando de forma significativa el número y densidad de líneas de corte transversales.



Muestra original. Fuente: representación propia.



Muestra con las líneas de corte aumentadas. Fuente: representación propia.

Como se puede ver el aumento significativo de las líneas de corte en un área puntual no parece haber producido la solución del problema aunque si se aprecian mejoras en la representación de la lámina de inundación. Sin embargo esta posible opción, la de aumentar el número de líneas de corte en todo el recorrido del río, presenta diversos problemas de aplicación práctica.

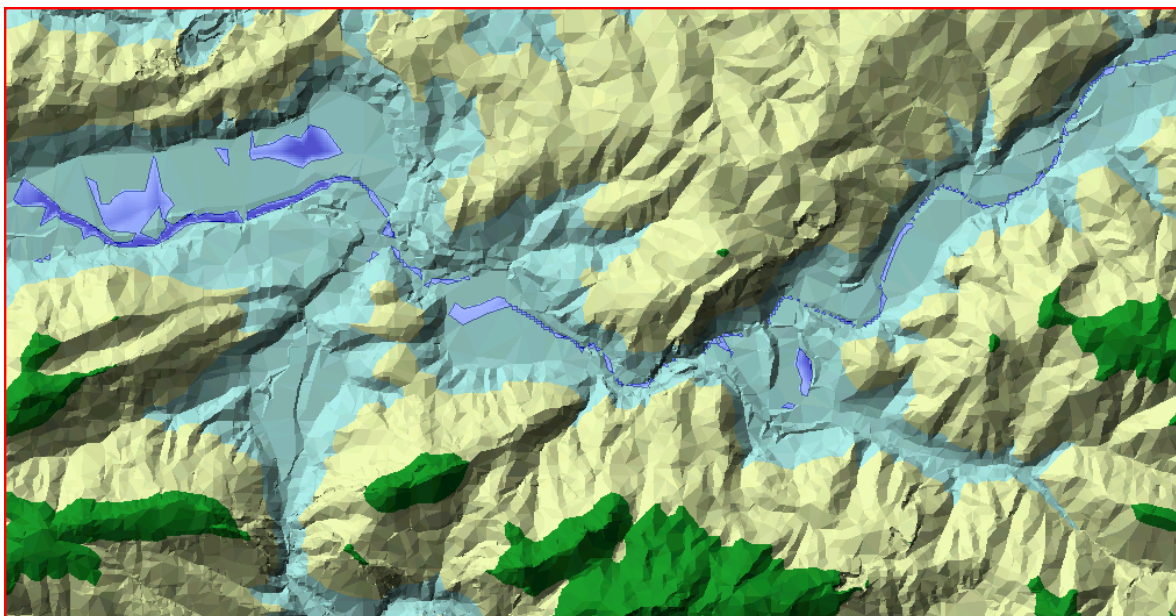
En primer lugar aumentaría de forma significativa el volumen de trabajo para la representación de la geometría del cauce. Además las propias necesidades de representación de las líneas de corte, que por restricciones del programa han de ser perpendiculares al cauce del río y no pueden tocarse entre sí, producirían problemas en tramos curvos del río o con abundante presencia de meandros para poder dibujarse con tal densidad. Por último y no de menor importancia, hay que tener en cuenta que este programa ha sido diseñado para la representación de riadas en grandes ríos como son los que surcan el continente americano, por lo que aunque en tramos cortos como el de nuestro área de estudio sería factible el aumento de la densidad de líneas de corte, no sería una solución aplicable a grandes ríos, por lo que en atención a la propia filosofía con que fue creado el programa y a la vocación de nuestro trabajo debemos descartar la opción del aumento drástico de la densidad de las líneas de corte como solución definitiva, aunque sí podremos tener en cuenta la conveniencia de realizar el mayor número de ellas posible dentro de los límites espaciales y temporales lógicos.

Continuando con el análisis del problema, es importante que intentemos entender el funcionamiento del software empleado para la realización de la simulación y su representación gráfica. Hec Ras es, según definen sus propios creadores, un programa que trabaja de forma unidimensional. Es decir, que cuando Hec Ras computa la simulación de inundación, lo que el programa en realidad nos está generando es una matriz de valores de altura de la lámina de agua. A la hora de realizar su representación, la extensión Hec Geo Ras lo que hace es restar esta matriz contra la matriz raster de alturas del terreno, asignando a la matriz raster resultante el resultado de SÍ INUNDADO cuando el valor es positivo (altura de la lámina de agua mayor que altura terreno) y NO INUNDADO cuando el valor es negativo (altura de la lámina de agua menor que altura terreno) Por tanto podemos suponer que el problema en la representación se deriva del modelo digital de terreno utilizado para la computación de la simulación y su representación.

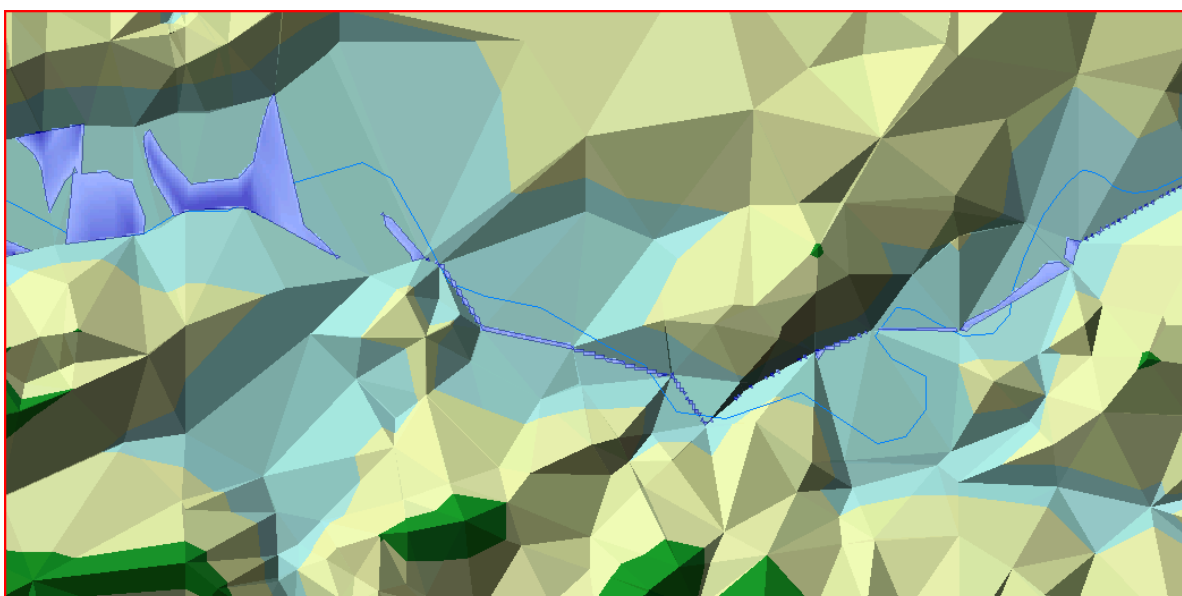
El trabajo de Calvo ya apuntaba a la posibilidad de utilizar unos TIN de la mayor resolución posible para solucionar el problema. Sin embargo las pruebas realizadas en el presente trabajo en ese sentido no han aportado los resultados de mejoría esperados, presentando además el problema añadido de aumento significativo del tiempo de trabajo del programa y la aparición de frecuentes errores en el software debido al aumento de "carga de trabajo". En teoría Hec-

Geo Ras permite la introducción del modelo digital de terreno en formato TIN o GRID, pero esta última opción, que teóricamente nos permitiría introducir el MDT05-LIDAR que es el modelo de mayor resolución del que disponemos, produce de forma indefectible un mensaje de error, probablemente debido al gran volumen de datos con el que se ve abocado a lidiar el software.

A continuación se incluyen algunos ejemplos de resultados de simulación en el último tramo para un caudal de $395 \text{ m}^3/\text{s}$ y una altura de 3,59m.

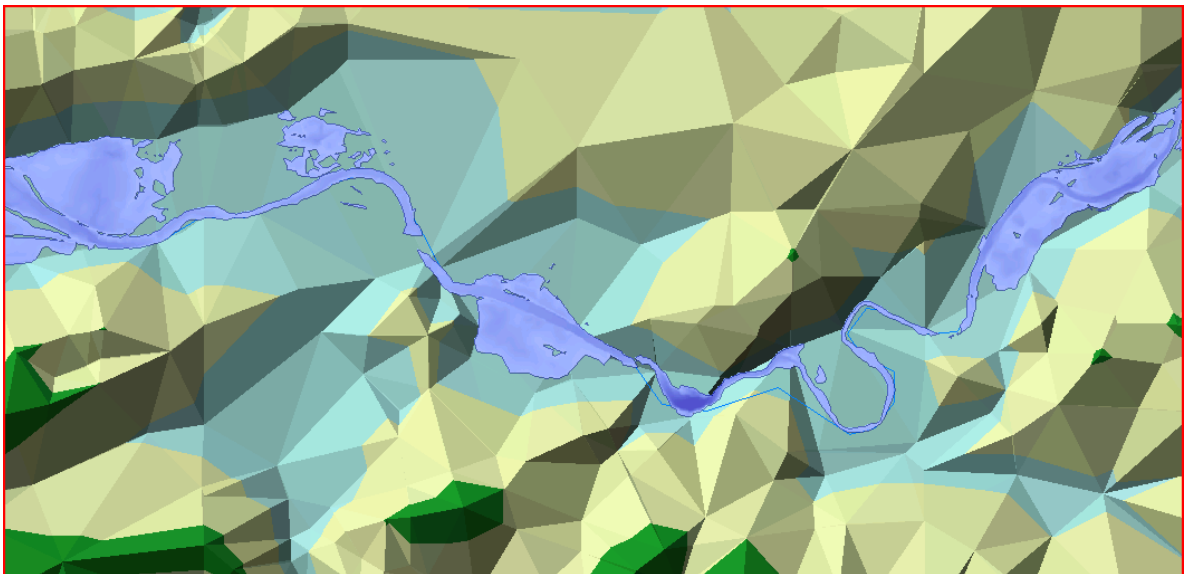


Ejemplo representación sobre TIN 1.329.387 nodos. Fuente: elaboración propia.

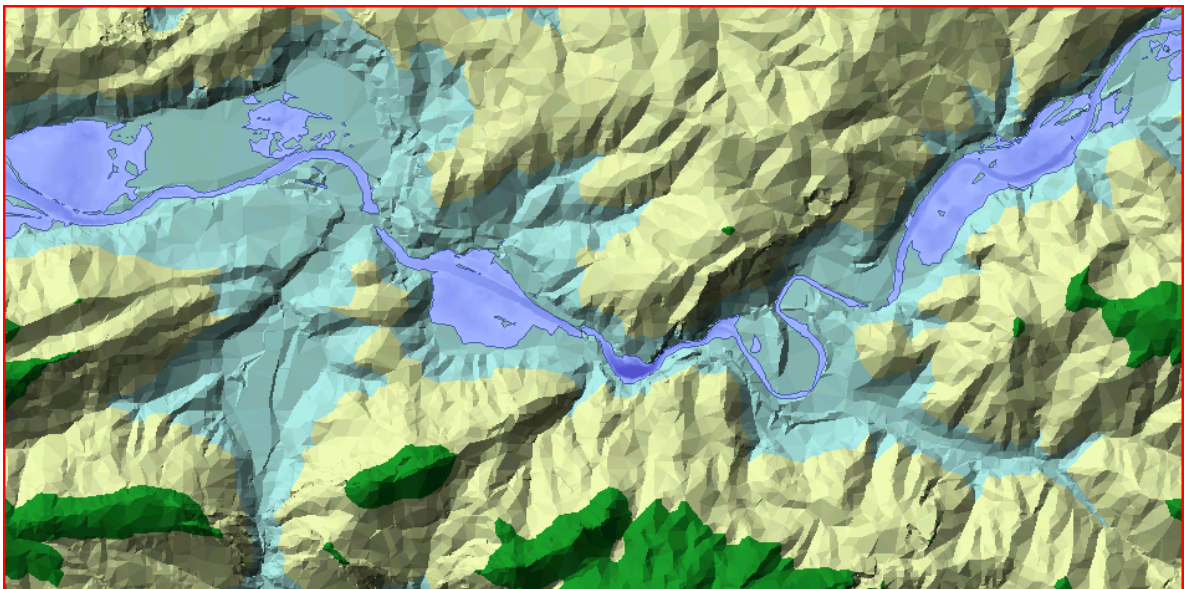


Ejemplo representación sobre TIN 30.608 nodos. Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar la mejora de la calidad en el número de nodos del TIN produce una mejor representación de la superficie inundada, pero sin solucionar realmente el problema ni ofrecer unos resultados válidos. Además si introducimos un caudal de $1080 \text{ m}^3/\text{s}$ y una altura de $5,7\text{m}$ el resultado es igual de satisfactorio, tanto si usamos un TIN de alta resolución como de baja, lo que concuerda con nuestra conclusión de que el factor limitante en los resultados de nuestro estudio es el bajo caudal del río y no la resolución de los TIN empleados:



Ejemplo representación sobre TIN 30.608 nodos. Fuente: elaboración propia.

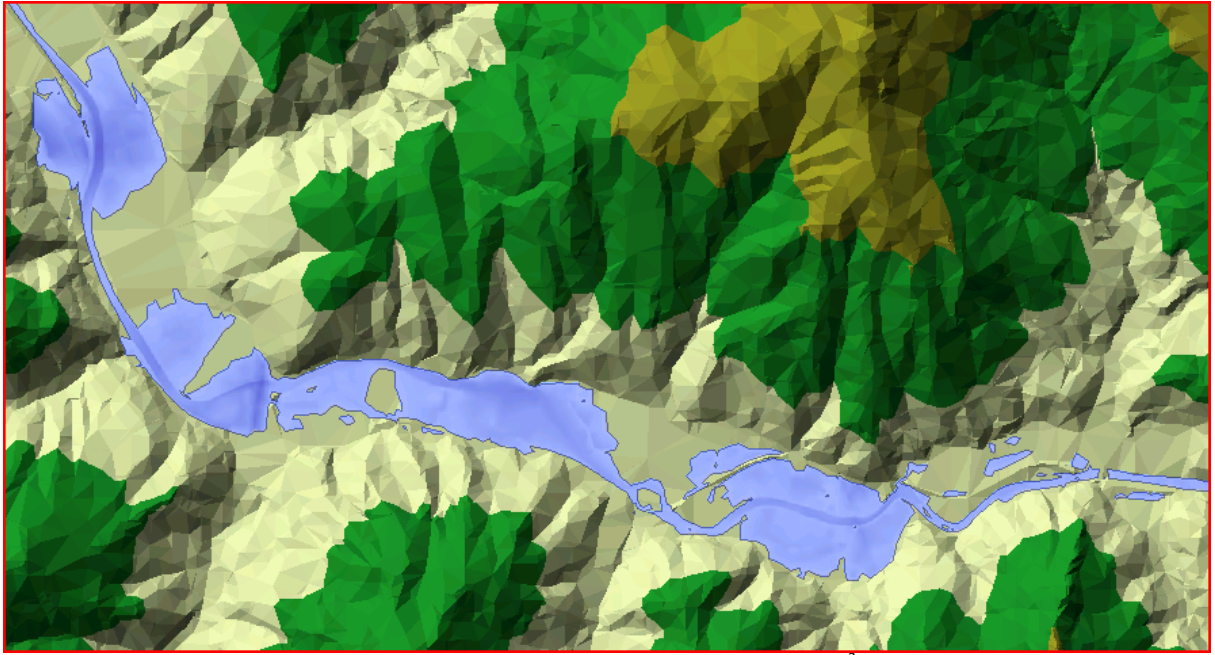


Ejemplo representación sobre TIN 1.329.387 nodos. Fuente: elaboración propia.

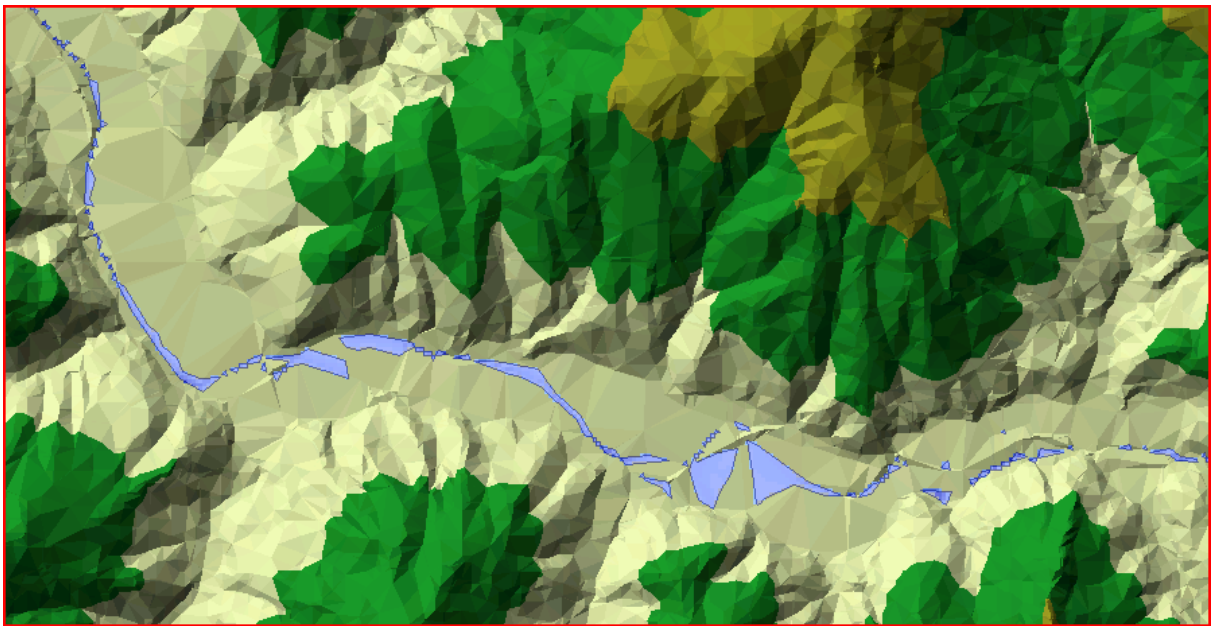
Como se aprecia en las figuras anteriores hay similitud entre ambos resultados a pesar de la enorme diferencia entre el número de nodos de ambos TINs.

Se ha conjeturado también la posibilidad de que el programa, al estar ideado para trabajar con ríos de gran longitud y cuencas muy extensas, funcione mejor con TINs de menor resolución. Se han hecho numerosas simulaciones a tal efecto, sin embargo los resultados obtenidos no difieren de los que se daban utilizando modelos de mayor resolución espacial. Además aun en caso de que la representación de la simulación funcionara a nivel gráfico, esta distaría mucho de ajustarse a la realidad debido a la pérdida de resolución espacial en el proceso de su ejecución.

Lo único a nivel experimental que ha funcionado para generar representaciones gráficas de simulaciones de inundación que tengan una representabilidad lógica y se ajusten a la realidad del terreno es la utilización de caudales volumétricos de gran envergadura, para los cuales el programa Hec-GeoRas genera unos resultados que se parecen en gran medida a los deseables y esperados. Basta una pequeña reducción del caudal volumétrico para que la representación se distorsione y corrompa sobremanera, como se muestra en la siguiente figura (ambas representaciones se han realizado sobre un TIN de 1.329.387 nodos:



Representación de inundación para caudal 200m³. Fuente: elaboración propia.



Representación de inundación para caudal 100m³. Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

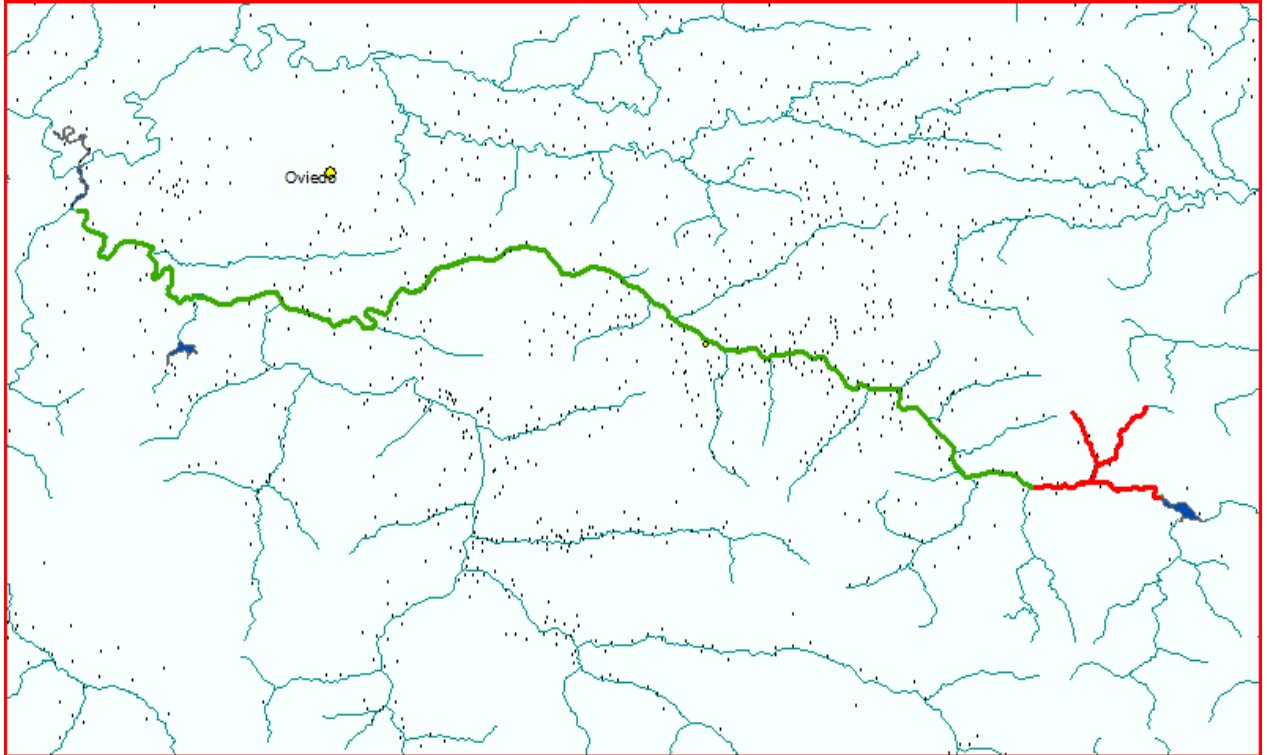
El presente estudio, que entre otros se basa principalmente en el trabajo previo realizado por Máximo Calvo Ordás en 2013 titulado “Desarrollo de un GIS para gestión de riadas utilizando GvSig”, tenía como objetivos fundamentales, establecidos en el propio trabajo en el apartado Objetivos, expuestos de modo resumido, los siguientes:

- Recreación de las simulaciones de Calvo de 2013 y creación de un protocolo para la recreación de las mismas.
- Ampliación del área geográfica.
- Corrección del problema de los parches en la lámina de agua.
- Estudio de la posibilidad de creación de un modelo meteorológico.
- Creación de las bases para una herramienta de gestión de caudales.

En lo que se refiere al estudio del trabajo de Calvo de 2013, se ha conseguido con éxito recrear las simulaciones desarrolladas en este y se ha establecido un protocolo para la recreación de las mismas, con los pasos necesarios expuestos de forma exhaustiva y detallada que cumplan con la intención de permitir su uso por parte de un usuario con conocimientos muy básicos de manejo de SIG. Este protocolo ha de servir para agilizar el trabajo de estudios posteriores, que ya no tendrían que invertir tanto tiempo en estudiar como recrear las simulaciones, pudiendo con ello avanzar más y en mejor forma en el objeto de sus estudios.

Además se ha procedido con éxito a la ampliación geográfica del área de estudio de manera significativa, de forma que ya se han podido realizar simulaciones de inundación en el tramo de cuenca comprendido entre las presas de Rioseco y Priañes, lo cual constituye un tramo muy importante de la cuenca del Nalón, en cuanto a extensión y a importancia socioeconómica de la zona. Mientras que el área estudiada en 2013 simplemente servía de “patio de pruebas” y ejemplo de lo que el programa podía hacer, debido a su escasa extensión y a la relativamente baja importancia socioeconómica de la zona estudiada no constituía un modelo apto para su aplicación en cuanto al nivel de utilidad real del mismo. En cambio la zona para la que se ha desarrollado el modelo de simulación de riadas en el proyecto presente sí que corresponde con un tramo de importancia relativamente significativa dentro de lo que es la cuenca del Nalón y la comunidad autónoma asturiana, tanto por su extensión longitudinal y

superficial como por la importancia en cuanto a presencia de núcleos de población, estructuras e instalaciones industriales en la misma. A continuación se muestra un esquema en el que se destaca la zona del estudio de Calvo, 2013 (en color rojo) y la ampliación del presente trabajo (en color verde).



Esquema de la ampliación del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

En tanto que el trabajo de Calvo de 2013 presentaba la importante problemática de la representación de la lámina de inundación en forma de parches, en lugar de una lámina continua, en el presente trabajo se ha trabajado en intentar corregir el problema siguiendo todas las pautas posibles, tanto las ya apuntadas en 2013 como aquellas de iniciativa propia de este trabajo. Los resultados parecen indicar que el software utilizado funciona a la perfección con caudales volumétricos de gran importancia, generando una lámina de agua de inundación continua y ajustada a lo que se consideraría un comportamiento lógico del agua con respecto al terreno en que se encuentra. Sin embargo para caudales normales o no tan elevados la simulación de inundación genera resultados totalmente erráticos, con superficies de inundación formadas a base de parches de agua aislados y sin siquiera seguir el curso normal del río. Sin tener muchas pruebas para ello, pero en base a los resultados obtenidos, parece ser posible afirmar que el software ha sido diseñado para ríos amplios,

de orografía más uniforme y caudales volumétricos de gran calibre, lo que *a priori* concordaría con el origen de desarrollo del programa. En conclusión el software y procedimiento utilizado en este estudio sería probablemente válido para otros ríos de la península ibérica de orografía más regular y mayor volumen de caudal, pero parece ser de difícil aplicabilidad a ríos situados en relieves montañosos y con caudales de menor envergadura como son los de Asturias y en general toda la cornisa cantábrica.

En lo que se refiere a la posibilidad de realización del modelo meteorológico, se ha obtenido la conclusión de que la realización de tal modelo es poco viable para nuestro área de estudio, debido a la falta de acceso abierto y gratuito a datos meteorológicos y a la ausencia de estaciones automáticas de la red de la Agencia Estatal de Meteorología en la cabecera del río Nalón.

Por último hemos procedido a sentar las bases para la creación de una herramienta para la gestión de caudales. En este sentido se ha creado una matriz de condiciones de flujo, que partiendo de datos de entrada de precipitación prevista para un tiempo determinado nos proporciona las condiciones de flujo esperables, en cuanto a caudal volumétrico y altura del nivel del río. Con estos datos la herramienta a desarrollar podría realizar la simulación de inundación en Hec Ras, generando un resultado gráfico mostrando si se produciría un desbordamiento del cauce del río, y de ser así, en qué puntos y que áreas y estructuras humanas se verían afectadas.

Este estudio ha cumplido por tanto con sus objetivos fundamentales, sentando las bases para la creación de una herramienta de gestión del cauce que proporcione la capacidad para la mejora de los servicios de protección ciudadana y alerta ante desastres naturales. Además el mejor conocimiento de las condiciones de inundación proporciona herramientas eficaces para la gestión de las zonas de cuenca, tanto para la planificación urbana como para la gestión de los usos consuntivos y no consuntivos del cauce. Por último pero no menos importante, serviría como herramienta de gestión de las presas del cauce, permitiendo una mejor toma de decisiones en cuanto a la suelta de aguas realizadas en las mismas por las empresas y organismos gestores. Si bien parece ser que podría no ser aplicable a ríos asturianos o de la vertiente norte de la península, bien podría ser de aplicabilidad para otras cuencas fluviales de España y la península ibérica.

Los futuros trabajos que se realizasen a partir de este estudio podrían encaminarse en las siguientes direcciones:

- Creación de la herramienta gestión de caudales: en esta línea el trabajo debería de perfeccionar la exactitud de los datos de la matriz, que en nuestro trabajo si bien se basan en datos históricos reales, son estimativos; y trabajar en la línea de creación del software capaz de realizar automáticamente las simulaciones con la simple elección del usuario de la precipitación esperada para un tiempo dado.
- Migración geográfica del área de estudio a cuencas de ríos ibéricos de mayor envergadura en cuanto a caudal.

Bibliografía y páginas web

- Calvo Ordás, Máximo (2013) “Desarrollo de un GIS para gestión de riadas utilizando GvSig” Universidad de Oviedo.
- Molero Melgarejo, Emilio (2013) “Manual básico de Hec-GeoRas 10” Tercera edición. Universidad de Granada.
- Molero, Emilio y S. Naniá, Leonardo (2007) “Manual básico de Hec-Ras 3.1.3 y Hec-GeoRas 3.1.1”. Universidad de Granada.
- Hidrology Engineering Center (2012) “GIS tools for support of Hec-GeoRas using ArcGis 10” US Army Corps of Engineers.
- Hidrology Engineering Center (2012) “HEC RAS River Analysis System, Application guide” US Army Corps of Engineers.
- Hidrology Engineering Center (2012) “HEC RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual” US Army Corps of Engineers.
- Hidrology Engineering Center (2012) “HEC RAS River Analysis System, User’s Manual” US Army Corps of Engineers.
- Ministerio de Obras Públicas (1990) “Instrucción 5.2-IC Drenaje superficial” Tecnología y carreteras MOPU.
- Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables en la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental (2011) “EVALUACIÓN PRELIMINAR DE RIESGO DE INUNDACIÓN (EPRI) MEMORIA” Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- CEDEX (2011) “Procedimiento de trabajo GIS para delimitar las zonas inundables” Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Díez, A. (2006). Documentación sobre Riadas y sus Riesgos en España (DIRE). Versión 1.1, febrero de 2006. <http://www.riada.es>

- BESCÓS ATÍN, A. Elaboración de cartografía de zonas inundables. Aplicación al llano de inundación del río Arga (Navarra). Serie Geográfica, 2000, n1 9, p. 219-236.
- Sánchez Sanromán, F. Javier (2013) “Medida de caudales” Dpto. de Geología. Universidad de Salamanca.
- Ibáñez Asensio, Sara (2006) “Métodos para estimar la escorrentía de una cuenca de pequeño tamaño” Universidad Politécnica de Valencia.
- DGPC y DGOH (1985): Estudio de Riadas Históricas. Mapas de Riesgos Potenciales. Dirección General de Protección Civil y Dirección General de Obras Hidráulicas, 2 vol.
- INUNcyl (2010) “Plan de Protección Civil ante el Riesgo de Riadas en la Comunidad Autónoma de Castilla y León” Junta de Castilla y León
- Berga Casafont, Luis (2011) “Las riadas en España. La nueva Directiva Europea de Riadas” Revista de Obras Públicas nº 3520.
- Anuario de aforos CEDEX
<http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>
- Sistema de Información del Anuario de aforos MAGRAMA
<http://sig.magrama.es/aforos/>
- SAIH Cantábrico
<http://saih.chcantabrico.es/cantabrico/index.php>
- Agencia Estatal de Meteorología
<http://www.aemet.es/es/portada>
- Instituto Geográfico Nacional
<http://www.ign.es/ign/main/index.do>
- Instituto Nacional de Estadística
<http://www.ine.es/>

- Confederación Hidrográfica del Cantábrico
<http://www.chcantabrico.es/index.php/es/>