

SIG y realidad: Inundaciones en *As Pontes de García Rodríguez* (A Coruña)

GIS and reality: floods in As Pontes de García Rodríguez (A Coruña)

ALEXANDRE LUIS VÁZQUEZ RODRÍGUEZ

Universidade de Santiago de Compostela

RESUMEN

Las inundaciones son el riesgo natural con mayor impacto social y económico. El desarrollo antrópico de la cuenca hidrográfica del río Eume hace que sea importante controlar los factores que contribuyen a las inundaciones de la zona. Para este proyecto, el rol de los sistemas de información geográfica es fundamental, ya que, junto al método racional hidrológico, permiten estimar el alcance de estas para realizar una posterior planificación con la que minimizar las pérdidas económicas y humanas que conllevan. Por esto, se ha elaborado la cartografía de las zonas inundables en el sector de *As Pontes de García Rodríguez*, sector vulnerable a las crecidas del río Eume, estableciéndose una serie de medidas para minimizar los daños posibles. La delimitación de las áreas inundables se ha llevado a cabo combinando métodos estadísticos, hidrológicos y geomorfológicos, siendo algunos procedimientos del proyecto automatizados mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG)

Palabras clave: Río Eume, inundaciones, riesgo natural, cartografía, sistemas de información geográfica.

ABSTRACT

Floods are the natural hazard with major social and economic impact. The anthropic development of Eume river's basin makes important to control the factors that contribute to flooding the area. For this project, the role of the geographic information systems is fundamental, because, together with the hydrological rational method, they allow to estimate the extent of these for further planning with which minimize the economic and human losses that involve. For this, it had developed mapping floodplains in the area of *As Pontes de García Rodríguez*, vulnerable sector to the flooding of the Eume River, establishing a series of measures to minimize possible damage. Delimiting of flood areas has been carried out by combining statistical, hydrological and geomorphological methods, with some automated project procedures using geographic information systems (GIS)

Keywords: Eume river, floods, natural hazard, mapping, geographic information systems.

1. INTRODUCCIÓN

Una inundación es un flujo de agua superficial mayor que supera su confinamiento habitual. Esta penetración de los márgenes habituales tiene su principal origen en las precipitaciones. Todos los ríos presentan irregularidades que dan lugar a pequeñas inundaciones frecuentes, ocasionales avenidas y escasas inundaciones extraordinarias, pero todas pueden ocasionar pérdidas humanas y económicas. En la cuenca del río Eume se dan frecuentemente episodios menores de inundación, debido a factores como la gran cantidad de precipitaciones que recibe anualmente la zona, o la poca permeabilidad de sus materiales, entre otros. Este estudio se va a focalizar en el sector de la cuenca correspondiente al núcleo *As Pontes de García Rodríguez*.

La finalidad de los mapas de zonas inundables es zonificar el espacio adyacente a los ríos basándose en la probabilidad de que sea afectado por uno de estos eventos. Para ello se emplean los Sistemas de Información Geográfica, para crear la delimitación cartográfica de las zonas inundables, la cual sintetiza el conjunto de conocimientos hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos de la superficie inundable (Mateu, 1989) y lleva intrínseca una valoración del nivel de riesgo. Es un instrumento de planificación útil para mitigar los posibles daños producidos por las inundaciones. En la actualidad, existe un proyecto de cartografía nacional de zonas inundables en el que se recoge que en un par de secciones del río Eume, en su desembocadura y en el área de *As Pontes*, existen tramos del río como áreas de riesgo potencialmente significativo, sin existencia del área que llegaría a inundarse, ni a que períodos de retorno corresponderían, siendo esto lo único que figura en la cartografía de los organismos oficiales.

El interés de estudio reside en la divulgación del riesgo de inundaciones, en una zona donde casi se desconoce, y en la utilidad de los SIG para su análisis, búsqueda de causas y establecimiento de posibles soluciones.

1.1. Situación geográfica

La cuenca del río Eume se ubica en el sector noroeste de Galicia entre los 43° 31' N y los 43° 16' N de latitud y los 8° 10' W y los 7° 33' W de longitud (fig. 1), tiene 450 km² de área, conteniendo parte del territorio de 11 municipios, y una población estimada de 30000 habitantes (INE, 2014).

El clima es oceánico, con registros anuales entre los 1.600 l/m² y 2.000 l/m² de precipitaciones (Meteogalicia, 2013), siendo la Serra do Xistral, lugar de nacimiento del río Eume, una de las áreas que presenta los valores de precipitaciones más altos de la región. La ubicación geográfica de la cuenca, próxima al océano Atlántico, hace que reciba todas las borrascas originadas en el océano, lo que explica la gran cantidad de precipitaciones recibidas y que los eventos extraordinarios en forma de ciclones de tengan efecto sobre el territorio (Martínez Cortizas; Pérez Alberti, 1999).

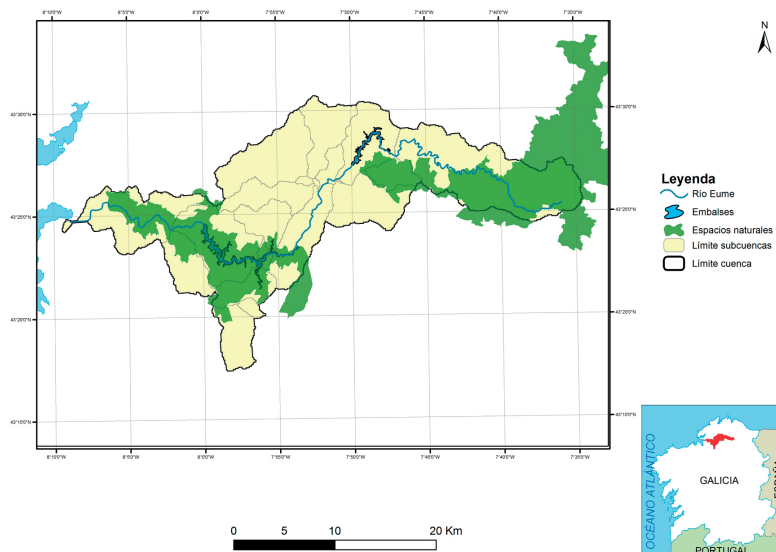


Figura 1. Situación geográfica de la cuenca del río Eume.

La cuenca del río Eume se ubica en la parte noroeste del macizo Ibérico. La región se localiza en el límite entre las unidades Centroibérica y Galicia-Tras-os-Montes, zonas de orogenia hercínica, con presencia de materiales paleozoicos (granito y cuarcitas) (Vera, 2004) (fig. 2).

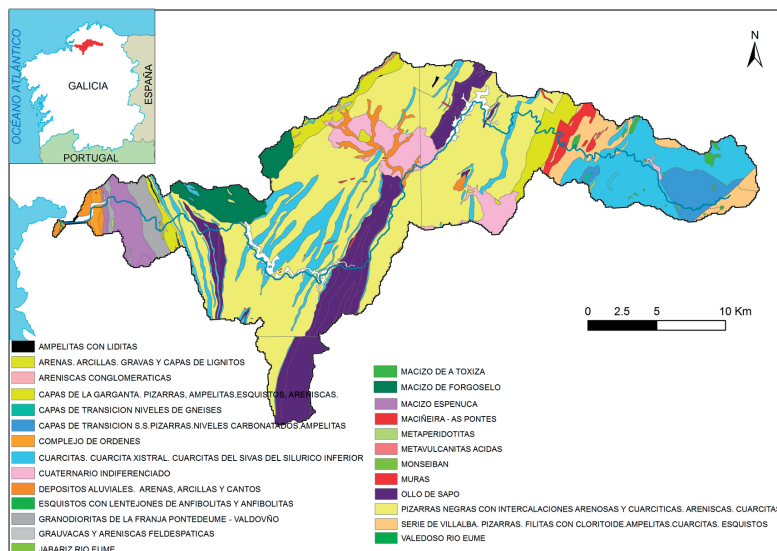
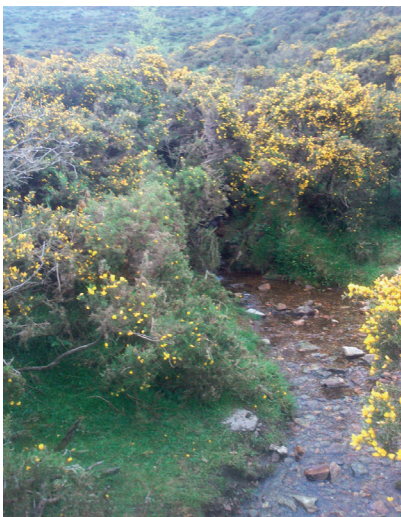


Figura 2. Mapa geológico de la cuenca del río Eume.

El río Eume nace en *Xeixobranco* (fig. 3), a partir de la unión de los regos de *Toxeiras* y *Lamoso*, en la vertiente suroeste de la *Serra do Xistral*, provincia de Lugo, y desemboca en el océano Atlántico a través de la *ría de Ares*, provincia de *A Coruña*. Su longitud es de 80 km, su cota máxima de 800 m, en su nacimiento, y la mínima de 0 m, en su desembocadura. El río presenta las características comunes de todos los ríos atlánticos gallegos: sectores de fuerte asimetría, presencia de escalones en el perfil longitudinal del río y encajamiento en diversos tramos de su recorrido.

En el ámbito geomorfológico se pueden diferenciar 3 unidades diferentes a lo largo de su cauce:

- En la cabecera, un relieve montañoso, abrupto y con pendientes escarpadas. En esta parte del recorrido, el río circula encajadamente sobre materiales graníticos. Existe un importante sector de turberas en esta sección, con un papel regulador del agua que recibe el río. Tienen gran capacidad para acumular agua en el interior de su cuerpo, actuando como reservorios a lo largo de todo el año. Retienen agua cuando hay excesos de precipitación y la transfieren lentamente a los sistemas de drenaje que desembocan en el río, mitigando las crecidas de este y aportando agua en épocas de déficit hídrico (fenómeno de la infiltración).
- En el sector central, está la cuenca terciaria de *As Pontes*, originada por una fracturación alpina de una falla con orientación NO-SE. Fuertemente antropizada, debido a la larga actividad minera que ha experimentado con la extracción de lignito durante el último medio siglo. Esta mina se cerró hace casi una década y, mediante trabajos de recuperación y regeneración, se convirtió en un lago artificial con finalidad turística.
- En la desembocadura, el relieve se caracteriza por pendientes suaves y zonas llanas. En esta parte se ubica el Parque Natural de *As fragas do Eume*, denso bosque de ribera compuesto por robles, castaños, abedules y por vegetación arbustiva (helechos).



Tanto en el sector intermedio, como en la desembocadura existen unas presas que alteran el régimen fluvial del río, ya que en época de precipitaciones, se recurre a su vaciamiento en varias ocasiones, lo que es un aporte hídrico importante adicional.

Figura 3. Nacimiento del río Eume.

1.2. Área de estudio: *As Pontes de García Rodríguez*

As Pontes de García Rodríguez se ubica en el sector central de la cuenca del río Eume, entre los 43° 26' N y los 43° 28' N de latitud y los 7°50' W y los 7°52' W de longitud (fig. 4), es la capital del municipio homónimo y cuenta con 9003 habitantes (INE, 2014). Se localiza en las orillas del río Eume, en la parte SE de una subcuenca de 6,5 km², que se va a tomar como área de estudio (fig.4).

Dentro de la diversidad de materiales de la cuenca del río Eume, el asentamiento se ubica sobre materiales del Cuaternario indiferenciado y pizarra, existiendo otro tipo de materiales geológicos (fig.5) dentro de la subcuenca.

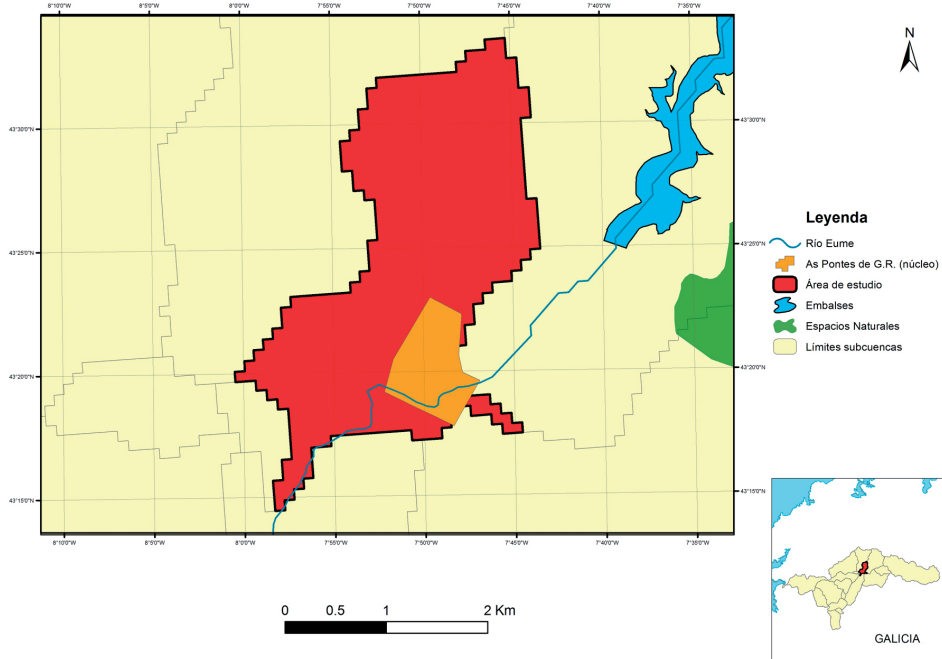


Figura 4. Situación geográfica de la subcuenca de *As Pontes*.

A 2 km de la subcuenca se localiza el embalse de *A Ribeira*. Tiene un rol destacado en las inundaciones, ya que puede contribuir a reducir el impacto del río aguas abajo, a la vez que también generan un peligro potencial para *As Pontes*, porque se abre en varias ocasiones al año para su vaciamiento, debido a la gran cantidad de precipitaciones anuales que recibe el área. También puede suceder que sufriese una ruptura que generase una gran avenida, como ocurrió en la presa de Vega de Tera en Ribadelago (Zamora) en 1959 o en la presa de Tous (Valencia) en 1982, contemporáneas a esta, construida en

1953. Se ha elaborado la cartografía de las zonas inundables que se verían afectadas en caso de que esto sucediese. Para ello, se ha estimado el caudal de agua que se liberaría si en el momento de la rotura total del embalse, estuviese a plena capacidad, empleando la *Guía técnica para la elaboración de Planes de Emergencia de Presas* del Ministerio de medioambiente de junio de 2001.

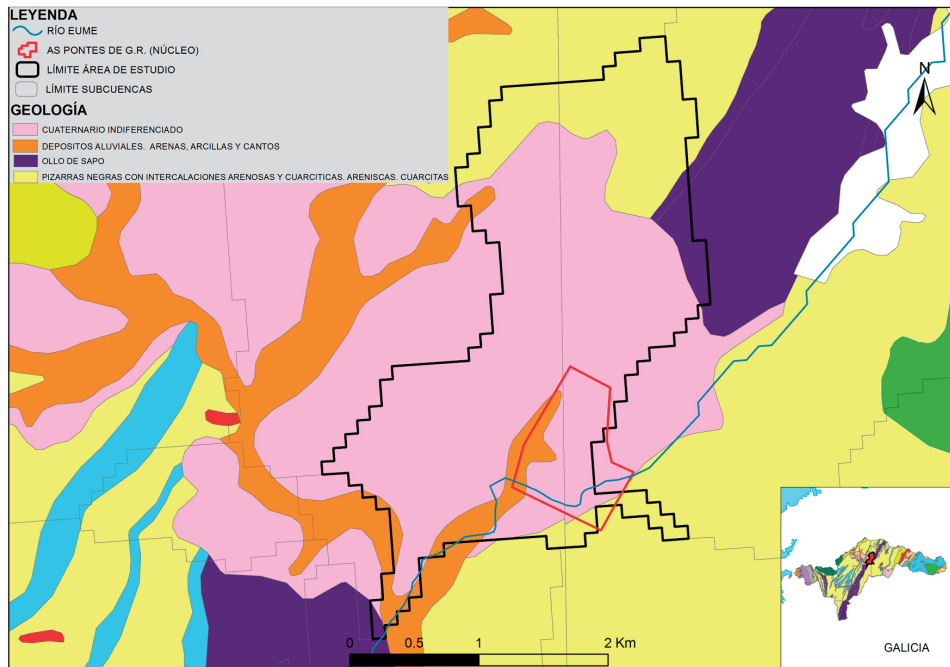


Figura 5. Mapa geológico de la subcuenca de *As Pontes*.

1.3. Antecedentes de inundaciones

En la actualidad, no existen registros de grandes catástrofes ocurridas en la cuenca del río Eume a causa de las inundaciones. Sí existen registros de eventos menores, que se dan con mayor frecuencia en el área de estudio. Las últimas inundaciones registradas sucedieron en enero de 2013, a causa del ciclón *Gong*. Del 16 al 19 de enero de 2013 cayeron sobre la cuenca del río Eume 180 l/m² (tabla I), lo que provocó la apertura de los embalses de la cuenca para su vaciamiento. Esto, y las intensas precipitaciones, dieron lugar a inundaciones puntuales en los municipios de *As Pontes de García Rodríguez*, *Pontevedra* y *Cabanas*, lo que hizo que la *Xunta de Galicia* declarase la alerta por crecida del río, se movilizasen los servicios de emergencias de los municipios implicados, y que se tomasen precauciones por parte de la población local para evitar daños posibles.

Tabla I
Precipitaciones en la región de estudio en enero de 2013.

Fecha	Precipitaciones (l/m ²)	Fecha	Precipitaciones (l/m ²)
01/01/13	8	17/01/13	38
02/01/13	0	18/01/13	55
03/01/13	0,2	19/01/13	51
04/01/13	0	20/01/13	16
05/01/13	0	21/01/13	15
06/01/13	0	22/01/13	13
07/01/13	0	23/01/13	23
08/01/13	3,2	24/01/13	1
09/01/13	11	25/01/13	8,4
10/01/13	3	26/01/13	1
11/01/13	2,2	27/01/13	20
12/01/13	19	28/01/13	0,4
13/01/13	8,4	29/01/13	0
14/01/13	4,2	30/01/13	15
15/01/13	3,8	31/01/13	11
16/01/13	35	Total precipitaciones (l/m ²)	365

1.4. Objetivos

El objetivo principal del proyecto es la elaboración de la cartografía de zonas inundables del sector de la cuenca de *As Pontes de García Rodríguez*. La cartografía de zonas inundables de un área es compleja, pero necesaria. Delimitar las zonas inundables de una zona, y relacionarlas con los caudales y los períodos de retorno que les correspondan, es obligatorio para una buena planificación que contemple las inundaciones.

Los otros objetivos del proyecto, derivarían de la creación de estos mapas, ya que se tratan de un instrumento decisivo para definir las medidas de mitigación que minimizarán el impacto causado por este tipo de eventos. Son útiles para la planificación territorial de los municipios, tanto para el escenario en que ya haya elementos expuestos, en los que hay que establecer medidas para evitar los posibles daños originados por una inundación, como en el escenario de que en estas zonas aún no existan elementos expuestos, lo que hará redefinir qué tipo de usos del suelo tendrán estos terrenos, porque son zonas potencialmente inundables.

2. METODOLOGÍA

La metodología del trabajo se compone de tres partes:

- El estudio previo de la zona, elaborando el contexto geográfico y geológico de la zona, realizando una búsqueda de los datos disponibles relacionados con las inundaciones (antecedentes, precipitaciones, noticias...), en el que también se incluye el trabajo de campo sobre el área de estudio, para revisar dicha área y recopilar datos necesarios para elaborar la cartografía.
- El trabajo teórico en el que se trataran los datos obtenidos durante la primera fase del proyecto, para, aplicando el método racional, aportar los datos indispensables al desarrollo de la cartografía deseada.
- La ejecución, con su posterior corrección, de dicha cartografía.

2.1. Estudio previo

Se ha realizado un estudio preliminar de la información disponible sobre la cuenca del río Eume para certificar la viabilidad del estudio. Existe dos estaciones meteorológicas de la que obtener series de datos de precipitación: una de Meteogalicia, *Marco da Curra* y una de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), *As Pontes*, dentro del área de estudio. También existe dos estaciones de aforo del Ministerio de Medio Rural, Ambiente y Marino operativas, *Eume-Ribeira* y *Eume-Fragas*, de las que obtener series de datos hidrológicos. De estas estaciones, se han utilizado para obtener los elementos para la elaboración de la cartografía de zonas inundables los datos de la estación meteorológica de *As Pontes*, y los de la estación de aforo de *Eume - A Ribeira*, localizada a 2 km al NE del área de estudio (fig. 6).

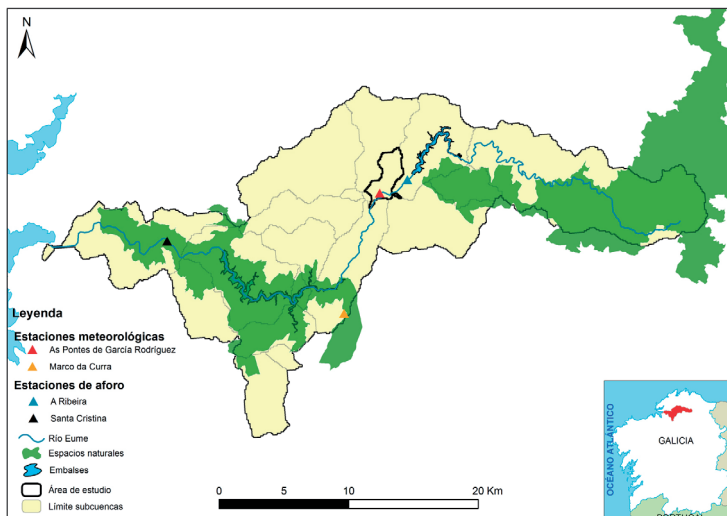


Figura 6. Localización de las estaciones de datos en la cuenca del río Eume.



Figura 7. La línea roja marca hasta donde llegó la lámina de agua en el evento sucedido en enero de 2013 según un testimonio recogido.

Se realizó trabajo de campo sobre la zona de estudio para recoger información oficial municipal, localizar zonas potencialmente inundables, registrar marcas de eventos de inundaciones anteriores (fig. 7) y realizar encuestas a la población sobre eventos pasados históricos y recientes.

2.2. El método racional

Se ha utilizado el método racional, adaptado a España por Témez (1978) y modificado por Ferrer (1993), por tratarse de un método hidrometeorológico que tiene en cuenta los factores principales que intervienen en los caudales de crecida. Aplicándolo, se obtuvieron los datos de caudales máximos necesarios para realizar la modelización unidimensional del río en la zona de estudio, para los períodos de retorno de referencia: 25, 50 y 100 años.

Se han calculado los elementos obligatorios previos a las operaciones del método racional: la geología de la zona, la precipitación umbral corregida, la intensidad de las precipitaciones y el coeficiente de *Manning* para las riberas y para el canal del río.

Se ha estimado una geología de tipo C para la zona, según la clasificación de los suelos del *Natural Resources Conservation Service* de Estados Unidos, organismo de referencia para estos casos, suelos compuestos por materiales poco permeables y un contenido en arena no superior al 50 % de este. La geología de la zona modifica qué valor tomar para calcular el número de curva.

Para corregir los efectos de la humedad del suelo en el área de estudio, se ha utilizado un factor regional de 1,5, utilizado en la estimación de la precipitación umbral corregida, a partir del mapa del coeficiente corrector del umbral de escorrentía (fig. 8).

Para calcular la intensidad de las precipitaciones se ha tomado 8 como valor de la relación $I1/Id$, según el mapa de isolíneas de la península Ibérica elaborado por Témez (fig. 9), ya que la posición geográfica de la cuenca coincide con este valor en él.



Figura 8. Mapa del coeficiente corrector del umbral de escorrentía. La ubicación de la cuenca del río Eume señalada en rojo. Fte: J.R. Témez.

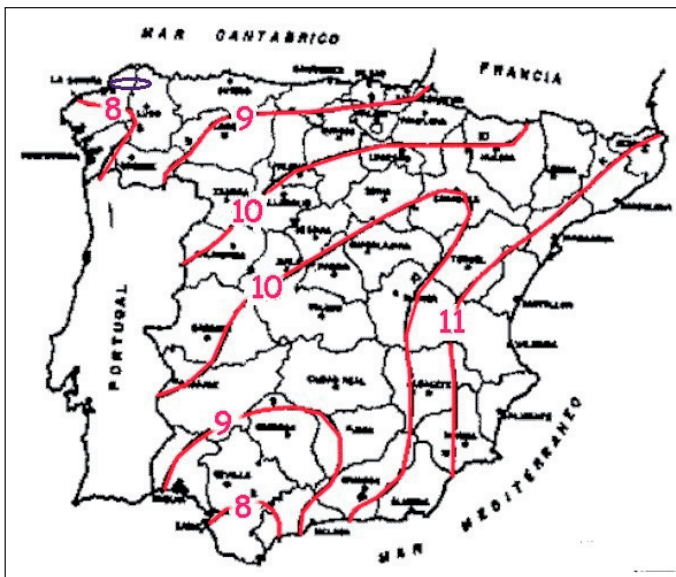


Figura 9. Mapa de isótopos de la península Ibérica. La ubicación de la zona de estudio señalada en azul. Fte: modificado de J.R. Témez.

Se ha utilizado un coeficiente de *Manning* para el canal del río de 0,025, porque tiene las siguientes características: natural, rectilíneo, limpio y con piedras y vegetación herbácea en el fondo (Chow, 1959). Para la ribera del río, se ha tomado como valor de 0.06, por el predominio de maleza y pocos árboles en la ribera del río en esta zona (Chow, 1959). Esto dará unos resultados que serán una aproximación más o menos precisa a la realidad, y permitirán establecer los órdenes de magnitud necesarios para elaborar la cartografía.

La fórmula empleada para la estimación de los valores de caudal máximo para diferentes períodos de retorno es:

$$Q_p = \frac{C \cdot I \cdot S}{3,6}$$

En la que:

Q_p (m³/s) = Caudal punta correspondiente a un período de retorno determinado

C = Coeficiente de escorrentía del intervalo en el que se produce I

I (mm/h) = Máxima intensidad media de las precipitaciones en el intervalo de duración T_c (tiempo de concentración de la cuenca)

S (km²) = Superficie de la cuenca

Para obtener el valor de estas variables se deben realizar los cálculos de las fórmulas del método racional (Tabla II).

Las variables previas al cálculo del caudal pico son:

La precipitación máxima diaria para distintos períodos de retorno: Necesaria para calcular la precipitación diaria corregida (P_d'). Para obtener el volumen para períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, se ha utilizado la fórmula de la guía *Máximas lluvias diarias en la España peninsular* (Ministerio de Fomento, 1999) (tabla II).

Para hallar el cuantil regional (Y_r), obligatorio para esta variable, se toma el coeficiente de variación regional del Mapa de isolíneas del valor regional del coeficiente de variación (C_v) elaborado por el Ministerio de Fomento (fig. 10).

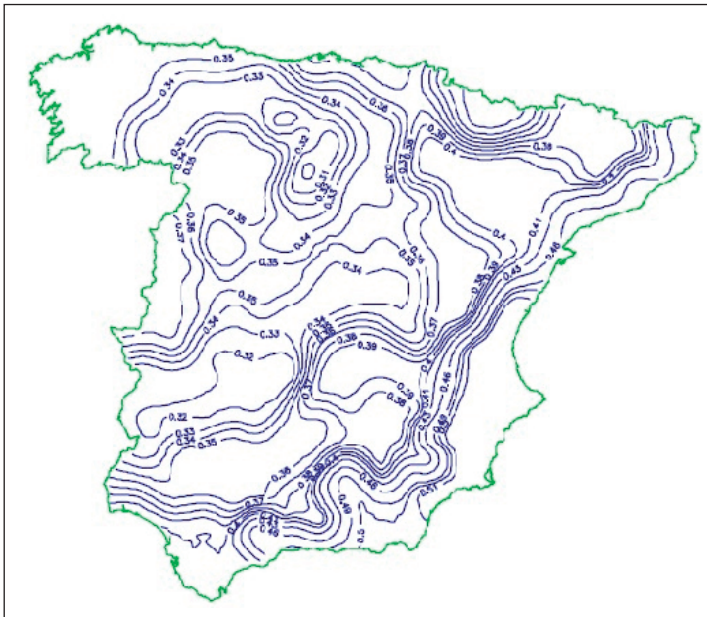


Figura 10. Mapa de isolíneas del valor regional del coeficiente de variación. Fte: Ministerio de Fomento.

Tabla II
Variables y fórmulas calculadas en el método racional

Variable	Fórmula	Donde
Cálculo de la precipitación máxima diaria para distintos períodos de retorno	$X_t = \bar{p} \cdot Y_t$	X_t (mm/día) = Volumen de precipitación máxima diaria para un período de retorno t (mm/día) = Precipitación media Y_t = Cuantil regional
Número de curva, precipitación umbral y precipitación umbral corregida	$P_o = \frac{5000}{NC - 50}$ $P'_o = P_o \cdot r$	P_o (mm) = Precipitación umbral (mm) = Precipitación umbral corregida NC = Número de curva r = Factor regional
Tiempo de concentración de la cuenca	$Tc = \frac{1}{1 + \sqrt{\mu \cdot (2 - \mu)}} \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{l}{j^{0,25}}\right)^{0,76}$	Tc (horas) = Tiempo de concentración μ (%) = Grado de urbanización de la cuenca l (m) = Longitud del río j (m/m) = Desnivel del río
Coefficiente de simultaneidad	$K_A = 1 - \frac{\log S}{15}$ $P'_D = K_A \cdot X_t$	K_A = Coeficiente de simultaneidad S (Km ²) = Superficie de la cuenca (mm) = Precipitación diaria corregida para una duración D (equivalente a un período de retorno t) X_t (mm/día) = Precipitación máxima diaria para un período de retorno T
Coefficiente de escorrentía	$C = (P'_D - P'_o) \cdot \frac{P'_D + 23 \cdot P'_o}{(P'_D + 11 \cdot P'_o)^2}$	C = Coeficiente de escorrentía (mm) = Precipitación diaria corregida para una duración D (equivalente a un período de retorno T) (mm) = Precipitación umbral corregida
Intensidad de las precipitaciones	$I_D = \frac{P'_D}{24 \cdot \left(\frac{I_1}{I_d}\right)^{\frac{28^{0,1} - D^{0,1}}{28^{0,1} - 1}}}$	I_D (mm/h) = Intensidad máxima de las precipitaciones para un evento de duración D (en el método racional equivalente al tiempo de concentración de la cuenca) (mm) = Precipitación diaria corregida para los diferentes períodos de retorno (mm/h) = Relación intensidad horaria y diaria

En el caso de la cuenca del río Eume el valor del coeficiente de variación es de 0,35, debido a su ubicación geográfica. Con este valor se obtiene el cuantil regional para los períodos de retorno (tabla III), necesario para obtener los valores de precipitación máxima diaria.

Tabla III
Cuantiles Y_t en el *Mapa para el cálculo de máximas precipitaciones diarias en la España peninsular*. Destacados los valores para la sección de estudio. Fte: Ministerio de Fomento

Cv	PERÍODO DE RETORNO (AÑOS)		
	25	50	100
0,30	1,625	1,823	2,022
0,35	1,732	1,961	2,220
0,40	1,839	2,113	2,403
0,45	1,945	2,251	2,586

Los valores del volumen de precipitación máxima diaria son:

Tabla IV
Valores de volumen de precipitación máxima diaria para diferentes períodos de retorno

T (años)	X_t (mm/día)
25	121
50	137
100	155

El número de curva (NC), es la estimación de la escorrentía generada por un evento de precipitaciones en función de las características de la cuenca: pendiente, humedad antecedente, tipo y usos del suelo (NRCS, 1949). Se ha calculado el número de curva de cada sección de estudio en función del tipo de suelo (C según el NRCS), y del tipo de uso (forestal, agrícola o urbano) (tabla V), mediante el producto entre cada valor de la geología tipo C y el porcentaje de cada uso de suelo en la sección de estudio. El porcentaje de cada tipo de uso (tabla VI) se ha estimado en función de los datos obtenidos del SIOSE (Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España) creado por el Ministerio de Fomento. Una vez hecho esto, se calculan los valores de precipitación umbral (P_o), la cantidad de lluvia límite que se puede infiltrar por el suelo, antes de que comience a circular por la superficie, corregida, variable necesaria para obtener el coeficiente de escorrentía (tabla II).

Tabla V

Valores para la curva de escorrentía según tipo y uso del suelo. Destacados los utilizados para la cuenca del río Eume. Fte: NRCS

Uso	A	B	C	D
Forestal	40	60	69	76
Agrícola	71	78	82	86
Urbano	89	92	94	95

Tabla VI

Porcentajes de usos del suelo y valores del número de curva de las secciones de estudio

Sección	Uso	Valor NC	Uso	Valor NC	Uso	Valor NC	Valor total NC
	Forestal (%)	Forestal	Agrícola (%)	Agrícola	Urbano (%)	Urbano	
<i>As Pontes</i>	20	13,8	50	41	30	28,2	83

El tiempo de concentración de la cuenca (T_c) es el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca aporten agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida de esta. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua procedente del punto más alejado de esta. Representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante y máximo (Ibáñez et al., 2011). El tiempo de concentración (tabla VII) es necesario para estimar los caudales pico.

Tabla VII

Tiempo de concentración de las zonas de estudio

Sección	Tipo	μ (l_1)	J (m/m)	T_c (h)
<i>As Pontes</i>	Urbana	0,3	0,01	5,65

El coeficiente de simultaneidad (K_A) se utiliza para corregir la no simultaneidad de las precipitaciones en cuencas superiores a 1 km² de superficie, como la de este estudio. Se multiplica por las precipitaciones máximas diarias para obtener las precipitaciones diarias corregidas, necesarias para obtener el coeficiente de escorrentía (tabla II). Los valores de precipitación diaria corregida (tabla VIII) se utilizarán para estimar el coeficiente de escorrentía de las secciones de estudio.

Durante un evento de precipitaciones, una parte del agua que cae sobre el terreno y se infiltra, otra parte se evapora y otra discurre por la superficie. El coeficiente de escorrentía (C) determina la parte del caudal que discurre por la superficie en relación al caudal total precipitado. Depende de diversos factores: la permeabilidad del suelo, la

temperatura de la zona o la intensidad y duración del evento de precipitaciones. Los valores del coeficiente de escorrentía (Tabla VIII) es una variable obligatoria para obtener el caudal pico.

Tabla VIII
Coeficiente de simultaneidad, valores de precipitación diaria corregida y coeficiente de escorrentía para diferentes períodos de retorno en la zona de estudio

Sección	KA	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	C para 25 años	C para 50 años	C para 100 años
As Pontes	0,88	106,36	120,42	136,25	15,36	0,55	0,59	0,64

Se ha estimado la intensidad de las precipitaciones (I) para eventos con una duración equivalente al del tiempo de concentración de las secciones de estudio. Los valores de intensidad de las precipitaciones es otro de los elementos necesarios para la estimación de caudales máximos. Los resultados son que para un período de 25 años la intensidad es de 13.12 mm/h, para 50 años 14.85 mm/h y para 100 años 16.81 mm/h.

Aplicando la fórmula del método racional,

$$Q_p = \frac{C.I.S}{2,6}$$

se han estimado los siguientes valores para los caudales máximos:

Tabla IX
Valores de caudal máximo para diferentes períodos de retorno

Sección	Q_{25} (m ³ /s)	Q_{50} (m ³ /s)	Q_{100} (m ³ /s)
As Pontes	131,30	160,11	193,64

Con estos datos se puede proceder a la modelización de este sector del río Eume.

2.3. Ejecución de la cartografía: Modelización y SIG

Se ha utilizado el sistema de información geográfica *ArcGIS 10*, el programa de modelización hidráulica *HecRAS 4.1* y su extensión *HecGeoRas*, integrada en el SIG. Los sistemas de información geográfica han sido útiles para trabajar la cartografía del presente proyecto, tanto para adquirir la estructura geométrica del río Eume, obligatoria para su modelización, como para trasladar los datos obtenidos del método racional al mapa y delimitar las zonas inundables.

La primera parte de este procedimiento se ha realizado con *ArcGIS 10*. Consiste en corregir la cartografía base obtenida de entidades gubernamentales, si es necesario, y

prepararla para crear una geometría para el río, necesaria para poder realizar la modelización. Para ello, se crean archivos *shapefiles* (tipo de archivo base que se emplean en los SIG), extraídos de la información obtenida, tales como la cuenca hidrográfica del Eume, el cauce del río (ambos de los archivos de cuencas y cauces del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España) o las curvas de nivel altitudinal de la zona, obtenible de un modelo digital terrestre del área (del Instituto Geográfico Nacional), necesario para crear un archivo tin (*triangulated irregular network*) (fig.11), porque genera los datos altitudinales para la creación de la geometría del río. También se ha empleado la herramienta *HecGeoRas* (fig. 12) para crear los archivos necesarios para la modelización: la llanura de inundación (*flow path centerlines*), el cauce en otro formato (*stream centerline*) y una serie de pares de líneas que extraen información, a lo largo de su longitud, de los archivos creados para realizar la modelización en 2D (*XS Cutlines*). Una vez se tienen todos los archivos requeridos (fig. 13) se importan a formato HecRAS en dos pasos: Se aplica la opción *Export RAS DATA* de *HecGeoRAS*, lo que crea un archivo que recoge todos los anteriores y se transforman con la aplicación *Import RAS SDF file*.

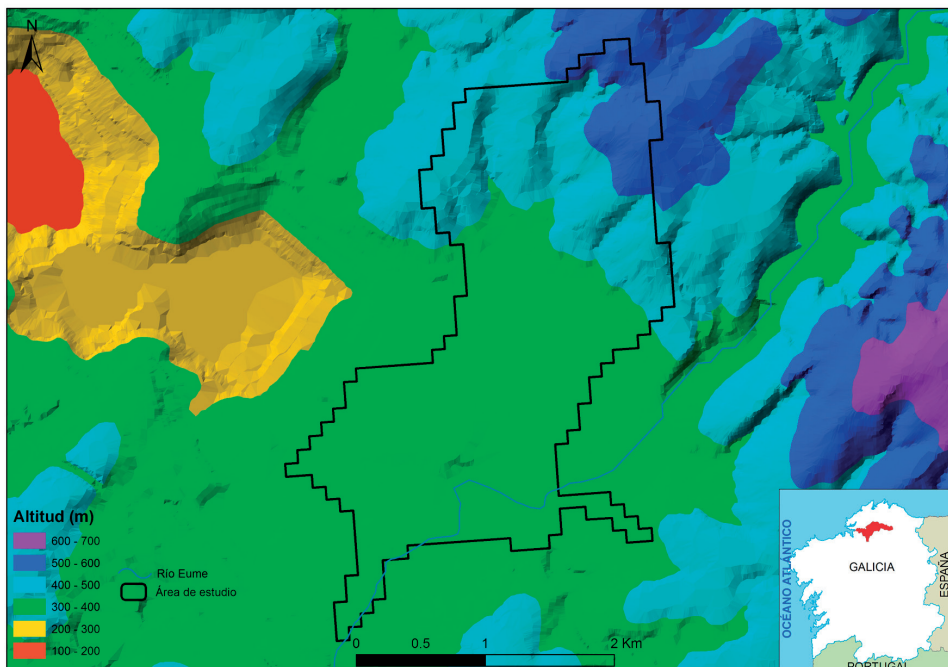


Figura 11. Archivo TIN de la zona de estudio. Fte: LiDAR-PNOA cedido por el Instituto Geográfico Nacional de España y elaboración propia.

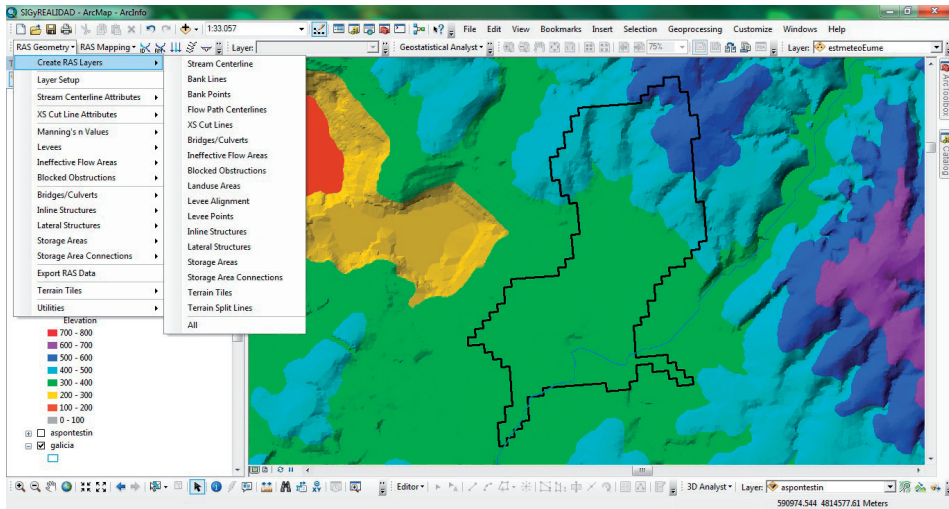


Figura 12. Listado de archivos creables con HecGeoRAS.

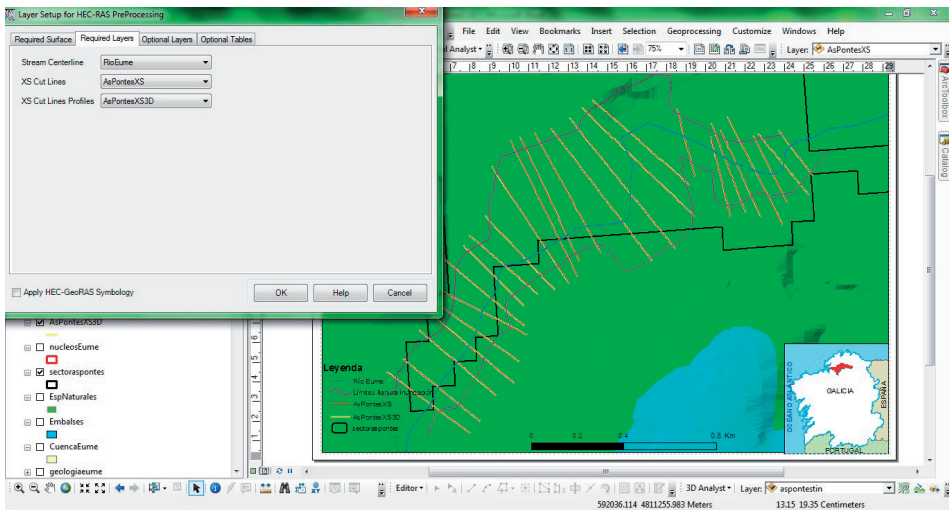


Figura 13. Archivos obligatorios para realizar una modelización.

Para modelizar se ha empleado *HecRAS 4.1*, creando un proyecto dentro del programa, en el que se procesa la estructura geométrica obtenida en el paso anterior, a la que se añaden los datos del coeficiente de *Manning* (para el cauce y ambas orillas) (fig.14), determinado antes de comenzar con el método racional, y los datos de caudal máximo, obtenidos de dicho método, mediante la opción *Steady flow data*. Hechas estas operacio-

nes, se procede a la simulación de las inundaciones para los períodos de retorno de 25, 50, 100 años (fig. 15) y para el caso de que se diese una ruptura total en el embalse de *Ribeira*, y se exporta a formato *ArcGIS*, para elaborar la cartografía.

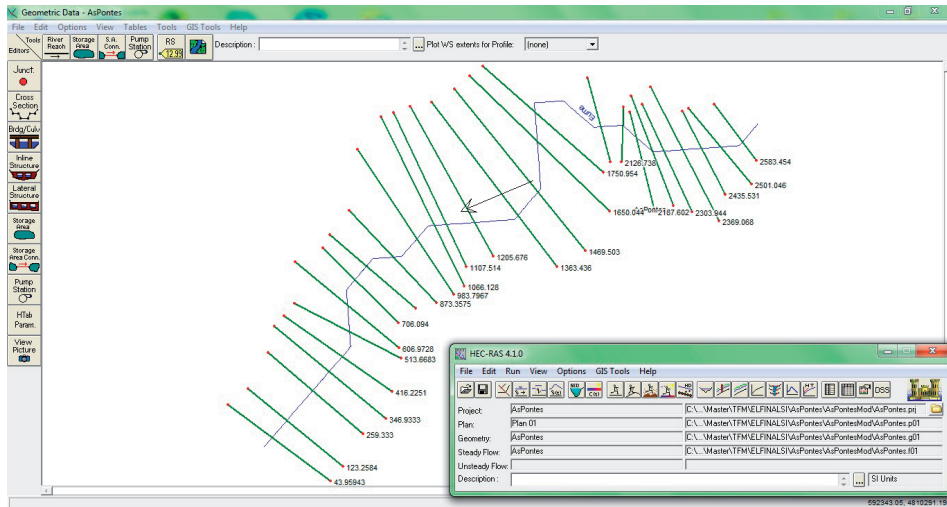


Figura 14. Coeficiente de Manning en *HecRAS*.

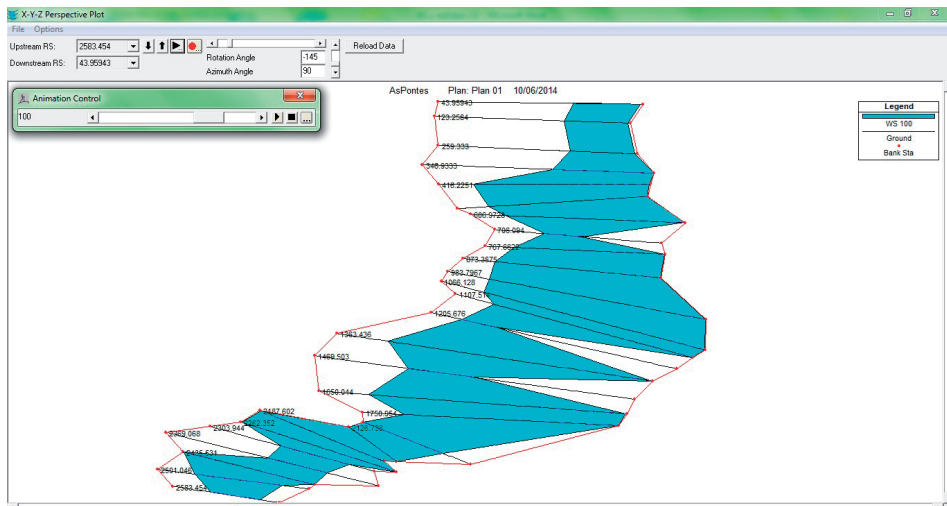


Figura 15. Simulación de la inundación producida en un período de retorno de 100 años en *HecRAS*.

En *ArcGIS*, se importan los archivos de *HecRAS* y se procesan para que se generen los *shapefiles* con las zonas inundables para cada período de retorno. *HecRAS* presenta ciertas limitaciones al pasar sus archivos a otra plataforma (áreas vacías dentro de una zona inundable cuando también lo es por ejemplo), por lo que los archivos obtenidos se deben corregir, si fuera necesario. El resultado es la cartografía de las zonas inundables de *As Pontes de García Rodríguez* para los períodos de retorno referentes de 25, 50 y 100 años y para el caso de que el embalse de *A Ribeira* sufriese una ruptura total.

3. RESULTADOS: LA DEFINICIÓN DE LAS ZONAS INUNDABLES

La cartografía resultante se ve afectada por las limitaciones de los datos y del software empleado para modelar. Para contrarrestar las limitaciones, se han corregido las anomalías iniciales que presentaban los resultados, reduciendo el error que puedan presentar los mapas.

Según el Manual Oficial del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos (2010), *HecRAS* aplica un modelo utilizando la ecuación de la energía del caudal y la evaluación de la pérdida de energía por fricción de *Manning*. El software reproduce la forma del cauce del río y la de la llanura de inundación, y determina la altura que alcanzará la lámina de agua en las condiciones que el usuario introduce. Habiendo aplicado a la sección el coeficiente de *Manning* más idóneo, los mapas resultantes serán una precisa aproximación a la realidad. El análisis de los resultados, tomando como referencia la cartografía correspondiente a los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años y a la ruptura del embalse, ha llevado a la siguiente cartografía:

3.1. Las zonas de inundación para períodos de retorno de 25, 50 y 100 años

En *As Pontes de García Rodríguez*, a partir de caudales de 131,30 m³/s, se inunda el casco histórico del municipio, el cual está habitado por población anciana, las instalaciones de la enfermería de la central térmica que allí se localiza y un pequeño sector de la carretera local (fig. 16). En períodos de retorno superiores, los elementos afectados son los mismos, pero en una mayor extensión (fig. 17 y 18).

5.2. Las zonas de inundación por ruptura de embalse

Empleando la *Guía técnica para la elaboración de Planes de Emergencia de Presas* del Ministerio de medioambiente de junio de 2001, se ha estimado el caudal de agua que se liberaría si en el momento de la rotura total del embalse estuviese lleno, 5010.74 m³/s,

En este caso (fig. 19), las zonas inundables son mayores que las del período de retorno de 100 años, ampliándose las de este. La totalidad del casco histórico se inunda, a la vez que se ven afectadas instalaciones de la central térmica, que no lo están en el caso del período de 100 años, como la zona de almacenamiento, e incluso la carretera ubicada en la entrada oeste de *As Pontes*.

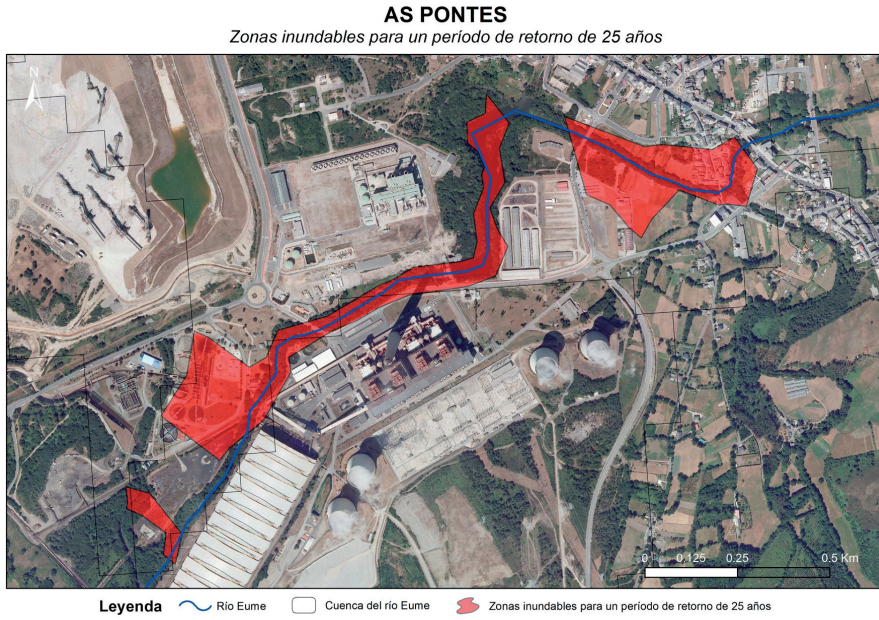


Figura 16. Zonas inundables correspondientes a un período de retorno de 25 años.

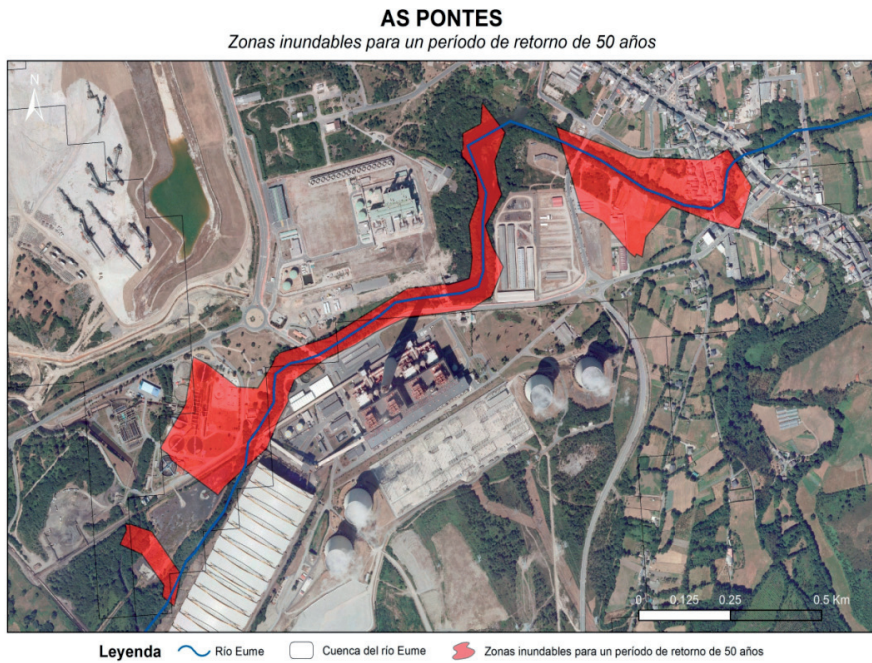


Figura 17. Zonas inundables correspondientes a un período de retorno de 50 años.

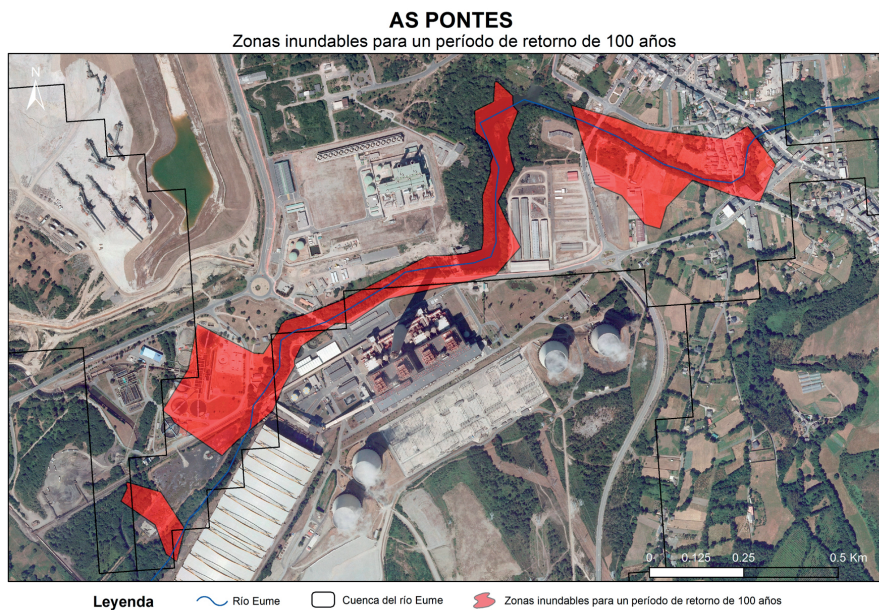


Figura 18. Zonas inundables correspondientes a un período de retorno de 100 años.

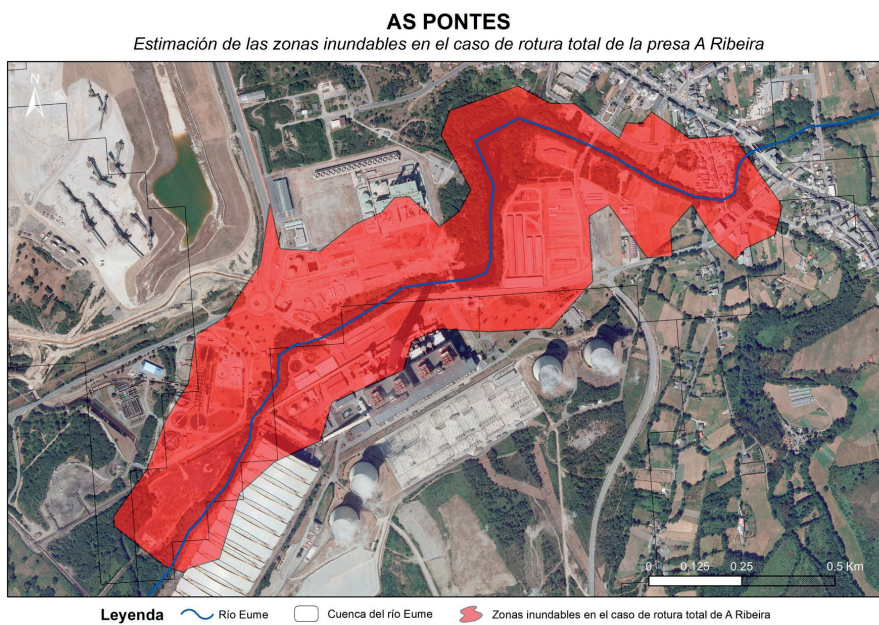


Figura 19. Zonas inundables correspondientes a la ruptura total del embalse de A Ribeira.

5.3. Comparación con las fuentes oficiales

El Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente está realizando un Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI). Este proyecto comenzó en el año 2011 y actualmente sigue en desarrollo. Ofrece una serie de tramos de ríos denominados áreas de riesgo potencialmente significativo, en el que se recogen partes de los cauces del río en las que puede darse una inundación, pero no figura la extensión de las zonas que esta alcanzaría. En la demarcación Galicia Costa, donde se ubica el río Eume, está en construcción, con tramos en consulta pública. No obstante, en *As Pontes* existen algunos. Si se compara con la aquí expuesta, se aprecia que los tramos correspondientes al río con riesgo potencialmente significativo coinciden con las zonas inundables (fig. 20), mientras que existen unos tramos perpendiculares al cauce que corresponden a un pequeño regato (en el caso del tramo sur) y al agua que cae en la parte alta del núcleo (tramo norte) en forma de precipitación, cuando la hay, que desciende hacia la parte más baja de la subcuenca, donde se ubica el río, aportes hídricos incluidos en la modelización.

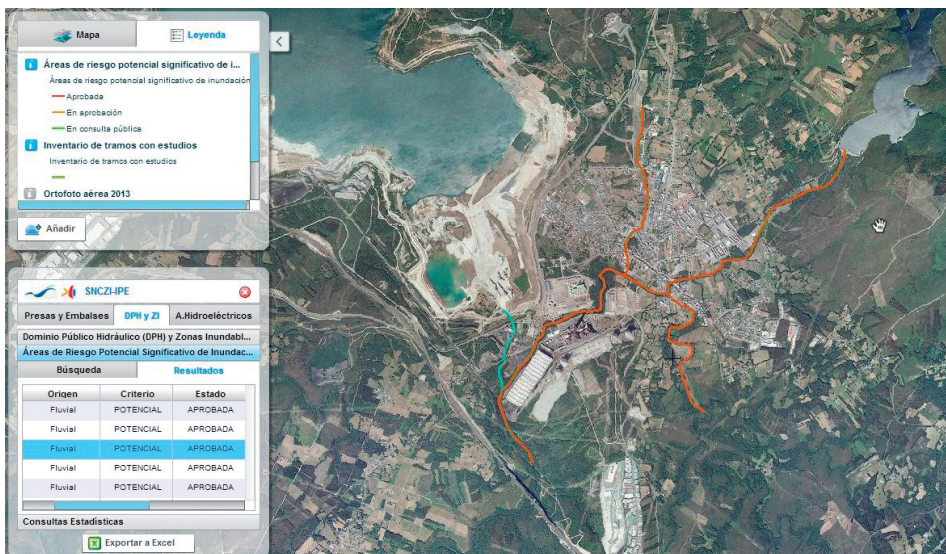


Figura 20. Tramos con riesgo de inundaciones potencial significativo. FTE: SNCZI, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Por parte de la *Xunta de Galicia*, la *Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestruturas*, está desarrollando una cartografía de las zonas inundables, donde, por el momento, no se recoge ninguna zona inundable en la sección de *As Pontes*.

5.4. Implicaciones prácticas de los resultados

La cartografía de zonas inundables es un trabajo complejo pero necesario. La combinación de diferentes métodos estadísticos, hidrometeorológicos, hidráulicos y cartográficos permiten una aproximación al problema de las inundaciones del área de estudio, lo que contribuye a superar el déficit de información hidrológica de la zona.

La aplicación de la metodología refleja que a partir de caudales de 131,30 m³/s la zona de estudio puede presentar pequeñas inundaciones en las inmediaciones del río Eume. La humedad antecedente, los materiales poco permeables, la pendiente y el desnivel de las secciones de estudio son factores influyentes en este fenómeno.

Las zonas afectadas por las inundaciones que generan más pérdidas estructurales y económicas del área de estudio son las instalaciones de la central térmica y el casco histórico. Con cada inundación, las instalaciones de la enfermería de la central térmica se deterioran por el efecto de las inundaciones, con lo que el mantenimiento de estas se encarece.

En el caso del casco histórico, las pérdidas económicas derivadas del deterioro de las casas, se le suman las posibles pérdidas humanas, ya que las viviendas están habitadas todo el año. La pirámide poblacional del centro histórico es invertida: La población residente es mayoritariamente anciana, factor que hay que tener en cuenta a la hora de elaborar planes de emergencia y evacuación para inundaciones.

Próxima a la sección de estudio está el embalse de *A Ribeira*, el cual en caso de rotura causaría una avenida de origen antrópica grave. No obstante, una buena gestión contribuiría a minimizar el riesgo de inundaciones, ya que ayudaría a controlar la laminación de agua para evitar desastres.

Se deberían adoptar varias medidas de mitigación en la zona de estudio; estructurales y no estructurales:

Las medidas estructurales son aquellas construcciones que minimizan el posible impacto de una inundación. No obstante, su funcionalidad es limitada, ya que se construyen para determinados eventos que pueden ocurrir, en los que previamente se ha calculado su alcance, pero en el momento que estos eventos sean mayores de lo planeado, las estructuras pierden su función, ya que no son capaces de afrontarlo.

Las medidas no estructurales son aquellas que no requieren grandes obras de ingeniería, que atañerían a la cultura y a la sociedad del ser humano. La concienciación ciudadana, las políticas preventivas, la inclusión de los riesgos naturales en la educación... busca el aumento de la resiliencia de la población expuesta.

Los planes de protección civil y de emergencia, junto a los sistemas de alerta temprana, para los casos de inundaciones son obligatorios. Un buen plan de gestión puede salvar muchas vidas humanas y no implica una gran inversión económica. Acciones sencillas, como cortar una carretera de manera temporal o avisar a la comunidad de una inminente inundación son eficaces. Durante el trabajo de campo, en la recogida de información oficial de los diversos organismos municipales, ninguno contaba con información cara al público del plan de emergencia a utilizar en caso de inundaciones.

Una campaña de información y concienciación sobre el riesgo de inundación es necesaria. Los testimonios recogidos en el trabajo de campo muestran que la población no tenía noción de lo que puede suceder en la zona, salvo en el caso de personas a las que uno de estos eventos les afectó.

La planificación territorial es muy importante, una zona inundable siempre es una zona susceptible a las inundaciones, esté o no urbanizada. La impermeabilización de espacios urbanos, el infradimensionamiento de las estructuras y la ocupación de llanuras de inundación del río deberían ser elementos que no se incluyesen en un plan de ordenación territorial. Estos deberían elaborarse considerando los riesgos ambientales existentes, ya que de no ser así, los daños en viviendas, equipamientos públicos, elementos patrimoniales y en las actividades agroforestales y ambientales (cultivos) serán inevitables.

En el caso de que se edifique en zonas con riesgo, las viviendas deberían adecuarse a la situación en la que se encuentran, para evitar daños en ellas, en sus habitantes, y en las infraestructuras que acarrearán.

La canalización de cauces genera una falsa sensación de seguridad, con lo que atrae crecimiento en torno a ella. Sin embargo no se puede demandar dicha canalización sin tener en cuenta las consecuencias: traslado de las inundaciones aguas abajo, edificación e zonas inundables (aunque haya canalización no dejan de serlo) o incluso la rotura de esta.

Haciendo balance de todo esto, los costes de respuesta y recuperación tras un desastre son más elevados que los que conlleva la adopción de estrategias de mitigación proactivas (FRA PALEO, 2010), con lo que lo invertido en las estrategias ya se recupera en las pérdidas que no surgen.

4. CONCLUSIONES

El método racional aplicado para calcular los caudales pico del río Eume en la sección *As Pontes*, recoge todos los factores que influyen en las inundaciones. La geología, la permeabilidad de los materiales, los aportes hídricos en los diferentes puntos de la cuenca, el desnivel de la misma, el estado del cauce del río...son recopilados en las diferentes fórmulas que presenta.

El caudal pico es necesario para modelar las zonas inundables del área de estudio, ya que es el caudal límite al partir del que se comienzan a generar inundaciones, lo que es el punto de partida para estos eventos.

Los Sistemas de Información Geográfica, junto a los programas de modelización hidráulica tienen un papel importante, ya que procesan los datos obtenidos en el trabajo de campo y en el método racional, y los transforman en una cartografía, más perceptible que cualquier fórmula, para todo tipo de públicos. Esta contribuye a la divulgación de un problema casi desconocido, y poco tratado, en la zona de estudio, por las instituciones gubernamentales.

La gestión del riesgo de inundaciones es importante y necesaria. En Galicia, región con una amplia red hidrográfica y unas precipitaciones anuales que oscilan entre los 1600 y los 2000 mm, es deficiente. La inversión de tiempo y dinero en esta gestión ampliaría los conocimientos sobre esta problemática y las medidas que se podrían tomar sobre los eventos de inundaciones. Adoptando las medidas de mitigación requeridas, estas pérdidas se verán minimizadas, siendo siempre la inversión menor que las posibles pérdidas.

BIBLIOGRAFÍA

- Ano Hidrológico 2009-2010* [en línea]. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia, 2010. Disponible en http://augasdeg Galicia.xunta.es/docs/Aforos/Informe_Anual_2009_10.pdf
- Avaliación preliminar do risco de inundación. Demarcación Galicia Costa*. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia, 2011. Disponible en http://augasdeg Galicia.xunta.es/docs/Directiva200760CE/castellano/EPRIGC_MAD_MEMORIAA3.pdf
- Chow, V.T. *Open-channel hydraulics*. New York, EEUU: McGraw Hill, 1959.
- Ferrer, Javier. *Análisis estadístico de caudales de avenida*. Madrid: CEDEX, 1993.
- Las dimensiones de las inundaciones históricas en Galicia en la comunicación del riesgo* (pp. 39-52) en Fra Paleo, Urbano (editor). *Riesgos naturales en Galicia: el encuentro entre naturaleza y sociedad*. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela, 2010.
- Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de zonas inundables*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011.
- Guía técnica para la Elaboración de Planes de Emergencia de Presas*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2001. [Consulta: 20 junio 2013]. Disponible en <http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/>
- Hec - Ras River analysis system. Applications Guide*. Davids, California, EEUU: U.S. Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, 2010.
- Ibáñez, Sara; Moreno, Héctor; Gisbert, J.M. *Métodos para la determinación del tiempo de concentración (Tc) de una cuenca hidrográfica*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2011. Disponible en <http://riunet.upv.es/bitstream/handle>
- Martínez Cortizas, Antonio; Pérez Alberti, Augusto (coord.) *Atlas climático de Galicia*. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia, 1999.
- Mateu, J.F. *Crecidas e Inundaciones*. Valencia: Guía de la Naturaleza de la Comunidad Valenciana, 1990, pp. 565-608.
- Máximas lluvias diarias en la España peninsular* [en línea]. Madrid: Ministerio de Fomento, 1999. Disponible en http://www.fomento.es/mfom/lang_castellano/direcciones_generales/carreteras/normativa_tecnica/drenaje/0610300.htm
- Natural Resources Conservation Service, *Curve number method: Origins, applications and limitations*. Washington D.C., EEUU: U.S. Department of Agriculture, 2003.
- Natural Resources Conservation Service. *National Engineering Handbook*. Washington D.C., EEUU: U.S. Department of Agriculture, 2004.
- Témez, J. R. *Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas. Dirección general de carreteras, 1978.
- Vera, J.A. *Geología de España*. Madrid: Sociedad Geográfica Española-Instituto Geológico y Minero de España, 2004.