

INUNDACIONES EN EL NOROESTE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA: EL CASO DEL RÍO EUME

Alexandre Luis VÁZQUEZ RODRÍGUEZ

Universidad de Santiago de Compostela (USC)
alexandreluis.vaquez@rai.usc.es/alexandreluis.vazquez@gmail.com

Abstract

Floods are the geological and geographical risk with high social and economic impact. The anthropic development of the basin of the Eume river makes it increasingly more important to control the aspects that contribute to flooding in the area. The Eume river is the sixth Galician river in length, 80 km, and has a drainage area of 470.22 km². It contains nine municipalities and more than 45.000 people. In the oceanic climate of Galicia, which reach 2.000 mm of annual precipitation, and where the watersheds are maximally exploited, flood risk should be considered.

This paper presents the process of developing floodplain mapping for three sectors of Eume River basin: *Serra do Xistral*, *As Pontes de García Rodríguez* and river mouth. The delineation of flood areas was carried out by combining statistical, hydrological and geomorphological methods. Some project procedures have been automated by the use of geographic information systems.

Keywords: flooding risk, flood area, Eume river, Galicia, precipitations.

Resumen

Las inundaciones son un riesgo geológico y geográfico con gran impacto social y económico. El desarrollo antrópico de la cuenca hidrográfica del río Eume hace que cada vez sea más importante controlar los aspectos que contribuyen a las inundaciones de la zona. El río Eume es el sexto río de Galicia en longitud, 80 km, y cuenta con una cuenca de 470,22 Km², que contiene nueve municipios gallegos y más de 45.000 habitantes. En un clima oceánico como el de Galicia, en el que se alcanzan los 2.000 mm de precipitación anuales, y en donde las cuencas hidrográficas se explotan al máximo, el peligro de inundaciones se debe tener en cuenta.

En este trabajo se ha elaborado la cartografía de las zonas inundables en tres sectores de la cuenca del río Eume: *Serra do Xistral*, *As Pontes de García Rodríguez* y desembocadura del río. La delimitación de las áreas inundables se ha llevado a cabo mediante la combinación de métodos estadísticos, hidrológicos y geomorfológicos. Algunos procedimientos del proyecto han sido automatizados mediante el uso de sistemas de información geográfica.

Palabras clave: riesgo de inundaciones, zona inundable, río Eume, Galicia, precipitaciones.

1. Introducción

Una inundación es un flujo de agua superficial mayor que supera su confinamiento habitual. Esta penetración de los márgenes habituales de un flujo de agua 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 primarias (daños en vidas humanas o en estructuras) y secundarias (inundación de los tanques sépticos). De hecho, las inundaciones son los fenómenos que generan un mayor volumen de pérdidas en un corto intervalo de tiempo. En la cuenca del río Eume se dan frecuentemente episodios menores de inundación, debido a la gran cantidad de precipitaciones que recibe anualmente y a la poca permeabilidad de sus materiales, entre otros factores.

La finalidad de los mapas de riesgo de inundaciones es zonificar el espacio adyacente a los ríos basándose en la probabilidad de que sea afectado por uno de estos eventos. La delimitación cartográfica de las zonas inundables, 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 no existe una cartografía completa en la cuenca del río Eume, solo un par de pequeños sectores del río, uno en Pontedeume y otro en *As Pontes*.

1.1. Área de estudio

El río Eume nace en la localidad de *Xeixobranco*, 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. Tiene 80 km de recorrido, una cuenca de 470,22 Km² (Fig. 1) de superficie, que contiene 9 municipios y más de 45.000 habitantes (INE, 2013). Su cota máxima alcanzada es de 800 m, en su nacimiento. La cota mínima es de 0 m, en su desembocadura en el océano Atlántico.

La cuenca del río Eume se ubica en la parte noroeste del macizo Ibérico. 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).

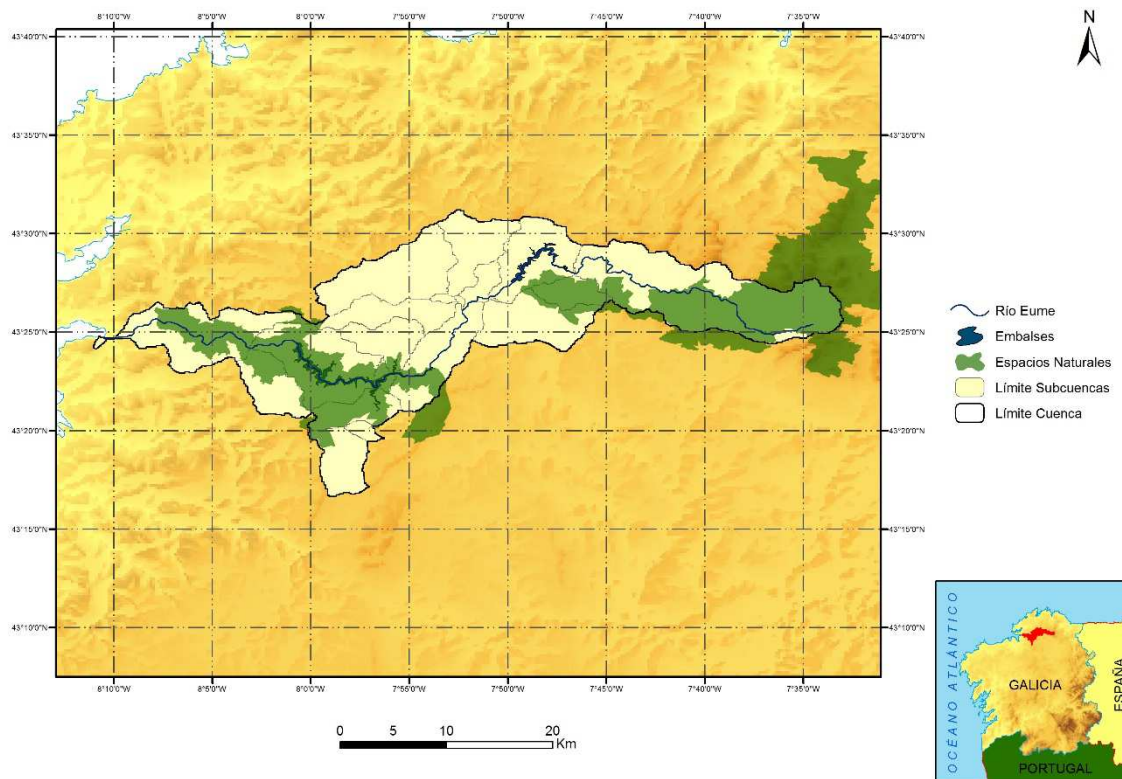


Fig. 1 Mapa de la cuenca del río Eume
Fuente: Elaboración propia.

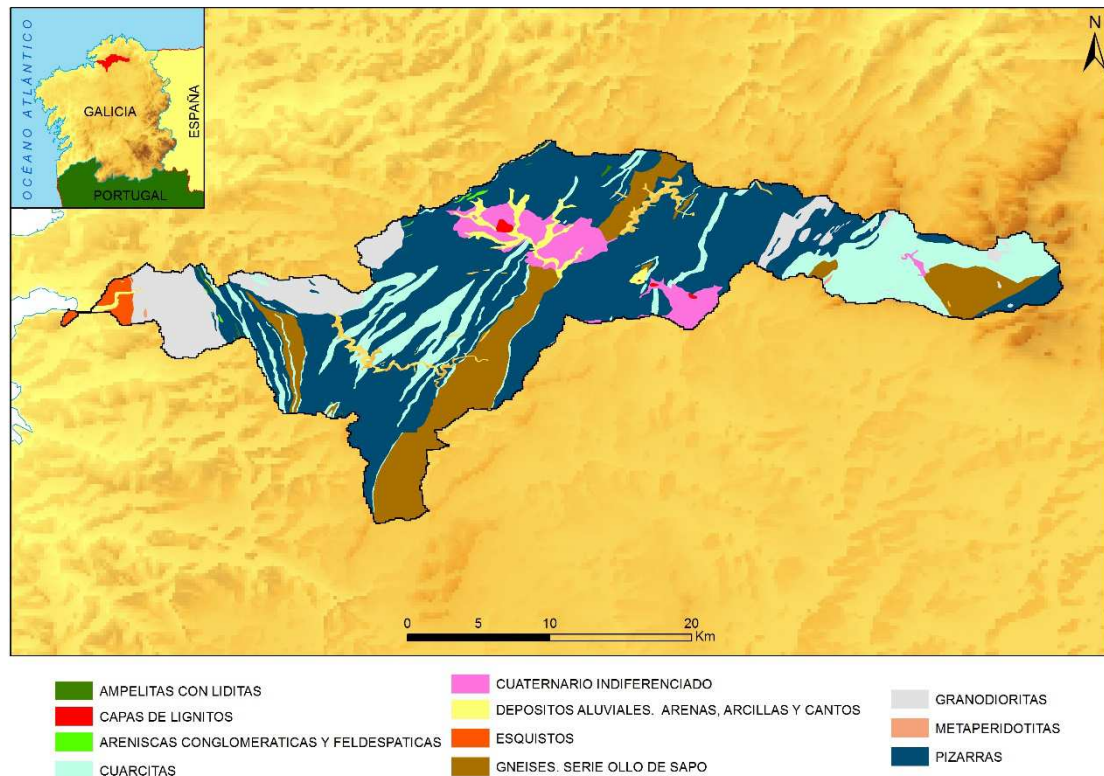


Fig. 2 Mapa de los principales materiales geológicos de la cuenca del río Eume

Fuente: Elaboración propia.

El río presenta las características comunes de todos los ríos atlánticos gallegos: sectores de fuerte asimetría, presencia de escalones en el perfil 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 área, el río circula encajadamente sobre materiales graníticos. Existe un importante sector de turberas, las cuales tienen un papel regulador el volumen de 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 sus crecidas 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., 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 vegetación de carácter arbustivo.

1.2. Antecedentes de inundaciones

En la actualidad, no existen registros de desastres ocurridos en la zona de estudio asociados a las inundaciones. Sí que existen registros de eventos menores, que se dan con mayor frecuencia en el área. 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 zona de estudio 180 l/m² (Tabla 1), lo que provocó la apertura de los embalses de la zona de estudio para evacuar el exceso de agua embalsada. Esto, y las intensas precipitaciones, dieron lugar a inundaciones puntuales en los municipios de *As Pontes de García Rodríguez*, *Pontedeume* y *Cabanas*, lo que hizo que la *Xunta de Galicia* declarase la alerta por crecida del río, se movilizaran los servicios de emergencias de los municipios implicados, y que se tomaran precauciones por parte de la población local para evitar daños posibles.

Tabla 1. Precipitaciones en la región de estudio en enero de 2013. Destacados los días del ciclón *Gong*

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

Fuente: Meteogalicia.

2. Objetivo

En la cuenca del río Eume existe una cartografía parcial de las zonas inundables, la Xunta de Galicia está actualmente elaborando los mapas para toda la región, pero no hay fecha de finalización para el proyecto. No obstante, esta delimitación solo marca dos pequeños sectores en toda la cuenca, lo que dista mucho de que sea completa.

El objetivo principal del proyecto es la elaboración de la cartografía de zonas inundables de los tres sectores más poblados de la cuenca del río Eume: Muras, en la cabecera, As

Pontes de García Rodríguez, en el medio y Pontedeume y Cabanas en la desembocadura. 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 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.

3. 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...) y en el que se incluye el trabajo de campo sobre el área de estudio, para revisar dicha área y buscar los datos que sean necesarios para elaborar la cartografía.
- El trabajo teórico en el que se tratan los datos obtenidos durante la primera fase del proyecto, para aportar los datos necesarios en el desarrollo de la cartografía deseada.
- La ejecución, con su posterior corrección, de dicha cartografía.

3.1. Estudio previo

Se ha realizado un estudio preliminar de la información disponible sobre la cuenca del río Eume. Existe una estación meteorológica de AEMET en *As Pontes* y una de Meteogalicia, en *Marco da Curra*, de las que obtener series de datos de precipitación, y dos estaciones de aforo del Ministerio de Medio Rural, Ambiente y Marino, *Eume-Ribeira* y *Eume-Fragas*, de las que obtener series de datos hidrológicos. Para los tres sectores existían los datos necesarios para realizar el trabajo.

Se realizó trabajo de campo para recopilar información oficial de los organismos municipales, localizar zonas potencialmente inundables, registrar marcas de eventos de inundaciones anteriores (Fig. 3) y preguntar a la población sobre eventos pasados históricos y recientes.



Fig. 3 La línea roja marca hasta donde llegó la lámina de agua en un evento sucedido en enero de 2013 según un testimonio recogido.

Fuente: Propia.

3.2. Trabajo teórico

Se ha utilizado el método racional, adaptado a España por Téméz (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:

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 esorrentía (Fig. 4).



Fig. 4 Mapa del coeficiente corrector del umbral de escorrentía. La ubicación de la cuenca del río Eume señalada en rojo
Fte: Modificado de J.R. Témez.

Para calcular la intensidad de las precipitaciones se ha tomado 8 como valor de la relación $I1/I_d$, según el mapa de isóneas de la península Ibérica elaborado por Témez (Fig. 5), ya que la posición geográfica de la cuenca coincide con este valor en él.

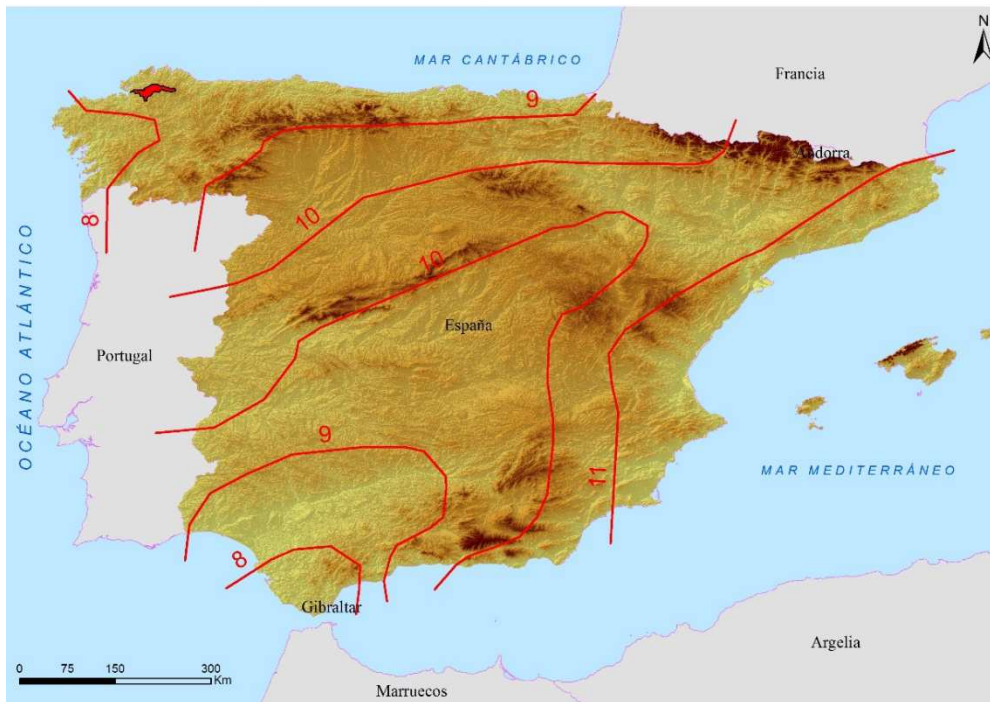


Fig. 5 Mapa de isóneas de la península Ibérica. La ubicación de la zona de estudio señalada en azul

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 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).

Para hallar el cuantil regional (Y_i), obligatorio para esta variable, se toma el coeficiente de variación regional del Mapa de isóneas del valor regional del coeficiente de variación (C_v) elaborado por el Ministerio de Fomento (Fig. 6).

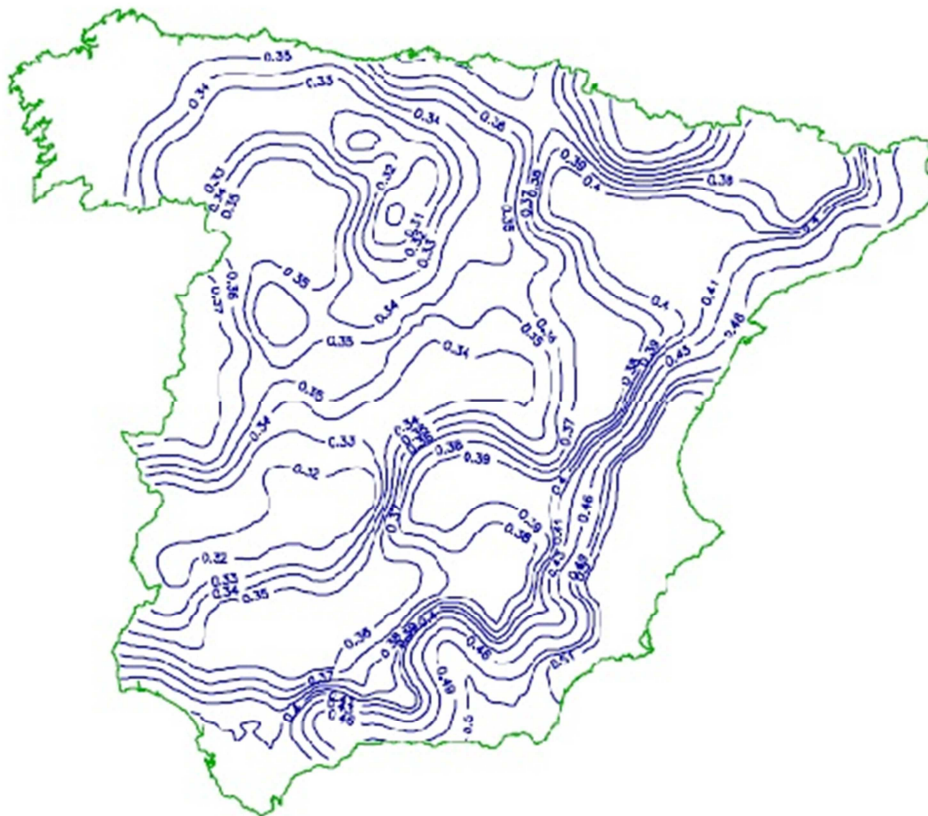


Fig. 6 Mapa de isóneas del valor regional del coeficiente de variación.
Fte: Ministerio de Fomento.

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 2), necesario para obtener los valores de precipitación máxima diaria.

Tabla 2. Cuantiles Yt en el Mapa para el cálculo de máximas precipitaciones diarias en la España peninsular. Destacados los valores para los sectores de estudio.

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

Fte: Ministerio de Fomento.

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 3), 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 4) 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.

Tabla 3. Valores para la curva de escorrentía según tipo y uso del suelo. Destacados los de las secciones de estudio

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

Fte: NRCS.

Tabla 4. Porcentajes de usos del suelo y valores del número de curva de las secciones de estudio

Sección	Uso	Valor	Uso	Valor NC	Uso	Valor	Valor
	Forestal (%)	NC Forestal	Agrícola (%)	Agrícola	Urbano (%)	NC Urbano	total NC
Muras	74	51,06	25	20,5	1	0,94	72,5
As Pontes	20	13,8	50	41	30	28,2	83
Desembocadura	37	25,53	60	49,2	4	3,76	78,49

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos los datos previos, se procede al método racional para la estimación de los valores de caudal máximo para los diferentes períodos de retorno:

$$Q_{P=\frac{C.I.S}{3,6}}$$

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 realizan los cálculos de las fórmulas del método racional (Tabla 5).

Tabla 5. Fórmulas del método racional

Variable	Fórmula	Donde
Cálculo de la precipitación máxima diaria para distintos períodos de retorno	$X_{t=\bar{P}.Y_t}$	X_t (mm/día) = Volumen de precipitación máxima diaria para un período de retorno t \bar{P} (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 P'_o (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 (°/1) = 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 P'_D (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 P'_D (mm) = Precipitación diaria corregida para una duración D (equivalente a un período de retorno T) P'_o (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) P'_D (mm) = Precipitación diaria corregida para los diferentes períodos de retorno $\frac{I_1}{I_d}$ (mm/h) = Relación intensidad horaria y diaria

Fuente: Elaboración propia.

Durante el método racional se calculan los valores para varias variables (Tabla 6):

- La precipitación umbral corregida (P'_0) es la cantidad de lluvia límite que se puede infiltrar por el suelo, antes de que comience a circular por la superficie, para obtener el coeficiente de escorrentía.
- 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). Necesario para estimar los caudales pico.
- El coeficiente de simultaneidad (K_A) se utiliza para corregir la no simultaneidad de las precipitaciones en cuencas superiores a 1 km² de superficie. Se multiplica por las precipitaciones máximas diarias para obtener las precipitaciones diarias corregidas, necesarias para obtener el coeficiente de escorrentía. La precipitación diaria corregida se utiliza para estimar el coeficiente de escorrentía en los diferentes sectores de interés.
- Durante un evento de precipitaciones, una parte del agua que cae sobre el terreno y se infiltra, otra 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. Obligatorio para obtener el caudal pico.
- La intensidad de las precipitaciones (I) para eventos con una duración equivalente al del tiempo de concentración de los sectores de estudio. Necesaria para la estimación de caudales máximos.

Tabla 6. Resultados

Variable			Resultado
Precipitación umbral (mm)	Muras		25,45
	As Pontes		15,36
	Desembocadura		20,55
Precipitación diaria corregida (mm)	Muras	T ₂₅	105,02
		T ₅₀	118,9
		T ₁₀₀	134,52
	As Pontes	T ₂₅	106,36
		T ₅₀	120,42
		T ₁₀₀	136,25

	Desembocadura	T ₂₅	107,66
		T ₅₀	121,9
		T ₁₀₀	137,92
Tiempo concentración (h)	Muras		6,89
	As Pontes		5,65
	Desembocadura		3,59
Coficiente de simultaneidad	Muras		0,87
	As Pontes		0,88
	Desembocadura		0,89
Coficiente de escorrentía	Muras	T ₂₅	0,33
		T ₅₀	0,38
		T ₁₀₀	0,42
	As Pontes	T ₂₅	0,55
		T ₅₀	0,59
		T ₁₀₀	0,64
	Desembocadura	T ₂₅	0,45
		T ₅₀	0,50
		T ₁₀₀	0,54
Intensidad de las precipitaciones (mm/h)	Muras	T ₂₅	11,43
		T ₅₀	12,94
		T ₁₀₀	14,64
	As Pontes	T ₂₅	13,12
		T ₅₀	14,85
		T ₁₀₀	16,81
	Desembocadura	T ₂₅	17,52
		T ₅₀	19,84
		T ₁₀₀	22,45

Fuente: Elaboración propia

Aplicando la fórmula del método racional,

$Q_{P=\frac{C.I.S.}{3,6}}$, se han estimado los siguientes valores para los diferentes períodos de retorno (Tabla

7):

Tabla 7. Valores estimados del caudal pico para los diferentes períodos de retorno

Caudal pico (Q _P)	T ₂₅	T ₅₀	T ₁₀₀
Muras	101,25	129,18	162,86
As Pontes	131,30	160,11	193,64
Desembocadura	99,41	123,41	151,76

Fuente: Elaboración propia.

2.3. Ejecución de la cartografía

El uso de Sistemas de Información Geográfica han sido clave para trabajar la cartografía básica del presente artículo, para adquirir la estructura geométrica del río Eume, necesaria para su modelización, y para delimitar las zonas de inundación de las diferentes áreas de estudio. Se ha empleado *ArcGIS 10* para trabajar sobre la cartografía base y para dotar a la modelización de la estructura geométrica del río. Para modelizar se ha empleado *HecRAS*, procesando la estructura obtenida del SIG y los datos de caudal máximo obtenidos del método racional. Con este material, se han creado los diferentes escenarios de inundaciones posibles y delimitado las zonas inundables para los tres sectores analizados. Finalmente, se han trasladado las zonas obtenidas a *ArcGIS 10* con *HecGeoRAS*, resultando en la cartografía de las zonas inundables de las tres áreas de interés para períodos de retorno de 25, 50 y 100 años.

3. Las presas

Existen dos presas en la zona de estudio: *A Ribeira* y Eume ubicadas en *As Pontes* y en el parque de *As Fragas do Eume*, respectivamente. Pueden tener un rol destacado en las inundaciones, ya que debido a la gran cantidad de precipitaciones anuales de la región, se abren varias veces al año para su descarga. Estas aportan agua a los asentamientos cercanos y contribuyen a reducir el impacto del río aguas abajo, pero también generan un peligro potencial a las poblaciones próximas, ya que en el caso de que sufriesen una ruptura se generaría una gran avenida, de dimensiones catastróficas. Se ha elaborado una cartografía de zonas inundables de los dos sectores de la cuenca que se verían afectados. Para ello, se ha estimado el caudal de agua que se liberaría si en el momento de la rotura total de la presa estuviese lleno, empleando la Guía técnica para la elaboración de Planes de Emergencia de Presas del Ministerio de medioambiente de junio de 2001.

3.1. A Ribeira

Presa ubicada en el municipio de *As Pontes de García Rodríguez*, de tipo gravedad, con una capacidad de 33 Hm³, un muro de 50 m de altura y un coronamiento de 278 m. Según la cartografía obtenida, en caso de que hubiese una rotura total en ella, la inundación alcanzaría cotas superiores a las correspondientes a un período de retorno de 100 años (Fig. 7), el casco histórico de la villa se inundaría por completo, con todas las pérdidas económicas que ello conlleva, a la que se le debe sumar la posibilidad de pérdidas humanas, en un sector del asentamiento donde prácticamente la totalidad de la población residente es anciana. Respecto a las instalaciones industriales, la superficie inundada aumentaría casi de manera exponencial,

pudiendo causar graves problemas en el funcionamiento de la central y de abastecimiento energético a las localidades receptoras.

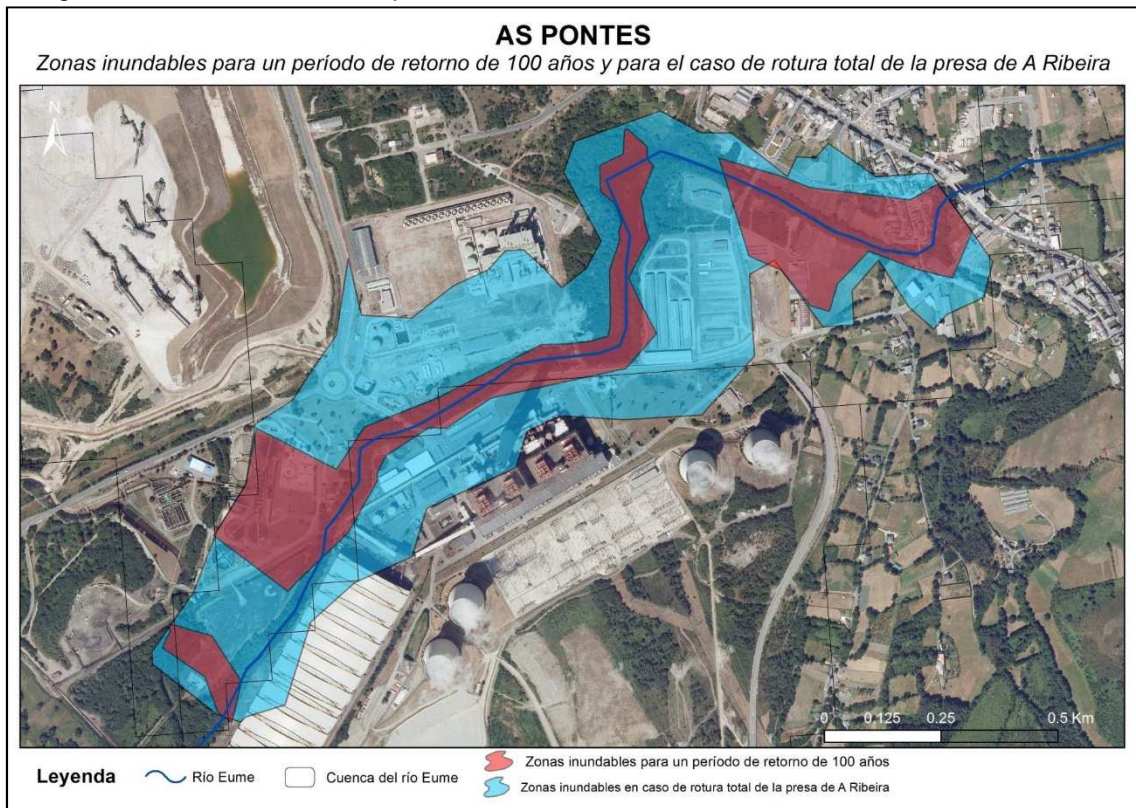


Fig. 7 Comparativa de las zonas inundables de *As Pontes* para un período de retorno de 100 años con las correspondientes al caso de rotura total de la presa *A Ribeira*
Fuente: elaboración propia. Ortofoto cedida por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

3.2. Eume

Presa ubicada entre los municipios de *A Capela* y *Monfero*, de tipo bóveda, con una capacidad de 123 Hm^3 , un muro de 110 m de altura y un coronamiento de 284 m. Según la cartografía obtenida, en caso de rotura total, la superficie inundada superaría a la correspondiente a un período de retorno de 100 años. Dentro del parque natural de *As Fragas do Eume* las zonas inundadas abarcarían una mayor superficie, pero no pasaría del entorno del parque debido al relieve que este presenta. En el caso de *Cabanas* y *Pontedeume* habría una gran variación (Fig. 8), ya que la altura de la lámina sería suficiente para afectar a las edificaciones inmediatas al cauce del río, el caudal proveniente de la presa supera los $400 \text{ m}^3/\text{s}$ necesarios para superar la altitud de los rellenos costeros antrópicos de los municipios. De hecho, una parte importante de la principal zona turística de *Cabanas* sufriría daños severos.

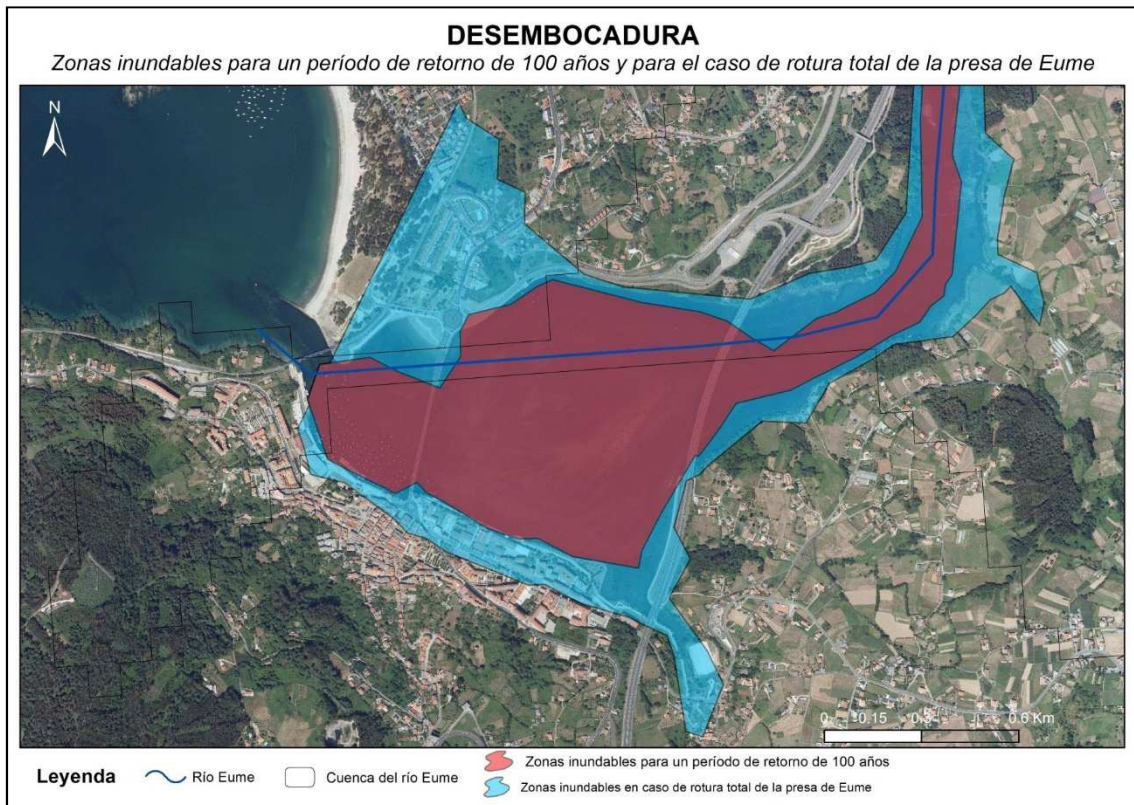


Fig. 8 Comparativa de las zonas inundables de *Pontedeume* y *Cabanas* para un período de retorno de 100 años con las correspondientes al caso de rotura total de la presa Eume
Fuente: Elaboración propia. Ortofoto cedida por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

4. Resultados

La cartografía resultante se ve afectada por las limitaciones de los datos y del software empleado para modelizar. 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 cada sección el coeficiente de Manning más idóneo, los mapas resultantes serán una precisa aproximación a la realidad. Las ortofotos de fondo han sido cedidas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). El análisis de los resultados, tomando como referencia la cartografía correspondiente a los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años, ha llevado a las siguientes conclusiones.

4.1 Muras

En Muras, a partir de caudales de $101,25 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fig.9 y 10), se inundan el bosque de ribera del río, parte de la llanura de inundación, donde se ubican varias parcelas rústicas sin cultivar, las instalaciones municipales del ayuntamiento homónimo, parte de la carretera local,

el único polígono industrial de la zona (Fig. 11) y las residencias más próximas a este. Cuanto mayor sea el período de retorno, mayor es la superficie de las zonas afectadas por las inundaciones, aunque los elementos afectados son los mismos, aumentando la parte afectada de estos cuanto mayor sea el período de retorno.

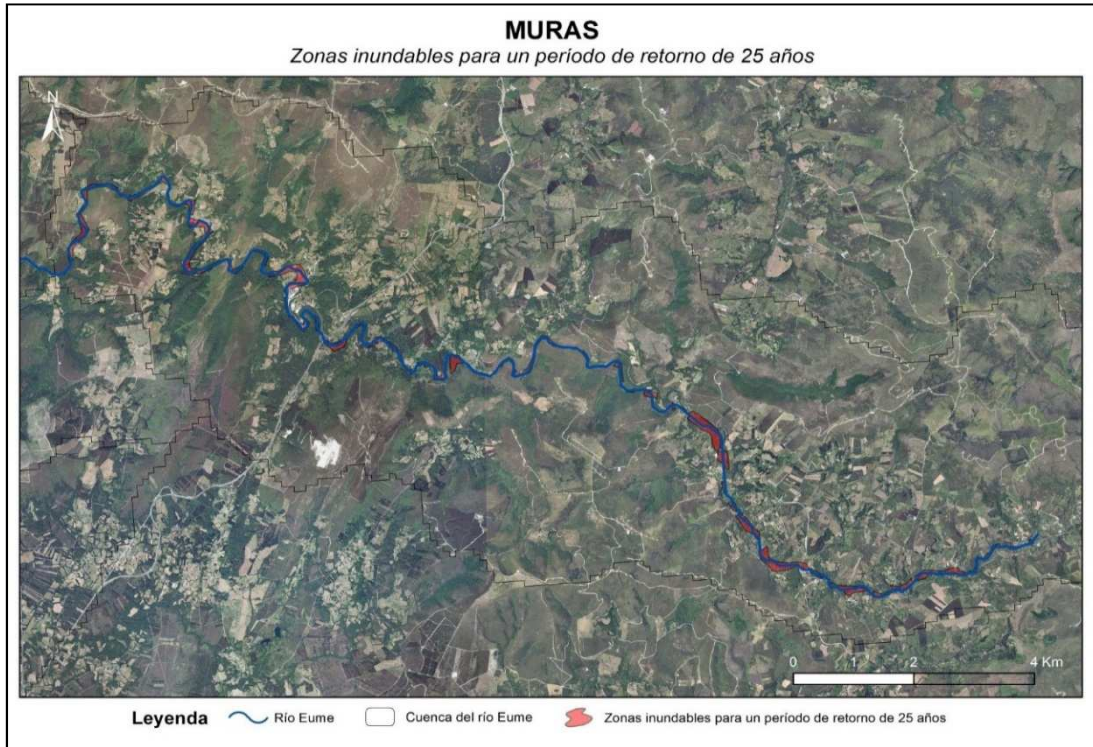


Fig. 9 Cartografía de las zonas inundables de Muras para un período de retorno de 25 años
Fuente: Elaboración propia.

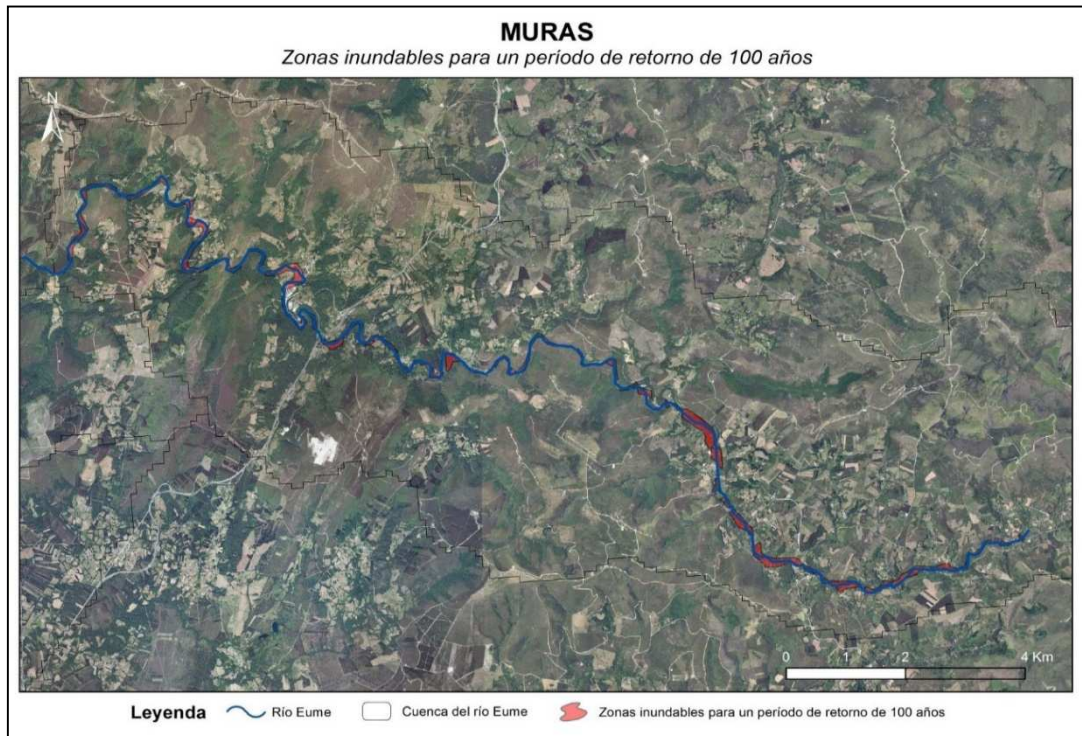


Fig. 10 Cartografía de las zonas inundables de Muras para un período de retorno de 100 años
Fuente: Elaboración propia.

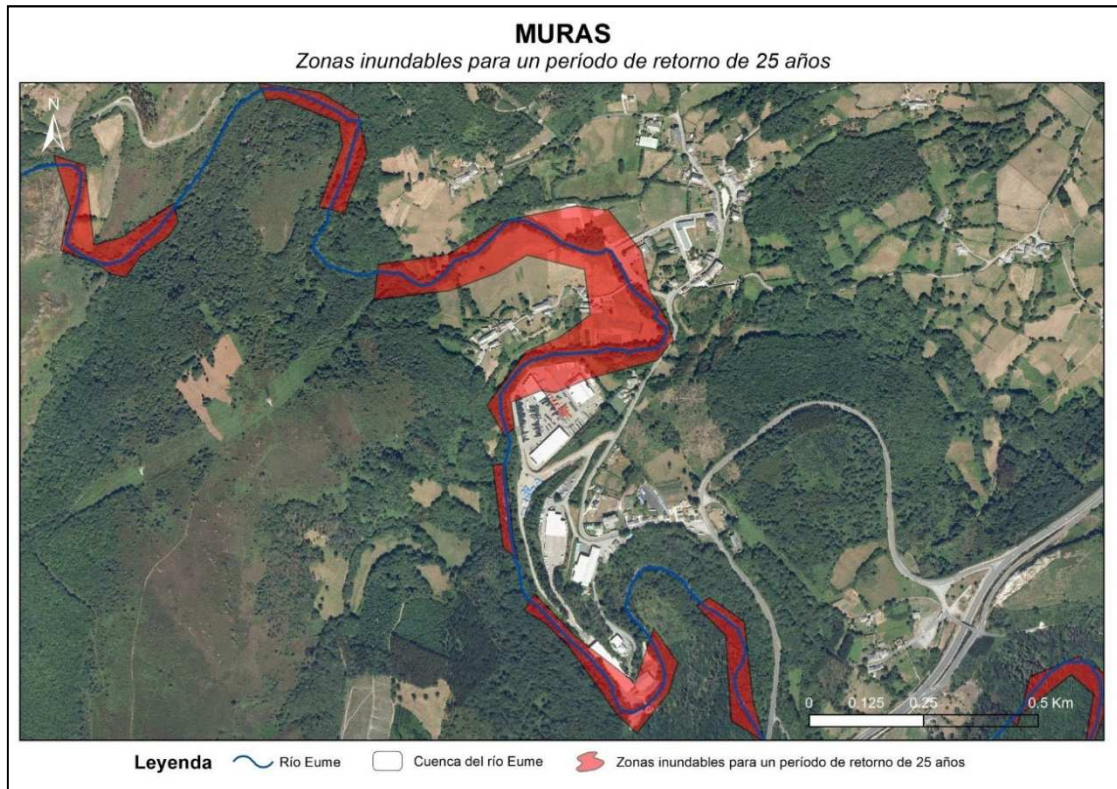


Fig. 11 Cartografía de las zonas inundables del núcleo poblacional de Muras para un período de retorno de 25 años
Fuente: Elaboración propia.

4.2 As Pontes

En *As Pontes de García Rodríguez*, a partir de caudales de $131,30 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fig. 12), 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 parte de la carretera local. En períodos de retorno superiores (Fig. 13), los elementos afectados son los mismos, pero aumenta la parte afectada, ya que la superficie de las zonas inundables aumenta.

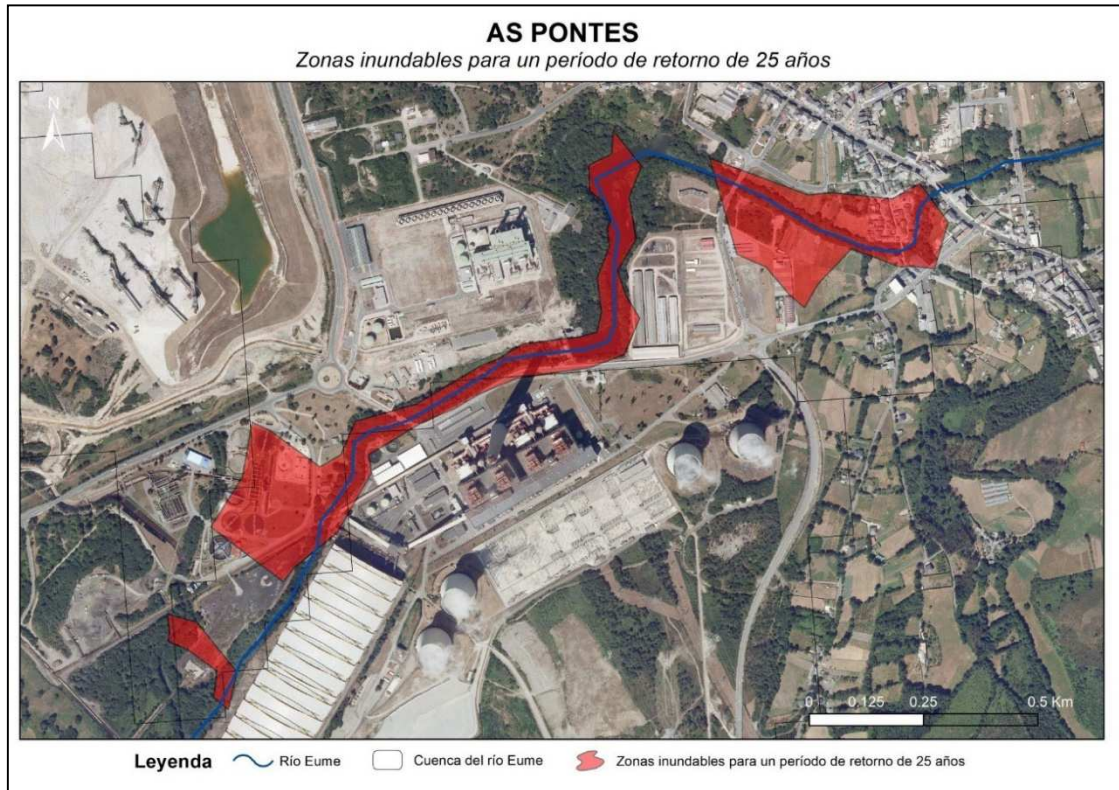


Fig. 12 Cartografía de las zonas inundables de As Pontes para un período de retorno de 25 años

Fuente: Elaboración propia.

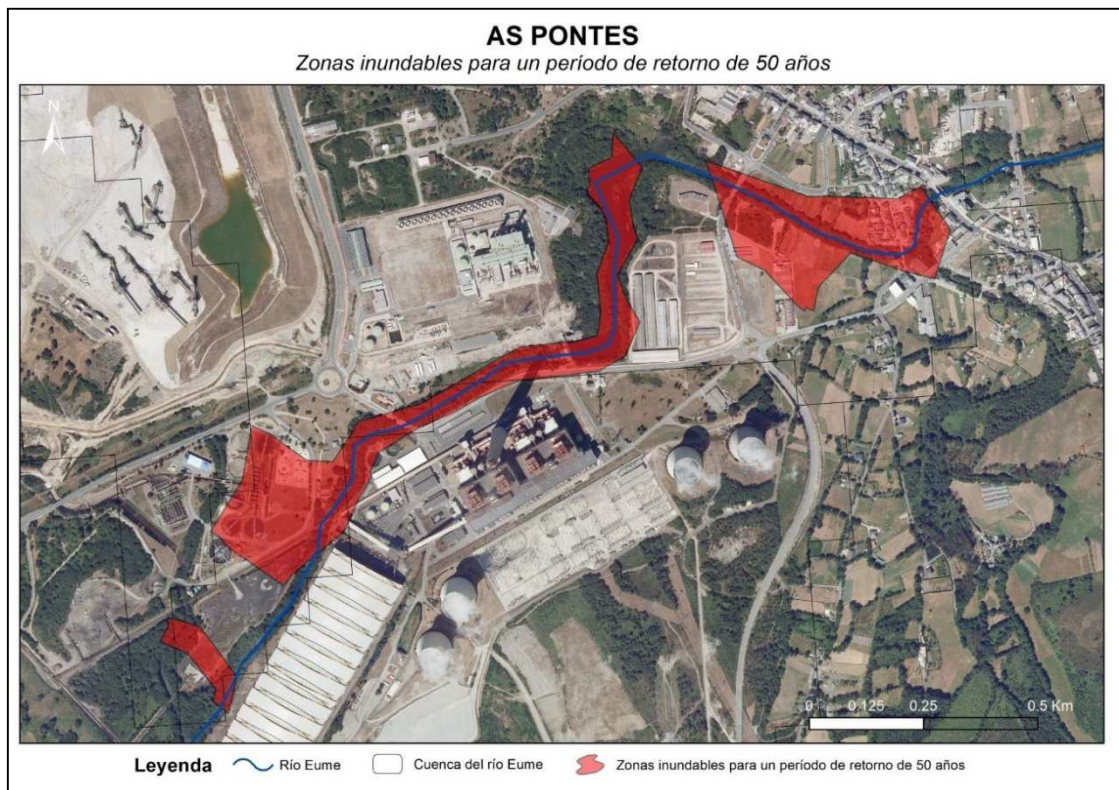


Fig. 13 Cartografía de las zonas inundables de As Pontes para un período de retorno de 100 años

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Desembocadura

En la desembocadura, la imagen presenta marea alta, y los cálculos están realizados con el supuesto de que no haya marea, con lo que el mapa resultante puede extrañar. En esta zona, a partir de caudales de $99,41\text{m}^3/\text{s}$ (Fig. 14 y 15), se inunda el bosque de ribera del río, las instalaciones eléctricas del parque próximas a la orilla del río, la carretera local, las fincas, utilizadas principalmente durante el período estival, según un testimonio, y las segundas residencias del Parque Natural de *As Fragas do Eume*. Los núcleos principales de esta sección de estudio, *Cabanas* y *Pontedeume*, no sufren inundaciones vinculadas al río Eume (Fig. 16), debido a su ubicación respecto al río, ya que se asientan sobre rellenos de 4 m de altura, altura para la que harían falta valores de caudal bastante elevados, que no se alcanzan ni en un período de retorno de 100 años. No obstante, existen indicios de inundaciones derivadas de la actividad de las mareas del océano Atlántico, que si coincidiesen con un período de crecida del río, sí que aumentaría la superficie afectada por las inundaciones. A lo largo de los diferentes períodos de retorno, la superficie afectada aumenta, pero ni *Pontedeume* ni *Cabanas* tendrían problemas.

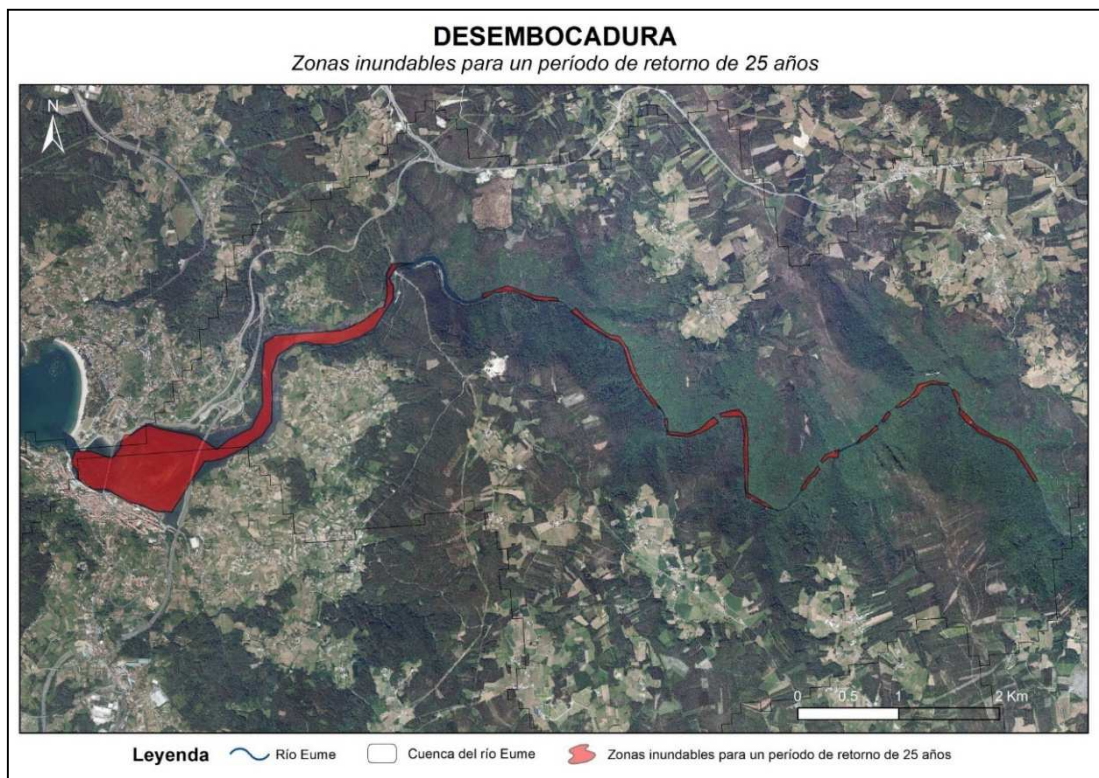


Fig. 14 Cartografía de las zonas inundables de la desembocadura para un período de retorno de 25 años.

Fte: Elaboración propia.

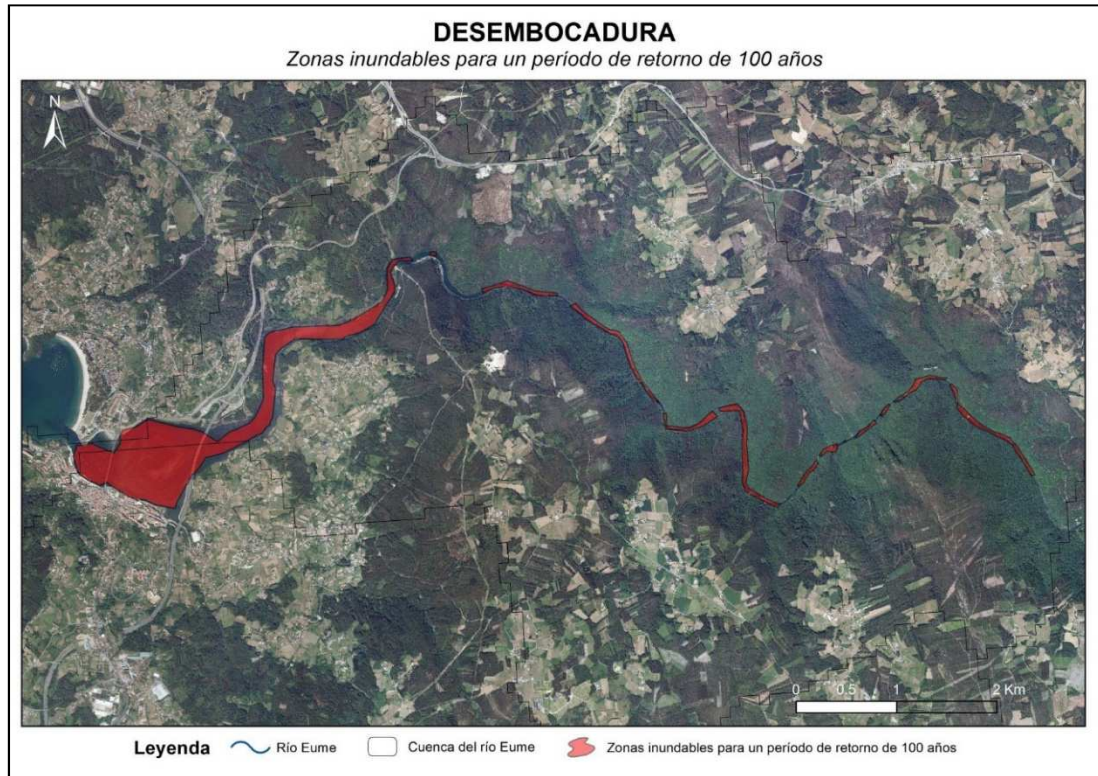


Fig. 15 Cartografía de las zonas inundables de la desembocadura para un período de retorno de 100 años.

Fte: Elaboración propia.

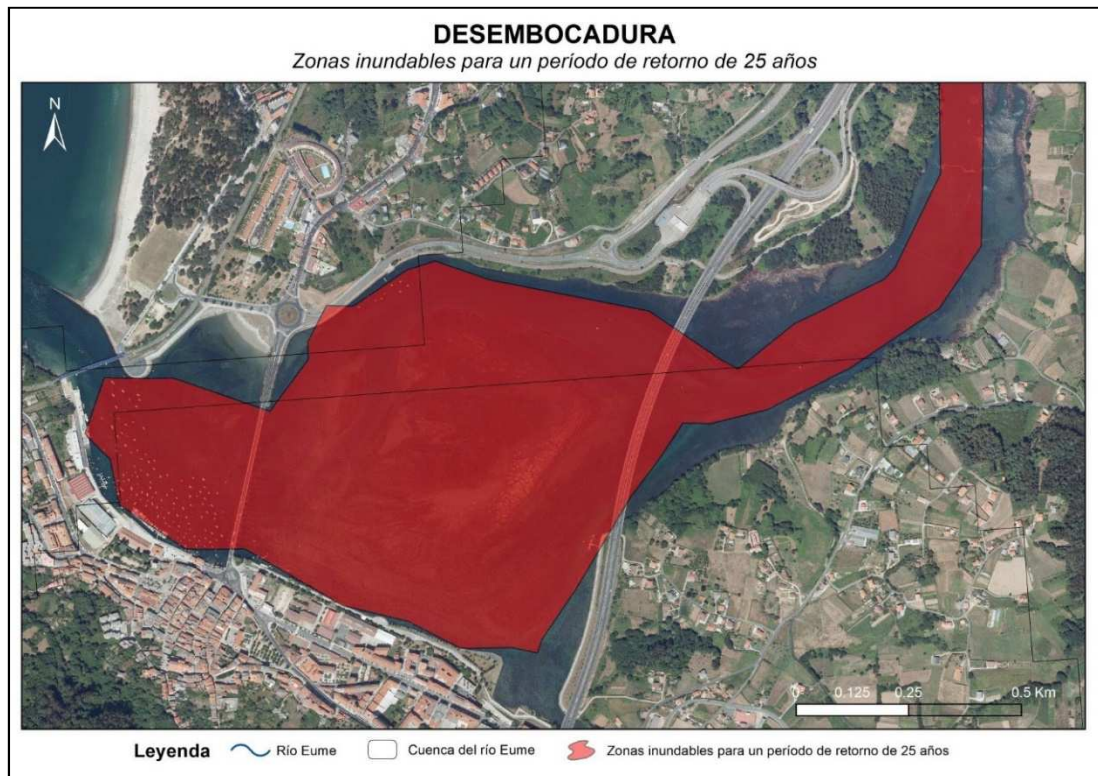


Fig. 16 Cartografía de las zonas inundables de *Pontedeume* y *Cabanas* para un período de retorno de 25 años

Fte: Elaboración propia.

4.4 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. 17), 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.

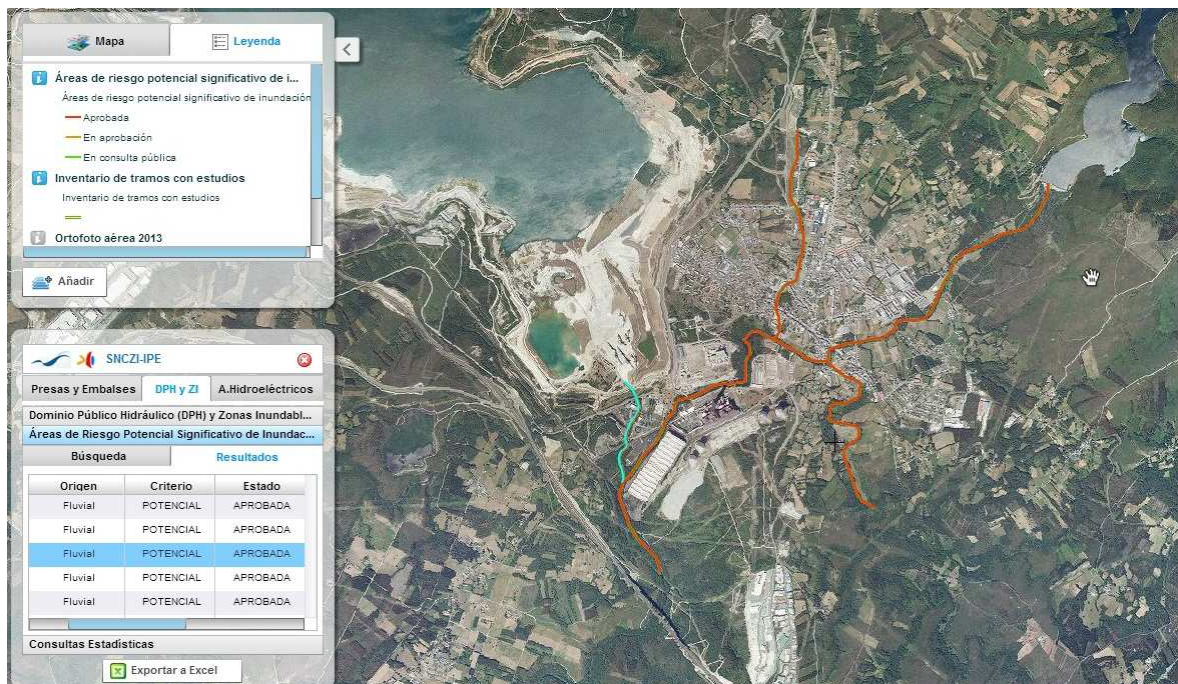


Fig. 17 Tramos con riesgo de inundaciones potencial significativo.
Fuente: SNCZI, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Por parte de la *Xunta de Galicia*, la *Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras*, está desarrollando una cartografía de las zonas inundables, donde, se recoge un mínimo sector en la desembocadura y se siguen las líneas del Ministerio para establecer las zonas inundables de *As Pontes*.

5. Implicaciones prácticas de los resultados y conclusiones

El método racional aplicado para calcular los caudales pico del río Eume 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.

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.

La aplicación de la metodología refleja que a partir de caudales de 99,31 m³/s los sectores de estudio pueden presentar pequeñas inundaciones en las inmediaciones del río Eume. La existencia de 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 son las instalaciones de la central térmica y el casco histórico de *As Pontes*, y el polígono industrial de Muras. Con cada inundación, las instalaciones y las mercancías del polígono industrial se deterioran, lo que deriva en pérdidas económicas. Lo mismo sucede con las instalaciones de la enfermería de la central térmica, las inundaciones las deterioran y el mantenimiento de estas se encarece. En el caso del casco histórico del núcleo de *As Pontes*, a 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 de los habitantes 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.

En las secciones de estudio existen dos embalses, *A Ribeira* y Eume, los cuales en caso de rotura causarían 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 mayores desastres.

Viendo lo expuesto en el artículo, se deberían adoptar varias medidas de mitigación en la zona de estudio, tanto estructurales como 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 pueden hacerle frente.

➤ Las medidas no estructurales serían todas aquellas que no requieren grandes obras de ingeniería, aquellas 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...buscan el descenso de la vulnerabilidad, y el aumento de la resiliencia de la población en riesgo.

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 el 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 acarreen.

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.

5. Bibliografía

Año Hidrológico 2009-2010 [en línea]. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia, 2010. Disponible en http://augasdegalicia.xunta.es/docs/Aforos/Informe_Anual_2009_10.pdf. [Consulta: 5 de junio de 2013].

Avaliación preliminar do risco de inundación. Demarcación Galicia Costa. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia, 2011. Disponible en http://augasdegalicia.xunta.es/docs/Directiva200760CE/castellano/EPRI-GC_MAD_MEMORIAA3.pdf. [Consulta: 30 de mayo de 2013].

CHOW, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*. New York, EEUU: McGraw Hill.

FERRER, J. (1993). *Análisis estadístico de caudales de avenida*. Madrid: CEDEX.

FRA PALEO, U. (2010). *Las dimensiones de las inundaciones históricas en Galicia en la comunicación del riesgo*. En Fra Paleo, U. (Ed). *Riesgos naturales en Galicia: el encuentro entre naturaleza y sociedad* (pp. 39-52). Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.

Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de zonas inundables (2011). Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Guía técnica para la Elaboración de Planes de Emergencia de Presas. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2001. Disponible en <http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones> [Consulta: 20 de junio de 2013].

MARTÍNEZ CORTIZAS, A., Y PÉREZ ALBERTI, A. (coords.) (1999). *Atlas climático de Galicia*. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia.

MATEU, J.F. (1990). *Crecidas e Inundaciones*. En Valencia: Guía de la Naturaleza de la Comunidad Valenciana (pp. 565-608).

Máximas luvias 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. [Consulta: 6 de junio de 2013].

Natural Resources Conservation Service (NRCS) (2003). *Curve number method: Origins, applications and limitations*. Washington D.C., EEUU: U.S. Department of Agriculture.

Natural Resources Conservation Service (NRCS) (2004). *National Engineering Handbook*. Washington D.C., EEUU: U.S. Department of Agriculture.

NUHFER, E.; PROCTOR, R.; MOSER, P. (1997). *The Citizens' Guide to Geologic Hazards*, trad. L. Suárez. Madrid: Ilustre Colegio Oficial de Geólogos.

TEMEZ, J. R. (1978). *Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas. Dirección general de carreteras.

VERA, J.A. (2004) *Geología de España*. Madrid: Sociedad Geográfica Española-Instituto Geológico y Minero de España.