

# ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA DE ZONAS INUNDABLES. APLICACIÓN AL LLANO DE INUNDACIÓN DEL RÍO ARGA (NAVARRA)

Amaya Bescos Atin y Ana María Camarasa Belmonte

Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá

C/ Colegios, 2 - 28801 Alcalá de Henares

E-mail: ggamcb@geogra.alcala.es

## Resumen:

La inundación es el riesgo natural de mayor impacto social y económico. La persistencia del problema a pesar de los continuos avances tecnológicos pone de manifiesto la necesidad de estudiar más detalladamente el comportamiento de las áreas inundables y elaborar una cartografía de riesgo que contribuya a un uso más racional del espacio.

Este trabajo presenta el proceso de elaboración del mapa de riesgo del llano de inundación del río Arga (Navarra) en los municipios de Falces, Peralta y Funes. La demarcación de áreas inundables para diferentes valores de caudal máximo se llevó a cabo mediante la combinación de métodos estadísticos, hidrológicos, hidráulicos y geomorfológicos. Algunos procesos metodológicos y análisis espaciales han sido automatizados mediante Sistemas de Información Geográfica.

**Palabras clave:** Mapas de riesgo, zona inundable, período de retorno, caudal máximo, umbral de escorrentía, método racional, Sistemas de Información Geográfica.

## Abstract

Floods are the most important natural risk in the world. Frequently engineering works are not enough to solve the problem. When hydraulic structures fail or they can not minimise negative impacts of floods, other measures are necessary. Risk cartography is a powerful tool to environmental planning.

This paper presents the methodology to elaborate the risk map of the floodplain of River Arga (Navarra, Spain). Methodology includes statistical, hydrological, hydraulic, and geomorphological tools. Some spatial analyses have been done using Geographic Information Systems.

**Key words:** Risk map, floodplain, maximum quickflow, runoff threshold, rational method, GIS.

## 1. INTRODUCCIÓN

La finalidad de los mapas de riesgo de inundación consiste en zonificar el espacio adyacente a los ríos en base a la probabilidad de que sea afectado por las inundaciones. La delimitación cartográfica en zonas de riesgo no sólo sintetiza el conjunto de conocimientos hidrológicos, geomorfológicos, hidráulicos y socio-económicos de la superficie inundable (Mateu, 1989; Rosselló, 1989), sino que, además, lleva implícita una valoración del nivel de riesgo. Constituye, por tanto, un instrumento que, desde la planificación, permite mitigar los daños por desbordamiento.

El método idóneo para realizar este tipo de cartografía consiste en trazar mapas de riesgo inmediatamente después de una gran inundación. Esto permite evaluar la altura alcanzada por el agua y las marcas dejadas por los flujos desbordados. Además, la memoria de las poblaciones afectadas se encuentra fresca y puede aportar información muy valiosa (Dunne y Leopold, 1978). Otra técnica óptima resulta de la interpretación de fotografías aéreas tomadas en el momento álgido de la avenida. A su vez, la recopilación de la información de reportajes periodísticos, fotografías oblicuas y crecidas históricas resulta imprescindible para una demarcación realista de las zonas inundables.

A pesar de que el análisis de casos puntuales puede aportar mucha información acerca de los procesos de formación de crecidas (Camarasa, 1995), la delimitación de zonas inundables de cara a la planificación requiere de un mayor número de fenómenos. Los estudios de eventos concretos pueden resultar excesivamente puntuales y no aseguran la robustez estadística que necesita el planificador, para la asignación de usos del suelo, o el ingeniero, para la construcción de obras de protección, de acuerdo con la normativa vigente. Así, es frecuente encontrar en la bibliografía la asociación entre parámetros estadísticos sobre la probabilidad de ocurrencia de un determinado caudal (períodos de retorno) y distintas categorías de riesgo en las zonas inundables.

Dos suelen ser los pilares en los que se basa la elaboración de la cartografía de riesgo: (1) la determinación de caudales máximos para distintos períodos de retorno y (2) la simulación de la dinámica de los flujos desbordados correspondientes a dichos caudales.

En la determinación de caudales de avenida asociados a períodos de retorno se utilizan, habitualmente, dos tipos de métodos: estadísticos e hidrometeorológicos (Ferrer, 1992, 1993). Los primeros relacionan caudales a sus períodos de recurrencia mediante leyes de frecuencia. Para aplicar estos métodos, es imprescindible disponer de series foronómicas largas y fiables. El segundo tipo de métodos simula el proceso lluvia-caudal partiendo de las series meteorológicas de precipitaciones (habitualmente más largas que las de caudales), y de varios parámetros físicos de la cuenca.

En cuanto a la simulación de la dinámica de las aguas desbordadas y altura de la lámina de agua, suelen determinarse mediante modelos hidráulicos de flujo unidimensional, bidimensional o cuasi-bidimensional. Los resultados obtenidos de la modelización se plasman sobre mapas topográficos de detalle que son los que, finalmente, permiten establecer los límites de las zonas inundables. No obstante, la demarcación definitiva requiere de un estudio geomorfológico minucioso del área cartografiada y de su validación en el campo.

Tomando como base estas dos líneas metodológicas, determinación de los caudales máximos para diferentes períodos de retorno y estimación del área afectada por los flujos desbordados, el presente trabajo presenta la

elaboración del mapa de riesgo de inundación del tramo final del río Arga. Los resultados implican la combinación de métodos estadísticos (leyes de frecuencia y períodos de retorno), hidrológicos (estimación de umbrales de escorrentía, cálculo de caudales máximos), hidráulicos (cálculo de la lámina de agua sobre el cauce) y geomorfológicos (trabajo de campo). Asimismo fueron utilizados los Sistemas de Información Geográfica como herramienta de análisis espacial, base de datos y producción cartográfica.

El río Arga, afluente navarro del Ebro, posee una larga lista de crecidas e inundaciones. La información histórica sobre sus desbordamientos es abundante, y en algunos casos, se encuentra bien documentada: *Estudio de inundaciones históricas en la Cuenca del Ebro (1985)*, *Estudio y análisis de los riesgos de inundaciones en Navarra (1995)*, *Proyecto Linde (1994, 1998)*. Sin embargo, en los últimos treinta años el problema, lejos de desaparecer, se ha agudizado debido a la creciente e indiscriminada ocupación de los valles aluviales (Bescos y Camarasa, 1998).

Dos áreas son las tradicionalmente conflictivas a lo largo de las riberas del Arga: la Cuenca de Pamplona y el llano de inundación del bajo Arga. La primera constituye una cuenca prepirenaica a la que el río arriba tras descender las montañas de cabecera. Es un espacio amplio, margoso y cuasi-llano donde se localiza la ciudad de Pamplona (181.000 habitantes), capital de la región. La segunda área inundable se encuentra unos sesenta kilómetros aguas abajo, en el llano de inundación, cuando el Arga ha recibido ya a sus principales tributarios (Ulzama, Elorz, Araquil y Salado). La llanura aluvial se abre, su pendiente se vuelve débil (0.11%) y el canal presenta una marcada tendencia meandriforme. En los últimos diez kilómetros, el río discurre por un cauce artificial y rectilíneo comunicado con los antiguos meandros del río, hoy cortados. A ambos lados del cauce, la vega ha sido ampliamente ocupada por regadíos y por la expansión de los núcleos de población de Falces, Peralta y Funes.

Esta dinámica expansiva en las zonas adyacentes al canal ha agravado los problemas de inundación. Las obras estructurales de ingeniería realizadas en el cauce entre los años 1977 y 1997 no han supuesto una solución, como lo demuestra la avenida de enero de 1997. En este contexto, el presente trabajo constituye una aproximación al problema des-

de la cartografía de zonas inundables, en un intento de reducir el riesgo mediante un uso más racional del espacio.

## 2. LA CUENCA DEL RÍO ARGÁ

La cuenca hidrográfica del río Arga tiene una superficie de unos 2,733 Km<sup>2</sup>, localizada en su mayor parte (96%) en Navarra. Presenta una disposición alargada norte-sur y se extiende desde la divisoria de aguas atlántico-mediterránea, al norte, hasta las tierras

mediterráneas de la ribera de Navarra, al sur (figura 1).

La diversidad y el contraste son los rasgos más característicos de la cuenca del Arga (Casas Torres, 1956; Floristán, 1995, 1996). En ella confluyen diversas unidades morfológicas: Pirineos Occidentales, montañas y valles Vasco-Cántabros y Depresión del Ebro. Como consecuencia el espacio se articula en dos bloques bien diferenciados, separados por las denominadas Sierras Exteriores -Urbasa-Andia, el Perdón y Alaiz- (Figura 2). En el sector septentrional destacan las áreas montaño-

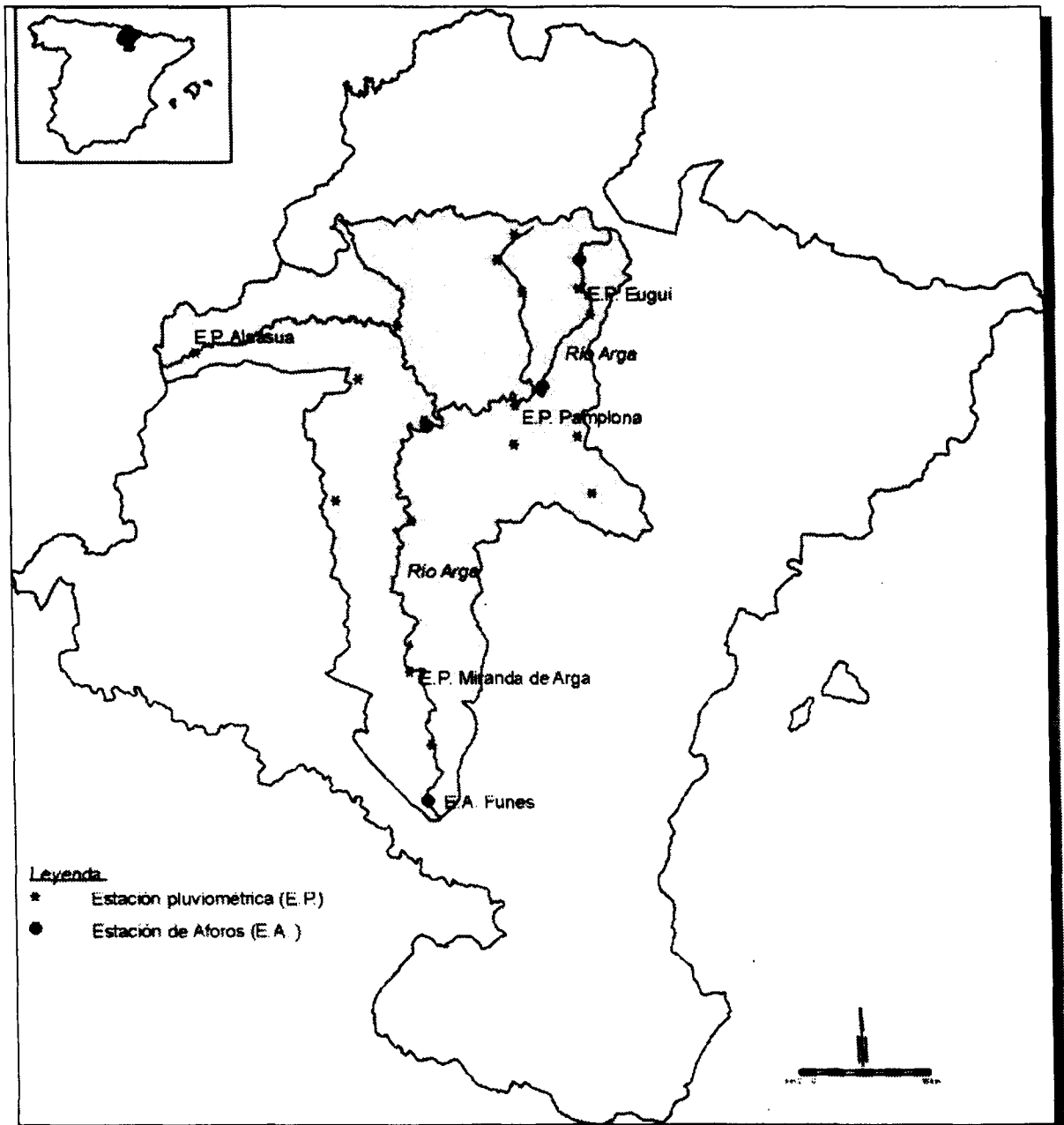


Figura 1.- Localización de la Cuenca del Río Arga y de las estaciones hidrológicas

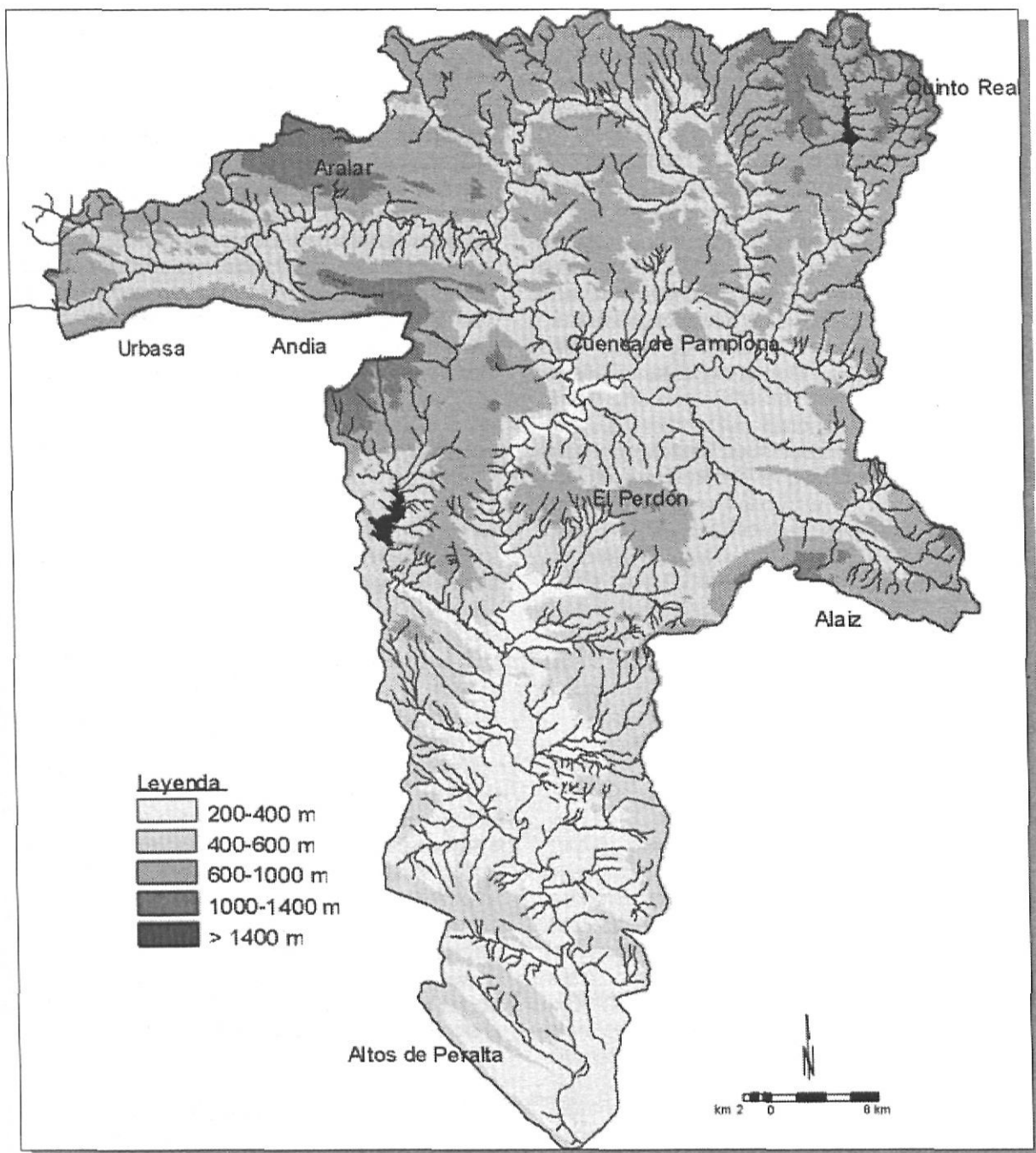


Figura 2.- Mapa hipsométrico de la cuenca del Arga.

sas, de fuertes pendientes, litologías duras (esquistos y pizarras en el Pirineo y calizas y dolomías en las sierras Vasco-Cántabras) o deleznales (margas en valles, corredores y cuencas), suelos someros y densos bosques de caducifolias atlánticas. En la zona meridional, predominan las llanuras arcillosas profusamente ocupadas por cultivos cerealistas, entre las que destacan pequeños resaltes montañosos que no superan los 500 m y están cubiertos por vegetación mediterránea.

La distribución de la precipitación refleja esta misma dicotomía. La lluvia tiende a disminuir gradualmente en sentido norte-sur como consecuencia del progresivo alejamiento de los relieves más elevados y del mar (figura 3). Así, mientras el área montañosa del norte supera los 1000 mm de precipitación anual, la zona media recibe entre 600 y 800 mm y la Ribera no alcanza los 500 mm de precipitación media.

Las copiosas precipitaciones que alimentan la cuenca, principalmente en cabece-

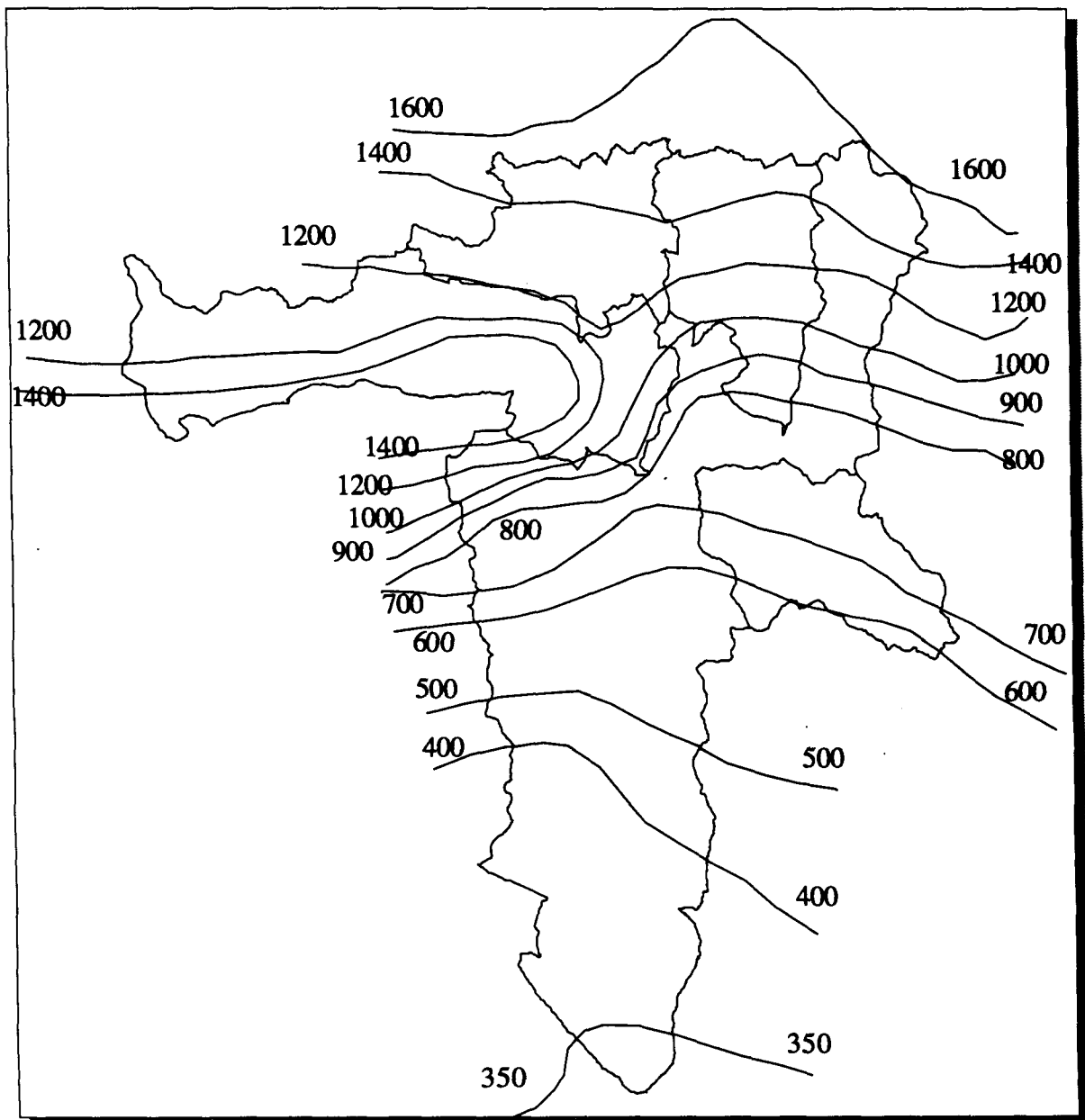


Figura 3.- Mapa de isoyetas medias anuales de la cuenca del Arga. (mm)

ra, hacen del Arga un río con caudal abundante, bastante regular y de numerosas crecidas (tabla I). En la cuenca alta, el régimen hidrológico manifiesta su origen atlántico y pirenaico (pluvionival). En la parte baja, sin embargo, se va volviendo cada vez más mediterráneo, los aportes disminuyen y el cauce pasa a ser un mero transmisor y laminador del agua recogida en cabecera.

Las crecidas del Arga presentan un marcado carácter pluvial atlántico, aunque en determinados sucesos, la fusión nival puede tener una importante influencia en el incremento de caudal, sobre todo en las avenidas primaverales. Las estaciones foronómicas

muestran que diciembre registra el mayor número de crecidas históricas, generalmente, como consecuencia de la entrada de borrascas atlánticas que afectan, principalmente, al área septentrional de la cuenca (Pejenaute, 1989).

El análisis de diferentes hidrogramas de crecida ha permitido apreciar la existencia de dos tipos de avenida (Bescós, 1997). El primero y más habitual, de marcado carácter cantábrico, es consecuencia de lluvias prolongadas y abundantes que producen hidrogramas largos (de seis a diez días de tiempo base) con varios picos de crecida (sirva de ejemplo la crecida de diciembre de 1980). El segundo tipo responde a un modelo más mediterráneo

Sector fluvial	Estación foronómica	Años de registros	Caudal medio (m <sup>3</sup> /seg)	Coefficiente de irregularidad
Cuenca alta	E. Eugui	28	2,9	4
Cuenca media	E. Echauri	38	42,5	5
Cuenca baja	E. Funes	59	56,9	2,9

Tabla 1.- Caudal medio en la Cuenca del Río Arga.

neo, con hidrogramas de reducido tiempo de base y elevados caudales punta, producidos por lluvias convectivas de gran intensidad (ejemplo, crecida de abril de 1915).

A las características hidrológicas y geomorfológicas de la cuenca debe añadirse el papel del hombre. Unas 50 poblaciones navarras se encuentran localizadas a orillas del río Arga. El incremento de la presión antrópica, especialmente rápido a partir de los años sesenta, ha supuesto un aumento considerable del riesgo y, como consecuencia, ha conducido a la construcción de obras de protección contra los desbordamientos (escolleras, motas, muros de hormigón, encauzamientos...). Sin embargo, estas soluciones estructurales se han manifestado insuficientes en crecidas de cierta entidad, como demuestra la inundación ocurrida en enero de 1997 (758 m<sup>3</sup>/seg en la estación de Funes). Por ello, cada vez se hace más evidente la necesidad de reducir el riesgo a través de la planificación territorial.

### 3. ELABORACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE ZONAS INUNDABLES

La cartografía de riesgo de inundación tiene como objetivo demarcar áreas inundables y, si es posible, relacionarlas con las magnitudes de caudal y frecuencias de ocurrencia que les corresponden.

La figura 4 muestra el esquema de trabajo seguido en este estudio. Dos objetivos han orientado el desarrollo de la metodología. Por una parte se ha procurado reproducir las principales fases del ciclo hidrológico, en coherencia con el *modus operandis* de una cuenca como un sistema abierto. Por otra parte se ha intentado dotar a los resultados de

cierta robustez estadística e ir más allá del mero estudio puntual de eventos concretos. A pesar de que los métodos estadísticos no siempre son los más adecuados en Hidrología, han sido muy utilizados para el análisis de crecidas, porque ofrecen la oportunidad de incluir la información de series largas de datos hidrológicos. Tanto planificadores como ingenieros valoran el hecho de que el mapa de riesgo presente información no sólo de las áreas inundables, sino también de la probabilidad de ser inundadas.

Si entendemos la cuenca como un sistema hidrogeomorfológico, cinco son los procesos fundamentales que deben tenerse en cuenta para la demarcación de zonas inundables. En primer lugar, las entradas al sistema que, para el caso del Río Arga suelen ser por precipitación. En segundo lugar es importante detraer las pérdidas (infiltración, evapotranspiración, fugas en canal, etc.) de la lluvia bruta, con objeto de conocer la lluvia efectiva o neta, verdadera componente del flujo de canal. En tercer lugar aparecen los procesos de conversión de esta lluvia neta en caudal. Seguidamente debe conocerse qué caudales son susceptibles de ser evacuados por el canal y cuáles superan la capacidad del mismo. Por último, aparecen los procesos de inundación, en relación con las áreas afectadas por los flujos desbordados. La reproducción de estas cinco fases se ha llevado a cabo mediante el uso combinado de diferentes métodos estadísticos, hidrológicos, cartográficos, hidráulicos y geomorfológicos.

Las fuentes que se han utilizado son hidrológicas, cartográficas y geomorfológicas. Como datos hidrológicos se utilizaron las series de precipitaciones diarias de diecisiete observatorios del INM y los datos de caudal

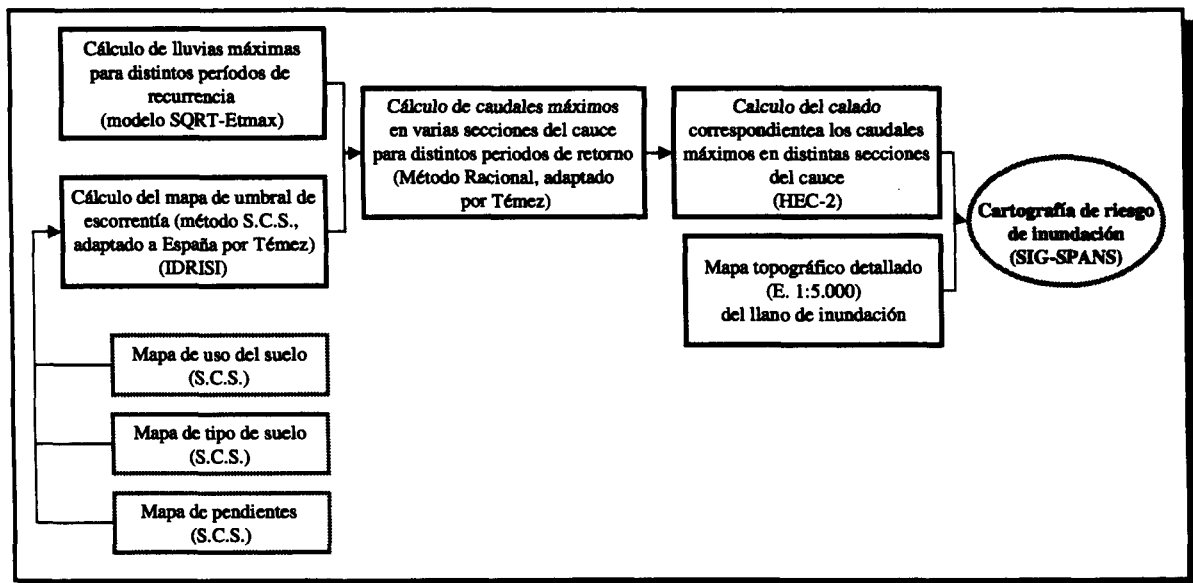


Figura 4.- Esquema metodológico

de la estación de Falces (Confederación Hidrográfica del Ebro), situada a pocos kilómetros de la desembocadura (figura 1). Respecto a las fuentes cartográficas se trabajó con los mapas, tanto analógicos como digitales, proporcionados por el Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Navarra. Se utilizó información base de topografía, tipos de suelo y usos del suelo, para toda la cuenca, a escala 1:50.000 e información detallada para el llano de inundación a escala 1:5.000. Las fuentes geomorfológicas se obtuvieron directamente mediante trabajo de campo, fotointerpretación y encuesta tras la última inundación.

#### A) Cálculo de lluvias máximas en 24 horas para distintos períodos de retorno.

Se ha estimado la precipitación máxima diaria correspondiente a los períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años en cada una de las diecisiete estaciones pluviométricas utilizadas. Para asociar la magnitud de la precipitación con la probabilidad de ocurrencia del suceso existen diferentes modelos estadísticos de leyes de distribución (Chow, 1964; Chow *et al.*, 1994). En España se ha utilizado tradicionalmente la ley de Gumbel, de dos parámetros. Esta ley asume un valor constante de coeficiente de sesgo que contradice frecuentemente los valores muestrales observados (Ferrer, 1991). Diversos estudios llevados a cabo en el CEDEX por Ferrer (1992) y Ferrer y Ardiles (1995) demuestran que la ley SQRT-ETmax, propuesta en Japón por Etho *et al.* (1986), presenta resultados más conservadores y realistas.

En el presente trabajo se ha utilizado la ley SQRT-Etmax para el análisis de máximas lluvias diarias porque ha demostrado un mayor ajuste con los datos locales que la conocida ley de Gumbel.

donde:

$$F(x) = \text{Prob}(X < x) = \exp\left[-\beta(1 + \sqrt{\lambda x}) \exp(-\sqrt{\lambda x})\right]$$

$x$  es la precipitación máxima diaria  
 $\lambda$  (parámetro de escala) y  $\beta$  (parámetro de frecuencia) definen la ley y deben ser ajustados a los datos existentes mediante el método de máxima verosimilitud -ML-.

Es interesante remarcar que los valores obtenidos con la aproximación probabilística son orientativos, ya que gran parte de las series pluviométricas (a excepción de Pamplona y Alsasua) no son todo lo largas, completas y regulares que sería deseable. A pesar de todo, estos métodos permiten obtener una idea del orden de magnitud.

Para estimar la precipitación areal correspondiente a cada uno de los períodos de retorno se ha utilizado el método de Thiessen Modificado, combinación de polígonos de Thiessen e isoyetas (CEDEX, 1987). Los polígonos de Thiessen permiten determinar las áreas de influencia de cada estación, y las isoyetas, aportan la influencia del relieve en la precipitación, principal deficiencia de los polígonos de Thiessen. Según la metodología propuesta por el CEDEX:

Denominando,

- Pa Precipitación media anual de la cuenca según isoyetas
- S Superficie total de la cuenca
- Si Superficie del área de influencia de la estación i
- Pi Precipitación media de la estación i
- P<sub>ai</sub> Precipitación areal sobre el área de influencia de la estación i
- N Numero de polígonos o áreas de influencia dentro de la cuenca de las estaciones consideradas

y definiendo 
$$K_i = \frac{P_{ai}}{P_i}$$

se pueden igualar los volúmenes de precipitación sobre la cuenca,

$$P_a S = \sum P_{ai} S_i = \sum K_i P_i S_i$$

y deducir:

$$P_a = \sum \frac{K_i S_i}{S} P_i = \sum C_i P_i$$

donde:

C<sub>i</sub> Coeficientes de Thiessen modificado, igual a

$$\frac{K_i S_i}{S}$$

$\frac{S_i}{S}$  Coeficientes de Thiessen puramente geométricos

Los resultados obtenidos (tabla II) muestran que las máximas precipitaciones se localizan al NE de la cuenca (figura 5a), las montañas pirenaicas se convierten en las primeras pantallas condensadoras de humedad para las masas nubosas e inestables que penetran por el Cantábrico oriental. En el área media de la cuenca, la precipitación descende con respecto a las montañas de cabecera, y a su vez, se aprecia un ligero descenso en sentido oeste (fig. 5b)-este (fig. 5c), que parece estar relacionado con la disposición orográfica y disminución del vapor de agua de las masas de aire en este mismo sentido. Las estaciones situadas más hacia el sur (fig. 5d) manifiestan una clara reducción de la lluvia para todos los periodos de retorno.

Respecto a la precipitación media areal (tabla II), el conjunto de la cuenca presenta valores entre 77 mm, para un período de retorno de 10 años, y 112 mm para 100 años.

### B) Estimación del umbral de escorrentía

Desde el comienzo de la lluvia hasta que se inicia la circulación hídrica, el suelo absorbe la lluvia hasta un límite P<sub>0</sub>, denominado umbral de escorrentía. Una vez alcanzado este valor, el agua solo se infiltra en parte, generándose un excedente de escorrentía directa (López Cadenas *et al.*, 1987). La infiltración varía espacial y temporalmente, y depende, en gran medida, de la intensidad de la lluvia, el estado antecedente del suelo y las características físicas del terreno (Chow *et al.*, 1994).

De las diferentes metodologías para cuantificar el umbral de escorrentía, se ha optado por la del *Soil Conservation Service* (SCS) adaptada a España por Témex (1978, 1991).

$$\sum E = 0 \quad \text{si } \sum P \leq P_0$$

$$\sum E = \frac{(\sum P - P_0)^2}{\sum P + 4P_0} \quad \text{si } \sum P > P_0$$

donde:

ΣE= escorrentía superficial provocada por la componente neta de lluvia

ΣP= precipitación acumulada desde el comienzo del aguacero

P<sub>0</sub>= parámetro o umbral de escorrentía

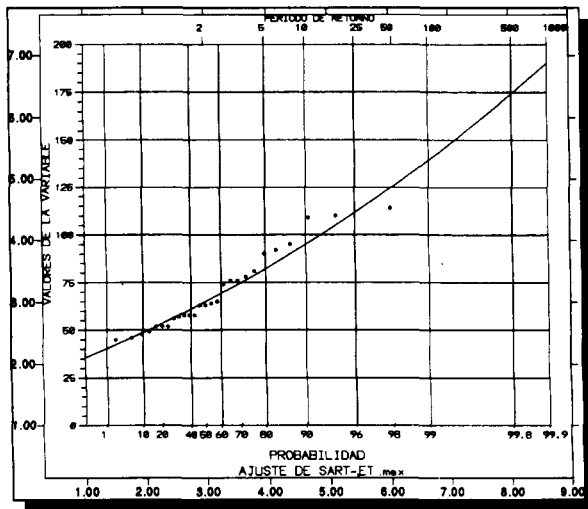
Este modelo empírico, experimentado en la Península Ibérica con buenos resultados, contempla cinco factores básicos en el proceso de infiltración: el uso del suelo, el tipo de práctica de cultivo, la pendiente del terreno, las características hidrológicas del suelo y las condiciones de humedad antecedente. La relación entre el P<sub>0</sub> y estas variables se establece a partir de la tabla propuesta por Témex (1978) mediante la superposición de los mapas correspondientes.

En el presente trabajo esta superposición cartográfica se realizó de forma automática, mediante el Sistema de Información Geográfica IDRISI, siguiendo la metodología desarrollada en el CEDEX (1994) y propuesta por Ferrer *et al.* (1995). Según este método, las variables fueron clasificadas, en primer lugar, en las categorías que propone Témex. Así, la

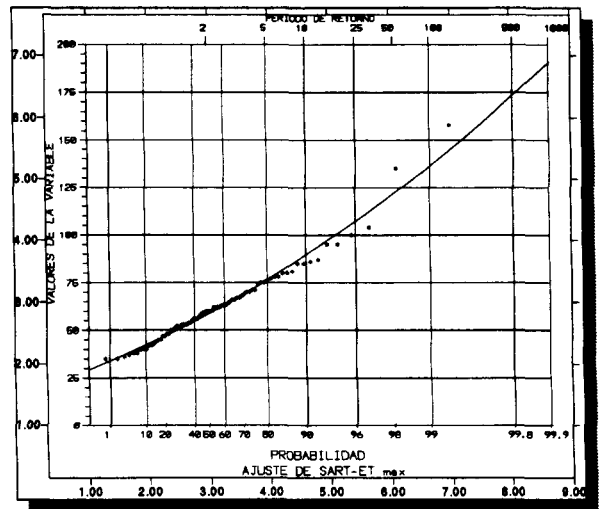


Período de retorno (años)	Probabilidad no excedencia	Eugui-Quinto Real (mm)	Alasua (mm)	Pamplona (mm)	Miranda de Arga (mm)	Precipitación media areal (mm)
10	.90	95	90	82	51	77,2
25	.96	112	107	103	63	85,7
50	.98	125	122	120	73	99,9
100	.99	139	140	138	84	112,4

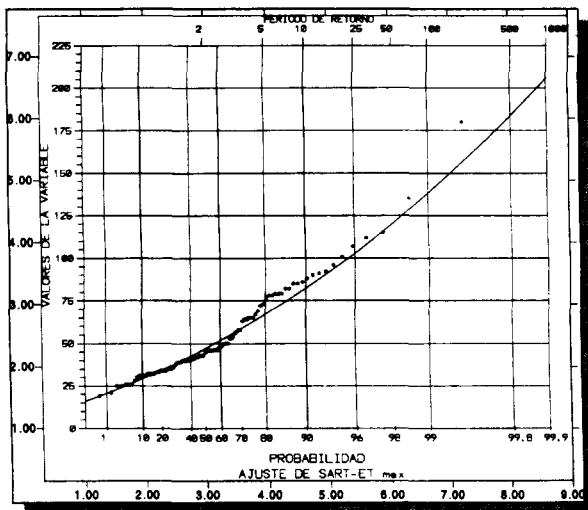
Tabla 2.- Precipitaciones máximas para distintos períodos de retorno.



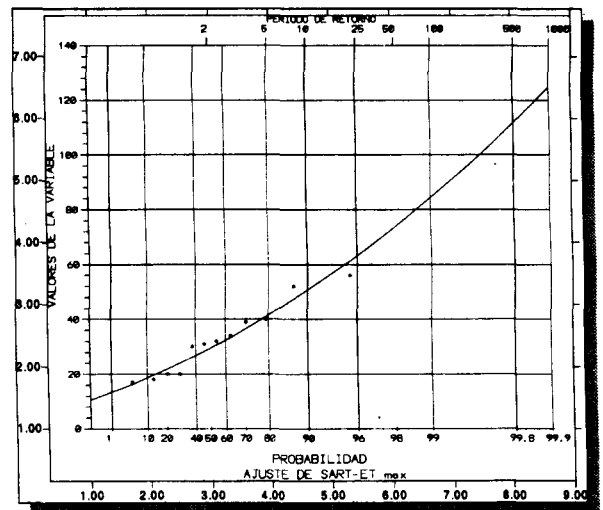
A



B



C



D

Figura 5.- Precipitaciones máximas para diferentes períodos de retorno: a) estación de Eugui-Quinto Real; b) estación de Alasua; c) estación de Pamplona-observatorio y d) estación de Miranda de Arga.

pendiente presenta dos grupos: menor de 3%, o mayor o igual al 3% (fig. 6); los tipos de suelo presentan cuatro clases (fig. 7) en función de su facilidad de drenaje (excesivamente drenados -A-, bien o moderadamente drenados -B-, imperfectamente drenados -C-, y pobremente drenados -D-) y los usos del suelo se dividen en 12 categorías (fig. 8). La falta de información precisa ha llevado a considerar dos abstracciones en el presente trabajo: la primera, un estado de humedad antecedente del suelo de tipo medio, y la segunda, una explotación del terreno con cultivos que siguen la línea de máxima pendiente (la más habitual en la cuenca).

En segundo lugar, a cada una de las categorías se les asignó un número primo. Los mapas de entrada se reclasificaron con estos nuevos valores y se multiplicaron entre sí. Dada la singularidad de los números primos, el producto de ellos dará siempre un número diferente. De este modo, tal y como proponen Ferrer *et al.* (1995), conociendo el resultado del producto se puede saber de qué combinación de variables (uso del suelo, tipo de suelo y pendiente) parte y, por lo tanto, asignarle el umbral de escorrentía correspondiente.

La figura 9 muestra el mapa de umbral de escorrentía obtenido, con una resolución espacial de 10 x 10 m. Este mapa pone de manifiesto que las principales áreas productoras de escorrentía de la cuenca corresponden a las zonas impermeables urbanas y los sustratos de margas y arcillas ocupadas por cereal o deforestadas (< 10 mm, 53% de la superficie). A medida que la cubierta vegetal es más densa, el terreno adquiere mayor capacidad de infiltración y el umbral de escorrentía se eleva. Los valores de  $P_0$  oscilan entre 20 y 45 mm en sustratos arcillosos o margosos con débiles pendientes, o en materiales más permeables (conglomerados, margo-calizas...) pero pendientes pronunciadas y suelos menos desarrollados (22% de la cuenca). En las montañas septentrionales, cubiertas por bosques de caducifolias atlánticas, los umbrales de escorrentía llegan a alcanzar valores de 60 mm (19% del territorio) a pesar de las fuertes pendientes de la zona. Finalmente, los valores de  $P_0$  más elevados (> 60 mm) se localizan en las sierras calizas con alto grado de fracturación y carstificación (6% de la superficie) y, por tanto, con elevada capacidad de infiltración.

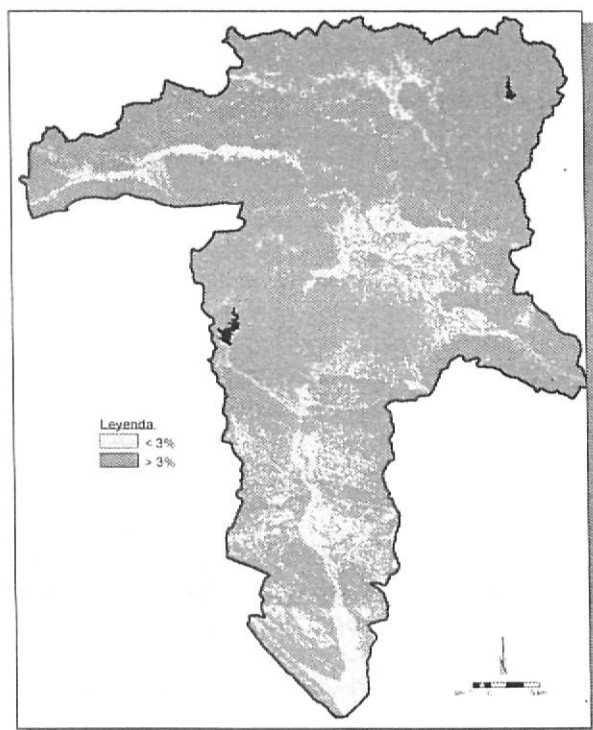


Figura 6.- Mapa de pendientes reclasificado según el método del S.C.S.

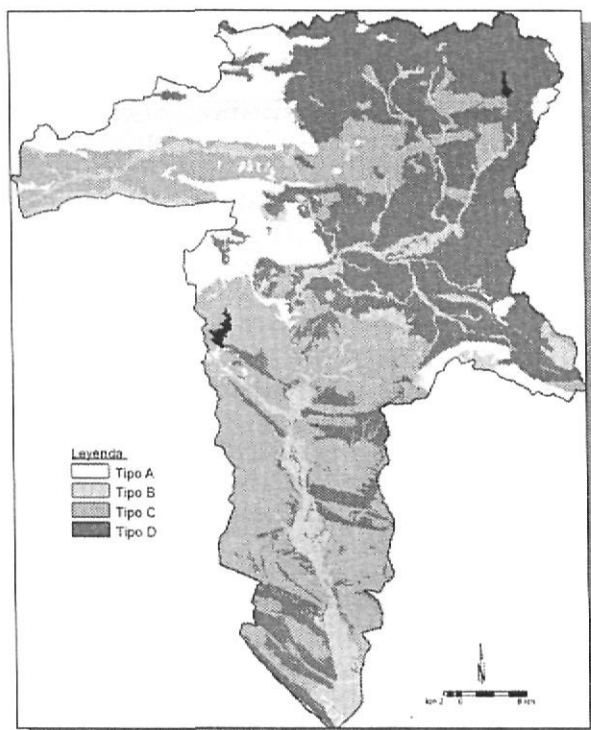


Figura 7.- Mapa de tipos de suelo según el S.C.S.

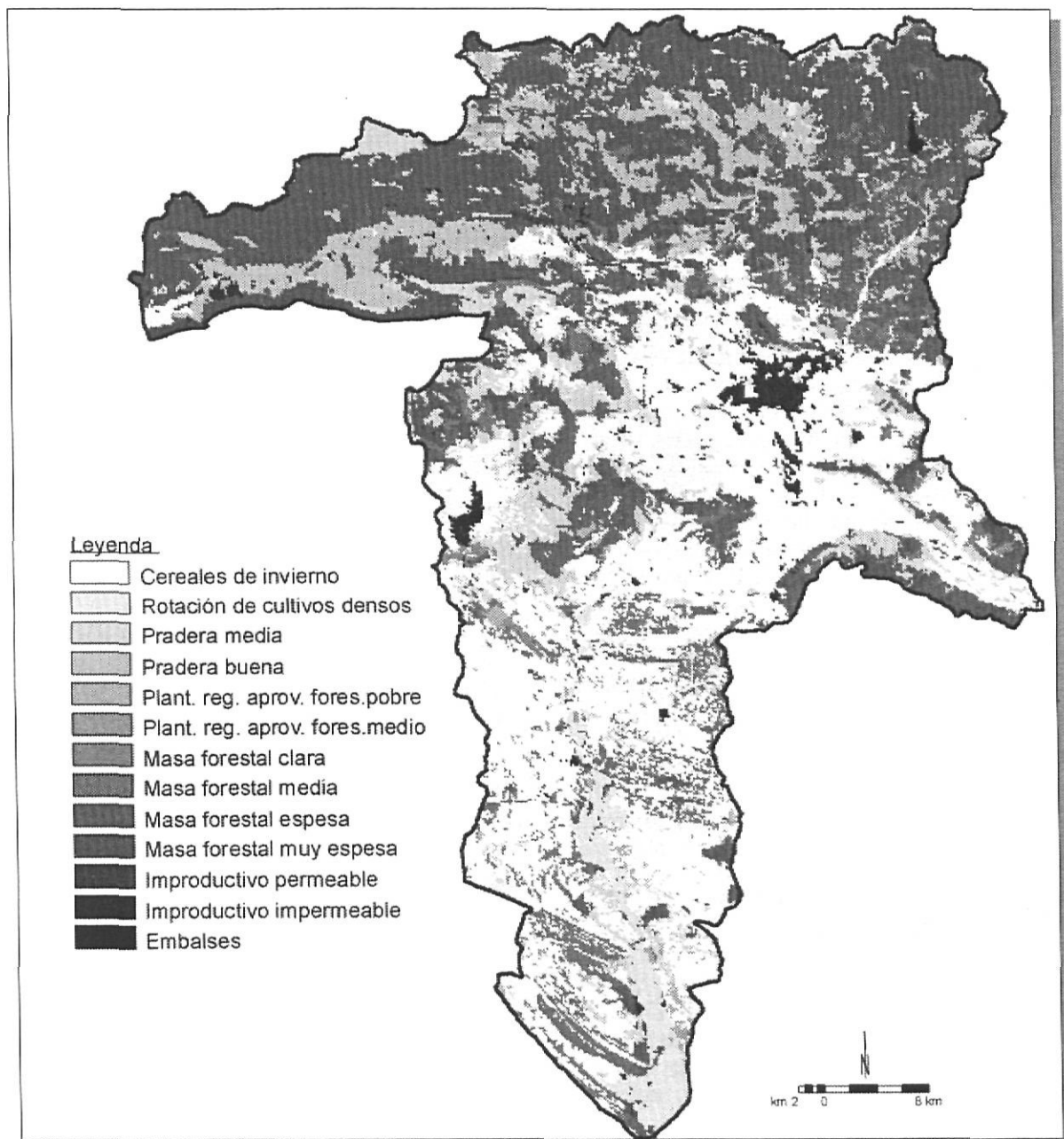


Figura 8.- Mapa de usos del suelo según el S.C.S.

### C) Determinación de caudales máximos en 24 horas

Existen tres tipos de métodos para evaluar la magnitud y frecuencia de los caudales de crecida: empíricos, estadísticos e hidrometeorológicos (Ferrer, 1993). En el presente estudio se utilizaron métodos estadísticos e hidrometeorológicos. Con registros suficientemente extensos y representativos, el análisis estadístico resulta un método válido y ampliamente difundido. Por su parte, los métodos hidrometeorológicos, utilizados, principalmente en ausencia de datos foronómicos, simulan

el proceso lluvia-escorrentía basándose en los registros pluviométricos y la cuantificación de determinados procesos físicos.

En el llano de inundación del Arga sólo se disponía de la estación de aforo de Funes, con 58 años de registro. Los datos de esta estación permitieron estimar, por métodos estadísticos, el caudal máximo para cada período de retorno. Se aplicaron dos leyes de frecuencia: la de Gumbel y la de valores extremos generalizados (GEV). Esta última mostró un mayor ajuste a los datos reales que la de Gumbel (figura 10). Además, aunque ambas

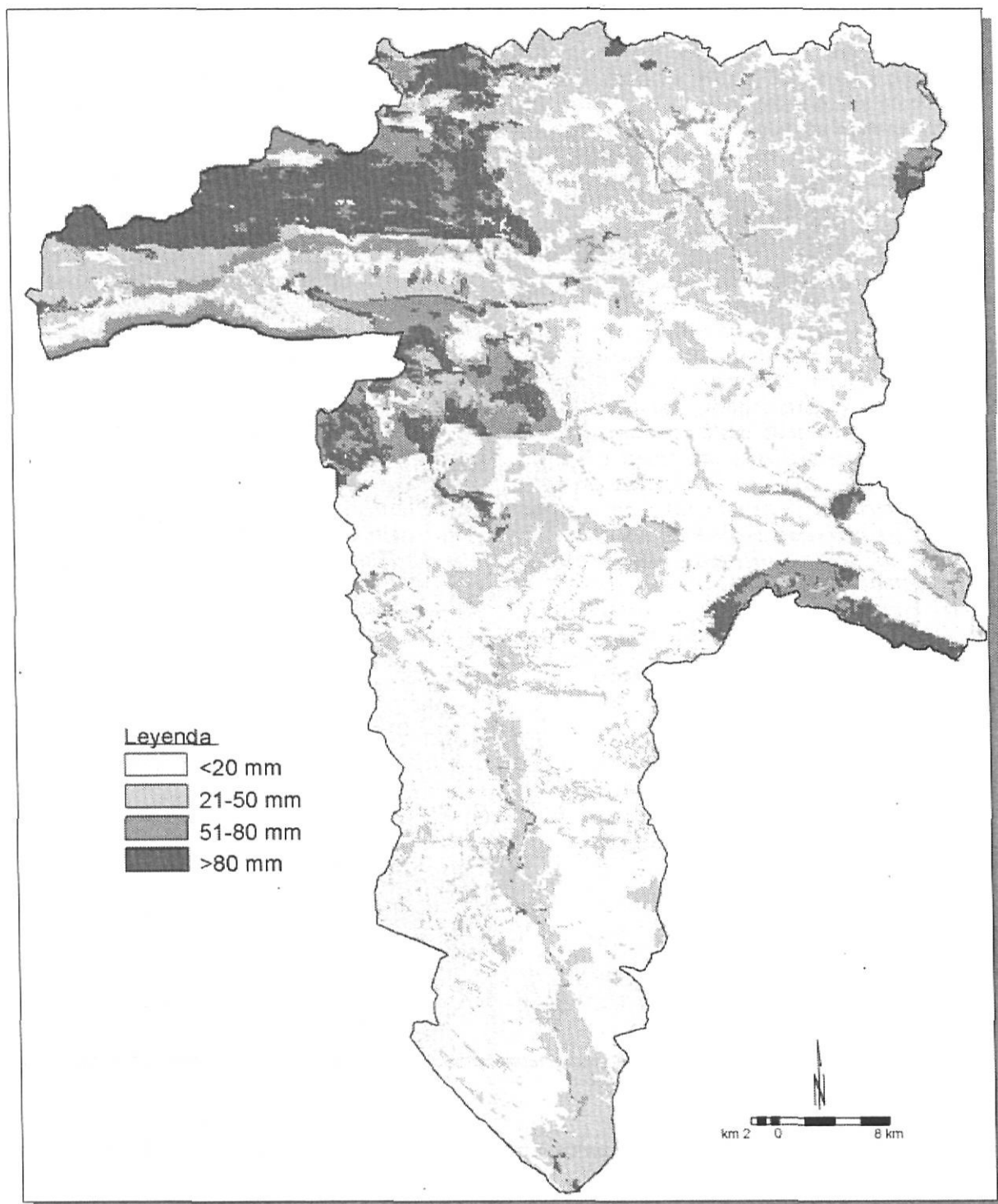


Figura9.- Mapa de umbral de escorrentía.

leyes se adaptan bien a los valores más bajos de la serie, cuando las crecidas son de cierta magnitud, la ley de Gumbel resulta poco flexible y estima los caudales por defecto, del lado de la inseguridad, lo cual puede resultar peligroso a la hora de determinar zonas de riesgo.

Al mismo tiempo que los métodos estadísticos, se aplicó en Funes el conocido método racional para la estimación de caudales máximos, adaptado a España por Témez (1991). Se trata de un método hidrometeorológico que formula, de forma sencilla, la influencia de los principales factores que condicionan los caudales de crecida. La versión adaptada por Témez puede ser aplicada a cuencas de

hasta 3.000 Km<sup>2</sup>, incluye nuevos coeficientes de escorrentía y uniformidad y una formulación para determinar el tiempo de concentración adaptada a las cuencas españolas.

$$Q = \frac{C.I.A.}{3,6} * K$$

en la que:

- Q (m<sup>3</sup>/seg) = Caudal punta correspondiente a un periodo de retorno dado
- I (mm/h) = Máxima intensidad media en el intervalo de duración T<sub>c</sub> para el mismo periodo de retorno
- A (Km<sup>2</sup>) = Superficie de la cuenca
- C = Coeficiente de escorrentía del intervalo donde se produce I
- K = Coeficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad, K, varía de unos episodios a otros, pero su valor medio en una cuenca concreta depende fundamentalmente del tiempo de concentración (T<sub>c</sub>). Ferrer (1993) propone para su cálculo la siguiente expresión:

$$K = 1 + \frac{T_c^{1,25}}{T_c^{1,25} + 14}$$

La intensidad de lluvia, I, requeriría el análisis del hietograma de cada suceso. Sin embargo, para el cálculo del caudal de diseño la fórmula se refiere a una intensidad asociada a un determinado periodo de retorno. En

cuanto al coeficiente de escorrentía, C, conocido el umbral de escorrentía (P<sub>0</sub>), puede obtenerse utilizando los datos diarios de precipitación (P<sub>d</sub>) a partir de la formulación del SCS (Ferrer, 1993).

$$C = \frac{((P_d / P_0 - 1) * ((P_d / P_0) + 23))}{((P_d / P_0) + 11)^2}$$

Con el método racional se estimaron los caudales máximos en Funes para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. Con objeto de evaluar la validez del método, los resultados se compararon con los obtenidos con las leyes estadísticas a partir de los datos del aforo de Funes (tabla III). La similitud con los caudales calculados mediante la ley GEV es evidente, por lo que se utilizó el método racional para calcular el caudal máximo en otros puntos del bajo Arga, donde no se disponía de estación de aforo. Para ello, se realizaron estimaciones en 16 tramos a lo largo de los 15 km que distan, aproximadamente, entre la presa del Arquillo (donde comienza a ensancharse el llano y se agravan los problemas de inundación) y la desembocadura, incluyendo las zonas inundables de Falces, Peralta y Funes (tabla IV).

#### D) Cálculo de la altura de la lámina de agua y delimitación del área inundable

Una vez calculados los caudales máximos para cada periodo de retorno, se ha estimado, mediante el modelo hidráulico HEC-2, la altura de agua correspondiente a dichos caudales.

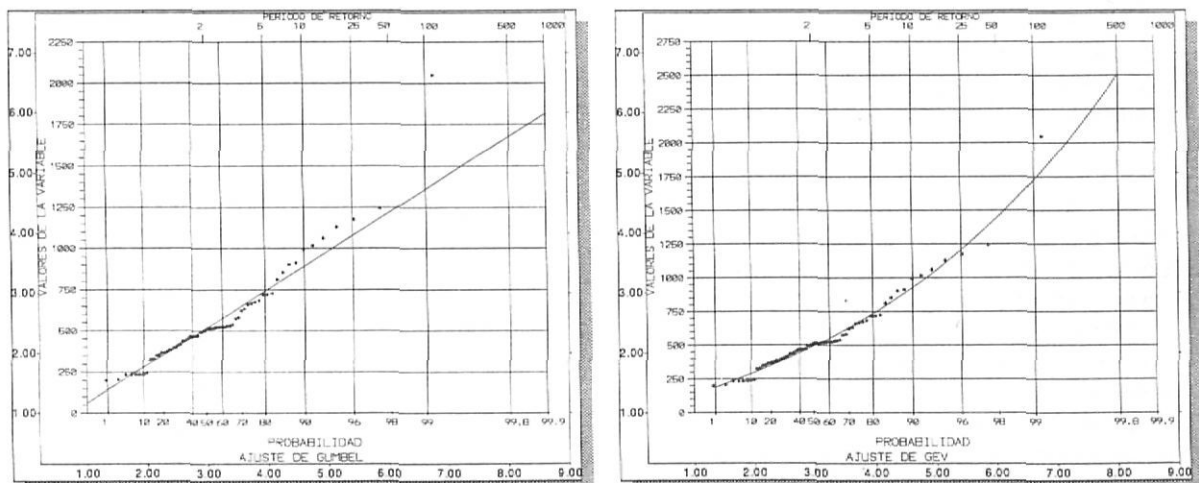


Figura 10.- Caudales máximos para distintos periodos de retorno en la estación de Funes: a) ley Gumbel y b) ley GEV.



COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS (m <sup>3</sup> /seg)				
	T10	T25	T50	T100
Método racional	902,5	1117	1459	1755,9
GEV	927	1209	1451	1725
Gumbel	892	1080	1219	1358

Tabla 3.- Comparación entre métodos para la estimación de caudales máximos

VALORES DE CAUDAL MÁXIMO SEGÚN EL MÉTODO RACIONAL				
TRAMOS	T10	T25	T50	T100
1	831,3	1028,8	1343,9	1617,3
2	831,8	1029,4	1344,7	1618,3
3	835,6	1034,1	1350,8	1625,6
4	835,8	1034,4	1351,2	1626,2
5	846,8	1048,1	1369	1647,6
6	847,6	1049	1370,3	1649,1
7	848	1049,5	1370,8	1649,8
8	848,9	1050,6	1372,3	1651,5
9	851,3	1053,6	1376,2	1656,3
10	853,8	1056,7	1380,3	1661,2
11	867,9	1074,1	1403	1688,5
12	881,3	1090,8	1424,8	1714,7
13	881,6	1091,1	1425,2	1715,3
14	898,2	1111,7	1452,1	1747,6
15	901,6	1115,9	1457,6	1754,1
16	902,5	1117	1459	1755,9

Tabla 4.- Caudal máximo estimado por el método racional para distintos períodos de retorno.

El HEC-2 es un modelo para flujo gradualmente variado en régimen estacionario y está basado en la solución unidimensional de la ecuación de la energía y la evaluación de la pérdida de energía por fricción de Manning (HEC, 1981). El programa reproduce la forma del cauce y del llano de inundación y determina la altura que alcanzará el agua en las condiciones que el usuario determina.

En el llano de inundación del río Arga se ha calculado la altura de la lámina de agua para los caudales máximos de cada período de retorno en 31 secciones transversales, definidas en función de cambios significativos en la morfología del cauce. El modelo digital del terreno, a escala 1:5.000, permitió, en una primera aproximación, delimitar automáticamente el alcance de la lámina de agua sobre el llano. Sin embargo, los resultados fueron muy groseros y en algunas ocasiones no se correspondían con las observaciones de campo.

Por ello, la delimitación automática de zonas inundables se corrigió manualmente, incorporando la información de campo, así como la de fotografías aéreas, tomadas en la última avenida (22 de enero de 1997).

La figura 11 recoge la delimitación de zonas inundables para distintos períodos de retorno. Como puede apreciarse, el nuevo cauce tiene capacidad para contener caudales inferiores a 900 m<sup>3</sup>/seg. Sin embargo, algunas áreas (espacios de cauce natural, zonas ubicadas entorno a los meandros aislados por la obra de encauzamiento y el área entorno a la desembocadura) quedan anegadas con caudales del orden de los 750 m<sup>3</sup>/seg. En estas zonas, el agua desbordada provoca importantes pérdidas económicas en las huertas, campos de cultivo y pequeñas edificaciones de tipo industrial, sin embargo, los cascos urbanos se encuentran fuera de peligro.

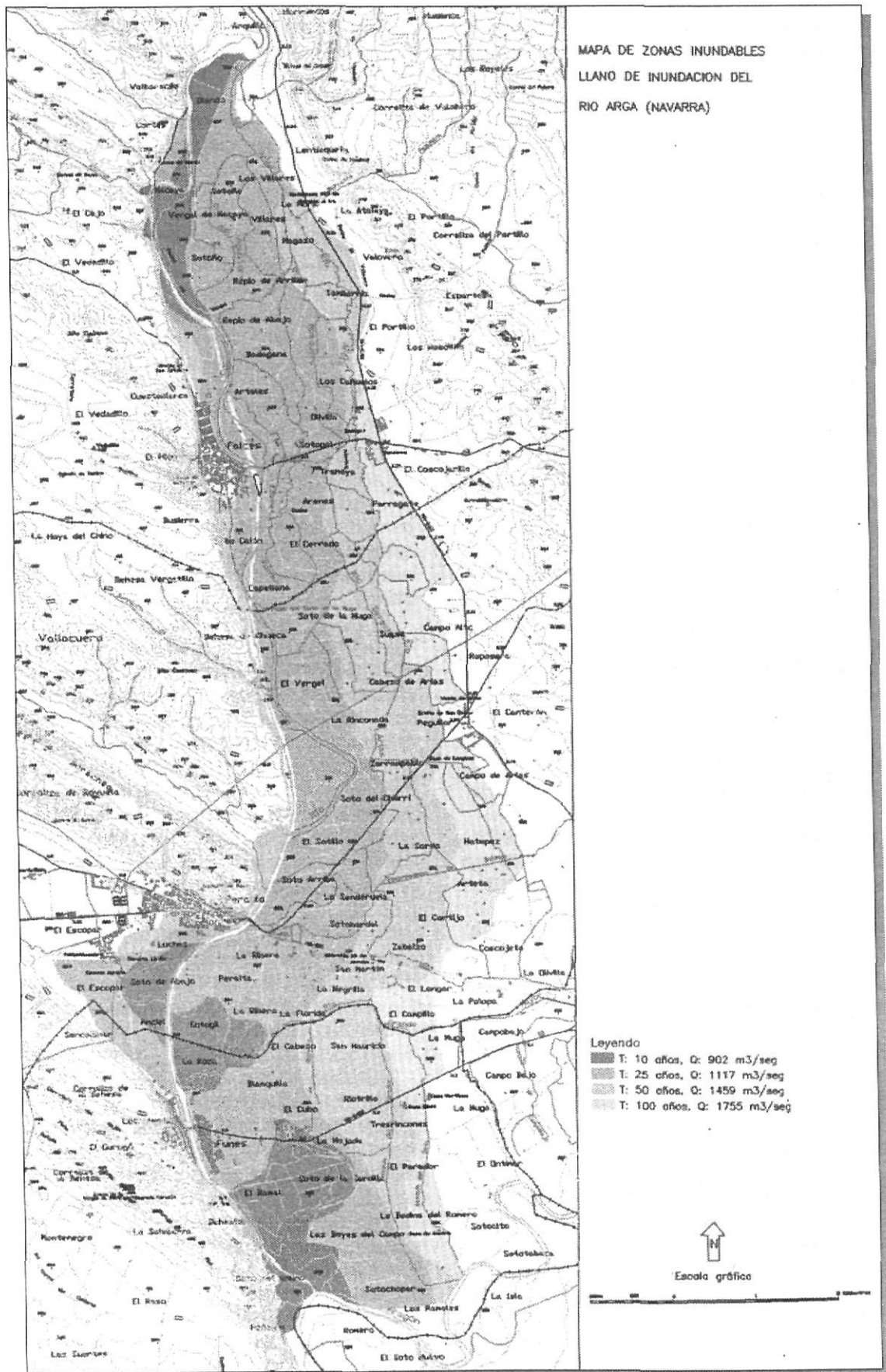


Figura 11.- Mapa de zonas inundables para distintos periodos de retorno.

A partir de caudales de unos 900 m<sup>3</sup>/seg, el caudal del Arga supera las motas artificiales. Con caudales de 1,000 y 1,100 m<sup>3</sup>/seg (T<sub>25</sub>), la inundación afectará a los nuevos barrios de las localidades de Falces, Peralta y Funes, situados a cotas más bajas que el asentamiento primitivo. El retorno del agua desbordada al canal se complica notablemente, ya que, con la obra de encauzamiento, han desaparecido los puntos de entrada de los flujos de retorno creados por el río de forma natural.

Con caudales de 1,459 y 1,755 m<sup>3</sup>/seg (T<sub>50</sub> y T<sub>100</sub>, respectivamente), el mapa muestra un llano de inundación anegado en su totalidad. Se amplian, sobre todo en Falces y Peralta, los límites de los barrios potencialmente inundables, sin embargo, dado que los asentamientos iniciales se encuentran ubicados a notable altura respecto al llano de inundación, estos siguen estando libres de riesgo.

En síntesis, puede concluirse que las actuaciones realizadas en el cauce del Arga han solventado los problemas de inundaciones de período de recurrencia bajo, pero, por el contrario, pueden agravar notablemente las situaciones de tipo extraordinario.

---

#### 4. CONCLUSIONES

La delimitación de zonas inundables es una tarea difícil, aunque necesaria. El uso combinado de diferentes métodos (estadísticos, hidrometeorológicos, hidráulicos, cartográficos y geomorfológicos) constituye una vía de aproximación al problema, de tipo interdisciplinar, que ayuda a superar la notable deficiencia de información hidrológica.

De los métodos estadísticos utilizados para la estimación de precipitaciones y caudales máximos asociados a períodos de retorno —leyes de Gumbel y de valores extremos generalizados—, éste último se ha demostrado más eficaz. No sólo presenta un mayor ajuste con los registros de las estaciones, sino que reproduce mejor los valores de largo período de recurrencia.

Respecto a las aproximaciones hidrometeorológicas, el método racional, adaptado a España por Témez, ha resultado de gran utilidad. El cálculo de caudales máximos en la estación de Funes ha permitido contrastar los resultados con los obtenidos por métodos es-

taadísticos. Las cifras estimadas por el método racional resultan muy similares a las obtenidas por la ley GEV. Si bien se muestran inferiores a éstas para períodos de retorno bajos, resultan algo superiores en los períodos de recurrencia altos, por lo que se acercan más al máximo valor de la serie.

Una vez contrastada la viabilidad del método racional en la cuenca, su aplicación a tramos no aforados resultó de gran utilidad. Los métodos estadísticos precisan de series foronómicas largas y fiables, difícilmente disponibles. Sin embargo, la fórmula racional, en tanto método hidrometeorológico, se basa en series pluviométricas y datos fisiográficos más fáciles de conseguir.

Los Sistemas de Información Geográfica se han demostrado muy útiles, tanto para la adquisición de datos morfométricos, como para la elaboración del mapa de umbral de escorrentía. Asimismo han permitido la primera delimitación, automática, de zonas inundables.

Respecto a los métodos hidráulicos para el cálculo de la altura de agua en el cauce, el modelo HEC-2 ha ofrecido resultados satisfactorios. Presenta el inconveniente de requerir una cartografía topográfica actualizada y de gran detalle (1:500; 1:1,000), por lo que, a menudo, precisa de un levantamiento topográfico previo. La escala 1:5,000 utilizada en este trabajo resultó insuficiente, por lo que fue necesario validar los resultados con fuentes auxiliares (trabajo de campo, fotografía aérea y oblicua, encuestas, ...). No obstante, independientemente de la precisión de la información disponible, entendemos que los métodos automáticos son claramente insuficientes y que el trabajo de campo resulta imprescindible en este tipo de estudios.

La aplicación de la metodología pone de manifiesto que el cauce en el llano de inundación del Arga tiene una capacidad teórica de 900 m<sup>3</sup>/seg, si bien con 750 m<sup>3</sup>/seg se producen desbordamientos en algunas áreas concretas. Caudales de 1,755 m<sup>3</sup>/seg, con un período de retorno de 100 años, anegarían prácticamente todo el llano, aspecto importante si consideramos que el caudal máximo registrado en Funes es de 2,024 m<sup>3</sup>/seg.

Por último remarcar que esta cartografía entra claramente en contradicción con la creciente ocupación humana que se está llevando a cabo en el llano del río Arga desde



los años sesenta. El uso y mejora de los mapas de zonas inundables puede ayudar a que esta ocupación se realice de una manera más racional.

---

## AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento a la Dirección General de Medio Ambiente del Gobierno de Navarra que nos ha permitido utilizar sus bases de datos y Sistemas de información. A la Confederación Hidrográfica del Ebro que nos ha procurado los datos de las estaciones foronómicas y al Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX) que nos ha cedido los programas hidrológico-hidráulicos utilizados.

---

## BIBLIOGRAFÍA

BESCÓS, A. (1997): *Estudio integral de la cuenca hidrográfica del Río Arga: el agua como recurso y como riesgo*, Memoria del Trabajo de Investigación, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá (inédito).

BESCÓS, A. y CAMARASA, A.M. (1998): Cartografía de riesgos de inundación mediante sistemas de información geográfica. Una aplicación al llano de inundación del Río Arga (Navarra). *Investigaciones recientes de la Geomorfología española*: 703-706

BESCÓS, A. y CAMARASA, A.M. (1998): Caracterización hidrológica del río Arga (Navarra): el agua como recurso y como riesgo", *Estudios Geográficos*, Tomo LIX, 232, pp. 389-421.

CAMARASA, A.M. (1995): *Génesis de crecidas en pequeñas cuencas semiáridas: Barranc del Carraixet y Rambla de Poyo*. MOPT-Confederación Hidrográfica del Júcar, 252 pp.

CASAS TORRES (1956): *La originalidad geográfica de Navarra*. Cursos de verano en Pamplona, lección inaugural del I Curso. Universidad de Zaragoza. Diputación Foral de Navarra.

CEDEX (1984): *Curso sobre utilización de los Sistemas de Información Geográfica en Hidrología*, CEDEX, Madrid.

CEDEX (1996): *Curso sobre métodos para el cálculo hidrológico de crecidas*, CEDEX, Madrid.

CHOW, V.T. (1964): *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw Hill, New York, 1.467 p.

CHOW V.T., MAIDMENT, D.R. y MAYS, L.W. (1994): *Hidrología Aplicada*, McGraw Hill.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS L.W. (1994): *Hidrología aplicada*. Mc Graw Hill

DUNNE, T. y LEOPOLD, L.B. (1978): *Water in Environmental Planning*, S. Francisco, Freeman and Company, 818 pp.

ETOH, T.; MUROTA, M.; NAKANISHI, M. (1986): SQRT- Exponential Type Distribution of Maximum. Proceeding of International Symposium on Flood Frequency and Risk Analysis. Louisiana. May 1986, pp- 253,265

FERRER, M.; RODRÍGUEZ, J.; ESTRELA, T. (1995): Generación automática del número de curva con Sistemas de Información Geográfica. *Ingeniería del agua* Vol. 2, num. 4, pp. 43-58. Madrid

FERRER, J. (1991): Frequency analysis of daily rainfall annual maximum series in Guadalupe Basin. *Proc. XXIV IAHR Congress.*, Madrid, vol. A, pp 21-30.

FERRER, J. (1992): Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas. CEDEX. Madrid. 76 pp

FERRER, J. (1993): Análisis estadístico de caudales de avenida. CEDEX. Madrid. 42 pp

FERRER, J.; ARDILES, L. (1995): Análisis estadístico de las series anuales de máximas lluvias diarias en España. *Ingeniería Civil*, 95: 87-100.

FLORISTÁN, A. (1995): *Geografía de Navarra*. El Solar-1. Introducción general. Fundamentos geográficos naturales. Las montañas de la Montaña. Diario de Navarra. Pamplona.

FLORISTÁN, A. (1996): *Geografía de Navarra*. El Solar-2. Diario de Navarra. Pamplona.

HEC 1981: *HEC-1 Flood Hydrograph Package, User's Manual*. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, Calif.

LOPEZ CADENAS DE LLANO F., MINTEGUI, J.A. (1987): Hidrología de superficie. Fundación Conde de Salazar. E.T.S. Ingenieros de Montes. 224 pp. Madrid

MATEU BELLES, J.F. (1989): "Crecidas e Inundaciones", *Guía de la Naturaleza de la Comunidad Valenciana*, pp. 565-608.

MATEU BELLES, J.F. (1990): Avenidas y riesgo de inundación en los sistemas fluviales mediterráneos de la Península Ibérica. *Bol. Asoc. de Geógrafos Españoles*. nº 10, pp 45-86

PEJENAUTE GOÑI, J.M. (1989): los días de precipitación elevada en Navarra y las situaciones atmosféricas que las originan. *Notas y Estudios de Ciencias Sociales*, 2, 17-60. Centro Asociado de la UNED en Navarra. Pamplona

ROSSELLÓ, V.M. (1989): Los llanos de inundación. (En) GIL ONCINA, A.; MORALES GIL, A. (Eds.): Avenidas fluviales e inundaciones en el Mediterráneo. Universidad de Alicante. C.A.M. pp 243-285. Alicante

SEGURA, F. (1991): Geomorfología fluvial y trazado de mapas de riesgo de inundación: El cono aluvial de Palancia. Actas del XII Congreso Nacional de Geografía. Universidad de Valencia. 221-227 pp. Valencia

SOIL CONSERVATION SERVICE: (1972): *National Engineering Handbook*, Section 4, U. S. Department of Agriculture, Washington, D. C.

TÉMEZ, J.R. (1978): Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales MOPU. Dirección General de Carreteras. 113 pp.

TÉMEZ, J.R. (1991): Extended and Improved Rational Method. version of the Hyghaways Administration of Spain. proc. XXIV Congress. Madrid (España) 1991. Vol. A., pp 33-40