

CAPÍTULO 4

APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA AL ANÁLISIS DEL RIESGO DE INUNDACIONES FLUVIALES

A. Díez Herrero



Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica al análisis del riesgo de inundaciones fluviales

Por A. Díez Herrero⁽¹⁾

1. INTRODUCCIÓN A LAS METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DEL RIESGO DE INUNDACIONES

El análisis del riesgo de inundaciones fluviales requiere, como la mayor parte de los riesgos naturales, el estudio pormenorizado de la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad asociadas al anegamiento de las riberas por desbordamiento durante crecidas o avenidas, para posteriormente confrontar los resultados y obtener una síntesis integrada del riesgo.

La peligrosidad (severidad, dimensión espacio-temporal y probabilidad) puede abordarse con tres grupos de metodologías (Figura 1): históricas, hidrológicas y geológico-geomorfológicas. Las primeras utilizan eventos previos para delimitar puntos conflictivos, niveles alcanzados por el agua o registros de caudales. Los métodos hidrológicos, más difundidos y cuantitativos, tienen a su vez dos etapas: modelación hidrológica, utilizando el análisis estadístico de los caudales registrados en estaciones de aforo, o métodos hidrometeorológicos (simulación del proceso precipitación-aportación), de la que se obtienen los caudales de crecida (Figura 2); y modelación hidráulica que, en distintas hipótesis de flujo (unifásico-bifásico, unidimensional-bidimensional, uniforme-variado, estacio-

nario-variable...), permite obtener las alturas de lámina de agua y velocidades que alcanzarán dichos caudales al circular por los cauces fluviales. Finalmente, los métodos geomorfológicos tratan de delimitar las áreas geomorfológicamente activas durante la inundación a partir de las formas y depósitos asociados a eventos de crecida del registro geológico. Como resultado final, la peligrosidad se expresa cartográficamente mediante diferentes tipos de mapas: áreas inundables (normalmente para diferentes períodos de retorno), isobatas durante la crecida, isotacas (o isove-las), puntos conflictivos, carga de sedimentos.

El análisis de la exposición y vulnerabilidad requiere utilizar cartografías y bases de datos de población y bienes materiales para evaluar su interferencia con las áreas de peligrosidad, así como la adecuada categorización de los elementos en riesgo de acuerdo a su fragilidad intrínseca. Los procedimientos son los estandarizados para cualquier tipo de riesgo, contemplando las particularidades de las inundaciones, derivada de las acciones que producen pérdidas o deterioro: ahogamiento, arrastre, choque, humectación, anoxia, desagregación, dilución, desmoronamiento, zapado, impermeabilización, cegamiento.

Cualquiera de estas etapas y las metodologías que llevan aparejadas son suscepti-

(1) Facultad de Ciencias del Medio Ambiente. Universidad de Castilla-La Mancha

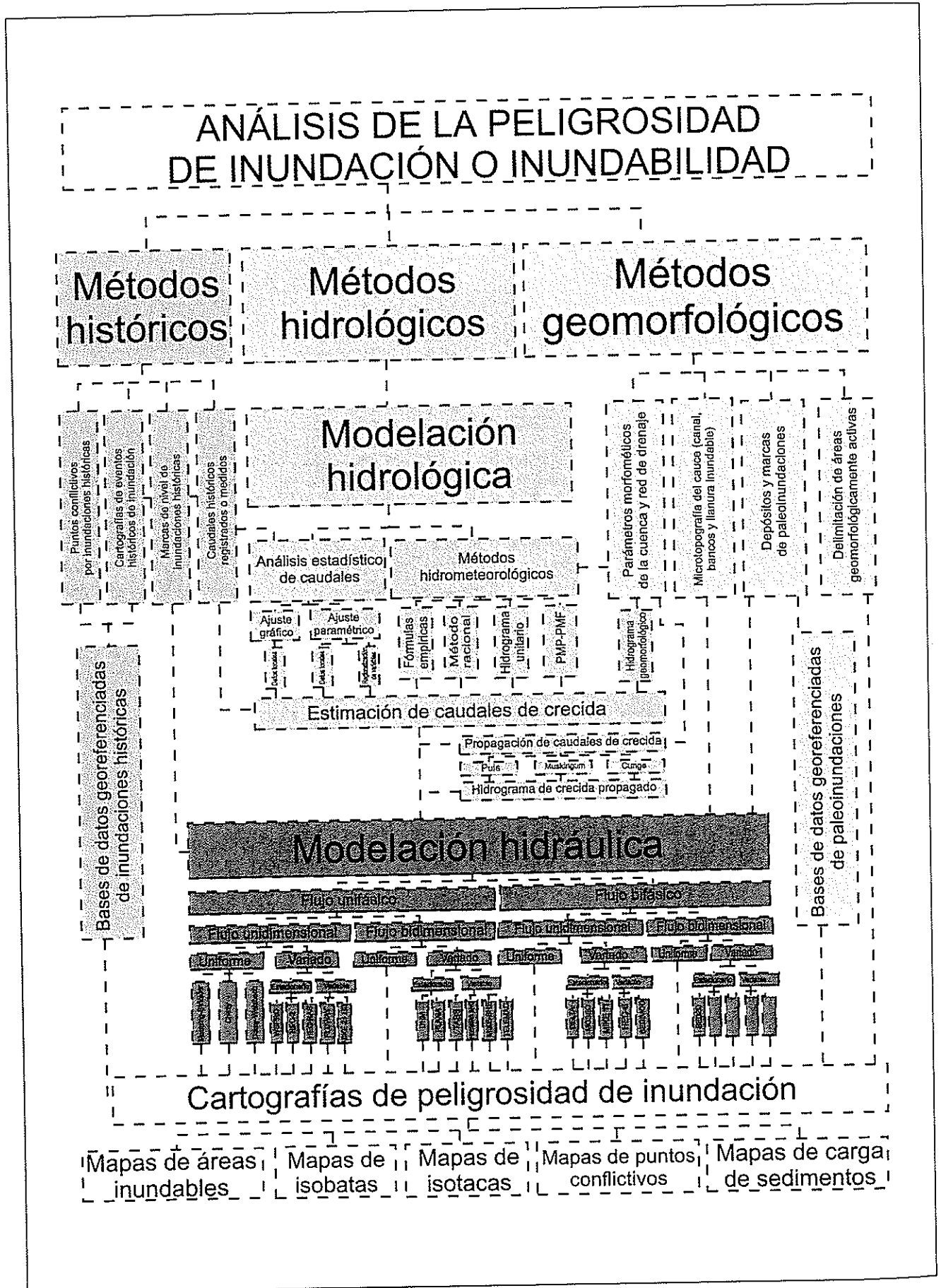


Figura 1. Esquema metodológico para el análisis de la peligrosidad de inundación o inundabilidad

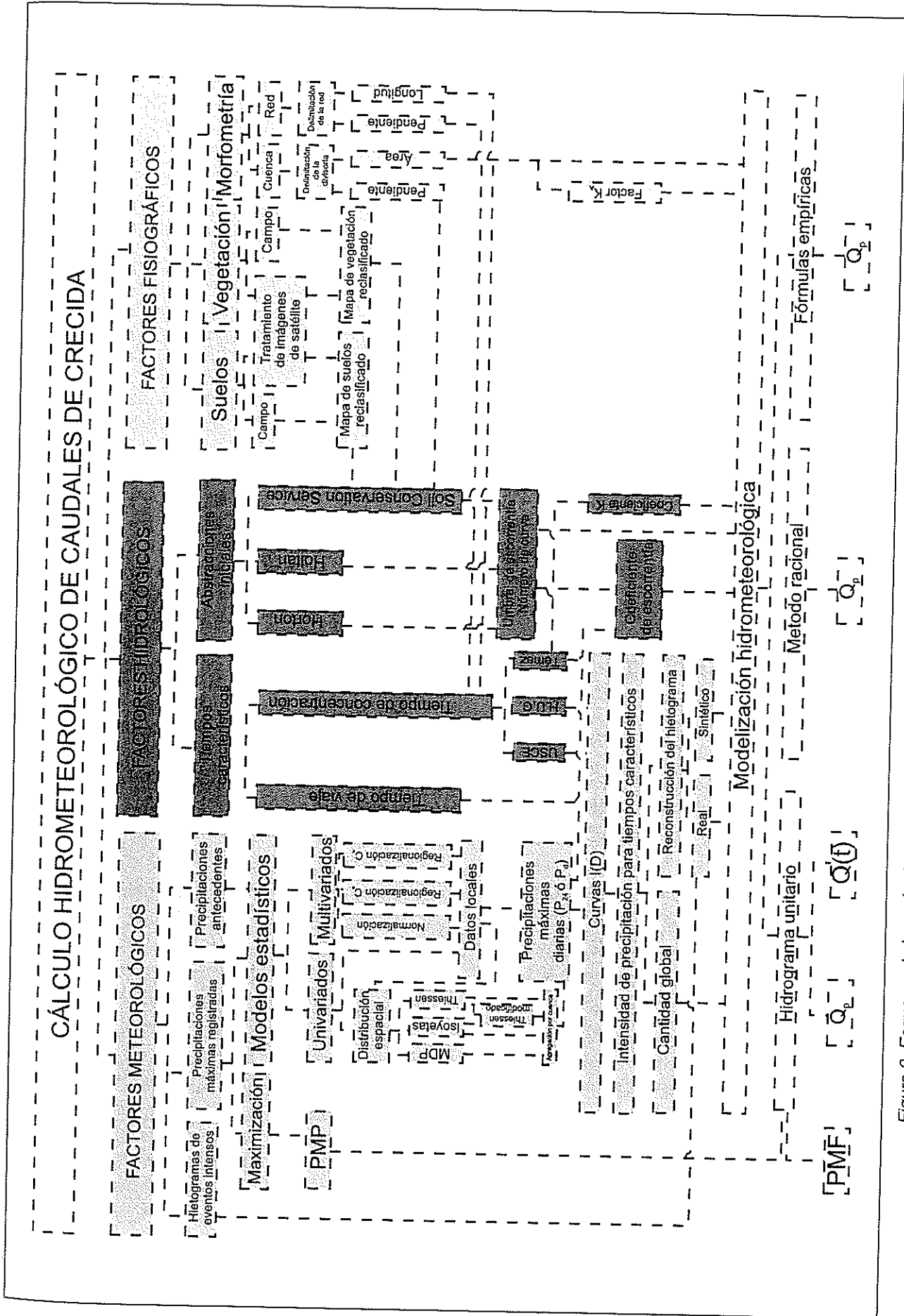


Figura 2. Esquema de los métodos hidrometeorológicos empleados en el análisis de la peligrosidad de inundaciones

bles de ser realizadas utilizando herramientas S.I.G., principalmente el amplio grupo que precisan analizar o representar la componente espacial del fenómeno. Básicamente, los S.I.G. pueden intervenir en las modelaciones hidrológica o hidráulica de dos formas: preparando datos de entrada o representando datos de salida de los modelos clásicos (físicos o matemáticos); o integrando dentro del S.I.G. los propios modelos (matemáticos).

En la práctica, los S.I.G. se utilizan frecuentemente en: regionalización de datos de precipitación (MDT, isoyetas, polígonos de Thiessen), obtención de parámetros morfométricos de interés hidrológico desde el MDE (divisorias, área, pendientes, longitudes de la red...), discretización de parámetros hidrológicos (umbral de escorrentía), interpolación de alturas de lámina de agua en modelos hidráulicos, confección de bases de datos georreferenciadas para inundaciones históricas y paleoinundaciones, edición de cartografías integradas de riesgo, etc.

2. LOS S.I.G. EN EL ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD DE INUNDACIONES

A la vista de las metodologías recogidas en el anterior apartado, se puede comprobar cómo las técnicas más difundidas, cuantitativas y susceptibles de utilizar las herramientas SIG son los modelos, especialmente los hidrológicos e hidráulicos.

Como bien recoge Estrela (1994), existen dos posibilidades en el uso combinado de los modelos y S.I.G. (Figura 3), lo que aplicado a modelos para el estudio de eventos hidrológicos extremos (crecidas) nos permite:

- a) Utilizar el S.I.G. únicamente para regionalizar, agregar y/o calcular las varia-

bles y parámetros del modelo, usando los resultados como entradas al mismo.

- b) Aplicar las ecuaciones del modelo en cada elemento de la cobertura S.I.G. (tesela, punto, línea o polígono) mediante las funciones propias del mismo, esto es, integrar ambos.

La mayor parte de las aplicaciones de los S.I.G. a los modelos empleados para el análisis de la peligrosidad de inundaciones se ajustan a la primera posibilidad debido a la complejidad matemática de los modelos hidrológicos e hidráulicos, aunque cada vez es más habitual el desarrollo de aplicaciones informáticas específicas que integran modelo y S.I.G.

2.1. Aplicaciones a la modelación hidrológica de caudales de crecida y avenida

Los S.I.G. pueden emplearse en la modelación hidrológica bien para la simple obtención de los parámetros meteorológicos, morfométricos e hidrológicos que constituyen la entrada al modelo hidrológico, o integrando el S.I.G. con éste.

a) Regionalización de parámetros meteorológicos desde datos puntuales

A partir de los datos puntuales que nos ofrecen las estaciones meteorológicas de superficie, y mediante técnicas de interpolación espacial, se pueden obtener valores meteorológicos para amplias extensiones del territorio.

Si mediante la interpolación de datos puntuales obtenemos una cartografía continua de valores, se construye un modelo digital del terreno (MDT), en el que el parámetro z no corresponde a la cota (como ocurre en los MDE), sino al valor de la variable:

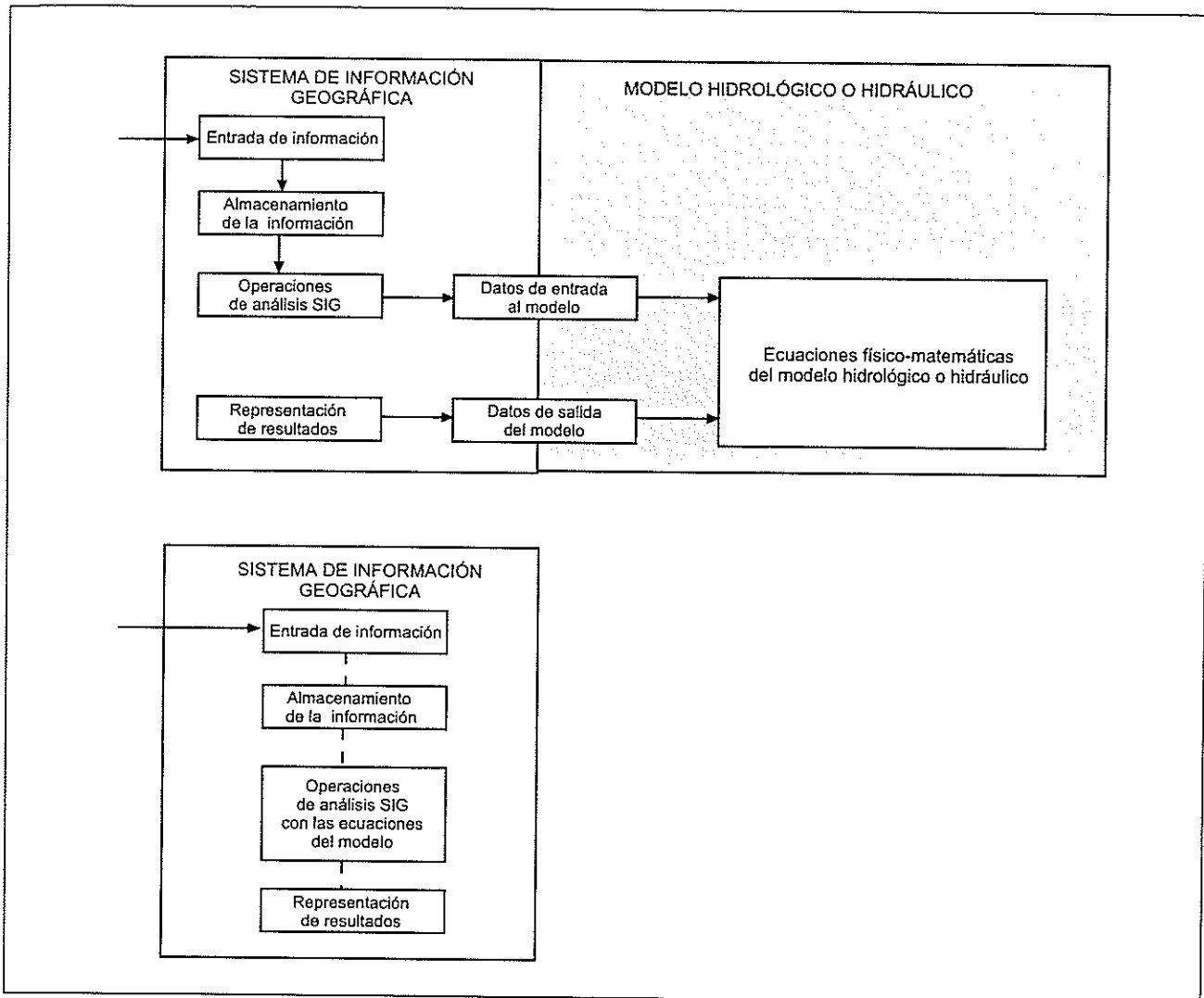


Figura 3. Posibilidades de utilización conjunta de modelos y S.I.G., bien de forma separada (esquema superior) o integrada (inferior). Adaptado de Estrela (1994)

precipitación máxima en 24 h (de un año o correspondiente a un determinado período de retorno), precipitación antecedente (días previos a la máxima precipitación).

La interpolación puede realizarse utilizando diferentes técnicas y métodos (Ruiz, 1994), incluso empleando pesos para los valores de cada estación obtenidos por interpolación óptima, como la realizada para el alto Palancia por el equipo del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la UPV (Francés, 1994).

De la misma forma pueden construirse los conocidos mapas de isoyetas para precipitaciones máximas correspondientes a diferentes períodos de retorno (Figura 4) a partir de datos puntuales (INM, 2001); o los polígonos de Thiessen a partir de la situación de las estaciones, utilizando funciones implementadas en el S.I.G. (THIESSEN en el *software* IDRISI de Clark Labs). Por cruce de estas dos cartografías con operaciones de superposición de coberturas, también se puede aplicar el denominado método de Thiessen modificado, combinación de los anteriores (Figura 5).

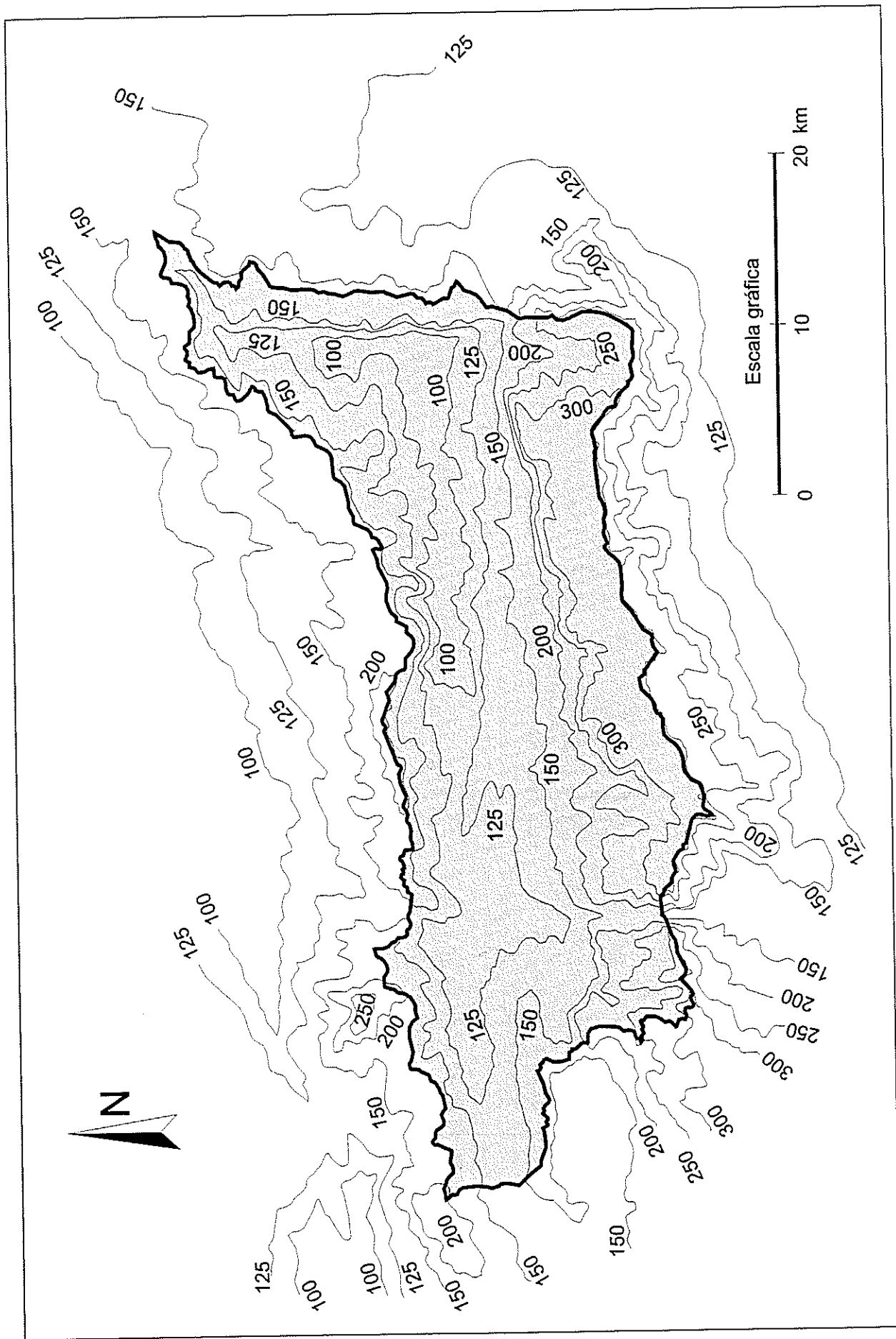


Figura 4. Isolíneas de máximas precipitaciones (mm) en 24 horas para un período de retorno de 100 años, calculadas a partir de interpolación de valores puntuales (SQRT-ET_{max}+ Máxima verosimilitud). Díez y Pedraza (1997)

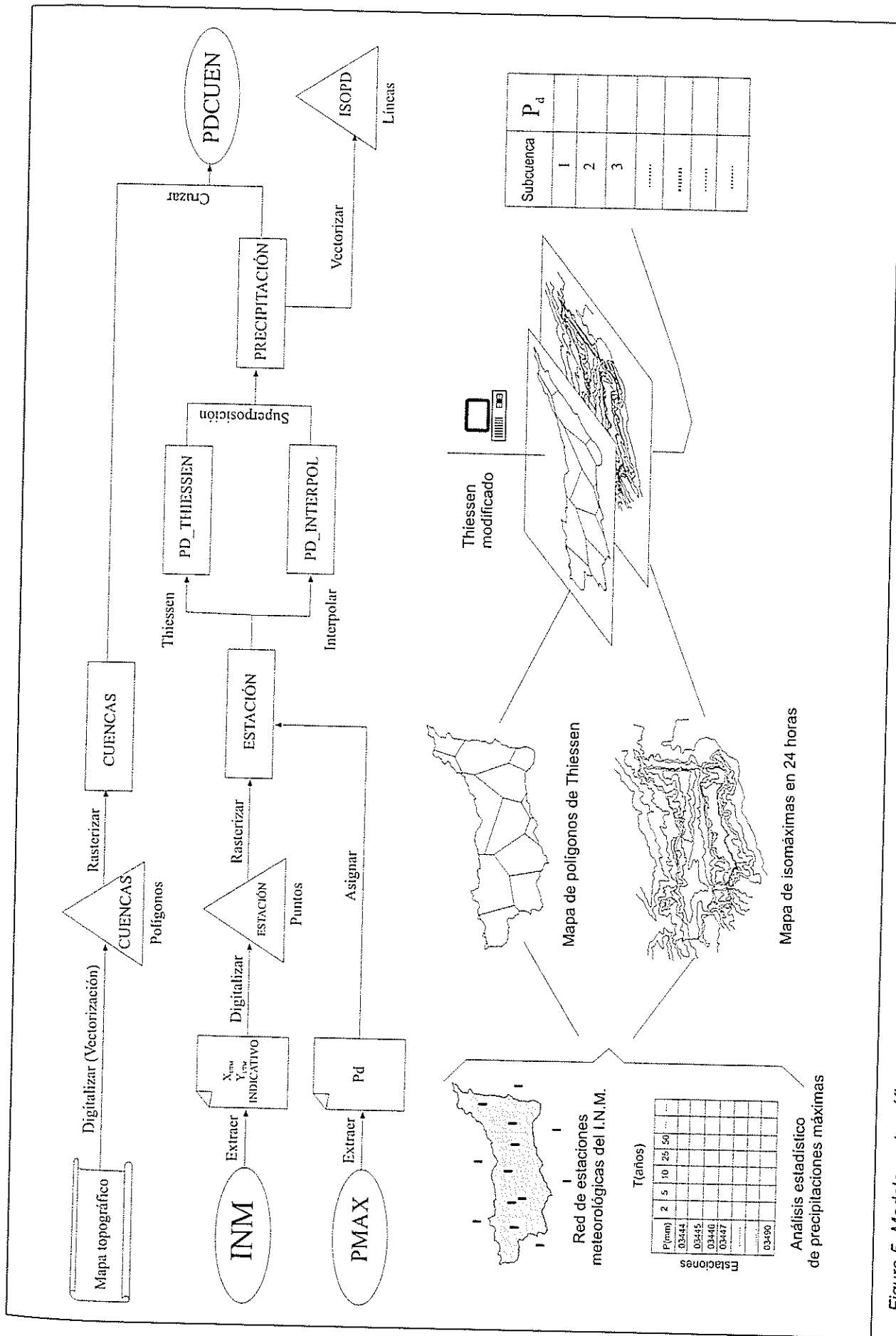


Figura 5. Modelo cartográfico para la regionalización de parámetros meteorológicos desde datos puntuales, utilizando un SIG. Esquema cartográfico del modelo. Díez (2001)

Otras alternativas más elaboradas consisten en regionalizar, utilizando un S.I.G.s, algunos parámetros estadísticos de la variable meteorológica, como la media y los coeficientes de sesgo y variación, a partir de la interpolación de los valores en las series locales. Este es el fundamento de la aplicación GISPLU (Ferrer, 1994; Menéndez *et al.*, 1996), desarrollada por el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX) para la Dirección General de Carreteras (Ministerio de Fomento), utilizando el *software* IDRISI (Clark Labs) en la obtención y representación de los resultados, y enfocada al cálculo de los cuantiles de lluvia para diferentes períodos de retorno. Como complemento se desarrolló MAXPLU (Menéndez *et al.*, 1996), que permite independizarse de un S.I.G. comercial, como es el caso de IDRISI.

Tras diversas mejoras, estas herramientas han sido publicadas por la Dirección General de Carreteras, primero como un mapa de isolíneas con los estadísticos necesarios para calcular la máxima precipitación diaria (DGC, 1996), y posteriormente incorporando un programa de aplicación en entorno S.I.G. (soporte CD-ROM) para facilitar la estimación (DGC, 1999).

Dada la dependencia fisiográfica de la variable precipitación, también se han hecho avances en la incorporación de la información continua del MDE para la interpolación de las precipitaciones (Hay *et al.*, 1993; CEDEX, 1994). En primer lugar se estudia la correlación de la precipitación con la cota altitudinal y/o orientación de la ladera para los datos disponibles en las estaciones meteorológicas, para después extrapolar esta correlación al resto del territorio.

b) Obtención de parámetros morfométricos desde el MDT

A partir del MDT, y en combinación con los

mapas de la cuenca y subcuencas, se pueden realizar operaciones de análisis de superficies, como el cálculo de medidas y parámetros morfométricos de interés hidrológico (área, altura media, curva hipsométrica, etc.), entre los cuales destacan la posibilidad de realizar perfiles longitudinales de las corrientes fluviales y la obtención de un mapa de pendientes de la cuenca (Figura 6).

Las medidas morfométricas básicas, como el área de cada subcuenca, resultan fundamentales para los métodos hidrometeorológicos, como el hidrograma unitario y en la estimación de parámetros del método racional modificado (K_n , de Témez).

Algunos parámetros de la red hidrográfica y cuencas de drenaje, como las denominadas leyes de Horton (relaciones de números, longitudes y áreas), pueden obtenerse automáticamente desde el S.I.G., aprovechando sus propiedades topológicas, y facilitar la estimación del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico. En esta línea, Rodríguez y Pantojo (2001) han desarrollado el programa Geomat, que opera en el entorno de AutoCAD (Geo-) y Matemática (-mat), para obtener el tiempo de viaje a partir de cartografías de las cuencas y redes de drenaje.

c) Discretización espacial de parámetros hidrológicos

Para la utilización de los métodos hidrometeorológicos más difundidos, como el método racional o el hidrograma unitario (ver apartado 1), en el cálculo de caudales de crecida es preciso la obtención de un parámetro hidrológico de enorme importancia: el umbral de escorrentía.

Entre las diversas metodologías existentes, es habitual aplicar la propuesta del U.S. *Soil Conservation Service*, que tan

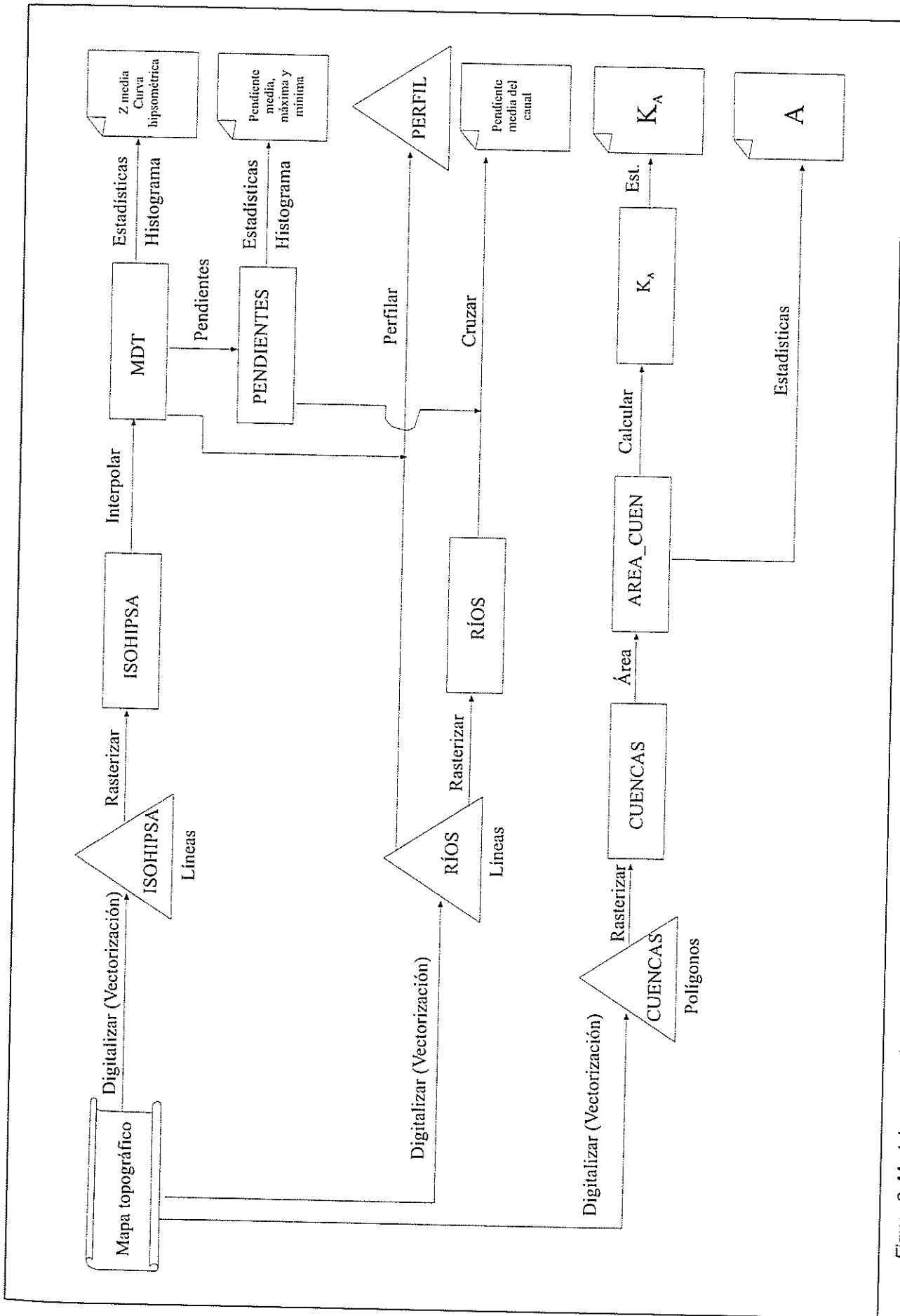


Figura 6. Modelo cartográfico de obtención de parámetros morfométricos de la cuenca y la red desde el MDT, empleando un S.I.G. (Diez, 2001)

sólo precisa tres variables de entrada: la pendiente del terreno, el tipo hidrológico de suelo, y la vegetación y/o cultivo. Los valores del número de curva (correspondiente a un determinado umbral de escorrentía) para cada combinación de cruce de las variables se encuentran tabulados, lo que ofrece la posibilidad de utilizar sistemas de información geográfica en su estimación.

Esta metodología, implementada en un SIG, ya fue utilizada en nuestro país por el CEDEX (1994) para el alto Palancia utilizando IDRISI (Clark Labs), y por Ferrer *et al.* (1995) para la obtención del número de curva en la cuenca del río Guadiana. En primer lugar realizaron operaciones de reclasificación a las coberturas de pendientes, suelos, y cultivos y aprovechamientos, y se cruzaron aplicando álgebra de mapas con una operación aritmética (producto). En la codificación de las clases se utilizaron números primos para evitar posibles duplicaciones de resultados, que fueron convertidos a valores de número de curva mediante una tabla de contingencia y transformados a umbral de escorrentía mediante una nueva función aritmética en la que se introdujo la fórmula de conversión.

Posteriormente fue utilizada por Díez y Pedraza (1997) en el alto Alberche con el *software* ILWIS (ITC), incorporando ligeras mejoras metodológicas, que consistieron básicamente en la utilización de diferentes tablas de reclasificación del mapa de cultivos y aprovechamientos para distintos meses, en función del estado fenológico de los mismos durante el período en el cual se producen las crecidas en la cuenca (septiembre-mayo). Una vez discretizados los valores del parámetro umbral de escorrentía, se agregaron a dos escalas diferentes (cuenca completa o subcuencas) para su aplicación en el cálculo de caudales mediante los métodos hidrometeorológicos agregados (Figura 7).

También se han elaborado con S.I.G. los mapas del coeficiente P_0 de umbral de escorrentía a escala 1:25.000, en el marco del Mapa geocientífico de la provincia de Valencia (Servicio de Medio Ambiente de la Diputación de Valencia).

Simulación de situaciones preoperacionales y postoperacionales

Las operaciones de análisis S.I.G. permiten igualmente la simulación de las crecidas en situaciones hipotéticas, bajo condiciones de contorno diferentes a las actuales. Éste es el caso de la estimación de las avenidas correspondientes a un estado preantrópico, esto es, previo a la intervención masiva del ser humano en el territorio y, por tanto, con la vegetación supuestamente natural sin alteración alguna. Para ello, en la estimación del umbral de escorrentía (véase el apartado anterior), se introduce en lugar del mapa de cultivos y aprovechamientos (que representa la vegetación y usos actuales) el mapa de vegetación potencial procedente de los mapas de las series de vegetación de España (ICONA, MAPA). Procediendo de semejante manera a como se indicó en dicho apartado se llega a un segundo valor de umbral de escorrentía para la situación preoperacional, tanto para la cuenca completa como para las subcuencas; con estos valores y los modelos hidrometeorológicos se pueden calcular los hidrogramas correspondientes a las avenidas previas a la ocupación humana del territorio (Figura 8).

d) Agregación espacial de parámetros hidrológicos

Estimación de parámetros en cuencas

Muchos de los parámetros hidrológicos anteriormente estimados de forma distribuida (precipitaciones máximas, precipita-

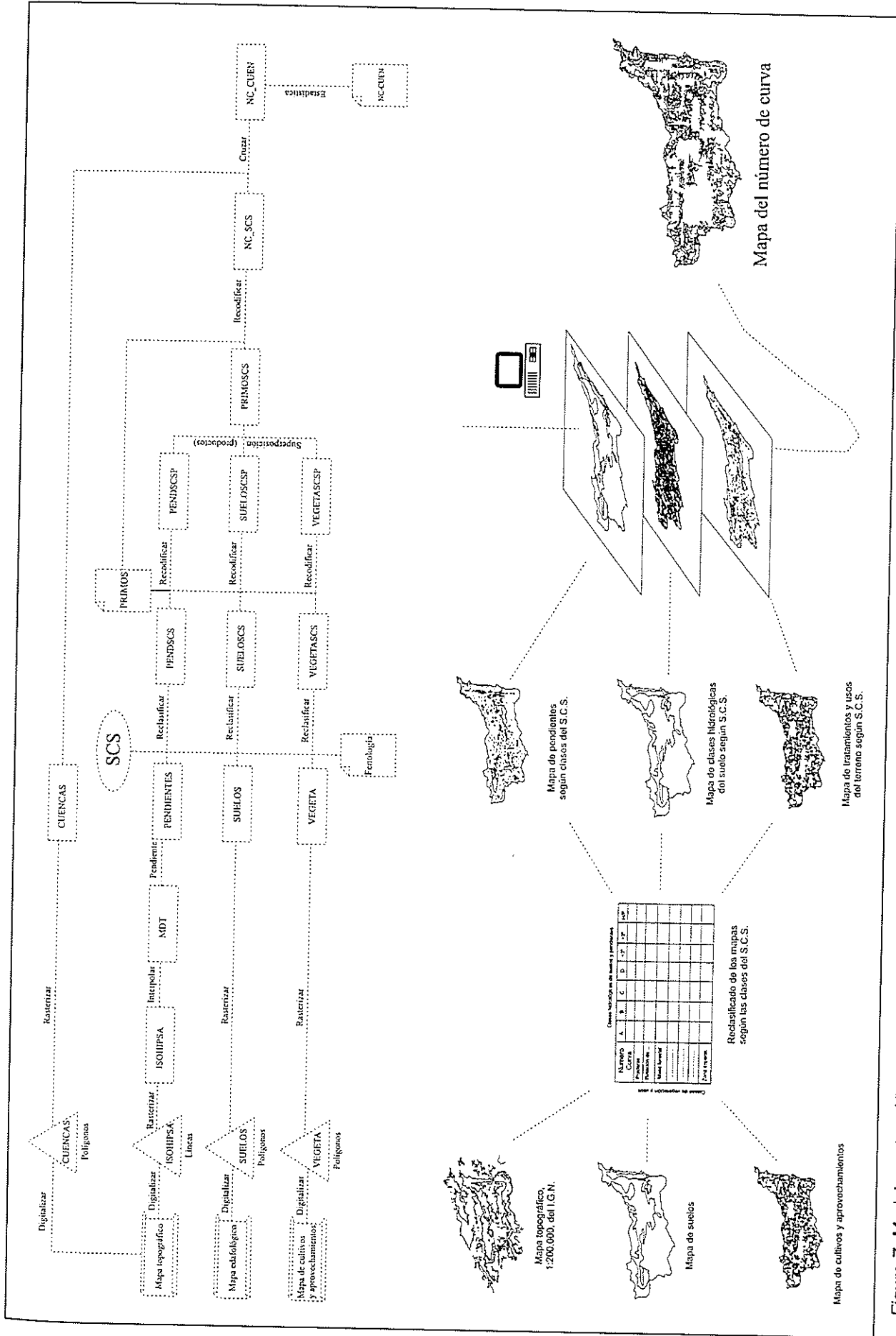


Figura 7. Modelo cartográfico para la discretización espacial del umbral de escorrentía (número de curva), empleando un S.I.G. Esquema cartográfico del modelo. Díez (2001)

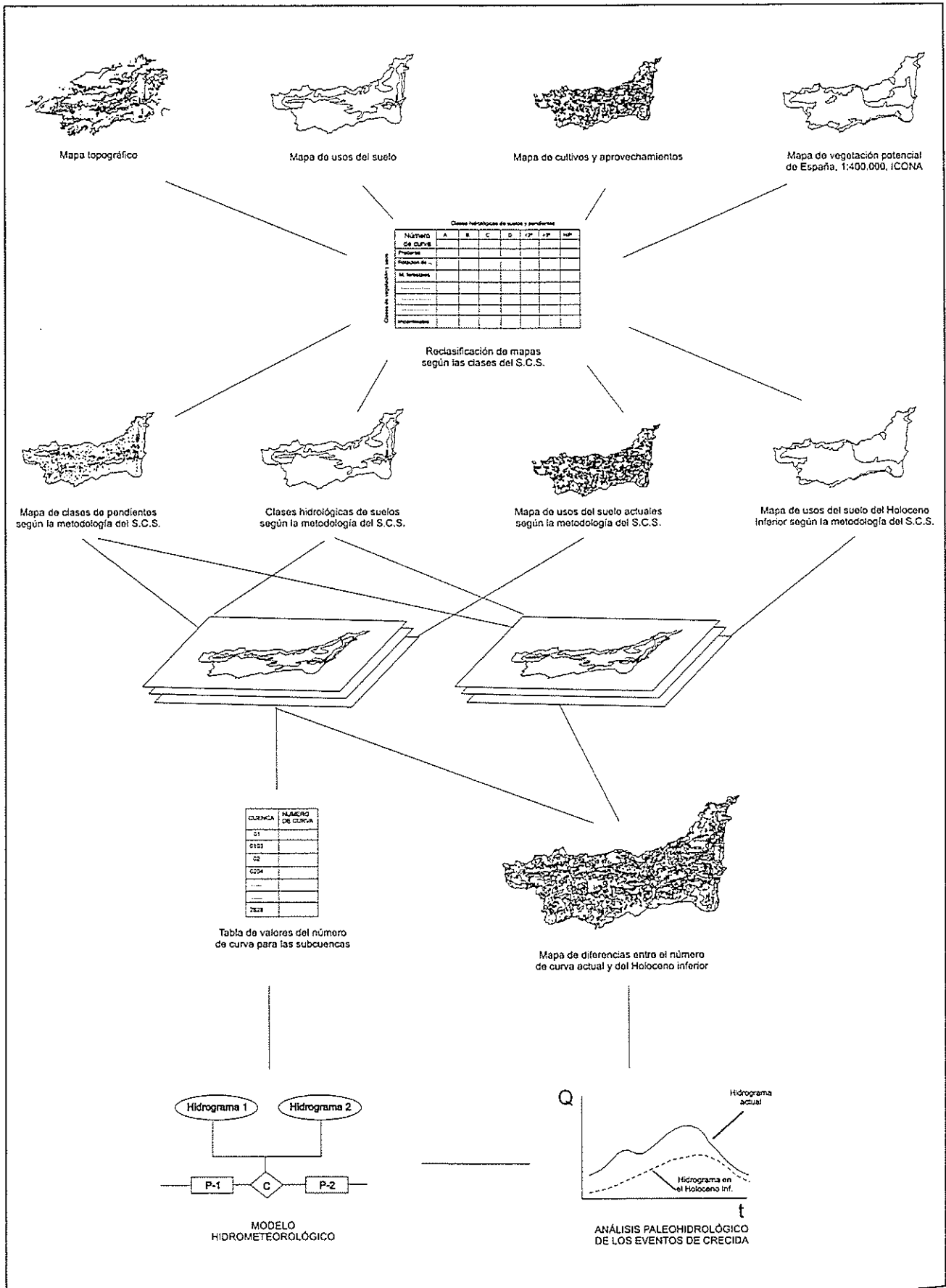


Figura 8. Esquema cartográfico de la simulación de situaciones preoperacionales en la estimación del umbral de escorrentía preantrópico y su hidrograma correspondiente, mediante el empleo de un S.I.G. (Díez, 2001)

ción antecedente, umbral de escorrentía...), necesitan ser agregados espacialmente utilizando la unidad hidrológica por antonomasia, la cuenca hidrográfica.

Para ello son de especial utilidad las funciones de los S.I.G., en especial los algoritmos denominados autómatas celulares (AC; Felicísimo, 1994), ya que permiten delimitar las cuencas hidrográficas de forma automática a partir del MDE (área subsidiaria de un elemento del MDE que actúa como sumidero), y superponer éstas a las cartografías distribuidas de los parámetros meteorológicos para calcular valores medios, máximos, mínimos y los correspondientes estadísticos (varianza, desviación, etc.).

Agregación de flujo

Buena parte de las aplicaciones S.I.G. incorporan funciones que permiten, a partir del MDT, trazar las líneas de concentración de flujo (asimilable a la red de drenaje), así como acumular los valores de los píxeles drenados por cada uno, esto es, agregar los valores del hipotético flujo. Así se puede obtener el caudal máximo potencial (CMP; Felicísimo, 1994), a partir del área subsidiaria de un elemento del MDE (p.e. una celda), la precipitación y la pendiente. Introduciendo un valor umbral de este CMP se puede definir aún con mayor precisión la red de drenaje.

e) Vinculación entre los S.I.G. y los modelos hidrológicos

Debido a la complejidad de los modelos hidrológicos, fundamentalmente los hidrometeorológicos, no es frecuente encontrarlos totalmente integrados en el S.I.G. No obstante, las posibilidades de integración y desarrollo que mejor aprovechan las capa-

ciones de los S.I.G. se dan en los modelos distribuidos.

A lo largo de la década de 1990 se han desarrollado diversos métodos de modelación hidrológica de la propagación de crecidas por la red de drenaje usando hidrograma unitario distribuido o bidimensional basado en un S.I.G. (Maidment, 1993; Muzik, 1996 a y b; Schumann & Funke, 1996; Tung, 1998), algunos de los cuales han obtenido amplia difusión mundial, como TOPMODEL (conectado con GRASS por Chairat y Delleur, 1993) y MIKE-SHE.

Aprovechando las propiedades de conectividad entre los elementos georreferenciados del S.I.G. (teselas, puntos, líneas o polígonos) es posible calcular la velocidad de movimiento del agua entre ellas, obtener un mapa de isocronas y, supuesta una lluvia uniforme en el espacio, generar el hidrograma unitario aplicando modelos distribuidos con pocos parámetros (Francés, 1994; Francés y Benito, 1995).

Martínez (1999) y Martínez *et al.* (2000) emplean un S.I.G. para la modelación hidrometeorológica distribuida de la escorrentía superficial en pequeñas cuencas no aforadas. El modelo fue implementado en el módulo matricial de la aplicación Arc/Info, y aplica las funciones de análisis S.I.G. en: la interpolación areal de datos de lluvia desde elementos puntuales (polígonos de Thiessen e inverso de la distancia al cuadrado); la estimación del número de curva mediante el método del SCS; la estimación de la lluvia neta en cada celda; la concentración de la escorrentía siguiendo los caminos de máxima pendiente (coberturas de direcciones de flujo); el desarrollo de superficies de fricción (coberturas de tiempos de paso) a partir de parámetros morfométricos, meteorológicos (intensidades), modelos de flujo, y coeficientes de rugosidad; y finalmente para obtener el

hidrograma mediante el método de las isocronas. Todo ello programado en rutinas de ARC Macro Language, con un interface de usuario sencillo, constituido por barras de menús y ventanas que facilitan la elección de diversas alternativas metodológicas.

Más común es el desarrollo de aplicaciones, módulos o extensiones de los programas de modelación hidrológica o S.I.G. que permitan una perfecta transferencia de ficheros de entrada y salida entre ellos. Es el caso de la extensión HEC-GeoHMS

(HEC, 2000b), que añadida al software ArcView GIS junto con la extensión Spatial Analyst, permite incorporar al programa HEC-HMS diversas funciones para la obtención de datos de interés hidrológico (parámetros morfométricos y topológicos de la cuenca y red de drenaje) desde la cartografía; posteriormente genera un fichero de entrada a HEC-HMS, donde se corre el modelo hidrológico (Figura 9).

Infinidad de módulos, extensiones, aplicaciones e interfaces semejantes han sido

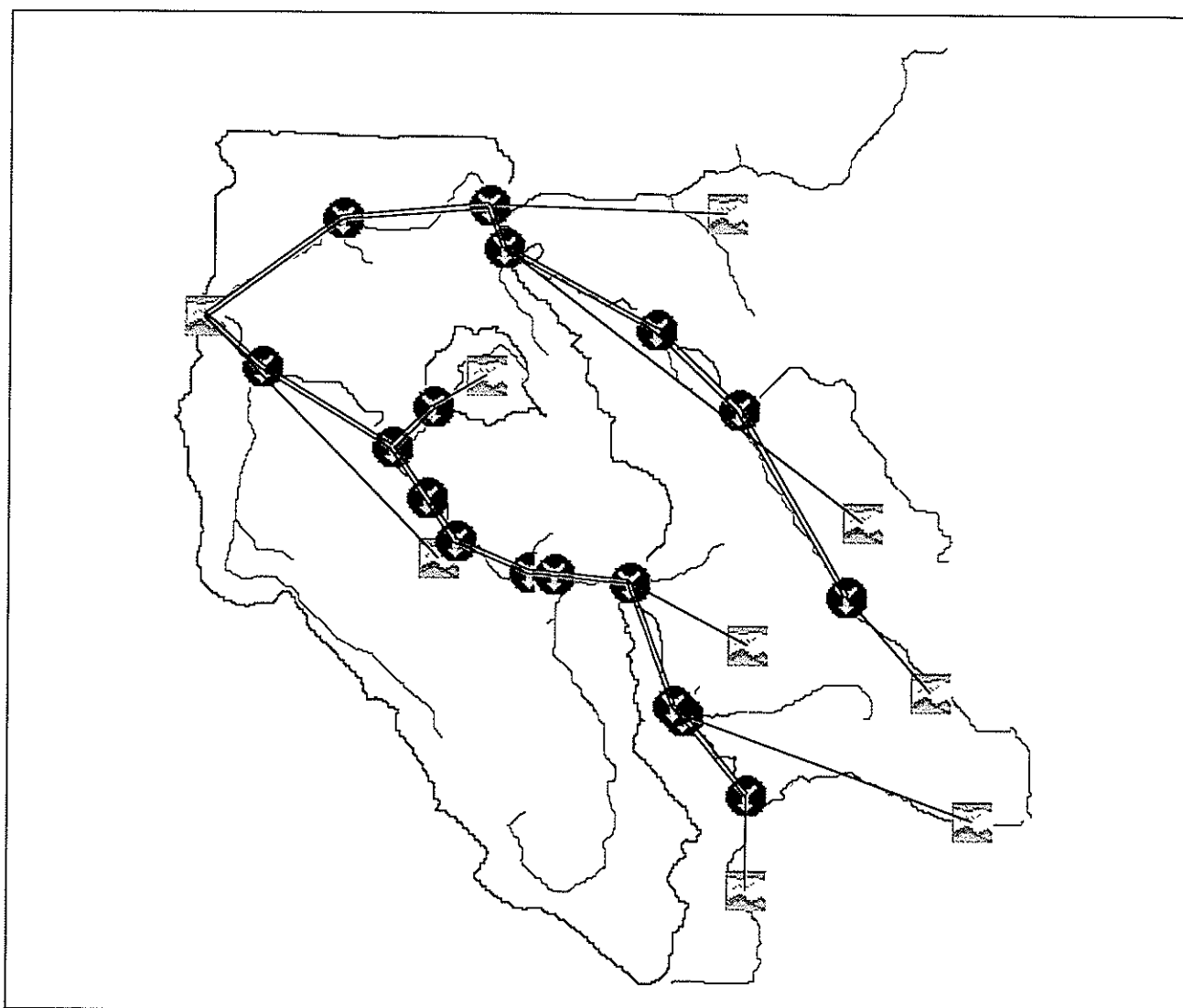


Figura 9. Esquema de un modelo de cuenca realizado mediante la extensión HEC-GeoHMS de ArcView para la modelación hidrológica de caudales de crecida por métodos hidrometeorológicos mediante HEC-HMS. Análisis hidrológico de las crecidas en el entorno de la Ciudad de Segovia. Amablemente cedido por José M. Bodoque

desarrollados a medida tanto por administraciones públicas, universidades e institutos de investigación, como por empresas privadas para su comercialización. Un ejemplo en nuestro país es el paquete informático HEC-SIG (Grupo AYESA, www.ayesa.es), que sirve de interfaz entre las aplicaciones S.I.G. (ArcINFO y ArcView GIS) y el modelo hidrológico HEC-1. Muy difundido está el programa WMS, desarrollado por Scientific Software Group (www.scisoftware.com), y que permite utilizar los MDE (en formato TIN) para delimitar cuencas y subcuencas y calcular los parámetros geométricos útiles en la modelación hidrometeorológica con HEC-1, TR-20, método racional y NFF. Por último, la empresa Genasys realizó en 1994 una integración del modelo HEC-1 con el *software* SIG GenaMap.

2.2. Aplicaciones a la modelación hidráulica

a) Modelación hidráulica empleando S.I.G.

Por su propia naturaleza y estructura espacial, muchos modelos hidráulicos que se utilizan en crecidas fluviales son susceptibles de ser integrados en un S.I.G.; especialmente los modelos bi- y tridimensionales, ya que su compartimentación del espacio se corresponde con la estructura de datos de los S.I.G., ya sea empleando mallas de teselas regulares (modelo de datos matricial) o redes de celdas triangulares irregulares (modelo de datos vectorial, TIN).

Así, no son infrecuentes las aplicaciones desarrolladas para modelar hidráulicamente crecidas con el soporte de un S.I.G. En nuestro país destaca la implementación del modelo hidráulico bidimensional PLANA con el *software* GRASS, de la que

surgió la aplicación GISPLANA (Estrela y Quintas, 1994 y 1996), utilizada con notable éxito en el estudio de la inundabilidad de la ribera del Júcar (CHJ, 2002).

Una conocida aplicación es SMS, pre- y postprocesador gráfico en entorno Windows para modelación hidrodinámica desarrollado por la empresa Scientific Software Group (www.scisoftware.com). Incluye módulos con interfaces para varios modelos hidráulicos bidimensionales (RMA2, SED2D y FESWMS)

Otras veces los modelos hidráulicos únicamente emplean la información geométrica que puede obtenerse en el S.I.G. a partir del MDE. La extensión HEC-GeoRAS (HEC, 2000a) para ArcView GIS, permite mediante su menú PreRAS obtener la geometría de las secciones transversales, el perfil longitudinal, la situación de los bancos de orilla y la distribución del coeficiente de rugosidad n de Manning a partir de coberturas ArcView GIS, principalmente el MDE generado como TIN; el fichero resultante puede importarse como datos de la geometría en la aplicación para modelación hidráulica unidimensional HEC-RAS.

b) Interpolación de parámetros hidráulicos desde elementos discretos

Los resultados de la utilización de los distintos modelos hidráulicos suelen generar parámetros físicos de la corriente durante la crecida (altura de lámina de agua, velocidad de la corriente, altura de energía...) para elementos discretos del territorio: puntos y secciones transversales al canal (modelos unidimensionales), celdas irregulares (modelos bidimensionales) o teselas regulares (modelos bi- o tridimensionales).

Una primera aplicación de los S.I.G. consiste en la interpolación de dichos valores discretos para completar con valores de

esos parámetros todo el canal durante el evento de crecida o avenida modelado.

De esta forma, puede realizarse una simple interpolación de las cotas de lámina de agua alcanzadas en los perfiles transversales (líneas) modelados con HEC-RAS, para obtener un modelo digital del terreno cuya z corresponde a la cota de la lámina de agua durante la crecida (Díez y Sanz, 1997 y 1998; Figura 10).

La extensión HEC-GeoRAS (HEC, 2000a) para ArcView GIS, combinada con Spatial Analyst y 3D Analyst, permite mediante su menú PostRAS interpolar automáticamente las cotas de lámina de agua obtenidas con HEC-RAS para las secciones, obteniendo un MDT de la lámina de agua (WS TIN). Un módulo semejante contiene el paquete informático HEC-SIG (Grupo AYESA, www.ayesa.es), que sirve de interfaz entre las aplicaciones SIG (ArcINFO y ArcView GIS) y el modelo hidráulico (HEC-2).

También interpolar, linealmente (celdas-cauce) o mediante discontinuidad entre niveles (celdas-vertedero), los valores de cota de lámina de agua entre celdas contiguas de un modelo hidráulico bidimensional (GISPLANA), para obtener un mapa más continuo de la altura de la lámina de agua durante la inundación (CHJ, 2002).

Del mismo modo podrían interpolarse otros parámetros hidráulicos, como la velocidad entre los valores calculados por el modelo para las secciones o celdas, pudiéndose obtener un MDT de velocidades de la corriente, o cartografías de isotacas (isovelas). Sin embargo no es frecuente la producción de estos mapas por la complejidad que tiene la interpolación entre valores de velocidad entre secciones o celdas, dado que el flujo durante las crecidas es variable y variado.

De ser posible la obtención del MDT de

velocidad, podría ser utilizado junto con el MDT de calados para la obtención de cartografías de peligrosidad muy útiles en protección civil, como la superposición de ambos en el S.I.G. mediante funciones lógicas y aritméticas que nos permitiesen diferenciar las zonas con calado superior a 0,8 m, velocidades superiores a 1 m/s, o producto entre ambos superior a 0,5 m²/s; estas zonas se consideran de elevada peligrosidad para las personas.

c) Estimación de áreas inundables y calados

De la superposición en el S.I.G. del modelo digital de elevaciones con el MDT de la lámina de agua, empleando funciones lógicas de análisis, se puede obtener qué áreas quedarán anegadas por el agua durante el evento de crecida concreto o asociado a cada período de retorno (Díez y Sanz, 1998). Esta función está implementada automáticamente, entre otras, en la extensión HEC-GeoRAS, cuyo menú PostRAS permite generar una cobertura vectorial del área inundada (*Floodplain Delineation*) que puede ser incorporada en ArcView GIS como una cobertura más (formato *shape*; Figura 11).

Además, aplicando funciones aritméticas (resta MDT-MDE) se pueden calcular las profundidades que se alcanzarán en cada punto del cauce, obteniéndose un nuevo MDT de calados durante la inundación; bien en modalidad matricial (Jones *et al.*, 1998) o vectorial (TIN; CHJ, 2002). Vectorizando en isolíneas este MDT puede obtenerse de forma automática un mapa de isobatas durante la inundación (Díez, 1999).

2.3. Delimitación y caracterización de eventos de inundación acontecidos

Los S.I.G. pueden ser empleados para la

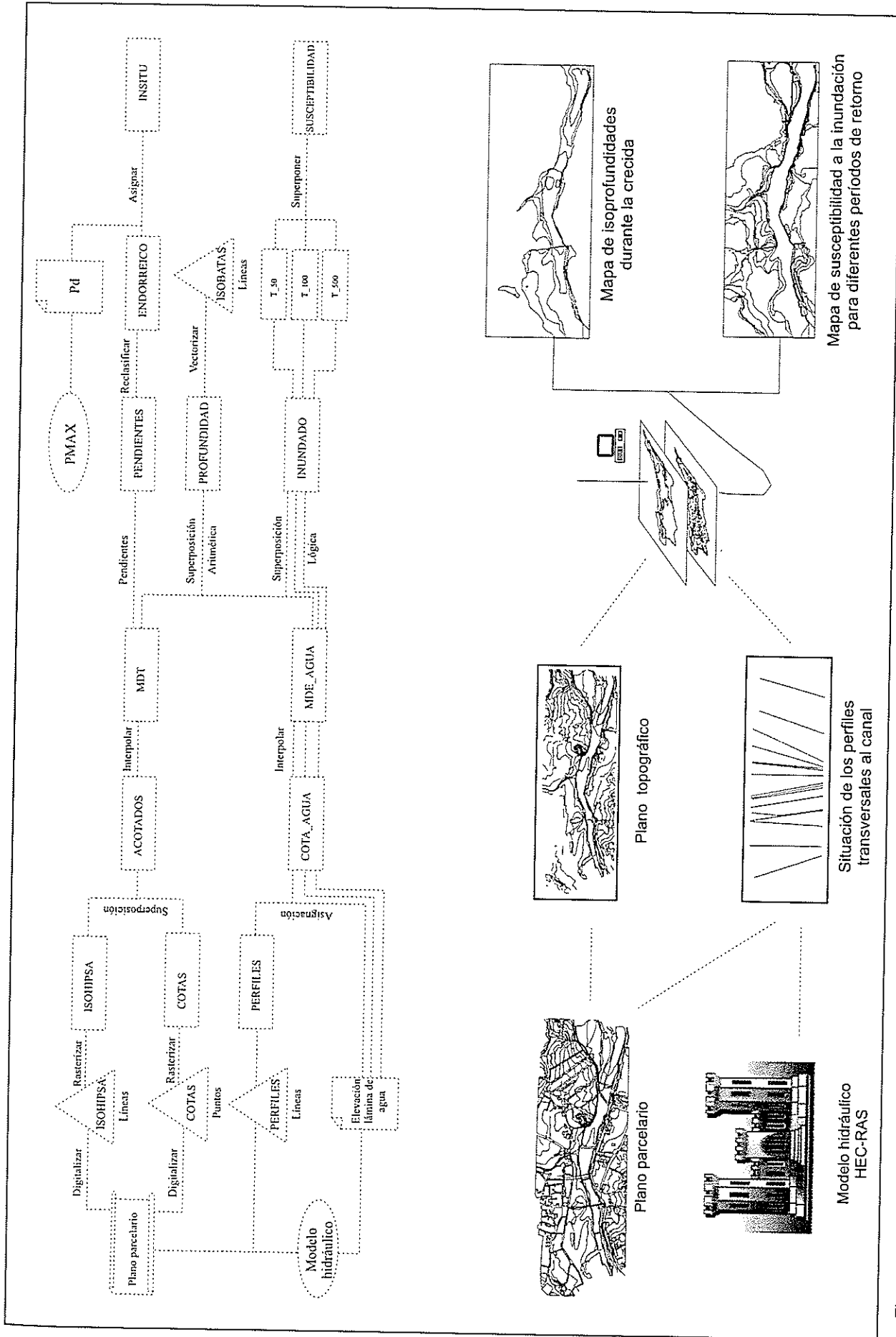


Figura 10. Modelo cartográfico para la estimación de áreas inundables (por precipitación in situ o desbordamiento) y calados (isobatas) y calados (isobatas) y calados (isobatas), mediante un SIG. Esquema cartográfico del modelo. Díez (2001)

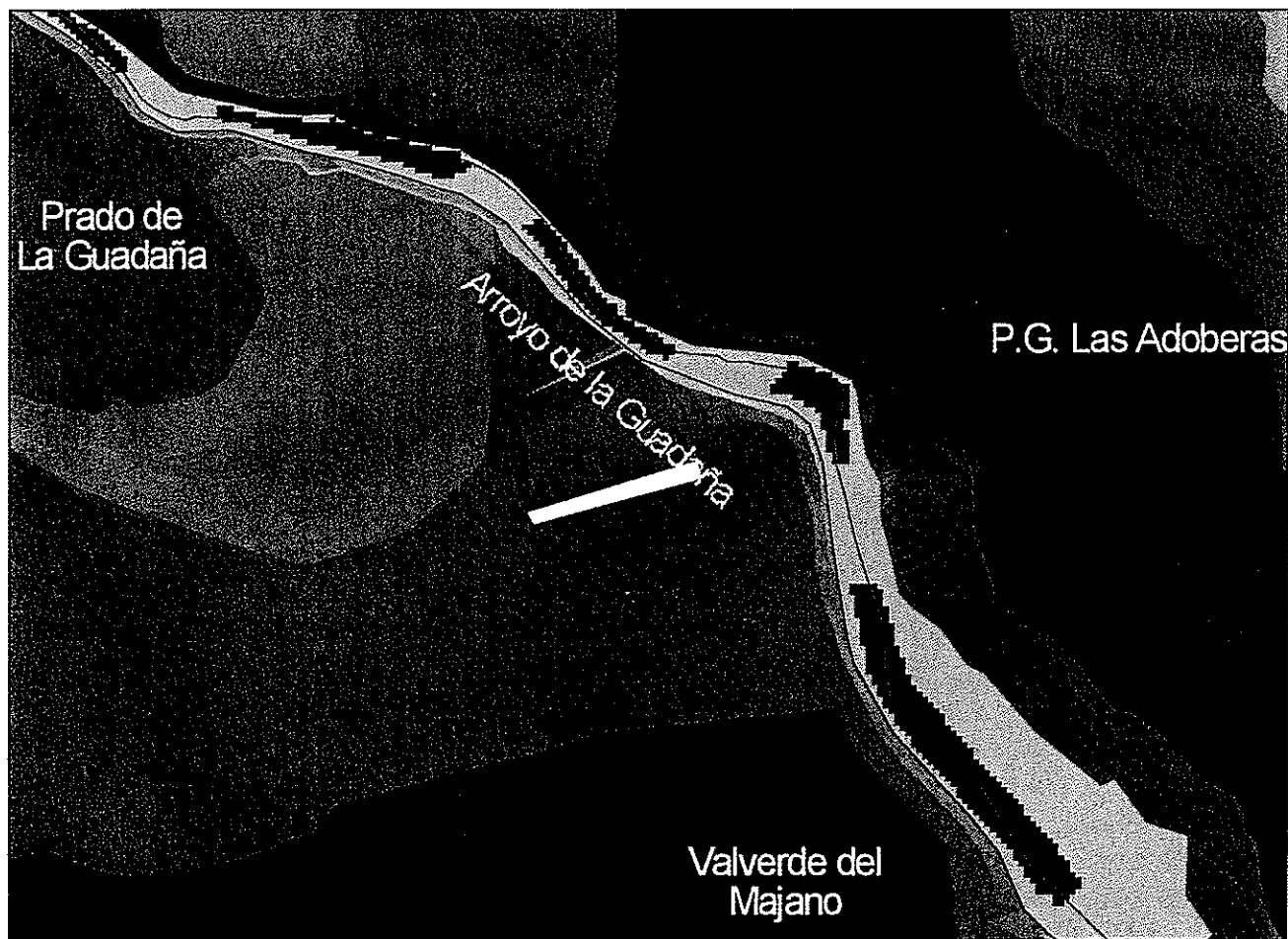


Figura 11. Salida gráfica del área inundable por la crecida correspondiente al caudal de 500 años de período de retorno (polígono azul), en el arroyo de la Guadaña (línea azul oscura), sobre un MDE en modalidad TIN del Prado de la Guadaña (Valverde del Majano, Segovia). Realizado con la extensión HEC-GeoRAS, para la conexión entre el programa de modelación hidráulica HEC-RAS y la aplicación ArcView GIS (ESRI)

obtención de cartografías de áreas inundadas durante eventos pretéritos de inundación, bien recopilando información de campo (marcas de nivel) o mediante información de teledetección (fotografía aérea o plataformas espaciales).

Son frecuentes las cartografías de eventos históricos o recientes de inundación donde se delimita el área anegada a partir de las cotas de marcas de nivel medidas en campo e interpoladas utilizando el MDE.

También se han utilizado los S.I.G. en el

tratamiento de imágenes de satélites espaciales para la delimitación de las áreas inundadas y su evolución temporal, e incluso para la obtención de batimetrías durante la crecida mediante clasificaciones supervisadas. Para ello se utilizan imágenes de satélites con alta resolución espacial (IRS, SPOT, LANDSAT, ERS...) y/o temporal (Meteosat, NOAA...). Es frecuente realizar composiciones en falso color combinando varias bandas para delimitar más correctamente la zona inundada, como RGB 247 de LANDSAT TM (Goniadzki *et al.*, 2002).

3. L
EXI

3.1.
per:

La a
de l
de l:
gan
amb
men
del (C
de b
Haci

El
Nava
topo
y áre
ción
dad
supe
obter
rías
urbar
cialm
perío
los t
(eléc
mobil
por c
expre

Dado
biene
centra
grand
planta
ción g
vivien
un ed
avanz
del a
quien
forma
per.).

3. LOS S.I.G. EN EL ANÁLISIS DE LA EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD

3.1. Aplicaciones a la estimación de las personas y bienes expuestos

La aplicación de los S.I.G. en la estimación de las personas y bienes expuestos parte de la utilización de coberturas que contengan información georreferenciada de ambos elementos en riesgo, fundamentalmente procedente de la base cartográfica del Censo poblacional (INE) y del Catastro de bienes urbanos y rústicos (Ministerio de Hacienda).

El proyecto piloto elaborado en Navaluenga (Ávila) ha utilizado los planos topográficos digitalizados del casco urbano y áreas circundantes, cruzando la información catastral con los mapas de inundabilidad mediante una simple operación de superposición por álgebra de mapas, para obtener las áreas con diferentes categorías de suelo (urbano, no urbanizable, urbanizable...) que serán ocupadas potencialmente por las crecidas con diferente período de retorno. Además, se obtienen los tramos de conducciones de servicio (eléctricas, telefónicas, hídricas, etc.), mobiliario urbano y similares, afectados por cada inundabilidad, que pueden ser expresados de forma tabular (Díez, 1999).

Dado que la exposición de personas y bienes durante las inundaciones se concentra en la planta baja de los edificios (en grandes inundaciones, las dos primeras plantas), es importante contar con información georreferenciada de la disposición de viviendas y comercios en cada planta de un edificio. Algunas administraciones están avanzando al respecto, como es el caso del ayuntamiento de Alcorcón (Madrid), quien tiene la información disponible en formato Microstation (F.J. Ayala, com. per.). También es importante distinguir,

mediante coberteras S.I.G. diferentes, la valoración económica del continente (edificio) y el contenido; este último tiene relación con la actividad económica (en las plantas bajas suelen ubicarse preferentemente comercios e industrias) y el nivel de renta.

3.2. Aplicaciones a la estimación de la vulnerabilidad

La fragilidad intrínseca de los elementos en riesgo puede incorporarse mediante una cartografía complementaria a la de situación de personas y bienes, en la que mediante reclasificación S.I.G. se asigne a cada elemento una vulnerabilidad entre 0 (nada vulnerable, no sufrirá daño alguno) y 1 (daño completo, muerte o destrucción del elemento); también puede expresarse en porcentaje de pérdida de valor o integridad que sufrirá. Como los elementos en riesgo son discretos (polígonos, líneas, puntos o zonas de píxeles), el mapa de vulnerabilidad no puede interpolar los valores para obtener un modelo digital continuo, aunque sí expresarse mediante isolíneas de valor.

Otra forma cualitativa de expresar la vulnerabilidad de los elementos es categorizando el daño en nulo, moderado y severo, e incorporando estas clases al inventario de elementos en riesgo, como se realizó para la localidad abulense de Navaluenga mediante la tipología de los textos en las tablas del inventario (Díez, 1999).

4. LOS S.I.G. EN EL ANÁLISIS INTEGRADO DEL RIESGO

En principio, la obtención de mapas de riesgo de inundación sería tan sencilla en un S.I.G. como la aplicación de operaciones de álgebra de mapas a partir de los mapas de peligrosidad, exposición y vulne-

rabilidad. En concreto, atendiendo a la clásica ecuación del riesgo ($R = P \times E \times V$), bastaría con multiplicar las tres coberturas correspondientes a las variables. La peligrosidad actuaría como capa booleana (1/0) adimensional, únicamente para determinar las áreas inundables; la vulnerabilidad, también de forma adimensional, sería una variable continua (0,1); la exposición tendría unidades de personas en la evaluación del riesgo social, y monetaria (euros) en el riesgo económico.

Sin embargo, la integración es mucho más compleja en la práctica, puesto que surgen problemas con la elevada variabilidad espacio-temporal de los elementos en riesgo, fundamentalmente las personas, con lo que un adecuado mapa de riesgo social requeriría una actualización continua de, al menos, la cobertura correspondiente a la exposición. Menos variable, aunque difícilmente evaluable económicamente, es la exposición económica (bienes materiales). Estas circunstancias han hecho que, hasta el momento, no se haya elaborado en nuestro país ni un solo mapa de riesgo de inundación en el sentido estricto del término. Bajo la denominación de mapas de riesgo de inundaciones en realidad suelen mostrarse mapas de peligrosidad (inundabilidad) más o menos complejos, elaborados o calibrados, pero rara vez reflejan o incorporan parámetros de exposición o vulnerabilidad, y prácticamente nunca se expresan en las unidades propias del riesgo: personas y costes.

Así pues, en el análisis del riesgo de inundación de forma integrada únicamente hemos de destacar la utilidad de los S.I.G. en dos aspectos tangenciales: la gestión de bases de datos de inundaciones, y el empleo como herramientas para la producción y edición de cartografía digital (fundamentalmente mapas de peligrosidad)

4.1. Aplicaciones en la gestión de bases de datos inundaciones

La disponibilidad de valores hidrológicos y/o hidráulicos de avenidas registradas en el pasado, tanto de forma sistemática (instrumental) como no sistemáticas (inundaciones históricas y geológicas), presenta un notable interés en los estudios de frecuencia y magnitud de caudales de crecida.

El registro sistemático de parámetros hidrológicos está recogido en nuestro país en la base de datos georreferenciada HIDRO gestionada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Quintas, 1994 y 1996). Contiene campos de alto interés en hidrología de crecidas, como las tablas AFLIQ (niveles y caudales de aforos diarios) e HIDROGR (hidrogramas en estaciones de aforo).

Para el caso de las paleoinundaciones, fundamentalmente del período histórico, se han desarrollado y aún siguen implementándose varias aplicaciones de bases de datos soportadas por un S.I.G.: HISTORIC del proyecto Paleotagus, para la Cuenca del Tajo, soportada por ArcView GIS (Díez-Herrero *et al.*, 1998); Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas, desarrollado por la D.G. de Protección Civil; e HISTO y PALEO, asociadas al proyecto europeo SPHERE.

4.2. Los S.I.G. como herramientas para la producción de cartografía digital sobre riesgo de inundaciones

Como se ha discutido anteriormente, la mayor parte de la producción cartográfica, realizada o no con herramientas S.I.G., bajo el título de mapas de riesgo de inundaciones, corresponden realmente a mapas de peligrosidad. El S.I.G. mejora sustancialmente la precisión y corrección

cartográfica en la representación de las áreas peligrosas; permite incorporar al mapa información adicional (bases cartográficas o fotográficas, leyendas, esquemas metodológicos, gráficos, fotografías, tablas, textos, etc.), tanto impresa como en formato digital mediante consultas y búsquedas directas utilizando los equipos informáticos; y facilita la edición y distribución de la cartografía resultante, abaratando costes de reproducción impresa y permitiendo ponerla a disposición de un mayor número de usuarios (en Internet, por ejemplo). Adicionalmente, facilita y abarata los costes de la necesaria actualización de los mapas, producida por la lógica variación temporal de los datos de entrada al modelo (precipitación, cubierta vegetal...) o de las metodologías de estimación.

En cuanto a la producción de cartografía de peligrosidad de inundaciones mediante herramientas S.I.G. en nuestro país, únicamente cabe destacar iniciativas puntuales y dispersas de algunos organismos, normalmente administraciones públicas: Instituto Geológico y Minero de España (MCYT), Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX), Servicio de Medio Ambiente de la Diputación de Valencia, confederaciones hidrográficas (CHJ, 2002)... También en las universidades, centros de investigación y empresas privadas se están utilizando estas técnicas en la producción de cartografía digital sobre el riesgo de inundación, destacando el material editado por: JPF Consultors, Arnáiz Consultores, EPTISA...

5. LOS S.I.G. EN LAS MEDIDAS PALIATIVAS DEL RIESGO DE INUNDACIONES

5.1. Aplicaciones en medidas predictivas

Los S.I.G. tienen un enorme campo de desarrollo en la implementación de las téc-

nicas predictivas del riesgo de inundación, tanto en predicción meteorológica como hidrológica.

En la predicción meteorológica cabe destacar las posibilidades de integración de los modelos predictivos meteorológicos sobre S.I.G., al igual que se viene haciendo en las últimas décadas con modelos climáticos. También en el tratamiento y análisis de imágenes procedentes de teledetección terrestre, como el rádar meteorológico, permitiendo utilizar estas imágenes en formato matricial para observar patrones de desplazamiento de núcleos convectivos (Díez, 2001) y convertir sus unidades de ruido (dBz) en intensidades instantáneas de precipitación (Figura 12).

En la predicción hidrológica, desde hace años se vienen utilizando los S.I.G. en captura, almacenamiento y análisis de la información procedente de los sistemas de información hidrológica en tiempo real. Concretamente, en nuestro país, el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), ha incorporado los S.I.G. en la modelación hidrometeorológica de eventos de crecida (ver apartado 2.1 e).

5.2. Aplicaciones en medidas preventivas

La aplicación de los S.I.G. en las medidas preventivas podría ser objeto, por sí sola, de otro trabajo monográfico. La integración de la cartografía de riesgo o peligrosidad para la ordenación de áreas inundables, su utilidad en protección civil o su empleo para la implantación adecuada de sistemas de aseguramiento, son algunos de los campos donde los S.I.G. están teniendo notable aplicación.

A modo de ejemplo, los S.I.G. están siendo utilizados en la elaboración del Plan de Ámbito Local de Protección Civil ante el

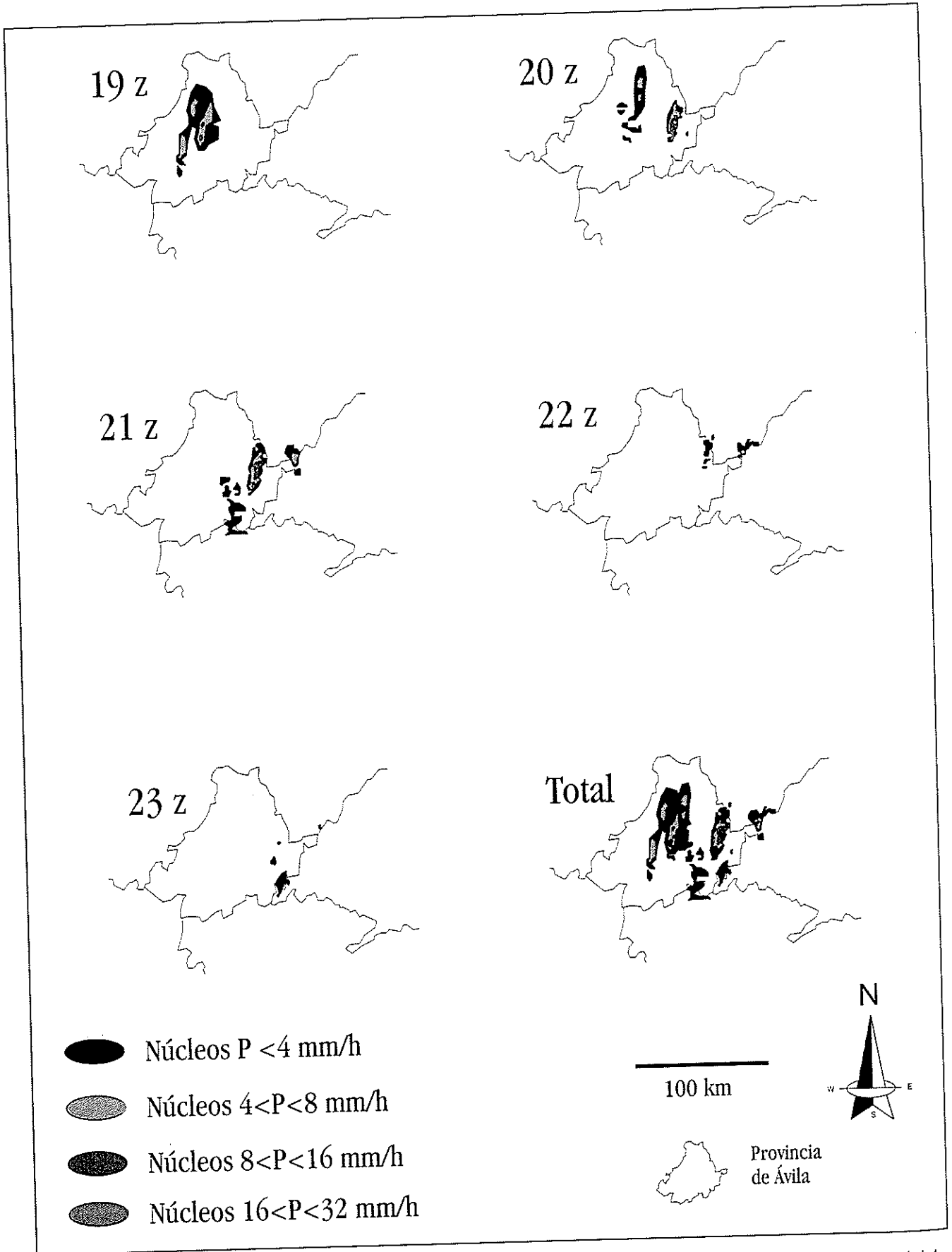


Figura 12. Secuencia evolutiva del núcleo convectivo de La Cañada (Ávila, Castilla y León) en la tarde del 1 de septiembre de 1999, a partir del análisis de las imágenes del radar meteorológico empleando un SIG en modalidad matricial (Díez, 2001)

riesgo de inundaciones que se viene elaborando con carácter piloto en el municipio de Navalunga (Díez y Sanz, 1997; Díez, 1999). El S.I.G. se empleará en: la optimización de los medios de Protección Civil, al permitir detectar la situación de las áreas más peligrosas, expuestas y vulnerables; y el trazado automático en tiempo real de las rutas óptimas de evacuación y/o rescate, considerando los obstáculos y problemas intrínsecos a la inundación (calado y velocidad de la corriente en cada vía de comunicación).

5.3. Aplicaciones en medidas correctoras

Las aplicaciones de los S.I.G. en la recuperación de la normalidad en áreas siniestradas por inundaciones pasa por la gestión de la información del desastre, tanto para su posterior análisis científico y causal, como para la optimización en el reparto de ayudas, indemnizaciones o priorización de actuaciones correctoras de los daños.

De ahí que sea muy importante la elaboración de bases de datos georreferenciadas de la secuela de un desastre. Consiste en introducir en el S.I.G. toda la cartografía generada y las bases de datos asociadas a los elementos geográficos reflejados en ella. Se han utilizado recientemente los S.I.G. para recopilar y almacenar la información generada a raíz de las inundaciones por precipitaciones intensas en el entorno de Santa Cruz de Tenerife (Islas Canarias).

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CEDEX (1994). Modelos hidrológicos de previsión de avenidas. Aplicación en cuencas experimentales. Informe Parcial nº 3. *Caracterización geomorfológica de la*

cuenca alta del río Palancia. Utilización de teledetección y de los Sistemas de Información Geográfica. CEDEX, Madrid (inédito).

Chairat, S. and Delleur, J.W. (1993). Integrating a physically based hydrological model with GRASS. In K. Kovar and H.P. Nachtnebel, *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Management*, IAHS publication, nº 211.

CHJ (2002). *Cartografía de riesgo de inundación en la ribera del Júcar.* CEDEX (Ministerio de Fomento) y Confederación Hidrográfica del Júcar (Ministerio de Medio Ambiente). CD-ROM.

DGC (1996). *Mapa para el cálculo de máximas precipitaciones diarias en la España peninsular*, escala 1:1.000.000. Dirección General de Carreteras, S.E. de Infraestructuras y Transportes, Ministerio de Fomento.

DGC (1999). *Máximas luvias diarias en la España peninsular.* Serie monografías. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, Madrid, 28 págs. + 25 mapas + CD-ROM.

Díez, A. (1999): Utilización de los SIGs en el análisis del riesgo de inundación en el Alto Alberche (Cuenca del Tajo). En: L. Laín Huerta (Ed.), *Los Sistemas de Información Geográfica en los Riesgos Naturales y en el Medio Ambiente*, Capítulo 3, pp. 47-68, ITGE (Ministerio de Medio Ambiente), Madrid.

Díez, A. (2001): *Geomorfología e Hidrología Fluvial del río Alberche. Modelos y S.I.G. para la gestión de riberas.* Tesis Doctoral. Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de

Madrid (en edición), Madrid, 584 págs.+Anexo (CD-R).

Díez, A. y Pedraza, J. (1997): Cálculo hidrometeorológico de caudales de avenida para la subcuenca de El Burguillo (río Alberche, Cuenca del Tajo). *Geogaceta*, 21, 93-96.

Díez, A. y Sanz, M.A. (1997): Análisis de riesgo de inundaciones en Navaluenga (Ávila): uso combinado de modelos y sistemas de información geográfica. *Actas del 1er Seminario Iberoamericano sobre Nuevas Tecnologías y Gestión de Catástrofes*. D.G. de Protección Civil, Madrid, pag. var.

Díez, A. y Sanz, M.A. (1998): Análisis de la inundabilidad de Navaluenga (Ávila, Castilla y León). En: A. Gómez y F. Salvador (Eds.), *Investigaciones recientes de la Geomorfología española*, 593-602, SEG y Universitat de Barcelona, Barcelona.

Díez-Herrero, A.; Benito, G. & Laín-Huerta, L. (1998): Regional Palaeoflood Databases Applied to Flood Hazards and Palaeoclimate Analysis. In: G. Benito, V.R. Baker & K.J. Gregory (Eds.). *Palaeohydrology and Environmental Change*. Chapter 24, pp. 335-347, John Wiley & Sons Ltd., Chichester (England).

Estrela, T. (1994). Los SIG en Hidrología. En: T. Estrela y L. Quintas (Eds.), *Curso sobre utilización de los Sistemas de Información Geográfica en Hidrología*, CEDEX, MOPTMA, Madrid, pag. var.

Estrela, T. y Quintas, L. (1994). Modelización de flujos en llanuras de inundación. El modelo GISPLANA. En: CEDEX (Ed.), *Curso sobre utilización de los SIG en Hidrología*, Escuela de Formación Técnica, Madrid, pag. var.

Estrela, T. y Quintas, L. (1996): El modelo de flujo bidimensional GISPLANA. *Ingeniería Civil*, 104, 13-21.

Felicísimo, A.M. (1994): *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Pentalfa Ediciones, Oviedo, 222 págs. Edición en Internet, página web <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/>

Ferrer, J. (1992). *Análisis estadístico de caudales de avenida*. Monografías M-26. Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX, MOPT), Madrid, 42 págs.

Ferrer, F.J. (1993). *Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas*. Monografías M-37. Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX, MOPT-MA), Madrid, 76 págs.

Ferrer, J. (1996). Métodos de regionalización. En: CEDEX. *Curso sobre métodos para el cálculo hidrológico de crecidas*. CEDEX, UPV Y TA&MU, Madrid, pag. var.

Ferrer, M.; Rodríguez, J. y Estrela, T. (1995). Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica. *Ingeniería del Agua*, vol. 2 (4), 43-58.

Francés, F. (1994). Uso de los S.I.G. en la generación de hidrogramas de avenida. En: T. Estrela y L. Quintas (Eds.), *Curso sobre utilización de los Sistemas de Información Geográfica en Hidrología*, CEDEX, MOPTMA, Madrid, pag. var.

Francés, F. y Benito, J. (1995). La modelación distribuida con pocos parámetros de las crecidas. *Ingeniería del Agua*, 2(4), 7-24.

Goniadzki, D.; Soldano, A. y Almeida, G. (2002). Impacto hídrico urbano: cuenca del río Salado. Localidad General Belgrano

- (Argentina). CONAE e INA. Página web <http://www.conae.gov.ar/emergencia>
- Hay, L.E.; Battaglin, W.A. y Leavesley, G.H. (1993). Application of GIS in modelling winter orographic precipitation, Gunnison River Basin, Colorado, USA. *International Conference on application of GIS in Hydrology and Water Resources Management Management*, Vienna.
- HEC (2000a). *HEC-GeoRAS Versión 3.0 for ArcView*. Hydrologic Engineering Center, Davis (CA).
- HEC (2000b). *HEC-GeoHMS. The Geospatial Hydrologic Modeling Extensión*. Ver. 1.0. Hydrologic Engineering Center, Davis (CA).
- INM (2001). *Las precipitaciones máximas en 24 horas y sus períodos de retorno en España. Un estudio por regiones. Volumen 12, Castilla y León*. Serie Monografías. D.G. del INM (Ministerio de Medio Ambiente), Madrid, 552 págs.+mapas.
- Jones, J.L.; Haluska, T.L.; Williamson, A.K. and Erwin, M.L. (1998). *Updating flood maps efficiently – Building on existing hydraulic information and modern elevation data with a GIS*. U.S. Geological Survey Open-File Report 98-200, from URL <http://wa.water.usgs.gov/reports/floodgis/>, accessed May 22, 1998, HTML format.
- Maidment, D.R. (1993). Developing a spatially distributed unit hydrograph by using SIG. *Hydrologis: Application of GIS in Hydrology and Water Resources Management*. Proceed. Vienna Conference. April 1993. IAHS Publ. 211, pp. 181-192.
- Martínez, V. (1999). Simulación y comprobación experimental de la escorrentía superficial en pequeñas cuencas no aforadas mediante modelos distribuidos implementados sobre S.I.G. *Tesis Doctoral*, Dpto. de Construcción y Vías Rurales, UPM.
- Martínez, V.; Dal-Ré, R.; García, A.I.; y Ayuga, F. (2000). Modelación distribuida de la escorrentía superficial en pequeñas cuencas mediante S.I.G. Evaluación experimental. *Ingeniería Civil*, 117, 49-58.
- Menéndez, M.; Ferrer, J. y Ardiles, L. (1996). GISPLU y MAXPLU: Obtención de máximas precipitaciones diarias en la España Peninsular. *Ingeniería Civil*, 104, 141-146.
- Muzik, A. (1996a). GIS-derived distributed unit hydrograph. En K. Kovar & H.P. Nachthebel, *HydroGIS'96, Viena*, IAHS Publ. No. 235, pp. 453-460.
- Muzik, A. (1996b). Flood modelling with GIS derived distributed unit hydrographs. *Hydrological Processes*, 10, 1401-1409.
- Quintas, L. (1994). Bases de datos hidrológicos. En CEDEX. *Curso sobre utilización de los sistemas de información geográfica en Hidrología*. Escuela de Formación Técnica, CEDEX, MOPTMA, Madrid, pag. var.
- Quintas, L. (1996). La base de datos HIDRO del CEDEX. *Ingeniería Civil*, 104, 117-126.
- Rodríguez, D. y Pantojo, I. (2001). Tratamiento informático de cuencas para la obtención del hidrograma instantáneo geomorfológico. <http://diana.cps.unizar.es/aeipro/HA-13.html>
- Ruiz, J.M. (1994). Modelización fisiográfica y climática con los S.I.G. En: T. Estrela y L. Quintas (Eds.), *Curso sobre utilización de los Sistemas de Información Geográfica en Hidrología*, CEDEX, MOPTMA, Madrid, pag. var.

Schumann, A.H. & Funke, R. (1996). GIS-based components for rainfall runoff models. En K. Kovar & H.P. Nachthebel, *HydroGIS'96, Viena*, IAHS Publ. No. 235, pp. 447-484.

Tung, K. (1988). Generating design hydrographs by DEM assisted geomorphic runoff simulation: a case study. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(2), 375-383.