

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DELIMITACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES Y LA ESTIMACIÓN DE USOS AFECTADOS EN SISTEMAS DE DRENAJE EFÍMERO

*Carmelo Conesa García y Yolanda Álvarez Rogel
Universidad de Murcia*

RESUMEN

Tras una detallada revisión de los métodos existentes en relación con el análisis y cartografía de riesgos de inundación, se muestra en el presente trabajo una metodología, basada en criterios hidrológicos e hidráulicos, que permite delimitar áreas inundables bajo diferentes condiciones de corriente, tanto en situaciones históricas como simuladas, aplicables a cauces efímeros (ramblas y ríos-rambla). A partir de un MDE de detalle, datos de campo (medidas de geometría hidráulica, rugosidad, parámetros dinámicos del flujo, etc.), tecnología SIG e implementación de programas en Qbasic, se consigue información sobre los puntos críticos de desbordamiento, la dirección y tiempo de recorrido de las aguas durante el proceso de laminación, las zonas y usos del suelo afectados y los sectores más proclives a la inundación. Este modelo se ha aplicado a uno de los sistemas fluvio-torrenciales más activos de la Cuenca del Segura: el sistema de ramblas Nogalte-Vilerda, Valle Alto del Guadalentín, obteniéndose hasta el momento buenos resultados.

Palabras clave: Peligro de inundación, alturas de la corriente, cauces efímeros, SIG, parámetros hidráulicos, usos del suelo.

ABSTRACT

Next to a detailed revision about the existent methods in conection with analysis and cartography of flood risks, this papers shows a methodology that is based on hydrology and hydraulics parameters, which allows to delimit flood areas under different conditions, both historical and simulates events, in ephemeral channels ('ramblas' and 'rivers-ramblas'). From a DEM, fields dates (hydraulics geometry, roughness, dinamic parameters of flow, etc.) GIS tecnology and Qbasic programs, it's possible to obtain information about critics overflow points, time and water

direction in lamination, areas and landuses affected by damages and prone to floods. This model has been applied to one of the more active fluvio-torrential system in Segura Basin: Nogalte-Vilerda system, 'Guadalentin High Valley', with good results.

Key words: Flood risk, flow level, ephemeral channels, GIS, hydraulics parameters, landuses.

INTRODUCCIÓN

La investigación actual en hidrología e hidráulica cuenta con una sólida base conceptual asentada desde principios del siglo XIX, hecho que ha permitido la rápida incorporación de nuevas técnicas de procesamiento y análisis de la información. La Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica ha contribuido a acelerar los procesos de análisis, desarrollar modelos espaciales más complejos y ejecutar con mayor precisión y ahorro de tiempo los métodos convencionales. El problema que se plantea en el presente artículo, la delimitación de áreas inundables, ha sido objeto de atención en numerosos estudios, existiendo una amplia variedad de metodologías basadas en teorías hidrológicas o modelos estrictamente hidráulicos. La modelización en sistemas de drenaje efímero, propios de medios áridos y semiáridos, requiere considerar ambas concepciones. Sin embargo, la falta de información hidrometeorológica en determinadas zonas obliga a escoger la modelización hidráulica, apoyada en datos experimentales de campo (radio hidráulico de la corriente de avenida, pendiente longitudinal del lecho y pendiente motriz del agua, coeficiente de rugosidad,...). Ésta ha sido la opción aquí adoptada: la determinación de puntos críticos de desbordamiento, a partir de parámetros hidráulicos referidos al cauce principal y llano de inundación, y la definición de áreas con peligro de inundación, según las trayectorias de laminación preferentes estimadas con ayuda de un modelo digital de elevaciones.

El análisis de alturas referenciadas al talweg y la parametrización hidrológica en relación con las características geométricas del cauce han sido realizados a través de IDRISI, Ver.32, sistema de información geográfica y de procesamiento de imágenes desarrollado por el *Graduate School of Geography, Clark University*. La cartografía de áreas potenciales de inundación, así obtenida, reviste gran interés para determinar los usos del suelo anegados según el nivel de las aguas de avenida y valorar la importancia de cada suceso en términos económicos y sociales, pudiendo constituir un aspecto de especial relevancia para la planificación territorial.

ESTUDIOS SOBRE ZONIFICACIÓN DEL PELIGRO DE INUNDACIÓN, ESTADO DE LA CUESTIÓN

En cualquier programa de previsión y control de los peligros de inundación los estudios convencionales de detalle resultan demasiado costosos, por lo que recurrir a la automatización del proceso de identificación de áreas inundables mediante Teledetección y SIG puede ser especialmente útil. A partir de un MDE se obtiene información morfológica relevante de la cuenca que puede conjugarse con la de otras

coberturas (hidrología, hidráulica, vegetación, usos del suelo, etc.), de particular interés para analizar su capacidad de interrelación e influencia en los procesos de riesgo de inundación. La resolución del MDE y, por tanto, la definición de las áreas potencialmente inundables depende de los mapas topográficos convencionales y de las imágenes de satélite empleadas, de manera que no siempre es posible obtener buenas delimitaciones, como sería deseable, para determinadas aplicaciones (POU, Seguros, etc.).

El uso de sistemas de detección remota en el seguimiento de inundaciones está aún escasamente explotado. Los usuarios potenciales no están familiarizados con los procedimientos para obtener datos de satélite, procesar e interpretar las imágenes. La Agencia Espacial Europea (ESA) dispone de dos satélites (ERS1 y ERS2), dotados de un radar de apertura sintética (SAR), que pueden suministrar información independientemente de las condiciones climáticas y de iluminación de la zona. Sin embargo, para mostrar con mayor facilidad las áreas inundadas suele aplicarse la técnica multitemporal, que utiliza el blanco y negro de las imágenes de radar de una misma área, tomadas en diferentes fechas, y les asigna los colores rojo, verde o azul. El resultado de una imagen multitemporal revela claramente el cambio en la superficie de la Tierra por la presencia del color que la representa (el tono y la intensidad del color indican la fecha y el grado del cambio respectivamente).

Los mapas de inundaciones y peligros de inundación han sido comúnmente elaborados con datos de aeronaves y satélites, sobre todo relativos a las bandas visible e infrarroja (DEUTSCH, 1974). Con menor frecuencia se utilizan los datos de infrarrojo térmico para cartografiar áreas inundables (WIESNER *et al.*, 1974 y BERG *et al.*, 1981). También es corriente el empleo de fotografías aéreas digitalizadas, en color infrarrojo, para clasificar la vegetación propia de estas áreas (HARKER y ROUSE, 1977), y, en ocasiones, resulta especialmente útil combinar los datos digitales Landsat con los datos digitales de elevación para establecer relaciones etapa-área de las zonas inundables.

La selección de datos es un requerimiento crítico, pero generalmente subestimado, para el uso efectivo de imágenes de satélite en las evaluaciones del peligro de inundación. Entre los sistemas de sensoramiento y satélites más recurridos en este sentido se encuentran el TM en el Landsat 4 y 5 y el HRV en el Spot. En concreto, la información Landsat 5TM ha tenido y sigue mostrando gran aplicabilidad en el análisis cualitativo y cuantitativo de la cobertura hídrica y de los usos del suelo (grado de impermeabilidad), realizado para la calibración de modelos hidrológicos. Puede citarse, en este caso, la metodología adoptada por GIRAUT (1992) para determinar la evolución de la cubierta hídrica superficial en sucesos de inundación, o por GIRAUT *et al.* (1998) en su estudio de inundaciones recientes en el Noreste de la República Argentina.

Por su parte, la tecnología SIG (Sistemas de Información Geográfica), debido a su gran capacidad de integración, análisis y gestión de la información espacial, está jugando un papel cada vez más importante en todos los ámbitos de planificación territorial (HORCAJADA *et al.*, 2000; CONESA GARCÍA, 2003). La delimitación de zonas con probabilidad de inundación y de riesgos asociados es uno de los objetivos prioritarios en los actuales Planes de Ordenación del Territorio, lo que, unido a las múltiples posibilidades que brindan los SIGs en la modelización hidrológica, han convertido esta herramienta de análisis en un instrumento de eficacia ampliamente reconocida en los medios científicos y políticos.

Para estimar los niveles de inundación de una avenida correspondiente a determinados períodos de retorno se realizan normalmente dos tipos de análisis: 1) hidrológicos, basados principalmente en la construcción de hidrogramas de avenidas con distintos períodos de retorno; 2) hidráulicos (parámetros dinámicos como la velocidad y la energía de la corriente, geometría hidráulica, rugosidad, etc.), relacionados con el régimen hidrológico, el modelo del terreno (incluidos los obstáculos existentes, como vías de comunicación, conducciones de riego,...) y los usos del suelo.

El primer tipo de análisis es abordado desde ópticas muy diferentes, mediante *modelos empíricos*, basados en relaciones estadísticas entre las entradas y las salidas (CONESA GARCÍA y ALONSO SARRÍA, 1997), *modelos conceptuales*, que relacionan un número reducido de componentes del sistema, a través de parámetros calibrados con datos reales ('hidrograma unitario' de SHERMAN, 1932; 'hidrograma unitario instantáneo' -IUH- de NASH, 1960; 'hidrograma unitario instantáneo geomorfológico' -HUIG-, de RODRÍGUEZ-ITURBE y VALDÉS, 1979, modificado por ROSSO, 1984), y *modelos distribuidos o de base física*, que consideran la cuenca como un sistema distribuido y variable respecto al tiempo y al espacio, representando los procesos hidrológicos mediante ecuaciones diferenciales o métodos empíricos que incluyen parámetros de tipo físico.

El análisis hidráulico se fundamenta, en cambio, en la consideración de parámetros intrínsecos a la corriente, condicionados por factores medioambientales del sistema fluvial, de manera que tiene una aplicabilidad directa a los estudios y diseños de infraestructuras hidráulicas.

Recientemente se han realizado numerosos estudios sobre los rasgos hidrológicos de distintas superficies de terreno a partir de modelos digitales de elevación. Unas de las rutinas más conocidas en este sentido son las desarrolladas por Sue Jenson en el U.S. Geological Survey (JENSON y DOMINGUE, 1988; JENSON, 1991). Se trata de rutinas basadas en un modelo "por-píxel", en el que el agua localizada en un píxel fluye hacia el más bajo de los ocho píxeles adyacentes (cuatro en los ejes de coordenadas y cuatro en los diagonales). Siguiendo la trayectoria del movimiento simulado del agua, de píxel a píxel, se trazan los accesos hipotéticos de la corriente; a partir de ellos, pueden establecerse los límites del área de drenaje. Esta aproximación es útil para estudiar superficies vertientes en áreas rurales, pero, en cambio, tiene una utilidad muy limitada en zonas urbanas, en la que la interposición de edificios y calles impiden la trayectoria recta en dirección aguas abajo, tal como requiere la aplicación de dicho modelo. La orden WATRSBED de IDRISI permite realizar este tipo de operaciones a partir de imágenes de orientación previamente creadas mediante el comando «*aspect*» del módulo SURFACE. CONESA *et al.* (1996) han empleado esta opción para delimitar áreas de drenaje relacionadas con tramos de desbordamiento en la rambla de Nogalte (Cuenca del Segura).

Un avance importante ha sido la integración de SIGs con modelos de flujos de superficie/subsuperficie, como el FESHM (*Finite Element Storm Hydrograph Model*) (SHANHOLTZ *et al.*, 1990), el ANSWERS (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*) (ENGEL *et al.*, 1991) y el AGNPS (*Agricultural Non-Point Source Pollution*) (PANUSKA *et al.*, 1991). En esta línea, ALONSO SARRÍA (1995) utiliza IDRISI para realizar una caracterización hidromorfológica de la cuenca de Rambla Salada (Murcia). En su estudio define tres módulos de información (módulo de precipitación, de interceptación-infiltración y de escorrentía) para generar un modelo de conversión lluvia-escorrentía. Como modelo de respuesta hidrológica de la cuenca adopta el

Hidrograma Unitario Instantáneo y como función proceso-respuesta el modelo de Nash o función gamma de dos parámetros, estimados a partir de las características geomorfológicas introducidas en el SIG.

Los parámetros hidráulicos de tipo dinámico (velocidad, energía de la corriente, pendiente motriz de la lámina de agua,...) pueden obtenerse con relativa facilidad en corrientes de régimen permanente, dotadas de instrumental de medida adecuado (aforadores, sensores de medición de velocidades primarias y secundarias, etc.), mientras que los datos de geometría hidráulica y rugosidad se adquieren de forma más directa en cauces de régimen efímero, que permanecen secos la mayor parte del año. El conocimiento de estos parámetros a través de trabajo de campo y la documentación existente permite estimar los caudales de desbordamiento en tramos no aforados y, con ayuda de la información derivada del MDE, fijar los límites de la zona inundada.

El objetivo principal de la modelización hidráulica es convertir los caudales en límites y calados de la zona de inundación. Con tal fin, el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia (DIHMA), en su estudio 'Delimitación del riesgo de inundación a escala regional en la Comunidad Valenciana' (1997), basa la modelización hidráulica en varias hipótesis: 1) hipótesis de flujo uniforme para la obtención de la lámina de agua; 2) consideración de la curva de remanso en condiciones de control o secciones con fuerte pérdida de energía; 3) adopción de la fórmula de Manning ($v = 1/n R^{2/3} S^{1/2}$) como ecuación de pérdidas de energía. Para inundaciones históricas en torno a las cuales existe abundante documentación, que incluyen datos de naturaleza física especialmente relevantes (alturas del agua, espesor de tarquines, usos del suelo afectados,...), pueden deducirse las variables hidráulicas necesarias para lograr una mejor estimación de caudales. De hecho, la amplia información de la Vega Baja del Segura recogida en la 'Memoria sobre efectos causados en la provincia de Murcia por la inundación de los días 14 y 15 de octubre de 1879' ha permitido a CALVO *et al.* (2001) aplicar diversos procedimientos empíricos para el cálculo de caudales máximos en este tramo durante dicho suceso histórico. En la actualidad, la compleja morfología rural de las llanuras de inundación, a menudo caracterizada por una densa red de acequias y vías de comunicación, dentro del ámbito mediterráneo, provoca que el comportamiento hidráulico de estas zonas tenga un fuerte carácter bidimensional. Éste es el caso de la 'plana' inundable del Júcar, cuyo complicado esquema de flujo ha sido simulado en los últimos años con el modelo matemático GISPLANA, que simula la evolución espacio temporal de niveles de inundación y caudales en los distintos elementos en que se discretiza la zona de estudio.

Una metodología sencilla y bastante operativa, muy utilizada en las previsiones de las administraciones locales, se basa en la obtención de alturas relativas sobre el nivel de base local del talweg y la aplicación de modelos hidrológicos e hidráulicos. En esta línea se hallan los trabajos de GARCÍA MANRIQUE y GALACHO JIMÉNEZ (1992), que combinan ARC/INFO con el Modelo Digital del Terreno "Quick-Surf. Generic Contouring Utility" para Autocad, extrayendo así las alturas relativas sobre el lecho del río Guadalhorce a su paso por el sector oeste de Málaga. CONESA GARCÍA *et al.* (1996) proponen una metodología, basada en el uso de IDRISI y de programas adicionales desarrollados en Qbasic, para la definición de áreas inundables bajo diferentes supuestos de altura. HORCAJADA *et al.* (2000) emplean un procedimiento parecido para elaborar el mapa de zonas inundables en la cuenca del Barranco de Aguajilva (Este de La Gomera). Y

ETXEBERRIA RAMÍREZ *et al.* (2002) combinan los SIGs con los modelos HEC-HMS y HEC-RAS. Una buena recopilación de trabajos sobre modelización hidrológica, que ponen de manifiesto las variadas posibilidades de los SIGs en la identificación, valoración y planificación de este tipo de riesgos, puede encontrarse en el libro editado por GOODCHILD *et al.* (1993) '*Environmental Modeling with GIS*', y en el '*Workbook Applications in Hazards Assessment and Management*' (EMANI, Ed., 1994).

WL/Delft Hydraulics ha desarrollado un Sistema de Información Hidrometeorológica y Ambiental avanzado (HYMOS), con módulos de análisis de altura-caudal, que incluyen la elaboración y validación de los datos de aforo directo, los cálculos y validación de las curvas de gasto. Éstas pueden representarse mediante funciones parabólicas o ecuaciones de tipo potencial con el fin de obtener datos de caudal y a partir de ellos niveles de agua.

METODOLOGÍA APLICADA AL SISTEMA DE RAMBLAS NOGALTE - VILERDA: UNA PROPUESTA METODOLÓGICA PARA CAUCES EFÍMEROS

Área de estudio. El sistema fluvial elegido para aplicar la metodología propuesta en este estudio es un sistema complejo compuesto por dos unidades o cuencas de drenaje aparentemente independientes (cuencas de las ramblas de Nogalte y Vilerda), cuyo funcionamiento conjunto puede tener efectos imprevisibles en sus tramos inferiores. Ambas terminan uniéndose en la zona distal del abanico aluvial que drenan, dando aquí origen a un sector de alto riesgo de inundación (figura 1). Por la situación que tienen dentro de la zona interior de las Cordilleras Béticas, muestran gran similitud morfológica y litológica. Su área vertiente (139 y 82 km² respectivamente) consta de dos partes bien diferenciadas: una extensa cabecera, de relieve apalachense, con predominio de conglomerados, filitas y micaesquistos, sobre la que se ha desarrollado una densa red de drenaje (9 kms/km²) (RUIZ GARCÍA, 1983), y un tramo bajo, labrado en formaciones aluviales cuaternarias tipo 'abanico', que se extienden hasta el fondo del Valle Alto del Guadalentín.

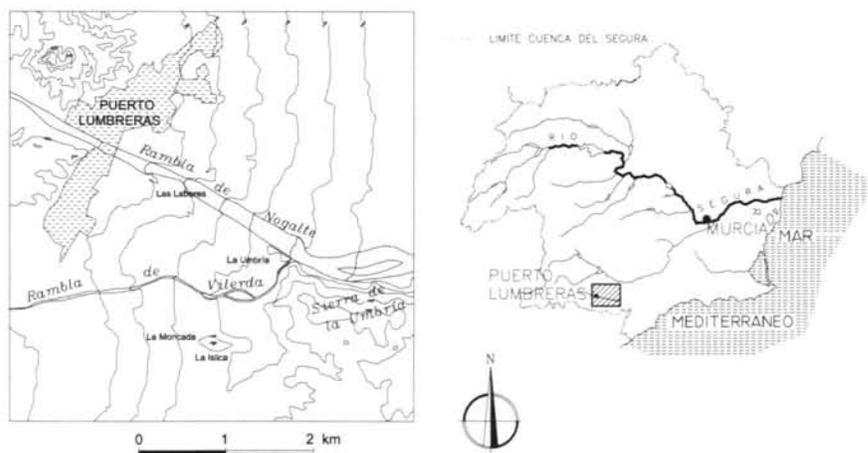


Figura 1: Localización del área de estudio en la Cuenca del Segura

La extraordinaria energía y capacidad erosiva de los flujos de avenida en las zonas de cabecera da paso, al penetrar en la Depresión Prelitoral del Guadalentín, a un complejo sistema sedimentario, donde alternan montículos marginales de cauce, compuestos por arenas y gravas, y sectores de inundación formados por materiales finos (CONESA GARCÍA *et al.*, 1994). Por otra parte, el carácter tectónico activo del flanco norte de la fosa del Alto Guadalentín contribuye al fuerte aluvionamiento de las tierras bajas del sistema Nogalte-Vilerda y explica la naturaleza 'aulacógena' del modelo sedimentario en esta zona.

Cartografía base y datos de campo. Como información fuente se ha utilizado la obtenida por digitalización a partir de mapas topográficos de gran escala y mediciones directas en el campo (datos sobre geometría hidráulica, granulometría de los materiales de lecho, etc.). A través de un entorno CAD se han digitalizado las curvas de nivel de los planos de líneas, 1/5000, 1-5, 1-6, 2-5, 3-5, 2-6 y 3-6, pertenecientes a la Hoja 975 del M.T.N. (Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, Consejería de Política Territorial y Obras Públicas, 1988). Una vez rasterizadas en IDRISI, se obtiene por interpolación de cotas un modelo digital del terreno con resolución de 5 m por pixel.

Obtención de alturas relativas sobre el nivel de base fluvial. Dado el trazado rectilíneo y la orientación ONO-ESE de la rambla de Nogalte, aguas abajo de Puerto Lumbreras, y O-E de la rambla de Vilerda en su tramo bajo, el procedimiento adoptado para calcular las alturas respecto al lecho de cualquiera de estos cursos, consiste en restar a las altitudes representadas en cada columna de la imagen la parte de deriva correspondiente al desnivel longitudinal del talweg, o sea la altitud mínima del cauce en su intersección con la columna en cuestión, tomada como valor constante para el resto de píxeles de la misma. Para ello se han desarrollado dos programas en Qbasic que pueden implementarse como subrutinas ejecutables desde IDRISI (cuadro 1). La primera permite extraer, a partir de la imagen de altitudes (figura 2), un fichero vectorial constituido por una única hilera de valores, cada uno equivalente al mínimo absoluto registrado en cada una de las columnas de la imagen. En su estructura se incluye un bucle FOR-NEXT, que ejecuta la instrucción $x < id$ (siendo x e id los valores de dos píxeles consecutivos) tantas veces como filas tiene la imagen (800 en el ejemplo del cuadro 1). La segunda subrutina utiliza los datos del fichero vectorial así creado para extender el valor mínimo de cada columna a todos sus píxeles, lo que se consigue mediante un nuevo bucle FOR-NEXT, que genera las mismas columnas que la imagen original o de partida, cada una de ellas integrada por el mismo valor digital en todas sus celdas (debido a la repetición del valor mínimo extraído en la fase anterior).

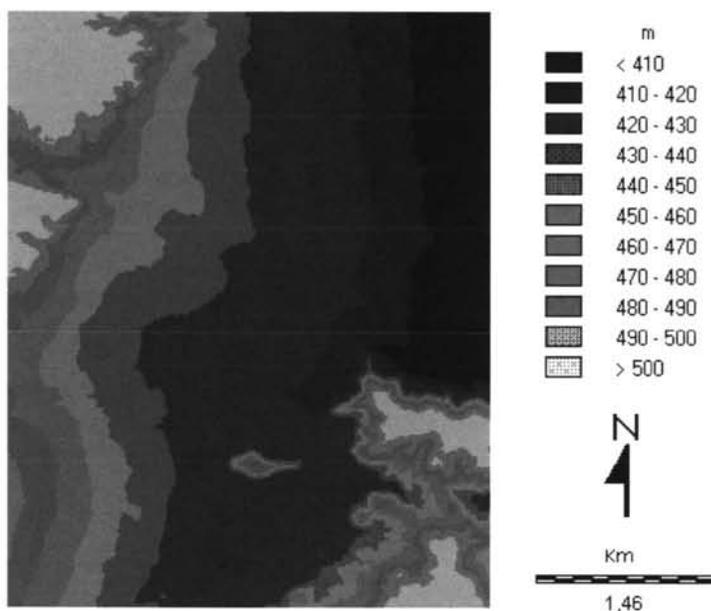


Figura 2. Mapa de altitudes relativas. Tierras bajas del Sistema de drenaje Nogalte-Vilerda.

```

CLS
ficinput$ = "c:\nogalte\altitud.img"
ficoutput$ = "c:\nogalte\talweg.vec"
OPEN ficinput$ FOR INPUT AS #1
OPEN ficoutput$ FOR OUTPUT AS #2
id = 999
DO WHILE (NOT EOF(1))
INPUT #1, id
  FOR i = 1 TO 800
  IF i > 1 THEN
  INPUT #1, x
  IF x < id THEN SWAP id, x
  END IF
  NEXT i
  PRINT #2, id
LOOP
CLOSE #1
END
  
```

(a)

```

CLS
ficinput$ = "c:\nogalte\talweg.vec"
ficoutput$ = "c:\nogalte\deriva.img"
OPEN ficinput$ FOR INPUT AS #1
OPEN ficoutput$ FOR OUTPUT AS #2
id = 999: num = 800
DO UNTIL id = 0
  INPUT #1, id
  FOR i = 1 TO num
  PRINT #2, id
  NEXT i
LOOP: CLOSE #1
  
```

(b)

Cuadro 1. Programas elaborados en Qbasic para la obtención de la imagen de cotas base, asimiladas a la altitud del talweg en cada punto de su recorrido: (a) subrutina que permite extraer las cotas mínimas de cada columna, creando un fichero vectorial; (b) subrutina que convierte dicho fichero vectorial en la imagen de cotas base

El resultado final es una imagen de “cotas base”, que disminuyen gradualmente hacia el Este, de acuerdo con el sentido general de la pendiente y la dirección de la corriente (figura 3). Visto en perspectiva isométrica, el MDE representa una rampa o plano inclinado, el mismo que es necesario sustraer a la imagen de altitudes para obtener la imagen de alturas referenciadas a los niveles de base locales del lecho topográficamente más bajo (figura 4). De esta forma, son asumidas las variaciones locales existentes a lo largo del perfil y disminuye la probabilidad de error en la obtención de cotas referenciadas al lecho.

Dado que el sistema de drenaje Nogalte-Vilerda se compone de dos colectores principales independientes situados a distinta altitud (el lecho de la rambla de Nogalte se halla más alto que el de la rambla de Vilerda), el análisis por separado de cada uno de ellos (la identificación de sus tramos de desbordamiento y la adopción de su talweg como elemento de referencia para extraer la alturas relativas de la zona) ha sido realizado mediante máscaras que discriminan un subsistema de otro. De esta forma pueden delimitarse áreas inundables, bajo diferentes supuestos de altura del agua, dependiendo de que actúe uno u otro subsistema, o ambos a la vez.. Las imágenes resultantes son reclasificadas según diferentes situaciones de flujo, atendiendo básicamente al nivel de agua alcanzado en secciones de geometría hidráulica conocida, próximas a los puntos potenciales de desbordamiento.

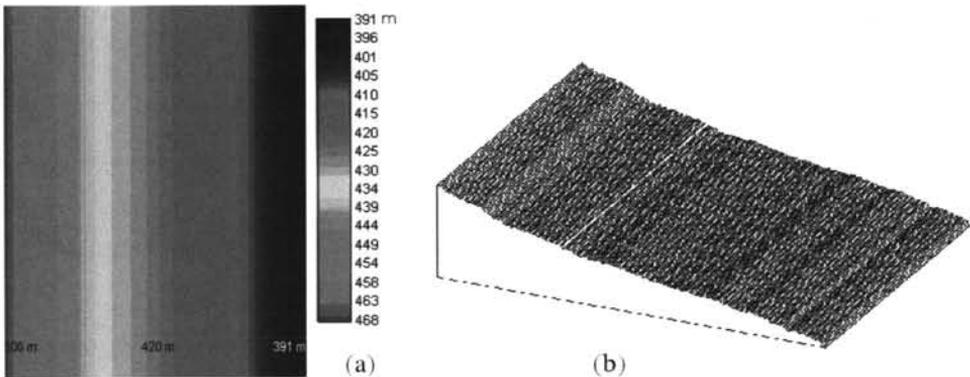


Figura 3. Imagen de cotas ‘base’ equiparada a los niveles de base locales del talweg de Vilerda (a) y perspectiva isométrica (b).

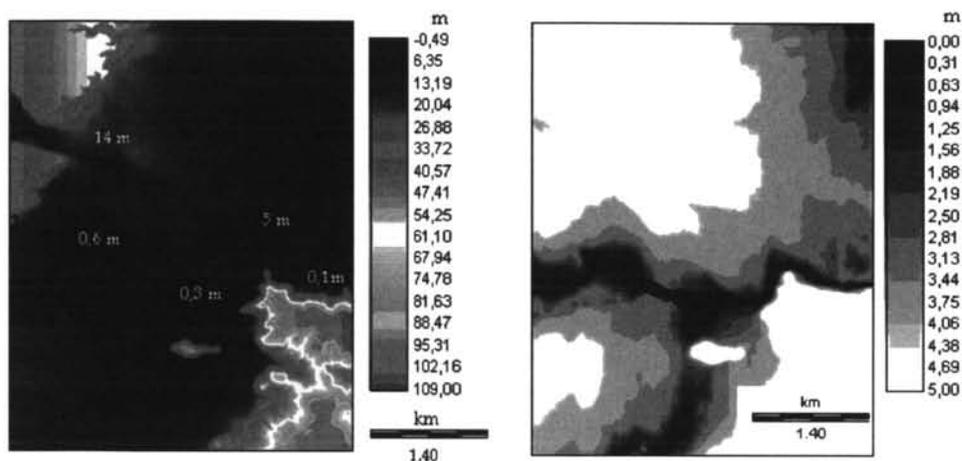


Figura 4. Mapas de alturas respecto al lecho de la rambla de Vilerda correspondientes al sistema global Nogalte-Vilerda (izquierda) y al subsistema de Vilerda (derecha)

Modelización hidrológica. Los caudales máximos instantáneos correspondientes a sucesos hidrológicos simulados y reales (avenidas históricas) pueden deducirse aplicando la fórmula de Chèzy-Maning, $V = (1/n) \times R^{2/3} \times S^{1/2}$, a partir de los niveles de agua alcanzados en cada caso, siendo n el coeficiente de rugosidad del lecho, R el radio hidráulico y S la pendiente longitudinal del cauce. Para ello, los datos de geometría hidráulica obtenidos con PROFILE deben complementarse necesariamente con mediciones en el campo (granulometría de los materiales de lecho, altura de la lámina de avenida, etc.).

La determinación de las alturas o niveles críticos de desbordamiento se ha realizado superponiendo la imagen «*watshed*» a la de alturas relativas al lecho, operación que permite localizar, a lo largo de la línea divisoria de ambas áreas de drenaje (área desbordable y área inundable), las cotas topográficas mínimas que las separan. Estas cotas son representadas a través de la orden PROFILE, obteniendo perfiles de secciones laterales al cauce (SL1, SL2, SL3 y SL4), por las que serán laminados gran parte de los caudales de avenida. La altura máxima asignable a la corriente evacuada por estas secciones dependerá de las situaciones de flujo simuladas en cada momento. Una vez establecidos los niveles mínimos de desbordamiento, se deduce la capacidad máxima de desagüe de la rambla en cada punto de su recorrido. Como secciones de referencia se han tomado los perfiles inicial (STI) y final (STF) del cauce, a fin de controlar la relación altura-caudal de la corriente a lo largo del tramo seleccionado e inmediatamente aguas abajo (fig. 5).

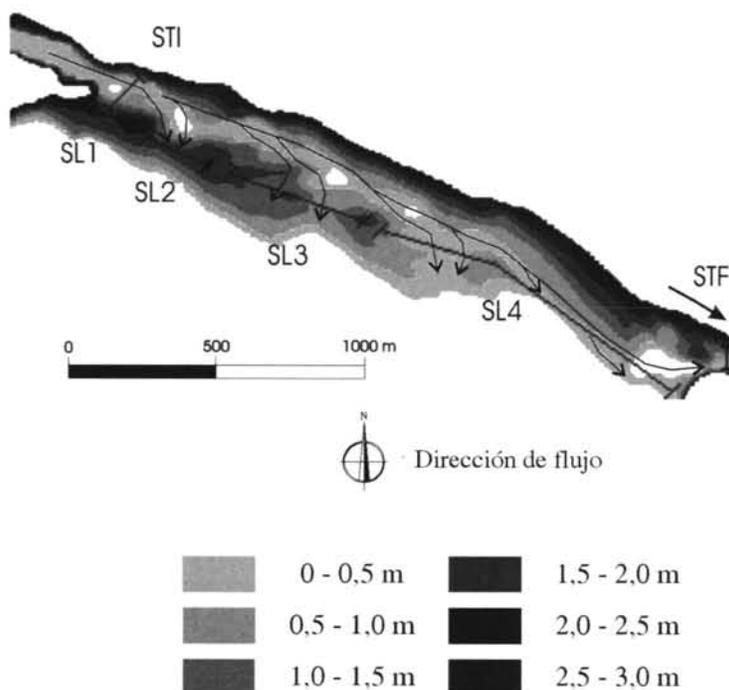


Figura 5. Localización de las secciones transversales analizadas con PROFILE y trayectorias de flujo preferenciales durante las avenidas

El caudal que circula por el cauce de la rambla, mas el que se desborda por las secciones laterales tipo «portillo», condiciona la altura del flujo y, por tanto, la superficie del área mojada y el radio hidráulico global. Conociendo la altura alcanzada en avenidas históricas o con tiempos de retorno específicos, pueden calcularse los caudales parciales correspondientes a los mismos, siempre que se disponga de un MDE preciso y se minimice el error derivado del empleo de n (factor de fricción) en las ecuaciones de velocidad (CONESA GARCÍA *et al.*, 1996).

La energía potencial liberada por la corriente en su descenso es disipada por fricción en el lecho y márgenes del cauce, lo que confiere al factor rugosidad una importancia decisiva en la estimación de la velocidad. El cálculo de este factor (n) reviste por lo general cierta dificultad. En los tramos de rambla estudiados, la forma y granulometría de los depósitos que configuran el lecho aconsejan la utilización de modelos como el de CHOW (1959), basado en ecuaciones de distribución de velocidades en cauces rugosos:

$$n = \frac{(x-1)y^{1/6}}{6,78(x+0,95)} \quad 1$$

donde x es la velocidad medida a 0,2 la profundidad de la corriente (y) / velocidad a 0,8. Como alternativa puede emplearse la expresión logarítmica desarrollada por el mismo autor:

$$n = \left[\frac{(R/x)^{1/6}}{21,9 \log(12,2 R/K)} \right] K^{1,6} \quad 2$$

en la que K es el tamaño correspondiente al 65 percentil de las partículas sedimentarias del lecho (d_{65}) y R , el radio hidráulico. A falta de mediciones directas de velocidad, se ha adoptado la ecuación logarítmica y la tabla de rugosidad propuesta por CHOW (1959), en la que n depende de las características granulométricas del lecho, las dimensiones y forma del cauce, tipo de trazado, vegetación, etc.

Aplicando la fórmula de Manning a los datos de niveles de agua proporcionados por el Ayuntamiento de Puerto Lumbreras o deducidos de fotografías, se han estimado los caudales máximos instantáneos de las avenidas de Octubre de 1973 y Septiembre de 1989. El mismo procedimiento ha sido empleado para definir las áreas de inundación, a partir de niveles catalogados como «críticos». En cambio, para simular situaciones previsibles para un determinado período de retorno (T_r) en la rambla de Nogalte, se han adoptado las alturas de los caudales-punta de avenidas obtenidos por ASISTENCIA TÉCNICA ELSAMEX (1995) para T_r de 100, 500 y 1000 años (1305, 1866 y 2100 m³/s respectivamente).

Para calcular los tiempos de concentración de la escorrentía (T_c) en cada una de las áreas definidas con WATRSHEd se ha empleado la fórmula-promedio de Basso, Kirpich, Instrucción de Carreteras y California: $T_c = 0,067 \times L^{1,155} \times H^{-0,385}$, donde L es la longitud del cauce y H su desnivel absoluto, ambos expresados en kms. L se calcula a través de la función DISTANCE de IDRISI, que utiliza una ecuación de distancia euclidiana, $D_{ab} = [(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2]^{0,5}$, en la que x e y son las coordenadas rectangulares que separan los puntos a y b (BOSQUE SENDRA, 1992). Como píxeles de referencia se seleccionan los que ocupan las tierras más bajas de la cuenca o los puntos de desagüe, dando dos mapas de distancias con los que se combinan los mapas de desniveles deducidos a partir del modelo digital del terreno. Basta entonces con aplicar SCALAR para elevar L y H a sus exponentes respectivos y combinar la información digital de los mapas resultantes (pixel a pixel) mediante la opción «multiplicar» de OVERLAY.

Estimación de usos del suelo afectados. Los usos del suelo son digitalizados utilizando como base cartográfica los polígonos catastrales, escala 1:5.000, pertenecientes al Catastro de Rústica de la Comunidad Autónoma de Murcia. Cada parcela y subparcela se relaciona con su correspondiente uso, generando una imagen raster en la que aparecen reflejados un total de catorce usos del suelo. Esta imagen se superpone, mediante un proceso de overlay, a tres imágenes “booleanas” donde se delimita la superficie afectada por cada uno de los niveles de corriente considerados (1,5 m y 2 m y 3 m). El posterior empleo de la orden “area” del módulo “Database query” permite extraer las superficies de los distintos usos afectados.

Tomando como base las imágenes de usos así generadas se procede a su reclasificación según criterios previamente establecidos, agrupando los catorce usos en

cinco categorías: 1) almendro de secano, labor secano y pastos; 2) almendro regadío, olivo regadío, agrios regadío e invernaderos; 3) ramblas, barrancos e infraestructuras de regadío; 4) zona urbana, vías de comunicación y construcciones de tipo disperso; y 5) labor regadío y otros frutales de regadío.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aguas abajo de Puerto Lumbreras, la rambla de Nogalte queda limitada por dos interfluvios de diferente extensión y altura. El interfluvio septentrional se caracteriza por una posición topográfica más alta, mayor pendiente ($>10\%$) y menor probabilidad de inundación, mientras que el meridional constituye un umbral discontinuo, de alturas modestas, inferiores a los 2,7 m respecto al lecho actual. Al sur de dicho umbral se extiende el área de Las Labores, a donde fluyen, en época de avenidas, las aguas desbordadas de las ramblas de Nogalte y Vilerda. Su superficie vertiente, calculada con el módulo WATRSHEd en torno a 320 Has, se halla flanqueada al O y E por elevaciones del terreno que represan el flujo, incrementando el peligro de inundación en dicha zona. Los tiempos máximos de concentración con los que estas áreas contribuyen a la escorrentía en sus sectores más deprimidos son de 27 minutos a lo largo del tramo de rambla y de 35 minutos en el paraje de Las Labores. Cuando se producen grandes avenidas, laminadas lateral y longitudinalmente, estos tiempos de concentración terminan igualándose en el extremo suroriental del citado paraje.

- Alturas y caudales de inundación

A su paso por Puerto Lumbreras, el encauzamiento de la rambla con muros de más de 5 m de altura protege al núcleo urbano contra las avenidas. Estimando, en este tramo, un nivel de agua, según la zona de lecho afectada, para caudales de tiempos de retorno de 100 y 500 años, y adoptando la ecuación de Manning, con pendiente $S = 0,019$ y un coeficiente de rugosidad $n = 0,045$ (propio del material del lecho), deducido de las tablas de CHOW (1959), resulta para el cauce principal:

	T_r (años)	h_{med} (m)	A (m ²)	R_h (m)	Q (m ³ /s)
Sec.promedio	~100	2,8	224	2,62	1297
(encauzam.)	~500	3,5	280	3,22	1859

Aguas abajo de Puerto Lumbreras, la rambla experimenta un ensanchamiento progresivo de su cauce, al tiempo que atraviesa un amplio abanico aluvial, originado por sus propios aportes torrenciales. El cuerpo de este abanico presenta un perfil diferente a uno y otro lado de la rambla, más suave y rebajado en la zona sur, y más convexo y compacto en la franja norte. Esta disposición, observada en el MDE se explica por la dinámica morfosedimentaria del área durante el Cuaternario, ligada a desplazamientos sucesivos de corrientes generalmente poco confinadas en cauces. De hecho, la rambla de Nogalte, al entrar en los terrenos cuaternarios, ha sufrido, al cabo de dicho período, una migración hacia el S (entre 1 y 6 kms según los puntos), tras el desarrollo de un extenso cono detrítico

por su margen izquierdo y la menor competencia a la erosión de las margas tortonienses frente a sus propios acarrees en el flanco sur (CONESA GARCÍA *et al.*, 1994). En este margen se localizan los tramos más vulnerables al desbordamiento. Se trata de secciones laterales con perfil cóncavo, que ocupan posiciones más bajas cuanto mayor es la distancia recorrida en la dirección del flujo, a través de las cuales se conectan las aguas procedentes de Nogalte con las de Vilerda.

Las cotas mínimas que definen estos tramos de desbordamiento (portillos) son 2 m para la sección SL1, 1,6 m para SL2, 0,9 m para SL3 y 0 m para SL4, y el nivel mínimo necesario para cubrirlos en su totalidad se sitúa en torno a los 2,6 m. O sea, manteniéndose uniformemente por encima de este umbral, la lámina superficial de agua sería continua desde Puerto Lumbreras hasta Las Labores. Sin embargo, tal circunstancia es poco probable en la mayoría de los sucesos, dada la enorme capacidad de laminación de los portillos SL3 y SL4.

En el cuadro 2 se muestran los parámetros de geometría hidráulica, que intervienen en el cálculo de caudales-punta laminados a diferentes niveles, los mismos que han sido ya descritos como umbrales críticos. Como datos de caudal figuran aquéllos que para una altura determinada serían capaces de evacuar las secciones de control. Lógicamente, el caudal desbordado a través de una sección lateral estará condicionado por los caudales registrados aguas arriba y la capacidad de drenaje de las secciones precedentes. Así, por ejemplo, para que la sección SL4 drene los 742,8 m³/s que le permite su dimensión al nivel de 1,6 m, es preciso que la laminación de la avenida en la sección STI, situada a la salida del núcleo urbano, se inicie con un caudal superior a 2000 m³/s y una altura mínima de 3,2 m, como ocurrió en la excepcional crecida de Octubre de 1973 (CONESA GARCÍA, 1995). Bajo las mismas condiciones de laminación inicial, y simulando un flujo uniforme entre 2 y 2,5 m de altura en las primeras secciones, el volumen de agua sangrado por las secciones SL2 y SL3 sería suficiente para inundar todo el sector.

Cuadro 2. Parámetros hidráulicos empleados en la estimación de caudales máximos potenciales, a partir de diferentes alturas críticas (0,9, 1,6, 2 y 2,5 m) (Conesa García *et al.*, 1996)

h_c	Sec.	c_{min}	w	h_{med}	A_m	P_m	R_h	v	Q
0,9	STI	0,0	135	0,41	55,4	136	0,41	1,60	88,6
	SL1	2,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,00	0,0
	SL2	1,6	0	0,00	0,0	0	0,00	0,00	0,0
	SL3	0,9	0	0,00	0,0	0	0,00	0,00	0,0
	SL4	0,0	185	0,48	91,2	186	0,48	1,78	162,3
	STF	0,0	60	0,37	22,2	60	0,37	1,59	35,3
1,6	STI	0,0	120	1,04	124,8	122	1,04	2,67	333,2
	SL1	2,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,00	0,0
	SL2	1,6	0	0,00	0,0	0	0,00	0,00	0,0
	SL3	0,9	401	0,28	112,3	401	0,28	1,12	125,8
	SL4	0,0	278	1,02	283,5	280	1,01	2,62	742,8
	STF	0,0	42	0,72	30,3	43	0,72	2,09	63,3

2,0	STI	0,0	150	1,18	177,0	152	1,16	2,87	430,5
	SL1	2,0	0	0,00	0,0	0	0,00	0,00	0,0
	SL2	1,6	210	0,24	50,4	211	0,24	1,32	66,5
	SL3	0,9	500	0,58	290,0	501	0,58	1,81	525,0
	SL4	0,0	278	1,39	386,4	280	1,37	3,26	1236,5
	STF	0,0	52	0,87	45,5	53	0,87	2,79	126,6
2,5	STI	0,0	150	1,29	194,0	152	1,28	3,07	595,6
	SL1	2,0	156	0,27	42,1	157	0,27	1,42	59,8
	SL2 +								
	SL3	0,9	802	1,02	818,0	804	1,01	2,34	1917,0

h_c = altura crítica de desbordamiento (m); c_{min} = cota mínima (m); w = anchura del cauce (m); h_{med} = altura media de la corriente (m); A_m = área mojada de la sección transversal del cauce (m²); P_m = perímetro mojado (m); R_h = radio hidráulico (m); v = velocidad de la corriente (m/s); Q = caudal máximo de desagüe (m³/s). STI = Sección transversal inicial del cauce en el tramo considerado; SL1 al SL5 = secciones laterales de previsible desbordamiento; STF = sección transversal final del cauce.

Si en STI se registran las alturas y caudales considerados críticos para los portillos laterales, o sea 88,6 m³/s a 0,9 m de nivel, 333,2 m³/s a 1,6 m, 430,5 m³/s a 2 m y 595,6 m³/s a 2,5 m, el régimen de flujo variará de acuerdo con las detracciones experimentadas en los tramos de desbordamiento intermedios, no pudiendo superar éstas los caudales que circulen a su paso. De este modo, si la altura de la corriente en STI es de 2 m y el caudal de 430,5 m³/s, SL1 no será alcanzada, SL2 detraerá 66,5 m³/s y SL3 podrá desalojar un máximo de 285,4 m³/s, que resulta de restar a 430,5 m³/s los caudales correspondientes a SL2 (bajo la misma cota) y los que siguen la dirección del flujo inicial por debajo de la cota mínima de SL3 (88,6 m³/s).

- Usos del suelo expuestos al peligro de inundación

Las áreas susceptibles de inundación, dentro del ámbito estudiado, comprenden la zona sur y sureste de Puerto Lumbreras y las proximidades del curso de Vilerda, quedando incluidos los parajes de Las Labores, La Umbría, La Moncada y La Islica, con continuidad hasta el Cabezo de la Paja y el Cabezo de las Minas, situados en el extremo noroccidental de la Sierra de Enmedio.

La vocación agrícola de estas tierras se pone de manifiesto en la parcelación que presenta el territorio, donde más del 60 por ciento del área total analizada, 1975 hectáreas, está ocupada por terrenos dedicados a la agricultura, predominando los cultivos de regadío (almendros, olivos, agrios, otros frutales y labor regadío) que ocupan más de 925 hectáreas. Los propios cauces de las ramblas de Nogalte y Vilerda, junto a las infraestructuras destinadas a la conducción de agua, boqueras, acequias y balsas, dibujan el paisaje tradicional de dicha zona.

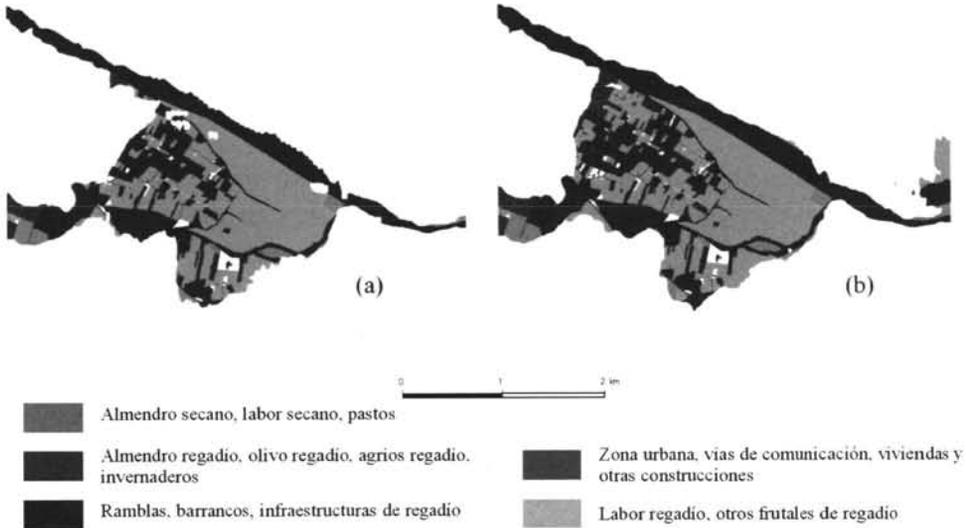
La margen derecha o septentrional de la rambla de Nogalte presenta una contrapendiente apreciable (superior al 10 por ciento), que sirve de barrera topográfica a la

corriente en caso de avenidas, mientras que la izquierda o meridional, dominada por un interfluvio de escasa altura con tramos rebajados y pendiente suave (portillos laterales), muestra un alto peligro de desbordamiento. La laminación de las aguas desbordadas en este tramo de la rambla de Nogalte tiene lugar, por tanto, de norte a sur, inundando primero el sector de Las labores y al poco tiempo La Umbría. Aguas abajo, en dirección Este, la confluencia de las ondas de avenida de ambos cauces, supone un incremento del riesgo especialmente para las tierras agrícolas situadas al sur de la rambla de Vilerda.

La elección de los niveles de corriente de 1,5 m, 2 m y 3 m en el tramo encauzado de la rambla de Nogalte a su paso por Puerto Lumbreras y en el tramo medio de la rambla de Vilerda, considerados críticos (véase el cuadro 3), permite establecer una serie de observaciones respecto a la magnitud y tipo de afecciones producidas aguas abajo. Un aumento del nivel del agua de 1,5 a 3 m implica un incremento importante de la superficie inundada, de 244 a 477 hectáreas, o sea un 74 por ciento en tan sólo metro y medio.

El incremento de superficie inundada entre los umbrales de 1,5 y 2 m (73,3 has) corresponde en su mayor parte a terrenos ocupados por almendros de regadío, labor regadío y otros frutales de regadío (38,2 has), que se extienden al sur del núcleo urbano de Puerto Lumbreras en la zona suroccidental del abanico aluvial de Nogalte. A pesar de tener menor probabilidad de inundación que el sector deprimido comprendido entre Las Labores y La Umbría, muestra una mayor vulnerabilidad, por cuanto los usos agrícolas afectados pertenecen principalmente al terrazgo de regadío y la afección urbana y de accesos crece de forma considerable (figura 6). En concreto aparecen anegados nuevos terrenos urbanos (ocho hectáreas), correspondientes a los sectores meridionales más próximos al encauzamiento de la rambla de Nogalte, tres kilómetros de carreteras y caminos, y casi dos hectáreas en las zonas dedicadas a labores de secano. El aumento de la afección en los restantes usos del suelo apenas alcanza una hectárea, con la lógica excepción de las ramblas y barrancos, que ocupan 74,7 hectáreas para una altura de corriente de 2 metros. Cuando la altura de la corriente se eleva a 3 metros el frente de laminación de la avenida se prolonga hasta el extremo más meridional del área en estudio, donde enlaza con un sector deprimido próximo a una pequeña elevación, al oeste de la Sierra de la Umbría, que favorece el represamiento del agua. Esta trayectoria hacia el Sur, con dirección al Mar Mediterráneo, es la que debió seguir el antiguo cauce de Nogalte a principios del Holoceno, como han puesto de manifiesto CONESA GARCÍA *et al.* (1994) al estudiar mediante sondeos geoelectrónicos las facies sedimentarias del Cuaternario en el Valle Alto del Guadalentín.

Figura 7. Áreas de inundación y usos del suelo afectados para alturas de corriente de 1,5 m (a) y 2 m (b)



Cuadro 3: Usos afectados por diferentes alturas de corriente. Ramblas de Nogalte y Vilerda.

Usos del suelo	h. máx = 1,5m		h. máx = 2m		h. máx = 3m	
	(has)	%	(has)	%	(has)	%
Ramblas y barrancos	57,6	21,0	74,7	21,5	91,7	19,2
Zona urbana	4,3	1,6	12,3	3,5	12,3	2,6
Cultivos de secoano						
almendro secoano	2,1	0,8	2,8	0,8	4,4	0,9
labor secoano	6,4	2,3	8,3	2,4	32,8	6,9
pastos	2,5	0,9	3,4	1,0	8,7	1,8
Cultivos de regadío						
almendro regadío	58,8	21,5	75,2	21,8	83,7	17,5
olivos regadío	5,8	2,1	6,3	1,8	7,7	1,6
agrios regadío	0,2	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1
invernaderos	0,0	0,0	0,3	0,1	0,3	0,1
otros frutales regadío	2,9	1,1	7,8	2,2	16,1	3,4
labor regadío	123,4	45,1	143,3	41,3	201,3	42,2
Infraestructuras de riego y viarias						
infraestructuras regadío	2,9	1,1	3,1	0,9	3,8	0,8
vías de comunicación	4,9	1,8	6,4	1,8	10,7	2,2
Viviendas y otras construcciones	2,1	0,8	2,9	0,8	3,1	0,6
Total inundado	273,9	100	347,2	100	477,0	100

Con la elevación del nivel de avenida de 1,5 a 3 metros todos los usos ven incrementada considerablemente su superficie inundada, si bien los valores más altos corresponden a los cultivos de regadío, que pasan de 191,1 a 309,5 hectáreas, ocupando la mayor parte de los terrenos aluviales comprendidos entre las ramblas de Nogalte y Vilerda. El terrazgo de secano pasa de 11 a 45,9 hectáreas, debido al predominio de las labores de secano (cereales) en las nuevas tierras anegadas de los sectores meridionales, sobre todo las situadas al sur de la rambla de Vilerda (La Moncada y La Islica). Las infraestructuras de riesgo y vías de comunicación también sufren un mayor peligro, quedando cortados gran parte de los accesos comarcales y vecinales con dirección Este y Sur, en particular los nexos meridionales de la circulación urbana. Por último, cabe señalar el extraordinario riesgo que estos aparatos torrenciales suponen para la población de zonas residenciales y naves industriales ubicadas en las llanuras de inundación o sectores de derrame (*écoulements d'épandage*). Las propias boqueras o canales de derivación, diseñadas según la dirección de los flujos de laminación en época de avenidas, constituyen un verdadero peligro cuando la corriente principal alcanza el nivel crítico de tres metros aguas arriba.

CONCLUSIÓN

El método aquí propuesto para definir áreas de riesgo de inundación tiene una base conceptual común con otros muchos modelos utilizados para el mismo fin. Sin embargo, difiere en la obtención de determinados parámetros hidráulicos y en la inserción de un modelo desarrollado en Qbasic para la extracción de alturas a partir de un MDE. La información recopilada directamente en el campo y derivada del MDE se gestiona con un SIG de tipo raster, dando como resultado varios mapas de áreas inundables y usos afectados, según el agua de avenida rebase ciertos umbrales críticos. Esta metodología se basa en el empleo de parámetros morfométricos del sistema fluvial y no requiere necesariamente datos de aforo, resultando, por tanto, particularmente útil en áreas vertientes de drenaje efímero. Su aplicación al sistema de ramblas Nogalte-Vilerda ha permitido comprobar la efectividad del método que, en todo caso, admite la ejecución de modelos hidráulicos como el HEC-RAS del Cuerpo de Ingenieros de EEUU y se muestra flexible a la introducción de nuevos parámetros.

BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO SARRÍA, F. (1995): *Análisis de episodios lluviosos y sus consecuencias hidrológicas sobre una cuenca mediterránea semiárida no aforada (Cuenca de la Rambla Salada, Murcia)*, Tesis Doctoral (inérita), Universidad de Murcia, 501 p.
- ASISTENCIA TÉCNICA ELSAMEX (1995): Estudio hidrológico de la rambla de Nogalte, con motivo de las obras de la variante de Puerto Lumbreras. Programa de Autovías del Mediterráneo. M.O.P.T y M.A.
- BERG, C.P., WEISNET, D.R. Y MATSON, M. (1981): "Assessing the Red River of the North 1978 Flooding from Series TPS 81-1.1981. NOAA Satellite Data" en M.

- Deutsch, D.R. Weisnet, and A. Rango (Eds.), *Satellite Hydrology, Proceedings of the Fifth Annual William T. Pecora Symposium on Remote Sensing*, Sioux Falls, South Dakota, June 10-15, 1979 (Minneapolis: American Water Resources Association, Technical Publication.
- BOSQUE SENDRA, J.(1992): *Sistemas de Información Geográfica*, Ediciones Rialp, Madrid, 451 p.
- CALVO GARCÍA-TORNEL, F., CONESA GARCÍA, C. y ALVAREZ ROGEL, Y. (2001): «La inundación de octubre de 1879 en el Bajo Segura. Magnitud y efectos inducidos», *Estudios Geográficos*, CSIC., Madrid, pp. 7-28.
- CEDEX (2002): *Cartografía de riesgo de inundación en la Ribera del Júcar. Memoria resumen*. Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 25 p.
- CHOW, V. (1959): *Open channel hydraulics*, McGraw-Hill, 680 p.
- CONESA GARCÍA, C. (1993): «Identificación de umbrales y sucesos morfológicos asociados a corrientes torrenciales en el sureste peninsular», *Jornada sobre el estado actual de la ciencia regional en Murcia*, AMUCIR×Instituto de Fomentode la Región de Murcia, Murcia, pp. 193-212.
- CONESA GARCÍA, C., SOLÍS GARCÍA-BARBÓN, L., SÁNCHEZ MEDRANO, R. Y CABEZAS CALVO-RUBIO, F. (1994): «Aplicación de técnicas de prospección geoelectrica al estudio de la evolución de formas de drenaje y facies sedimentarias del Cuaternario en el Valle Alto del Guadalentín», *Cuadernos de Geografía*, 55, Uni. de Valencia, pp. 1-15.
- CONESA GARCÍA, C. (1995): «Torrential Flow Frequency and Morphological Adjustments of Ephemeral Channels in South-East Spain», en E.J.Hickin (ed), *River Geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd, pp. 169-192.
- CONESA GARCÍA, C. ; ÁLVAREZ ROGEL, Y.; BELMONTE SERRATO, F.; VIVERO MARTÍNEZ, M.A. Y RODRÍGUEZ TELLO, T. (1996): “Simulación mediante SIG de áreas inundables en el tramo inferior de la Rambla de Nogalte (Cuenca del Segura)”. En *Modelos y Sistemas de Información en Geografía*, Universidad del País Vasco pp. 192-201.
- CONESA GARCÍA, C. y ALONSO SARRIA, F. (1997): «Stochastic matrices applied to the probabilistic analysis of runoff events in a semi-arid stream», *Hydrological Processes*, vol.11, 297-310.
- CONESA GARCÍA, C. (2003): “Análisis espacial y aplicaciones estadísticas: la eficacia instrumental de los Sistemas de Información Geográfica”, en García Cuesta, J.L. (ed), *Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, Editorial Dossoles, Burgos, pp. 129-162.
- DHIMA (DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE) DE LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA (DIHMA) (1997): *Delimitación del riesgo de inundación a escala regional en la Comunidad Valenciana*, Serie Publicaciones de Divulgación Técnica, Colección ‘Cartografía Temática’, Núm. 1, Generalitat Valenciana. Valencia, 56 p.

- EMANI, S. (Ed) (1994): *Applications in Hazard Assessment and Management*, vol. 6, serie *Explorations in Geographic Information Systems Technology*, UNITAR, United Nations Environment Programme.
- ENGEL, B.A., SRNIVASAN, R. Y REWERTS, C.C. (1991): "A GIS toolbox approach to hydrologic modeling". *Proceedings, GRASS 1991 User's Conference*, Berkeley, California.
- ETXEBERRIA RAMÍREZ, P.; BRAZAOLA ROJO, A. Y EDESO FITO, J.M. (2002): "Cartografía de peligro de inundación mediante Sistemas de Información Geográfica y modelos hidrológicos e hidráulicos". *XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, Santander, 9 p.
- GARCÍA MANRIQUE, E. Y GALACHO JIMÉNEZ, F.B. (1992): "Aplicación de tecnología SIG en la elaboración de una cartografía de las zonas de riesgo de inundación en el sector oeste de la ciudad de Málaga", *V Coloquio de Geografía Cuantitativa*, Zaragoza, pp. 115-126.
- GIRAUT, M. (1992): GIS methodology applied to Hydrological Hazard Mapping in flat areas landscape. Documento final de beca de investigación, O.N.U., Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), Lausanne.
- GIRAUT, M., SOLDANO, A. Y LUDUEÑA, S. (1998): "Cuantificación de la evolución de coberturas hídricas durante las recientes inundaciones en el noreste de la República Argentina: una propuesta metodológica". *Jornadas Argentinas de Teleobservación*, CONAE, Buenos Aires, 17-19 de junio 1998.
- GOODCHILD, M.F., PARKS, B.O. Y STEYAERT, L.T. (Eds) (1993): *Environmental Modeling with GIS*, Oxford University Press, Oxford.
- HARKER, G.R., AND ROUSE, J.W. (1977): «Flood Plain Delineation Using Multispectral Data Analysis» en *Photogrammetry, Engineering and Remote Sensing*, vol. 43, no. 1, pp. 81-87.
- HORCAJADA HERRERA, T., SIMANCAS CRUZ, M.R. Y DORTA ANTEQUERA, P. (2000): "La constatación y validación de los mapas de riesgo de avenidas en pequeñas cuencas hidrográficas mediante Sistemas de Información Geográfica. Propuesta metodológica y aplicación a la Ordenación del Territorio". *Boletín de la A.G.E.*, N° 30, pp. 135-154.
- JENSON, S.K. & DOMINGUE, J.O. (1988): «Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), pp. 1593-1600.
- JENSON, S.K. (1991): «Applications of hydrologic information automatically extracted from digital elevation models», *Hydrologic Processes*, 5(1), pp. 31-44.
- NASH, J.E. (1960): "A unit hydrograph study with particular reference to British catchments", *Proc. I.C.E.*, 17, pp. 249-282.
- PANUSKA, J.C., MOORE, I.D. Y KRAMER, L.A. (1991): "Terrain analysis: integration into the agricultural non-point source (AGNPS) pollution model", *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, pp. 59-64.

- RODRÍGUEZ ITURBE, I. y VALDÉS, J.B. (1979): "The geomorphological structure of hydrologic response", *Water Resources Research*, 15 (6), pp. 1409-1420.
- ROSSO, R. (1984): "Nash model relation to Horton order ratios", *Water Resources Research*, 20 (7), pp. 914-920.
- RUIZ GARCÍA, A. (1983): *Estructura y funcionamiento de las redes fluviales de la región de Murcia: El sistema de ramblas de Nogalte-Béjar-Viznaga*. Memoria de licenciatura (inérita), Univ. de Murcia, pp. 76-89; 91-106 y 112-122.
- SHANHOLTZ, V.O., DESAI, C.J., ZHANG, N., KLEENE, J.W., METZ, C.D. Y FLAGG, J.M. (1990): "Hydrologic/water quality modeling in a GIS environment", ASAE Paper, N° 90-3033, St. Joseph, MI: *American Society of Agricultural Engineers*, 17 p.
- SHERMAN, L.K. (1932): "Streamflow from Rainfall by the Unit-Graph Method", *Eng. News-Rec.*, 108, pp. 501-505.
- TARBOTEN, D.G., BRAS, R.L. & RODRÍGUEZ-ITURBE, I. (1991): «On the extraction of channel networks from digital elevation data», *Hydrologic Processes*, 5(1), pp. 81-100.
- WIESNET, D.R., MCGINNIS, D.V., AND PRITCHARD, J.A. (1974): «Mapping of the 1973 Mississippi River Floods by the NOAA-2 Satellite» in *Water Resources Bulletin*, vol. 10, no. 5, pp. 1040-1049

Fecha de Recepción: 1 de Octubre de 2003. Fecha de aceptación: 29 de Octubre de 2003.