

El modelo de flujo bidimensional GISPLANA

TEODORO ESTRELA MONREAL (*); LUIS QUINTAS RIPOLL (**)

RESUMEN Se presenta un modelo hidráulico de flujo bidimensional en régimen variable para el estudio de crecidas en llanuras de inundación, acoplado a un Sistema de Información Geográfica (SIG) para el tratamiento de la información espacial que procesa. Se ha desarrollado sobre un sistema informático con una interfaz gráfica de usuario con objeto de gestionar eficientemente toda la información. Se ha aplicado para el estudio de la inundación de la llanura del Júcar de noviembre de 1987.

GISPLANA TWO DIMENSIONAL FLOW MODEL

ABSTRACT This article presents a hydraulic two-dimensional variable regime flow model for the study of high waters in flood plains, coupled to a Geographical Information System (GIS) for the spatial information in handles. It has been developed around a computer system with a graphical user interface with a view to achieving an efficient management of all the information. It has been applied to the study of the flooding of the Júcar plain in November 1987.

Palabras clave: Flujo bidimensional; SIG; Llanura de inundación; Modelo hidráulico.

1. INTRODUCCIÓN

Para simular la propagación de caudales y niveles de agua en las crecidas de un río es corriente utilizar modelos matemáticos en régimen variable. Cuando la inundación se extiende a grandes áreas de la llanura, suele ser necesario que estos modelos hidráulicos sean bidimensionales, lo que implica la gestión de gran cantidad de información variable en el espacio y el tiempo, por lo que en la mayoría de las ocasiones su utilización es compleja y muy laboriosa. Para facilitar el manejo de toda esa información, en el CERDEX se ha desarrollado un Sistema de Apoyo a la Decisión (SAD) formado por: un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el se gestiona y visualiza la información, un modelo hidráulico bidimensional que simula niveles de agua y caudales y una Interfaz Gráfica de Usuario (IGU), que conecta al usuario con el Sistema. A ese SAD se le ha denominado GISPLANA (Estrela y Quintas, 1994).

GISPLANA integra por tanto un modelo hidráulico bidimensional, PLAN, realizado por la Fundación Agustín de Betthencourt bajo un convenio de colaboración con el CERDEX (Fundación A.B., 1989) con el SIG GRASS, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers (1991) de los EEUU. Una integración similar (HEC, 1991) ya ha sido realizada por este organismo con el conocido modelo unidimensional y estacionario HEC-2 (Hydrologic Engineer Center, 1982). El SIG en cuestión nos permite manejar, visualizar y analizar diferentes informaciones espaciales y temporales (terreno, calados, caudales, etc) de un modo muy cómodo y

fácil. Para ilustrar el funcionamiento del modelo GISPLANA se ha aplicado en un suceso real, las inundaciones que tuvieron lugar en noviembre de 1987 en la llanura del río Júcar.

2. BASES TEÓRICAS DEL MODELO HIDRÁULICO

Los ríos y sus llanuras de inundación se zonifican en una serie de bolsas o celdas interconectadas por conexiones hidráulicas. La determinación de esas bolsas no es arbitraria, sino que viene en su mayor parte fijada por los diques, carreteras, ferrocarriles, acequias etc existentes en la llanura. Las hipótesis básicas del modelo son dos: el nivel de agua se asume horizontal en cada celda y el caudal de conexión entre dos celdas es función de sus niveles de agua y el tipo de conexión existente entre ambas. Estas hipótesis implican la no consideración de los términos de energía cinética, ya que se asume que las velocidades en la llanura son, en general, despreciables.

El modelo permite tres tipos de conexiones entre celdas: a) conexión tipo río, se asume que el agua circula como en un canal y se utiliza la fórmula de Manning como ley de intercambio de caudales, b) conexión tipo vertedero, se utilizan las fórmulas tradicionales de vertedero libre o anegado. Esta conexión funciona generalmente cuando el agua tiene que atravesar obstáculos como carreteras, ferrocarriles etc y c) flujo en carga donde se aplican las fórmulas habituales de flujo en carga. Es el caso de las obras de drenaje transversal de las vías de comunicación.

Desde el punto de vista numérico, para calcular en cada instante de tiempo los niveles de agua en las celdas y los caudales que circulan a través de ellas, el modelo resuelve un sistema de ecuaciones que representan la continuidad en cada celda y que tiene un número de ecuaciones igual al número de bolsas o celdas en que se ha discretizado la llanura.

(*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Coordinador Programa Técnico Científico del Área de Hidrología del CERDEX.

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Coordinador Programa Técnico Científico de Ingeniería de Sistemas del CERDEX.



FIGURA 1. Interfaz Gráfica de Usuario del modelo GISPLANA.

Estas ecuaciones se resuelven a partir de una situación inicial una vez introducidas las condiciones en el contorno, que pueden ser de tres tipos: a) nivel en función del tiempo, b)

recarga o descarga en función del tiempo y c) recarga o descarga en función del nivel. El método de resolución numérica utilizado es el de Gauss-Seidel con sobrerelajación.



FIGURA 2. Ejemplo de visualización de niveles.



FIGURA 3. Ejemplo de visualización de tiempos de inundación.

3. EL MODELO GISPLANA

Los SIG pueden no parecer, en principio, un instrumento adecuado para la modelación hidráulica, ya que en su estado actual de desarrollo es difícil resolver con sus comandos propios las ecuaciones diferenciales que gobiernan, por ejemplo, los problemas de flujo en una llanura de inundación. Sin embargo, existe la alternativa de utilizarlos únicamente como instrumento que facilite el pre y post-proceso de la información espacial que maneja el modelo. En esa línea se ha planteado el modelo GISPLANA, cuya estructura y requerimientos informáticos se describen a continuación.

El núcleo hidráulico del modelo GISPLANA está programado en lenguaje FORTRAN-IV, compatible con FORTRAN-77, y está estructurado de la siguiente manera: a) lectura de datos generales, intervalos de tiempo, datos de las celdas y conexiones, leyes de lluvia y estado inicial, b) impresión opcional de los datos de entrada, c) preparación de parámetros, d) ciclo de simulación y e) escritura en fichero de los niveles y caudales simulados (en distintos instantes de tiempo y máximos).

El análisis de la información contenida en los ficheros de entrada de datos y salida de resultados se realiza a través de una interfaz gráfica de usuario (IGU) (fig. 1) desarrollada con el generador XGEN (Buehler, 1991) del U.S. Army Corps, que conecta con GRASS. Las distintas rutinas del modelo se han integrado en shellscripts de UNIX legibles por XGEN y ejecutables mediante widgets de OSF/MOTIF (Open Software Foundation, 1991) sobre Xwindows.

GISPLANA debe instalarse en una estación de trabajo con el sistema operativo HP-UX. Para su ejecución requiere otras aplicaciones auxiliares: a) el GIS GRASS4.1 (U.S. Army Corps of Engineers, 1991), b) XGEN (Buehler,

1991), c) OSF/MOTIF, versión 3.1 (Open Software Foundation, 1991), d) XWINDOWS, versión 5 y e) Compiladores FORTRAN y C.

Algunos ejemplos sobre la información que proporciona GISPLANA son: a) evolución temporal de caudales en una conexión o frontera (conjunto de conexiones entre celdas), b) evolución temporal del calado o de los niveles de agua en una celda, c) niveles de agua en un perfil (conjunto de celdas), d) mapas espaciales de calados o niveles de agua a lo largo del tiempo, e) tiempos en los que la inundación en cada una de las celdas es superior a un calado umbral, f) mapas espaciales de diferencias de niveles entre distintas simulaciones, g) visualización de información complementaria como mapas físicos, modelos digitales del terreno, fotografías, etc.

4. MÓDULOS DE GISPLANA

Las tareas que puede desarrollar el modelo GISPLANA se han agrupado en módulos de manera que su manejo sea sencillo y flexible. Una vez introducidos los ficheros de datos, toda la aplicación se controla interactivamente con ayuda de ventanas y del ratón.

Los distintos módulos son accesibles desde el menú principal de GISPLANA:

- 1) *Ficheros de datos.* Permite la introducción de los nombres de los archivos de datos y resultados con los que se va a trabajar.
- 2) *Ejecución modelo.* Posibilita la ejecución de los cálculos para la simulación del flujo bidimensional a partir de los archivos introducidos.
- 3) *Análisis gráfico.* Se trata de la herramienta gráfica de postproceso para la visualización de los resultados.

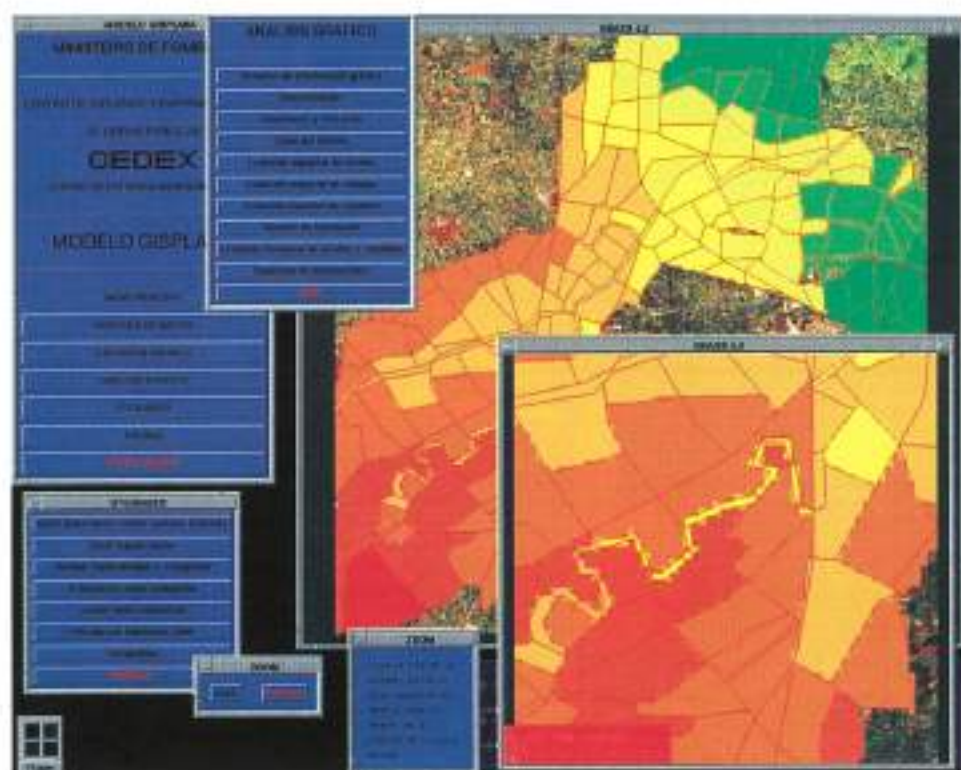


FIGURA 4. Ejemplo de aplicación del zoom en un mapa raster.

- 4) *Utilidades*. Tiene opciones para crear pantallas de visualización, y obtención de datos detallados de los resultados del modelo.
- 5) *Ayudas* Módulo de ayuda y documentación del modelo.

A continuación se describen brevemente los módulos de Análisis Gráfico y Utilidades por ser los de mayor interés.

ANÁLISIS GRÁFICO

Este módulo está diseñado para el tratamiento gráfico de toda la información gestionada por el modelo, tanto de entrada (celdas y conexiones hidráulicas, condiciones de contorno y condiciones iniciales, etc.) como las de salida (niveles y calados, etc.). Se dispone en el menú de las siguientes opciones:

- 1) *Ficheros de información gráfica*. Se introducen los nombres de los ficheros donde se almacena la información gráfica (ficheros vectoriales con el contorno de las celdas y las fronteras, ficheros raster de la zona de estudio, ficheros de definición de la resolución de las coberturas raster, etc.)
- 2) *Discretización*. Permite el despliegue de mapas vectoriales o raster de la discretización en celdas de la llanura de inundación.
- 3) *Conexiones y fronteras*. Muestra gráficamente las conexiones y fronteras definidas en el modelo.
- 4) *Cotas del terreno*. Produce mapas descriptivos del modelo digital de terreno empleado en la modelación.
- 5) *Evolución espacial de niveles*. Los niveles que se muestran (fig. 2) son los niveles de agua respecto al cero de referencia (nivel medio del mar).

Existen dos opciones: *Niveles máximos*: pueden desplegarse como *Dibujos vectorial* o *Dibujos raster*. En el primero aparecen las celdas con el valor del nivel máximo alcanzado en la inundación en cada una de las celdas. En el segundo se despliega el mapa raster de celdas y su valor se conoce por medio de una leyenda. *Niveles instante t*: se selecciona el instante (en horas) que se quiere analizar y se despliegan como en el caso anterior.

Además existe la posibilidad de grabar los resultados en un archivo raster para una futura comparación.

- 6) *Evolución espacial de calados*. Tiene las mismas prestaciones que la opción anterior pero refiriéndose a calados en lugar de niveles. Estos calados se obtienen por diferencia entre niveles y cotas de terreno de las celdas.
- 7) *Evolución espacial de caudales*. Una vez se selecciona el instante (hora) en el que se quieren analizar los caudales, se puede optar por su despliegue en ventana o por la grabación en un archivo para su posterior envío a plotter. El resultado es un dibujo de todas las conexiones entre celdas con el valor del caudal que pasa por ellas en el instante escogido. Como base se tiene el mapa vectorial de celdas.
- 8) *Tiempos de inundación*. Dispone de dos opciones: *Dibujos de tiempos de inundación*: sobre un mapa raster de celdas se muestra el tiempo que ha estado inundada cada celda con un calado superior a un valor umbral determinado (fig. 3). *Dibujos instantes máxima inundación*: sobre un mapa raster de celdas se muestra a qué hora tiene lugar en cada celda el calado máximo. Ambas opciones tienen la posibilidad de representarse gráficamente en ventana con su correspondiente leyenda o de grabar en un archivo para posterior comparación.
- 9) *Evolución temporal de niveles y caudales*. Permite visualizar niveles y calados a lo largo del tiempo en diversas situaciones:

- *Evolución temporal de niveles en un perfil de celdas.* Muestra una gráfica con la evolución a lo largo de la crecida de los niveles o calados en un conjunto de celdas determinado. También pueden obtenerse valores máximos solamente.
 - *Evolución temporal en una celda, conexión o frontera.* Se obtiene la evolución de nivel de una celda, frontera o conexión.
 - *Evolución temporal en una agregación de fronteras.* Permite calcular los caudales que cruzan varias fronteras que estén conexas.
- 10) *Contraste de simulaciones.* El programa realiza una sustracción celda a celda de los valores obtenidos en dos simulaciones, obteniéndose el mapa raster diferencia. Tiene especial interés para comparar simulaciones con distintas condiciones de contorno (hidrogramas de entrada diferentes, etc.), diferentes condiciones iniciales o diferentes tipos de conexiones hidráulicas (cambios en los cauces, en los obstáculos o en las obras de drenaje).

UTILIDADES

En el módulo de *Utilidades* el usuario tiene diferentes opciones para facilitar el empleo del modelo:

- 1) *Abrir/seleccionar/cerrar una ventana GRASS.* Permite abrir simultáneamente varias ventanas para el despliegue de información gráfica, tanto imágenes raster o vectoriales como gráficas.
- 2) *Zoom mapas raster.* Efectúa ampliaciones de las imágenes directamente con el uso del ratón (fig. 4).
- 3) *Perfiles transversales.* Utiliza una herramienta de GRASS que genera perfiles transversales de los mapas raster.

- 4) *Información sobre categorías.* Permite conocer la categoría asociada a cualquier celda de un mapa raster.
- 5) *Listado tabla conexiones.* Muestra un listado donde figuran las conexiones hidráulicas establecidas entre las celdas.
- 6) *Volcado por impresora color.* Realiza el volcado a impresora en color de cualquier ventana de la aplicación, seleccionada con el ratón.
- 7) *Fotografías.* Da acceso a los ficheros con fotografías de la inundación almacenados para ilustración de los niveles alcanzados durante el suceso (fig. 5).

5. CASO DE ESTUDIO REAL

GISPLANA se ha aplicado a la llanura de inundación del río Júcar en el levante español. La llanura se ha discretizado en celdas que representan ríos, canales, etc., procurando reflejar el comportamiento hidráulico de la llanura (fig. 6). Tienen una superficie pequeña (del orden de 3 o 4 km²), fundamentalmente las que no tienen obstáculos y la pendiente de la lámina de agua es suave. Los límites de inundación de la llanura encierran una superficie del orden de 250 km², siendo estos límites poco sensibles a la magnitud de los caudales, cuando se trata de avenidas de período de retorno altos (50 - 500 años). El número total de celdas es de 403 y el de conexiones hidráulicas de 959.

El modelo se ha utilizado para el estudio de la avenida de noviembre de 1987 (CEDEX, 1988b), que tuvo un caudal punta de unos 5000 m³/seg. Con él se ha simulado, además de la situación histórica, diversas situaciones hipotéticas cuyo objeto es analizar el efecto sobre los niveles de inundación de distintas actuaciones en el medio físico, por ejemplo, construcción de diques de protección, mejora de los sistemas de drenaje transversal de las vías de comunicación etc.

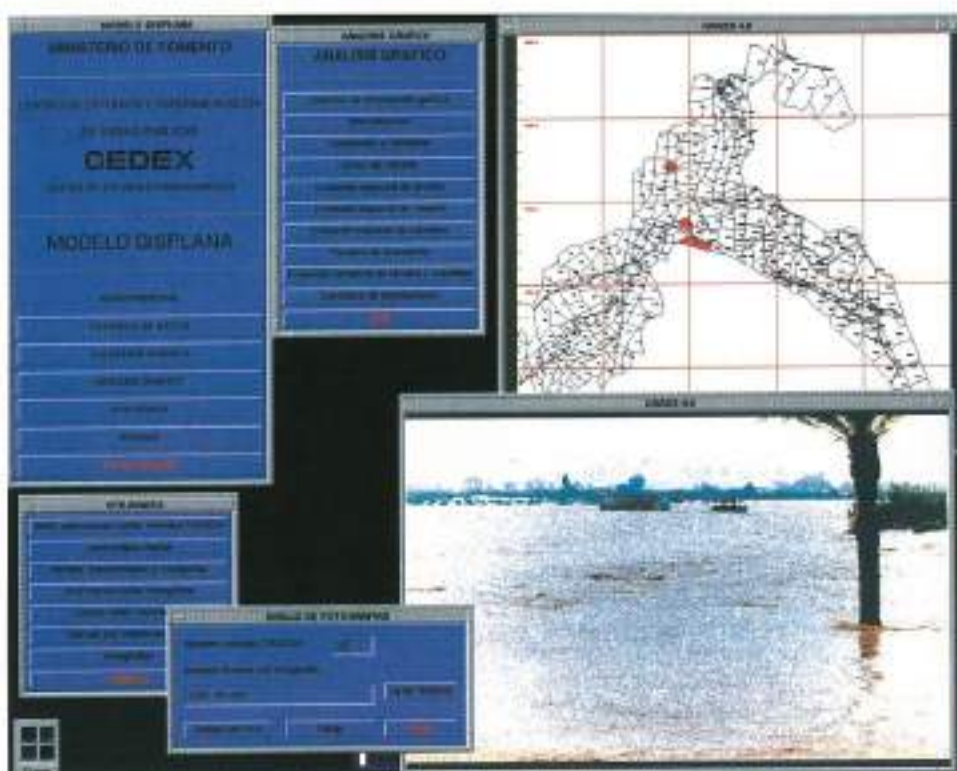


FIGURA 5. Ejemplo de visualización de fotos de la inundación.

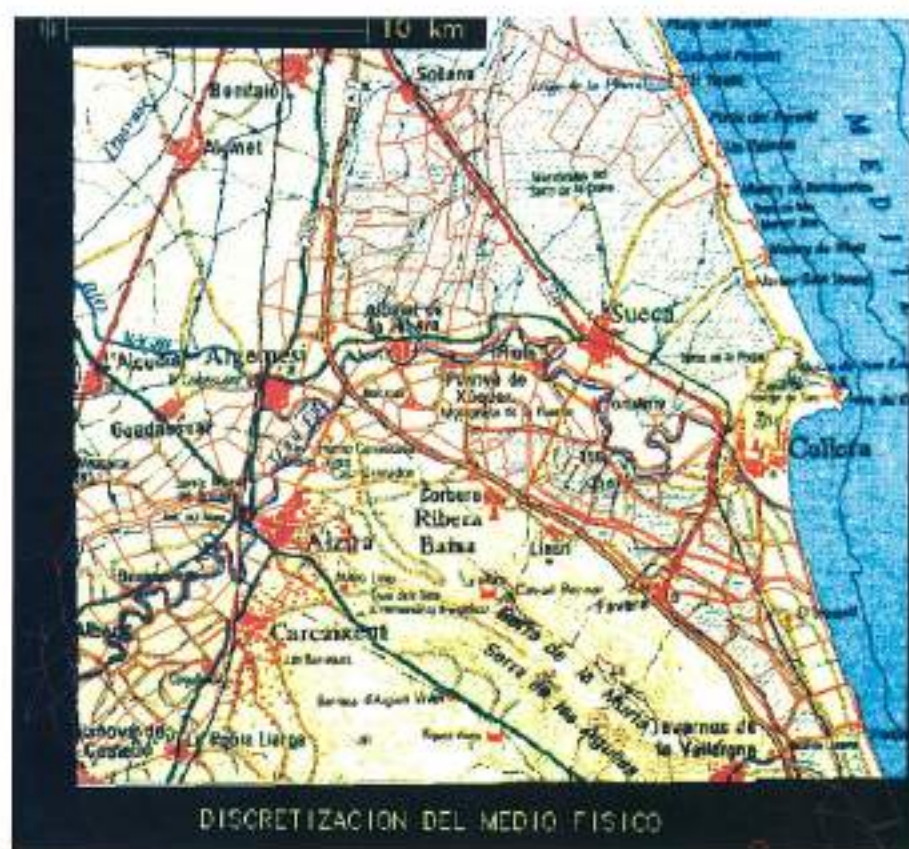


FIGURA 6. Discretización de la llanura de inundación del Júcar.

Para modelar los cauces de los ríos se utilizaron unos coeficientes de Manning que varían entre 0,025 y 0,035. En el caso de cauces revestidos los coeficientes fueron menores (entre 0,014 y 0,017). Los huertos de naranjos se modelaron con coeficientes de Manning más grandes cuanto más predominaban los naranjos, sobre todo los de gran tamaño (coeficientes de Manning entre 0,05 y 0,10). Los arrozales teniendo en cuenta que la avenida estudiada tuvo lugar en noviembre, con el arroz ya recolectado, se estimó que la rugosidad sería pequeña (coeficientes de Manning entre 0,020 y 0,025). Finalmente para los terrenos de huerta se tomó una rugosidad intermedia entre la de los arrozales y la de los naranjos 0,025 y 0,040.

Los coeficientes de descarga de vertedero del modelo no tienen que ser siempre asimilables a los de un vertedero en pared gruesa o delgada porque lo que intentan es simular una pérdida de carga compleja entre dos parcelas. El valor de los coeficientes de descarga libre oscilan, entre 0,35 en las conexiones de vertedero en ferrocarriles, carreteras o autopistas y 0,20 en las conexiones entre celdas de la llanura y cauces con la dirección de flujo perpendicular a la conexión. Los coeficientes de desagüe anegado varían entre 0,90 y 0,25. Las pérdidas en la embocadura se supusieron iguales a 0,5 ($V^2/2g$) y en la desembocadura a 1,0 ($V^2/2g$). Las pérdidas a lo largo de la conexión se despreciaron porque la longitud de la misma es habitualmente pequeña y el diámetro, en las conexiones importantes, es bastante grande con lo que las pérdidas por fricción son de una magnitud pequeña. Por ello se tomaron pérdidas totales de 1,5 ($V^2/2g$).

Las condiciones de contorno existentes fueron de dos tipos: a) Caudales que varían en función del tiempo. Corres-

ponden a los hidrogramas de los ríos que entran a la llanura de inundación. Los ríos principales, en orden de importancia decreciente, son el Júcar (fig. 7), Magro y Verde y b) Niveles de agua constantes en el tiempo. Estas condiciones de contorno corresponden al nivel de agua en la Albufera (laguna conectada con el mar) y al mar. Se supuso que el nivel del mar se mantuvo constante a la cota 0,6 m sobre su nivel medio y que en la Albufera el nivel permaneció a la cota 0,8 m.

El modelo descrito fue calibrado con una avenida anterior (CEDEX, 1988a), que tuvo lugar en 1982, de una magnitud superior a la de 1987, 15.000 m³/seg frente a los 5.000 m³/seg de ésta. La información disponible para la calibración del modelo en la avenida de 1982 fue: a) Niveles máximos alcanzados y a veces tiempo de ocurrencia, b) Niveles observados en función del tiempo y c) Caudales máximos calculados en determinadas secciones: autopista del Mediterráneo, ferrocarril entre las poblaciones de Sollana y Sueca, etc.

Con la avenida de 1987 se pudo validar el modelo con informaciones similares a las utilizadas durante la calibración, comprobándose su funcionamiento con caudales y niveles de menor magnitud. Se realizaron pequeñas modificaciones de los parámetros que sirvieron para afinar la calibración realizada con la avenida de 1982. Los menores caudales de inundación implicaban que la evolución de ésta se viese más afectada por fenómenos locales y por los obstáculos del terreno, lo que obligó a revisar con mayor detalle, en algunas zonas, el modelo digital de elevación del terreno.

En cuanto a la evolución temporal de los caudales, en la figura 8 se representa el hidrograma correspondiente al

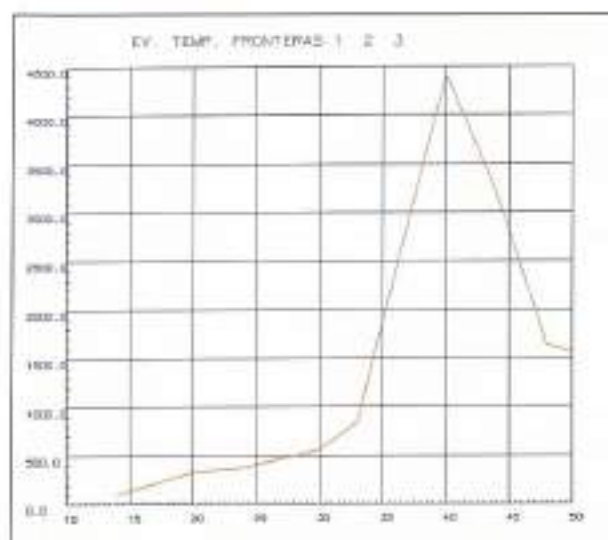


FIGURA 7. Hidrograma del Júcar a su entrada a la llanura de inundación (año 1987).

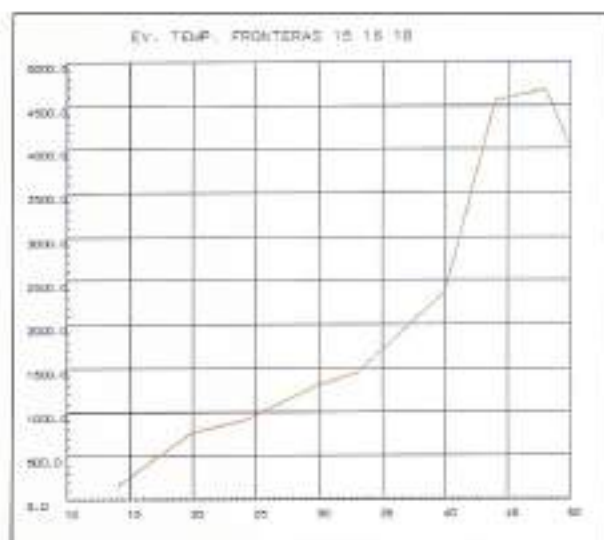


FIGURA 8. Hidrograma en el cruce con la autopista A-7 (año 1987).

cruce con la autopista. La punta de caudal en el cruce con esta fue de unos 5000 m³/seg. En cuanto a la evolución temporal de calados, en la figura 9 se muestra la distribución espacial de calados en varios instantes de tiempo (14, 20, 24 y 40 horas).

Entre las muchas simulaciones realizadas con el modelo para analizar el efecto de distintas alternativas de actuación sobre el medio físico, sirvan como ejemplo las siguientes: a) situación hipotética sin la autopista con la avenida de 1987,

El efecto que la existencia de la autopista produjo sobre los niveles máximos en la avenida de 1987 es apreciable inmediatamente aguas arriba, disipándose rápidamente aguas abajo debido a la notable pendiente de la lámina de agua y a la expansión en abanico del flujo después en la confluencia con el río Magro (fig. 10) y b) situación hipotética con los desagües de la autopista de la situación histórica mas las obras correspondientes al nuevo desagüe próximo al enlace de Algemés y el ensanchamiento del puente sobre el Júcar,

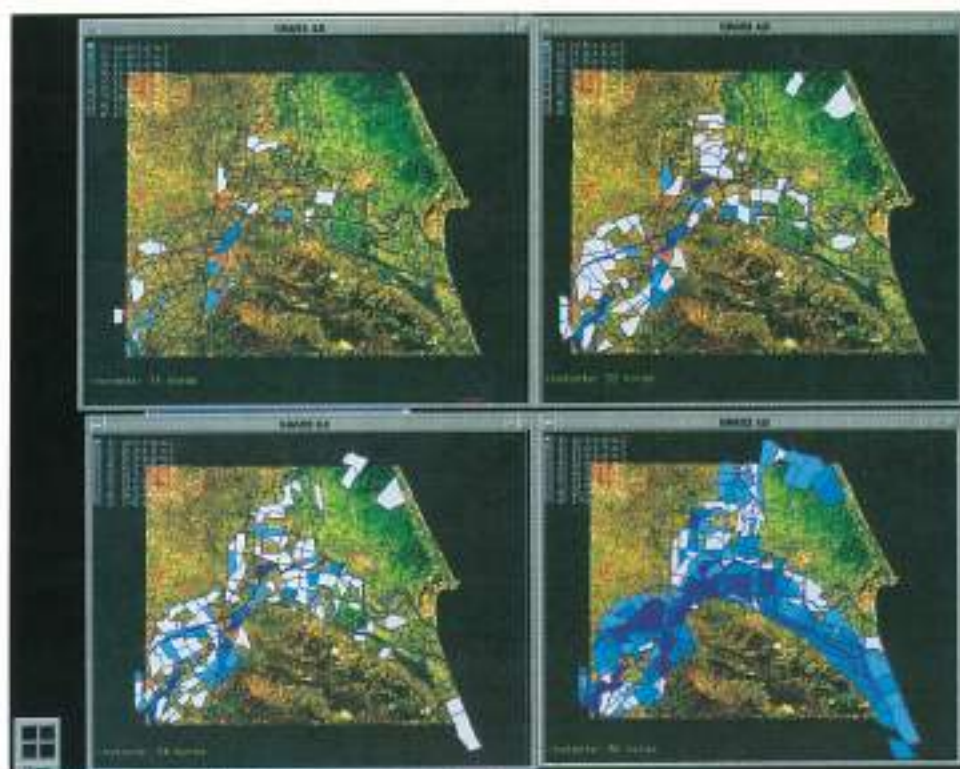


FIGURA 9. Evolución espacial y temporal de calados en la llanura.

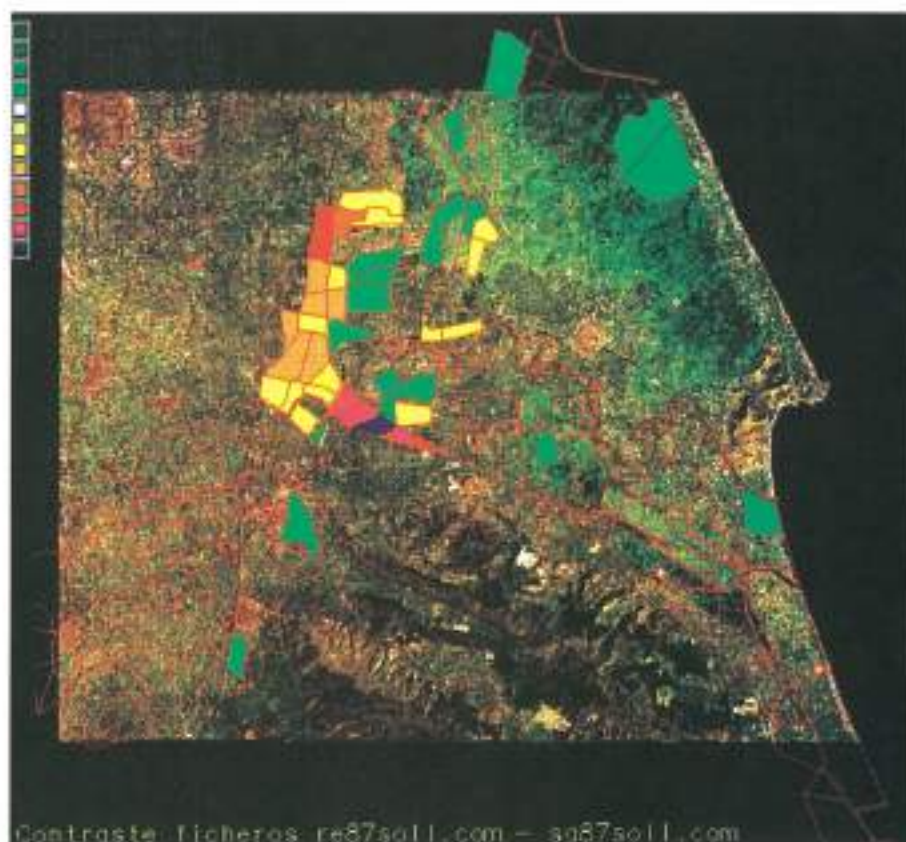


FIGURA 10. Efecto de la autopista sobre los niveles máximos de la inundación.

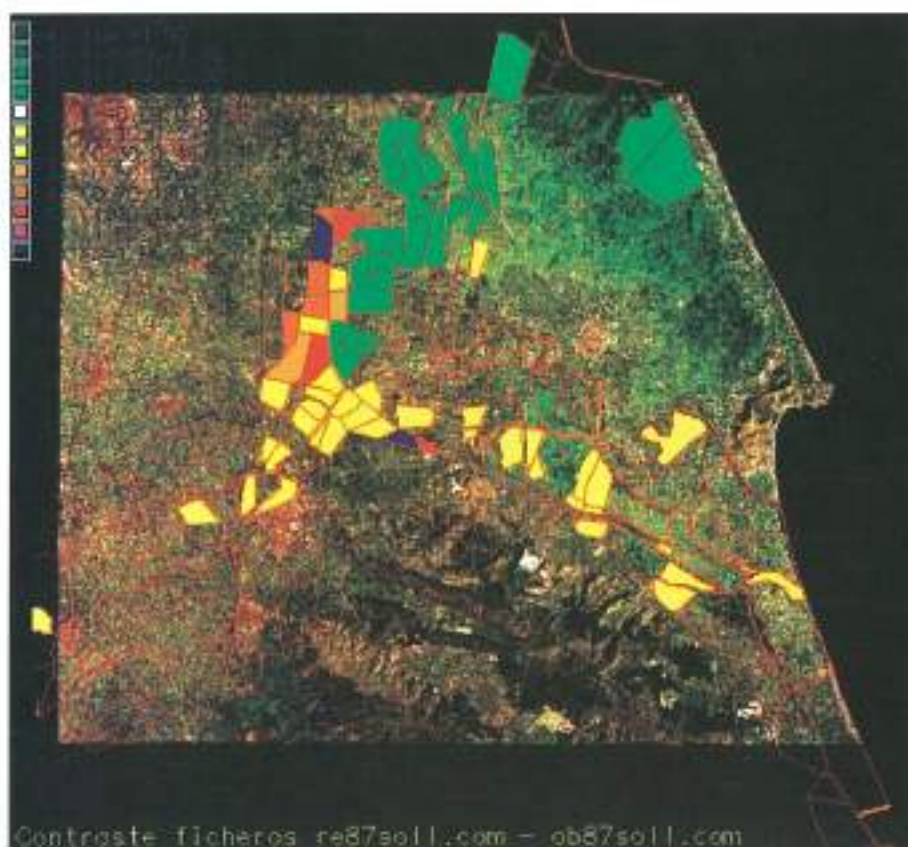


FIGURA 11. Efecto de las nuevas actuaciones sobre los niveles máximos de la inundación.

con la avenida de 1987 (fig. 11). El efecto de estas actuaciones es claramente beneficioso aguas arriba de la autopista, pues la lámina de agua desciende notablemente en la margen izquierda, dejando prácticamente en seco alguna de sus zonas. Por otra parte la posible influencia negativa en lo que se refiere a aumentos de niveles aguas abajo es pequeña. Con estas obras y se según desprende de análisis de las figuras 10 y 11, se tiende a restituir el régimen de flujo que tendría lugar si no existiese la autopista.

En la actualidad se está llevando a cabo, a petición de la Confederación Hidrográfica del Júcar y mediante un Convenio de colaboración entre el CEDEX y la UTE formada por INYPSA y SEGURPRESA, la actualización de la modelación de la llanura del Júcar incorporando toda la información disponible de la zona desde 1987.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUEHLER, K. A., 1991 "Xgen: An application interface generator program". USA CERL. U.S. Army Corps, 1991
CEDEX, 1988a "Estudio en modelo matemático de las inundaciones de Octubre de 1982 en la Plana del Júcar". Informe final. Convenio CEDEX y D.G.O.H. Octubre 1988.

CEDEX, 1988b "Estudio hidrológico e hidráulico de la crecida de Noviembre de 1987 en la Ribera del Júcar". Informe final. Convenio CEDEX-D.G.C. Diciembre 1988.

ESTRELA, T. y QUINTAS, L., 1994. Use of a GIS in the modelling of flows on floodplains. 2nd International Conference on River Flood Hydraulics. Edited by W.R. White and Jacqueline Wats. H.R. Wallinford. Wiley Wats Eds. Pages 177-190. England.

Fundación Agustín Bethencourt, 1989. El modelo PLANA. Convenio "Desarrollo de los trabajos sobre modelos matemáticos REBOLSA y PLANA relacionados con los convenios previstos con la DGC sobre inundaciones del Júcar". Enero, 1989.

Hydrologic Engineering Center, USA., 1982 "HEC-2 Surface Profiles. Users Manual". September 1982.

Hydrologic Engineering Center, 1991. "F-Tools: Floodplain Analysis Tools. User Documentation. Version 1.7". May 1992.

Open Software Foundation, "OSF/Motif. Release 1.1, Programmer's Reference". Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1991

U.S. Army Corps of Engineers, "Manual for the Geographical Resources Analysis Support System GRASS. Version 4.0". CERL ADP Report N-87/22. July 1991.



*Depurar
es
generar
vida*



GENERALITAT VALENCIANA
CONSELLERIA D'OBRES PÚBLIQUES, URBANISME I TRANSPORTS



Anunciamos nuevos modelos que hacen de nuestra gama técnica la más potente de la industria.

Potente, porque abarca desde Estaciones de Trabajo de sobremesa hasta los sistemas de gama alta, capaces de trabajar hasta con 64 procesadores en paralelo.

Potente, porque es la gama más amplia totalmente compatible con todo tipo de aplicaciones técnicas en la industria.

Clase B. Nuevas Estaciones de Trabajo con inigualable relación precio/prestaciones y con altas capacidades gráficas. Idóneas para Diseño en 2 y 3D.

Clases C y J. Estaciones de Trabajo con el potente procesador PA8000 de 64 bits. Reducen en un 60% el tiempo de cálculo de aplicaciones computacionales y satisfacen las necesidades gráficas en 3D más exigentes. Ideales para CAD, GIS, Ingeniería Civil, Obras Públicas, Arquitectura.

Clases K, S y X. Servidores técnicos que incorporan desde 4 hasta 64 procesadores PA8000. Su potencia permite acelerar las tareas de computación intensiva más complejas y terminar en minutos cálculos que en otras plataformas precisan días.

Solicite más información sobre la gama técnica de Hewlett-Packard llamando al: ☎ (91) 631 11 11.

Estaciones de Trabajo HP VISUALIZE			
Modelo	B 132	B 160	C 180
Procesador	PA7300LC	PA7300LC	PA8000
SPECint 95	5,9	7,8	11,8
SPECfp 95	6,2	7,8	20,2

Servidores Técnicos HP		
Modelo	Clase S	Clase X
Procesador	PA8000	PA8000
CPU's	hasta 16	hasta 64
GB/DPS	11	46