

# USO DE MODELOS UNI- Y BIDIMENSIONALES EN LLANURAS DE INUNDACIÓN. APLICACIÓN AL CASO DEL RÍO TAJO EN TALAVERA DE LA REINA.

Juan Pedro Martín Vide<sup>1</sup>, Susana López Querol<sup>1</sup>, Pedro Martín Moreta<sup>1</sup>, Gonzalo Simarro Grande<sup>1</sup> y Gerardo Benito Ferrández<sup>2</sup>

## Resumen:

En este trabajo se presenta la experiencia de uso de un modelo hidráulico unidimensional (Hec-Ras) y uno bidimensional (Feswms) en el estudio de la inundabilidad de Talavera de la Reina por el río Tajo. Se revisan los fundamentos y se analizan las aplicaciones de estos modelos, extrayendo las enseñanzas prácticas de sus virtudes e inconvenientes. La avenida de 1947 en Talavera, que teóricamente superó los 7000 m<sup>3</sup>/s se analiza con detalle.

**Palabras clave:** Modelos hidráulicos; Inundación; Registros históricos; Ríos Tajo y Alberche; Talavera de la Reina.

## INTRODUCCIÓN

Los estudios de inundabilidad son esenciales en la planificación hidrológica, en particular en los planes y proyectos de defensa frente a inundaciones, así como, cada vez con más frecuencia, en estudios y proyectos para la autorización de actividades o el emplazamiento de infraestructuras o edificaciones cerca de los ríos. Entendemos por estudio de inundabilidad la determinación de las áreas inundadas, y de las variables hidráulicas de la inundación como la altura y la velocidad del agua, en distintas hipótesis de crecida del río, caracterizadas por su probabilidad de ocurrencia o periodo de retorno.

La metodología empleada en estudios de inundabilidad ha evolucionado muy rápidamente en los últimos años, gracias a la generalización del uso de los modelos matemáticos. Antes de esta extensión de los modelos, sólo se utilizaban en la práctica fórmulas de régimen uniforme aplicadas con secciones

tipo, es decir como si se tratara de cauces prismáticos. Los modelos unidimensionales de régimen permanente gradualmente variado trajeron como mejora la facilidad de usar todas las secciones del río, es decir considerar los cauces como no prismáticos, con movimiento no uniforme. De estos modelos, el llamado HEC-2 y posteriormente HEC-RAS se ha convertido virtualmente en “universal” en esta clase de aplicaciones. Más recientemente los modelos bidimensionales empiezan a utilizarse también, para obtener una mejor descripción del flujo y del campo de velocidades. Entre ellos, el llamado SMS FESWMS-2DH se utiliza con frecuencia. La utilidad de ambos modelos, uni- y bidimensional, se ha multiplicado por el hecho de ejecutarse en versiones “amigables” en ordenadores personales.

Los autores han tenido la oportunidad de estudiar un caso destacado, el del río Tajo en Talavera de la Reina (Toledo), utilizando uno y otro tipo de

<sup>1</sup> Escuela T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. Univ. de Castilla-la Mancha. Avda. Camilo J. Cela, s/n. 13071 Ciudad Real. Teléfono: 926 29 53 00 ext. 3263 y 3291. E-mail: vide@ehma.upc.es, mslopez@ccp-cr.uclm.es, pjmartin@ccp-cr.uclm.es, gsimarro@ccp-cr.uclm.es

<sup>2</sup> CSIC, Centro de Ciencias Medioambientales. C/ Serrano 115dupl. 28006 Madrid. Telf.: 91 562 50 20 ext. 213. E-mail: benito@cma.csic.es

Artículo recibido el 10 de abril de 2002, recibido en forma revisada el 3 de septiembre de 2002 y aceptado para su publicación el 19 de diciembre de 2002. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las “Instrucciones para autores”. En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

modelo, tratando de extraer de ellos conocimientos o enseñanzas prácticas de sus virtudes e inconvenientes. Estas enseñanzas, provenientes tanto de aspectos fundamentales del cálculo como de aspectos más instrumentales de cada modelo, se presentan como objetivo principal de este artículo. Las informaciones presentadas en el artículo se consideran también relevantes para el caso particular de la inundabilidad de Talavera de la Reina.

### LA INUNDABILIDAD EN TALAVERA DE LA REINA

Talavera de la Reina, con 85.000 habitantes, segunda ciudad en población de la comunidad de Castilla-la Mancha, se encuentra situada a orillas del río Tajo, en donde la cuenca vertiente del río asciende a 31.066 km<sup>2</sup>. El cauce principal del río en la ciudad tiene unos 300 m de anchura, mientras la extensión de la planicie inundable alcanza varios kilómetros. El tramo de interés es desde la desembocadura del río Alberche, afluente importante por la derecha (con una cuenca de 4.100 km<sup>2</sup>), hasta el extremo inferior de la denominada Isla Grande (fig. 1), a lo largo de unos 8 km de río aproximadamente. En esta distancia el curso del Tajo es sinuoso, pues el cauce en planta puede describirse como una morfología meándrica con algo más de una longitud de onda de desarrollo. En estos 8 km el río desciende unos 12 m de cota, de modo que la pendiente media es del 1.5 por mil. En el extremo superior del tramo, el río Alberche forma un delta de arenas

al desembocar en el Tajo. Aguas abajo desemboca el pequeño arroyo Chascoso por la margen izquierda y ya en la ciudad el arroyo de la Portiña, por la derecha.

La influencia antrópica sobre el río es muy grande. En primer lugar, la ciudad histórica (cuya primera muralla es del año 963) se asienta en la orilla derecha del río, sobre una pequeña elevación del terreno. Su crecimiento posterior fue a modo de coronas concéntricas, pero la gran extensión de la ciudad hasta sus dimensiones actuales, ocupando la llanura de inundación, comenzó en 1960 (fig.1). Cabe destacar que se realizó un relleno antrópico, para elevar el terreno, en un arrenal o playa aguas arriba de la ciudad (hoy recinto ferial). Por otra parte, en la llanura izquierda se ha producido un cierto desarrollo suburbano.

En el cauce existen dos pequeños aprovechamientos hidroeléctricos de un siglo de antigüedad, el primero de los dos en desuso, situados en sendos brazos de dos islas del río (la segunda es la Isla Grande). Asociados a estos saltos existen 5 pequeños azudes (3 para el primer salto y 2 para el segundo), cuya función es derivar o conducir el agua hacia el brazo y conseguir una cota de agua para el aprovechamiento. Las alturas sobre el cauce son del orden de 6 m como máximo. Existen tres puentes sobre el Tajo en Talavera: el puente antiguo o romano, destruido parcialmente, el puente de hierro de 1908 y el puente nuevo de 1973.

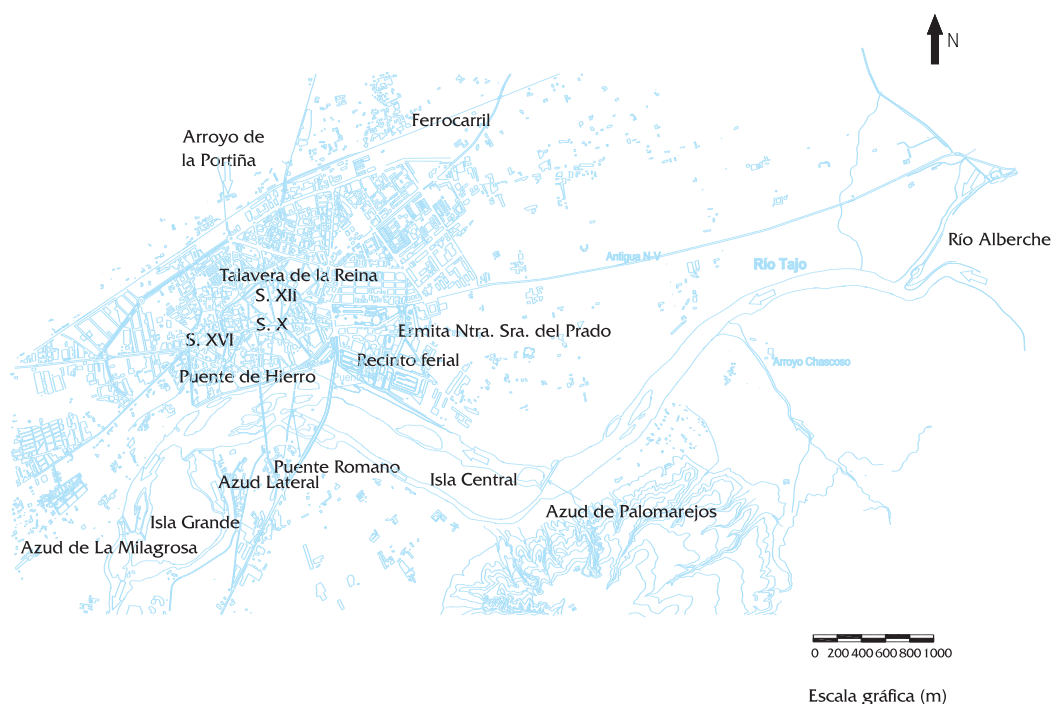


Figura 1. Plano del área de estudio, desde el Alberche hasta la Isla Grande

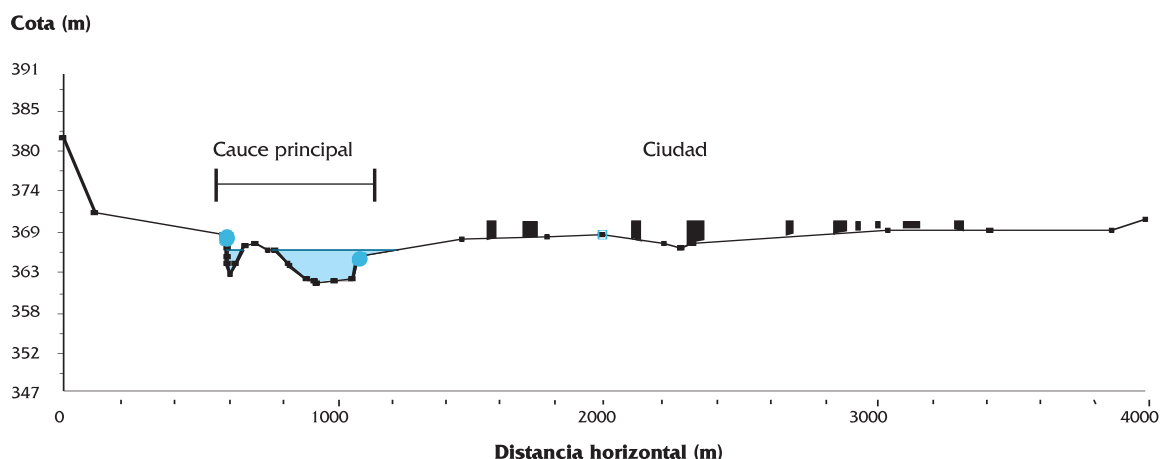


Figura 2. Sección transversal de cálculo, donde se señalan cauce principal y llanuras, así como las edificaciones de la ciudad.

Los episodios más notables de inundación en Talavera en el siglo XX ocurrieron en 1912, 1936, 1947, 1955, 1970 y 1979. Para el más importante, el de 1947, se tiene la cifra de 7320 m<sup>3</sup>/s como caudal punta (Confederación Hidrográfica del Tajo). Se inundaron extensas partes de la ciudad, incluida la carretera que quedó cortada. Los ojos del puente de hierro quedaron cegados.

## USO DEL MODELO HEC-RAS

### Sobre los fundamentos

Como es bien sabido, un modelo unidimensional como HEC-RAS calcula el perfil de la superficie libre en régimen permanente gradualmente variado (en la actualidad, la versión 3.0 de este programa admite régimen variable, aunque en este caso no ha sido empleado, debido a la no disponibilidad de los datos de hidrogramas de las avenidas estudiadas). Para el cálculo en régimen permanente, aplica la ecuación de la energía (o de Bernoulli) entre dos secciones transversales consecutivas del río, teniendo en cuenta las pérdidas de energía continuas o de rozamiento y las pérdidas de energía localizadas. El resultado del modelo es una altura de agua o calado y una velocidad media en cada sección.

Una limitación del modelo es considerar el fondo fijo y el transporte sólido del río sin efecto sobre el movimiento del agua (lo que se denomina cálculo de “agua clara”). Como la pendiente del Tajo es pequeña, el régimen es lento y de ahí el transporte sólido es poco cuantioso, por lo que la hipótesis de agua clara es razonable. El fondo puede sin embargo descender (erosionarse) durante las crecidas con el efecto de aumentar el área de flujo y la

capacidad hidráulica del río, cosa que no tiene en cuenta el modelo. Por otra parte, el cauce y las llanuras del Tajo pueden experimentar erosiones o sedimentaciones a largo plazo, que cambien sustancialmente el riesgo de inundación de la ciudad. Por ello, tratamos de pronosticar, al final del artículo, la evolución de la cota del cauce.

Cuando existen un cauce principal y unas llanuras de inundación bien diferenciados, se puede introducir la posición de las orillas que los separan. En tal caso, así como siempre que existen distintos coeficientes de rugosidad en un área, el modelo pondera la resistencia al flujo de las distintas partes para obtener una única pendiente motriz, empleada en el cálculo de las pérdidas de energía continuas. Este aspecto es importante en el estudio de río del Tajo en Talavera que presenta un cauce y unas llanuras bien diferenciados (fig. 2).

La elección de las secciones transversales a partir de la topografía y la batimetría del cauce requiere cierto criterio. En principio se toman perpendiculares al cauce principal y a una distancia no menor que una vez la anchura. Es preferible hacerlas coincidir con los lugares más anchos y más estrechos, así como con los lugares característicos (puentes, azudes), para que las interpolaciones que se realizan durante el cálculo sean más correctas. Las secciones trazadas por el cauce principal se continúan en las llanuras, pero no en línea recta, para evitar que las líneas que definen las secciones se corten. Esto es frecuente en ríos de llanura, como en el caso de Talavera (fig. 3).

El modelo puede manejar mucha información geométrica, es decir representar una topografía compleja. En las secciones transversales pueden in-

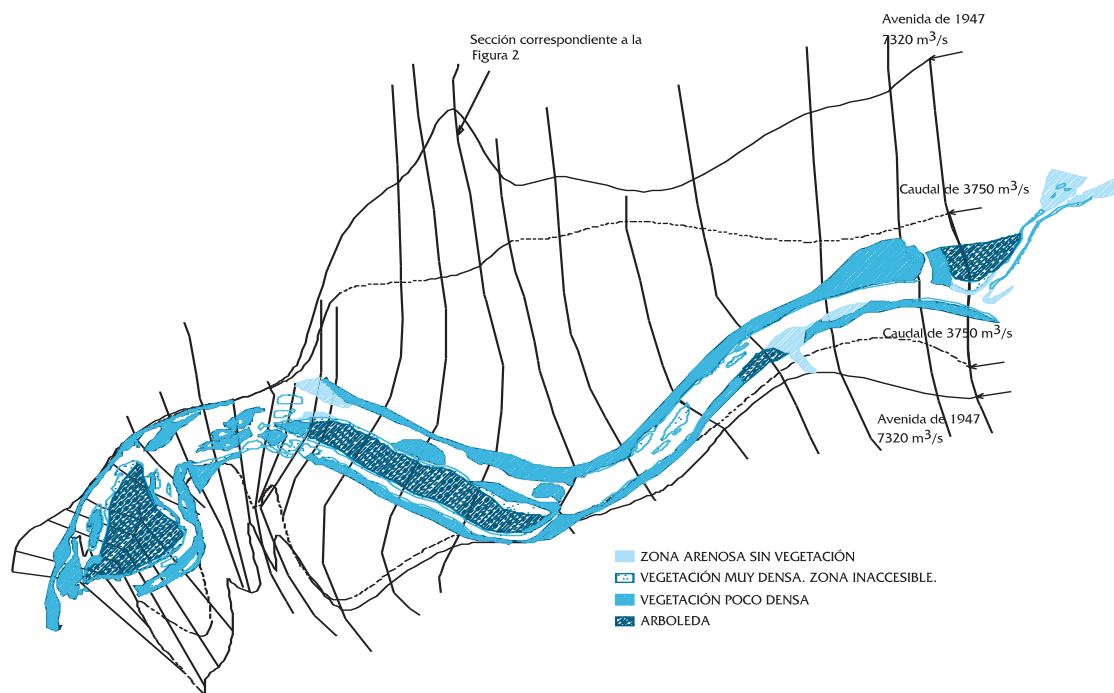


Figura 3. Planta del tramo de estudio. Se señalan las líneas de inundación de la avenida de 1947 (7320 m<sup>3</sup>/s) y de 3750 m<sup>3</sup>/s, así como la traza de las secciones transversales y las clases de vegetación en las orillas del cauce central.

producirse los detalles geométricos que se desee. Por ejemplo, en las secciones que cortan la ciudad, las edificaciones se representan como áreas bloqueadas o no efectivas para el flujo (fig. 2). El defecto de este procedimiento es que trata los edificios sin tener en cuenta que su agrupación favorecería al flujo (como sería el caso si las calles fueran perpendiculares a la sección transversal) o lo dificultara (edificios colocados en damero). También puede el modelo manejar mucha información referente a rugosidad.

### Sobre la aplicación

Una condición de contorno aguas abajo dada en forma de nivel de agua, asociada al caudal de estudio, es suficiente para realizar el cálculo con el modelo, debido a que el régimen es lento. A unos 34 km aguas abajo de la Isla Grande, contorno inferior del tramo estudiado, se encuentra la presa de Azután construida en 1969. A partir de las características de su aliviadero se ha realizado el cálculo de esos 34 km con HEC-RAS para distintos caudales circulantes. El resultado se expresa como una “curva de gastos” o relación caudal-calado que sirve como la condición de contorno buscada. Del mismo modo, para fechas anteriores a 1969 se hace el cálculo comenzando con el calado normal a 34 km de distancia. El resultado, prácticamente coincidente en ambos casos, significa que el remanso

de la presa no alcanza al área de estudio y sirve también como análisis de la sensibilidad de la condición de contorno a las hipótesis que se hagan sobre el cauce de aguas abajo.

De las islas presentes en el cauce del Tajo, la Isla Grande es la mayor y sólo queda sumergida para caudales grandes, del orden de 2500 m<sup>3</sup>/s. Aun sumergida, pensamos que su papel de división del caudal en dos corrientes justifica tratarla de modo especial. Se divide el flujo en dos brazos, mediante una frontera imaginaria trazada por los puntos más altos de la isla (fig. 3), y se reparte el caudal entre ellos en una proporción arbitraria. Esta proporción es objeto de iteración hasta igualar el valor de la energía en la sección de aguas arriba, donde se inicia la bifurcación en dos brazos, condición de “compatibilidad” necesaria del cálculo. Esto se hace en cada aplicación del modelo.

Los azudes se han representado en el modelo. Su cota de coronación se ha obtenido en el campo con GPS. Su longitud, medida sobre plano, se proyecta sobre la sección transversal, pues en ocasiones son azudes laterales (fig.1). El otro parámetro de importancia en su funcionamiento hidráulico es el coeficiente de desagüe, estimado aproximadamente a partir de observaciones de campo y de fotografías históricas. Sin embargo, para los caudales de avenida estudiados los azudes se encuentran su-

mergidos desde aguas abajo por los niveles de agua, al tiempo que la longitud del azud se hace muy pequeña en comparación con la de la sección completa formada por el cauce y las llanuras inundadas. Por estas razones, el resultado del cálculo es apenas sensible al valor del coeficiente de desagüe.

De los tres puentes que cruzan el Tajo a su paso por Talavera de la Reina el que más efecto tiene sobre el flujo es el Puente Romano (en ruinas), debido a la fuerte reducción de la sección del río (fig.4). Es posible que la cercanía entre los puentes cree un efecto de interacción que con un modelo unidimensional sea difícil de representar. Este efecto no se ha tenido en cuenta, analizándose cada puente por separado, debido a que la gran influencia que tiene el Puente Romano sobre los niveles de agua hace mínima la afección ocasionada por los otros dos, que tienen pilas estrechas y luces amplias y además los caudales máximos están lejos de la cota inferior de sus tableros. Los coeficientes de pérdidas de carga localizadas del Puente Romano se han tomado de una investigación de laboratorio sobre puentes con arcos de medio punto (Martín-Vide et al, 2002). En esta investigación se han encontrado unos valores de los coeficientes de contracción y expansión para los dos caudales representados en la figura 4, que han sido aplicados en la ecuación de la energía tanto en lámina libre como en presión. Como contraste de los resultados, se han usado vistas aéreas del Puente Romano casi inundado, publicadas en la prensa al día siguiente de la crecida de 1947.

Los valores del coeficiente de rugosidad de Manning influyen decisivamente en los resultados del modelo. La naturaleza granular de los fondos y de los depósitos aluviales del río determina en gran

medida la rugosidad del cauce principal. Otro factor importante en la rugosidad del cauce y las orillas es la vegetación. Se ha realizado un trabajo de campo para precisar ambos factores, reconociendo y muestreando los depósitos aluviales del río y describiendo las formaciones vegetales (fig. 3). Se han distinguido depósitos de arena, con toma de 11 muestras a mano, y depósitos de grava, muestreados en 6 catas. El tamaño medio de las arenas es 1.06 mm y el de las gravas es 33.6 mm. La arena que se encuentra en las muestras de grava tiene aproximadamente la misma granulometría que la arena de depósitos homogéneos de arena. La vegetación se ha clasificado por su densidad, tomando como criterio la accesibilidad de una persona. Los coeficientes de rugosidad que resultan de aplicar la fórmula de Strickler para los materiales granulares y otras expresiones para la vegetación (Martín-Vide, 1997) son 0.026 y 0.060.

## Sobre los resultados

El resultado principal de la aplicación de un modelo unidimensional es el perfil longitudinal de la superficie libre. Los resultados también se pueden representar como plano de inundación trasladando los perímetros mojados de las secciones a la figura del río en planta (como en la fig.3). Al revisar las fuentes de información sobre inundaciones en Talavera se encontraron noticias de lugares alcanzados por el agua (en particular la ermita del Prado, fig.1). Además, durante el trabajo de campo, se han descubierto dos azulejos que señalan la altura alcanzada por el agua en 1947 en las centrales hidroeléctricas.

Estos datos se han usado como contraste de los resultados del modelo. Las señales en los azule-

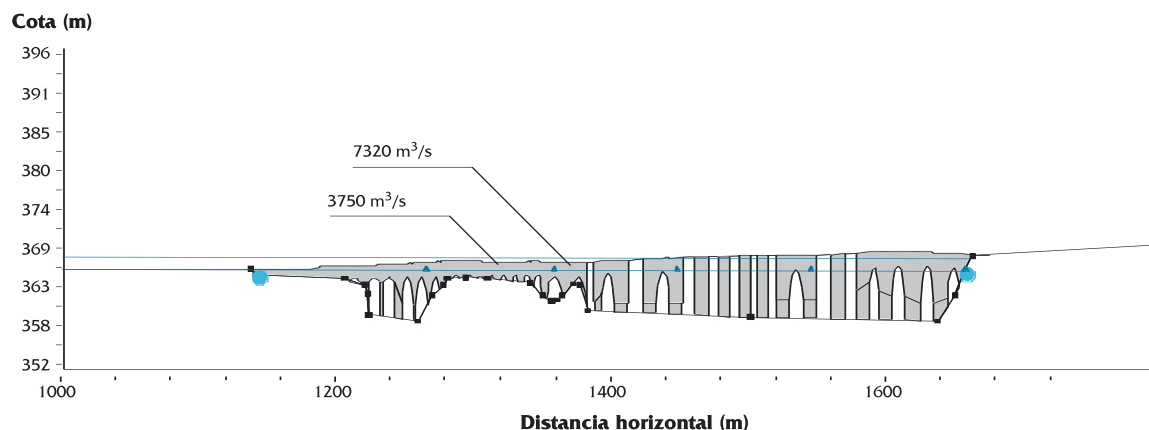


Figura 4. Sección transversal por el puente romano (con distorsión).

Los niveles de agua señalados son vistos desde aguas abajo, para 7320 y 3750 m<sup>3</sup>/s.



jos, sin embargo, no se ajustan bien al perfil de la superficie libre. El caudal punta de  $7320 \text{ m}^3/\text{s}$  hubiera dado niveles de agua bastante mayores que los registrados (fig. 5), aun usando las hipótesis más favorables para un buen ajuste (por ejemplo una rugosidad alta). Considerando el caudal como variable de ajuste, el mínimo error entre los cálculos y las dos señales se da con un caudal de  $3750 \text{ m}^3/\text{s}$  (fig. 5). Hay que indicar también que la información de campo no está libre de incertidumbres porque las señales se encuentran muy cerca de dos de los azudes y en las paredes de las edificaciones. Sólo mediante un modelo físico que reprodujera las particularidades locales del flujo se podría convertir exactamente el nivel de las señales en nivel de agua medio en la sección transversal. En la fig. 3 se muestra las áreas que habrían quedado inundadas si en 1947 el caudal hubiera sido de  $7320 \text{ m}^3/\text{s}$  y si hubiera sido de  $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ , caudal éste último más probable atendiendo al cálculo hidráulico.

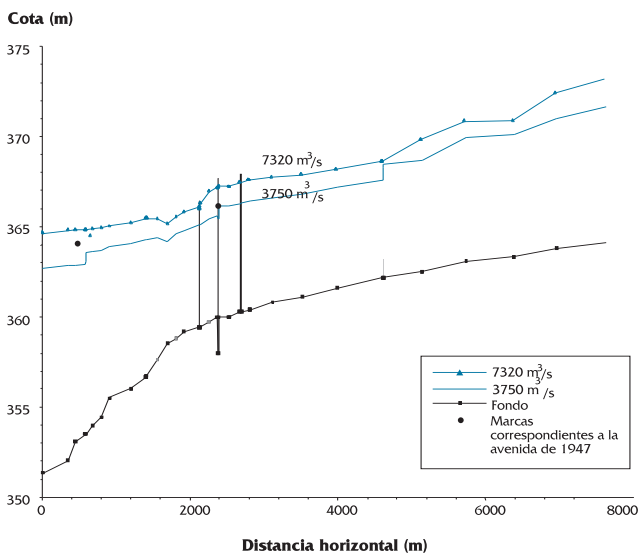


Figura 5. Perfiles de la superficie libre correspondientes a  $7320$  y  $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ , señalándose las marcas de los azulejos.

## USO DEL MODELO SMS FESWMS-2DH

### Sobre los fundamentos

Un modelo bidimensional como SMS FESWMS-2DH calcula el perfil de la superficie libre y las dos componentes en el plano horizontal ( $v_x, v_y$ ) del vector velocidad. Para ello, utiliza las ecuaciones de conservación de la masa y de conservación de la cantidad de movimiento en el plano horizontal, en donde  $v_x, v_y$  son el promedio de la

velocidad en la dirección vertical. Mediante este promedio vertical de la velocidad, se evita considerar el flujo como tridimensional. Para aplicaciones en ríos, en donde las longitudes y anchuras son mucho mayores que los calados, esta simplificación de la realidad suele ser aceptable, con la excepción de los lugares de gran curvatura.

Las ecuaciones de cantidad de movimiento contienen las tensiones tangenciales turbulentas, en los contornos y en el seno del fluido. Para definir las primeras se usa la fórmula de Chézy o de Manning y para las segundas el concepto de viscosidad turbulenta. El modelo resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales por el método de los elementos finitos, creando en primer lugar una malla de elementos (triangulares o rectangulares) cuya densidad se puede elegir para tener mayor resolución donde más interese (en el cauce principal, por ejemplo). El cálculo es implícito en el tiempo, es decir en cada instante se ha de resolver un sistema de ecuaciones algebraicas en los nodos, lo cual se hace con el esquema iterativo de Newton-Raphson.

Las condiciones de contorno en el contorno de aguas arriba y en el de aguas abajo son una de las limitaciones del modelo. En régimen lento, aguas arriba se introduce el caudal total circulante y aguas abajo el nivel de agua, como sería también el caso en un modelo unidimensional. Sin embargo, de un modelo bidimensional se debería esperar más posibilidades al especificar las condiciones de contorno. Es sabido que el nivel de agua en una sección transversal a la corriente de un río no es en realidad constante, sino probablemente más bajo en donde la corriente es más veloz. Análogamente, la velocidad en una sección transversal, además por supuesto de no ser constante, no está necesariamente en proporción a la resistencia al flujo en la sección (dada por ejemplo por el producto  $n^{-1}AR_h^{2/3}$  según la fórmula de Manning), sino que puede venir dada por particularidades del flujo aguas arriba de dicha sección. El modelo utiliza en todo momento un único nivel de agua aguas abajo y un reparto del caudal aguas arriba en proporción a la resistencia al flujo.

### Sobre la aplicación

Se ha preferido una malla triangular que distribuye los puntos en la llanura sin prejuzgar la dirección principal del movimiento, como en una cuadrangular. En los vértices (o nodos) de los elementos es donde se define la cota del cauce (y la rugosidad). Por ello la información geométrica no se organiza por secciones transversales ni puede tener

tal cantidad de particularidades como en el modelo HEC-RAS. La reproducción exacta de obstáculos como las manzanas de la ciudad es prácticamente imposible, porque requeriría una definición totalmente ad-hoc de la malla. La misma dificultad se encuentra para introducir puentes y azudes, que no se han incluido en la aplicación bidimensional porque se aumentaría el número de elementos y el tiempo de cálculo, dificultando la convergencia.

El modelo necesita una condición inicial para empezar el cálculo. A falta de más información se usa una superficie libre horizontal y una velocidad nula en todo el dominio de estudio. A partir de ahí, el modelo calcula los errores que se cometen en las ecuaciones e iterativamente corrige los valores anteriores del nivel y de las velocidades  $v_x$ ,  $v_y$ , hasta reducir al mínimo el error. El control de la convergencia hacia la solución se hace por medio de dos parámetros: el número de iteraciones y un factor que multiplica al incremento de las variables entre cada iteración y la siguiente. Un factor pequeño significa ser muy prudente para evitar la inestabilidad del cálculo, pero a costa de necesitar un gran número de iteraciones. Con un factor grande es mayor el riesgo de inestabilidad pero menor el número de iteraciones. Como el número máximo de iteraciones es un dato de entrada, el modelo puede dar un resultado que todavía no haya convergido, es decir erróneo. Este resultado, siendo más próximo a la

solución, puede usarse a continuación como condición inicial para repetir el cálculo.

El modelo trabaja mejor con caudales lo bastante grandes para mantener inundada toda la malla. Este es el sentido de tomar como condición inicial una superficie horizontal alta. El problema asociado a caudales menores son los elementos que se secan cuando el cálculo da calados muy pequeños en iteraciones intermedias. Cuando la cota de un nodo queda más alta que el nivel de agua, todos los elementos que confluyen en el nodo se consideran secos, lo cual deja secos también los elementos adyacentes. El campo de velocidades se transforma para “sortear” el área seca.

La convergencia y la introducción de las condiciones de contorno son los mayores inconvenientes encontrados al usar el modelo SMS FESMWS-2DH. La experiencia dice que debe verificarse que el resultado del cálculo es independiente de los parámetros de control de la convergencia y que es sensible a los cambios en las condiciones de contorno. Un modelo comercial como éste prefiere dar una respuesta, pese a ser algo errónea, antes que reconocer que no puede responder. Sin embargo, las mallas irregulares, las pendientes locales elevadas, ciertas condiciones de contorno o condiciones iniciales muy alejadas de la solución pueden tener problemas de convergencia.

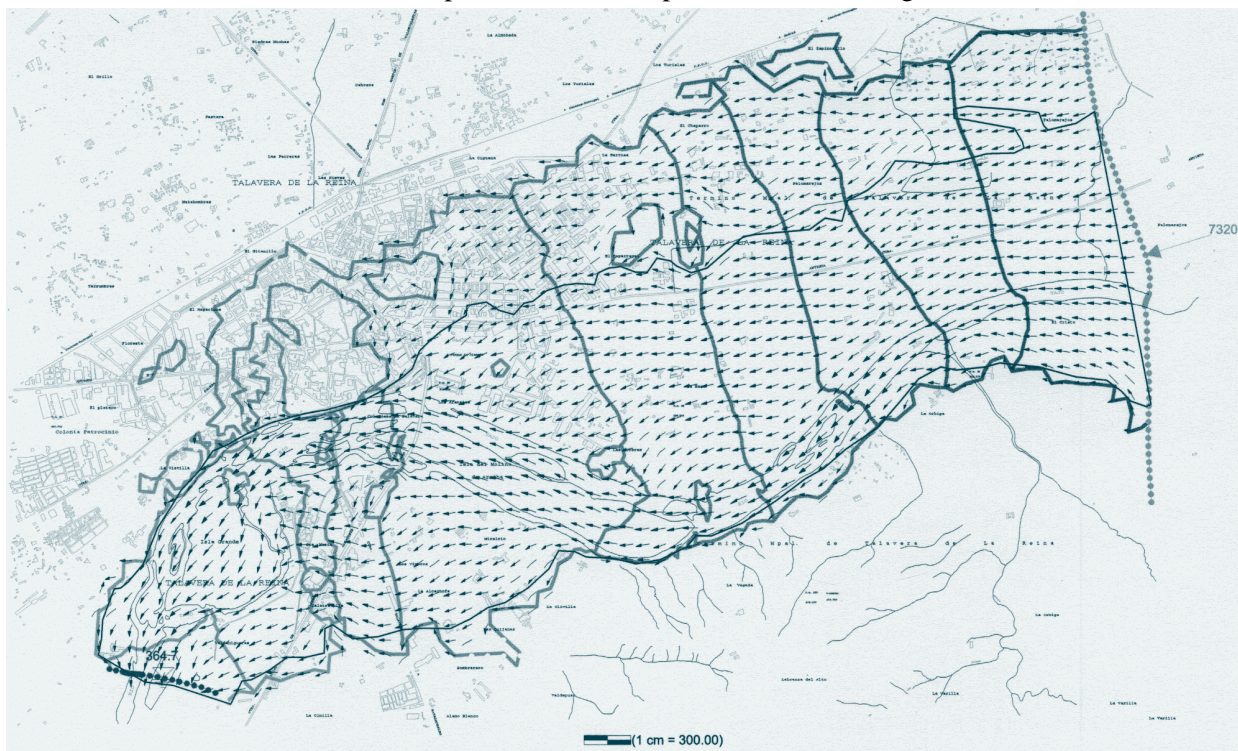


Figura 6. Planta del flujo de 7320 m<sup>3</sup>/s según el modelo bidimensional. Se indican los bordes del área de inundación peligrosa. Las líneas transversales significan líneas de igual nivel de agua, con equidistancia de 1m. Las flechas dan la dirección de la velocidad (no su módulo).

### Sobre los resultados

En la figura 6 se muestra el resultado del modelo con el caudal de 7320 m<sup>3</sup>/s. Es interesante observar que hay un desbordamiento intenso del cauce principal hacia la llanura derecha en la parte superior del tramo, cerca de la desembocadura del Alberche. Esta agua regresa al cauce principal en la región de expansión moderna de la ciudad (recinto ferial) aguas arriba de los puentes. Precisamente en esa región comienza el desbordamiento por la margen izquierda que regresa al cauce en la Isla Grande. En el primer desbordamiento se darían velocidades de 1 a 1.5 m/s y calados de más de 2.0 m en la carretera y 1.3 m en la ermita. Cifras parecidas se dan en el segundo desbordamiento. En la figura se representa también el área de inundación peligrosa para las personas (es decir allí donde:  $v > 1\text{ m/s}$ ,  $y > 1\text{ m}$  ó  $v_y > 0.5\text{ m}^2/\text{s}$  – ver Martín-Vide, 1997). El casco antiguo se libra de la inundación excepto en la periferia y en el área más baja que era en origen el arroyo de la Portiña.

La superficie de inundación obtenida con el modelo bidimensional es similar en la forma, pero más extensa, que la obtenida con el modelo unidimensional. Esto es consecuencia de que la superficie libre y la altura de energía son siempre mayores, entre 0 y 1 m, en el modelo bidimensional (fig.7). La explicación de este hecho puede ser que en Hec-Ras sólo hay una componente de la velocidad, perpendicular a las secciones, las cuales a efectos de cálculo son como una colección de cortes paralelos. En el modelo bidimensional hay una componente

en la dirección media del río (y del valle, o sea de NE a SW) más otra componente perpendicular, positiva o negativa y de valor considerable, la cual probablemente ha de tener algún efecto como pérdida de energía. Véase también que los perfiles de la superficie libre parten del mismo valor en el contorno inferior (donde se especifica el nivel de agua) y las pendientes del agua y de la energía son similares en los dos modelos, mayores en la zona de la ciudad y aguas arriba del azud de Palomarejos.

También del modelo bidimensional se extraen secciones transversales como la de la fig.8. En ellas se observa un nivel de agua más o menos constante, pero más bajo en el cauce (donde la velocidad es mayor) que en las llanuras, aunque inversamente la línea de energía es más alta en el cauce que en las llanuras. El significado de esta diferencia de valores de energía es que el cauce entrega o envía agua a las llanuras. Lo contrario (el cauce recoge el agua de las llanuras) ocurre cuando la línea de energía en el cauce es más baja.

### PRONÓSTICO DE LA EVOLUCIÓN DEL CAUCE

Los estudios de inundabilidad deberían tener en cuenta la eventualidad de que los cauces sufran cambios. Además de los posibles cambios en planta, la variación del nivel del fondo, ya sea descendiendo (erosión) o ascendiendo (acreción), tiene una repercusión en los niveles de inundación. Existen modelos unidimensionales de lecho móvil, es decir modelos que consideran un fondo variable y usan ecuaciones de transporte y continuidad de los

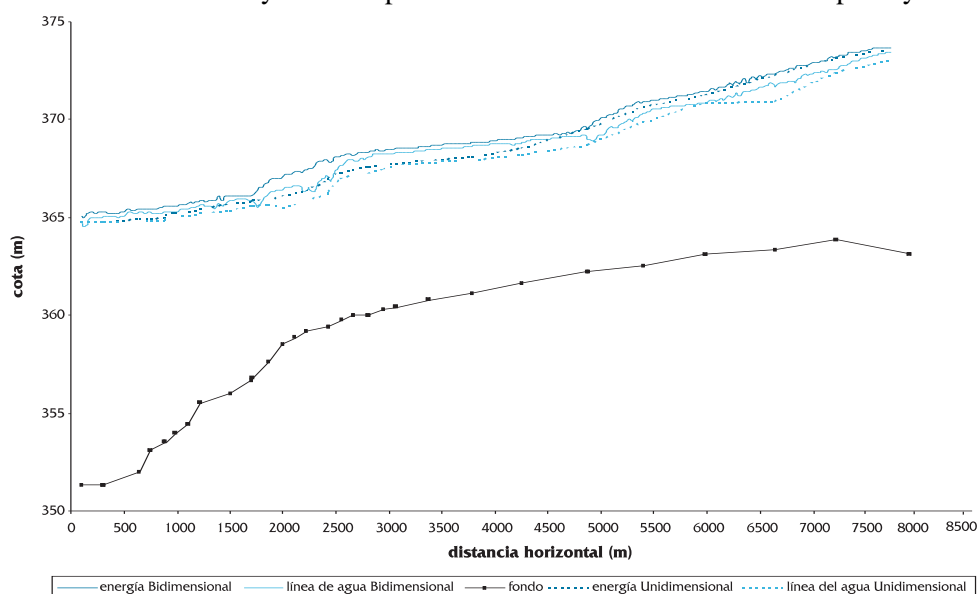


Figura 7. Comparación de los perfiles longitudinales de la superficie libre (y comparación de las líneas de energía) con Hec-Ras y Feswms.



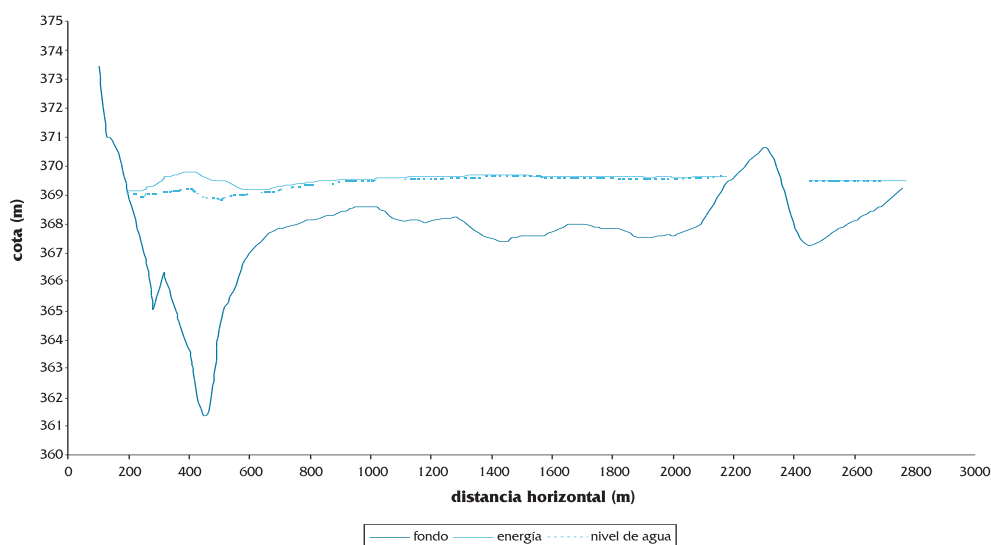


Figura 8. Sección transversal obtenida con el modelo bidimensional, cercana al azud de Palomarejos. Se dibujan la superficie libre y la línea de energía.

sólidos. Son más o menos fiables sólo para cauces prismáticos y cuando se conoce una ecuación de transporte sólido. La debilidad de uso de estos modelos es que necesitan como condición de contorno un caudal sólido aportado desde aguas arriba. La falta de datos de transporte sólido en los ríos españoles hace que la aplicación de estos modelos incluya demasiadas suposiciones. Las mismas objeciones pueden formularse a los módulos de sedimento de los modelos bidimensionales (en el caso de SMS RMA-2 se llama SED-2D, en el caso de HEC-RAS existe un modelo unidimensional de lecho móvil de la misma familia llamado HEC-6).

Cuando hay tal incertidumbre, parece preferible algún cálculo global, con menos detalle geométrico que el de los modelos matemáticos. El objetivo es por ejemplo estimar un valor máximo de erosión (suponiendo caudal sólido nulo) o valores medios probables de erosión o acreción mediante un balance sedimentario. Esto último se ha hecho para el tramo del Tajo comprendido entre la desembocadura del Alberche y el azud de Palomarejos. Para ello se ha desarrollado un modelo simplificado en MATLAB, con objeto de la realización de este análisis de tendencias. Para su aplicación se han buscado secciones tipo, representativas de los valores medios del flujo en cada uno de los tramos estudiados, y en cada uno de ellos se ha aplicado un balance, que consiste en una operación de comparación entre el suministro o aporte de sedimento a un tramo y la capacidad de transporte del río en el tramo. Las arenas del Alberche y las gravas del Tajo “superior” son los aportes sólidos al tramo siguiente del Tajo, comprendido entre la confluencia y el

arroyo Chascoso. Se supone que Alberche y Tajo “superior” aportan tanto como resulta de su capacidad de transporte, dada por una sección tipo, pendiente media y granulometría del cauce. El volumen y la granulometría del material que puede llevarse el tramo del Tajo en cuestión se calculan con algoritmos de comparación entre disponibilidad y capacidad, aplicados a cada fracción granulométrica.

Se han usado cuatro fórmulas distintas de transporte sólido: Meyer-Peter y Müller, Ackers y White, Yang y finalmente Parker para gravas en combinación con Engelund y Hansen (Maza *et al*, 1996) para arenas. El empleo de estas fórmulas se ha realizado aplicando hidrogramas de avenida simplificados para cada uno de los tramos estudiados; estos hidrogramas se han discretizado en escalones, para cada uno de los cuales se determinan las características geométricas de la sección tipo representativa en régimen permanente; por otro lado, se han utilizado las características granulométricas del material muestreado en el lecho del río en los tramos correspondientes. De este modo, es posible determinar “sedimentogramas” de las avenidas estudiadas. Se supone que el Alberche, el Arroyo Chascoso y el Tajo “superior” transportan en cabecera la totalidad de su capacidad, ya que no se dispone que datos de transporte sólido. Asumir esta hipótesis supone determinar las envolventes superiores de los sedimentogramas.

Los volúmenes sólidos de acreción o erosión resultan distintos según las fórmulas, pero las tendencias a uno u otro fenómeno y los órdenes de magnitud no son muy diferentes. Por ejemplo, una

crecida exclusivamente del Alberche, como la ocurrida en los primeros meses de 2001, significaría del orden de 500.000 m<sup>3</sup> de material aportado al Tajo, de los que éste sólo se llevaría hacia abajo durante la avenida unos 20.000 m<sup>3</sup>, resultando depósitos del orden de 80 cm en el cauce principal. El Tajo con caudal constante pero sin desbordar tardaría de 8 a 24 meses en transportar este excedente de arenas. Si una avenida fuera simultáneamente del Alberche y del Tajo (como la de 1970) el excedente de arenas sería del orden de 350.000 m<sup>3</sup> que podría presentarse como un depósito de unos 7 cm en cauce y llanuras del Tajo.

En conclusión, el Alberche es capaz de descargar en el Tajo un volumen de arenas que al Tajo le cuesta mucho tiempo transportar. Se podría pronosticar una tendencia a la acreción en el tramo de estudio, siempre que la disponibilidad de arenas en el Alberche siga siendo ilimitada.

## CONCLUSIONES

El uso del modelo HEC-RAS unidimensional y FESWMS-2DH bidimensional para estudiar la inundabilidad de Talavera de la Reina lleva a concluir:

1- HEC-RAS es un modelo preciso porque puede incorporar fácilmente mucha información geométrica. Para casos como el presente, esto es una ventaja sustancial, más importante que el inconveniente que supone despreciar los efectos bidimensionales.

2- HEC-RAS requiere criterio e ingenio en aspectos importantes como la definición de la condición de contorno aguas abajo, el cálculo del flujo en dos brazos y los azudes. Parece fundamental introducir la rugosidad del cauce a partir de su granulometría y la de la vegetación a partir de observaciones de campo.

3- Un modelo bidimensional como FESWMS-2DH supone una mejora del cálculo realizado con HEC-RAS sólo en cuanto a la dirección de las aguas desbordadas que recorren las llanuras de inundación. Esta información sería útil para una mejor definición de la traza de las secciones transversales en una ulterior aplicación de HEC-RAS. Sin embargo, FESWMS no puede incorporar información geométrica detallada. En términos generales, es posible que unos niveles de agua algo mayores sean un efecto bidimensional.

4- El modelo FESWMS-2DH tiene limitaciones serias en la variedad de condiciones de contorno posibles. Puede dar dificultades de convergencia y problemas con zonas que queden secas.

5- Talavera de la Reina presenta alto riesgo de inundación en las áreas de expansión más modernas, no así en el casco antiguo. El caudal de 7320 m<sup>3</sup>/s publicado como valor punta de la avenida de 1947 parece improbable con los datos de campo existentes. El valor más probable del caudal en esa avenida habría sido 3750 m<sup>3</sup>/s.

6- El río Alberche es capaz de descargar en el río Tajo un volumen de arenas que al Tajo le costaría mucho tiempo transportar hacia aguas abajo. Según la frecuencia de avenidas en el Alberche y la disponibilidad de material arenoso en su cauce, cabría la posibilidad de una acreción en el río Tajo en la zona de Talavera.

o Nota: Este trabajo es un resultado del proyecto FEDER I+D 1FD972110C0201. Agradecemos la colaboración de Máximo Florín Beltrán, José María Ureña Francés y Fabio Spaliviero Bertinchamps.

## REFERENCIAS

- U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (2001) HEC-RAS. River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 3.0
- U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. FESWMS-2DS: Finite Element Surface – Water Modelling System: Two – Dimensional Flow in a Horizontal Plane. Users Manual
- Martín-Vide, J.P (1997) Ingeniería fluvial. Edicions UPC, Barcelona.
- Martín-Vide, J.P.; Prió, J.M.; Bateman, A. “Backwater effects in arch bridges under free and submerged conditions”. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE (en revisión, 2002).
- Maza Alvarez, J.A.; García Flores, M. Transporte de sedimentos. Capítulo 10 del Manual de Ingeniería de Ríos. Instituto de Ingeniería de la UNAM, México 1996.