

Modelación matemática en el ámbito de la dinámica fluvial

Luis Balairón Pérez

Director del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX

luis.balairon@cedex.es

1 De la modelación física y/o numérica a la modelación híbrida

En el ámbito de la dinámica fluvial, la modelación física y la simulación matemática constituyen dos técnicas diferentes para la resolución de problemas hidráulicos complejos de muy diversa naturaleza que, en el inicio de cada una de ellas, discurrieron en paralelo sin apenas interferencia de la una en la otra.

La primera de las dos técnicas citadas (la modelación física aplicada a los flujos en lámina libre) tuvo sus orígenes en los Estados Unidos de América en los primeros años del siglo pasado, asociada a los modelos reducidos en laboratorio llevados a cabo en el US Bureau of Reclamation con motivo de la construcción de las grandes presas de Hoover, Grand Coulee, Glen Canyon, Yelolowtail y Morrow Point.

En España, el principal exponente de esta tecnología es sin duda el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, cuyas actuales instalaciones (que datan de los años 1960) han prestado y prestan un apoyo tecnológico de gran importancia sobre todo a la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

A título de ejemplo de la actividad del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX puede destacarse el hecho de que en sus instalaciones han sido estudiadas en modelo físico a escala reducida algunas de las actuaciones fluviales más importantes acometidas en nuestro país durante el siglo pasado, como por ejemplo, el estudio hidráulico del nuevo cauce del río Turia en Valencia (en el año 1966) a resultas de las trágicas inundaciones con resultado de pérdidas de vidas humanas y cuantiosos daños materiales que sufrió la ciudad de Valencia en el año 1957. Las intensas lluvias caídas en ese año dieron lugar a una punta de caudal estimada en $3.700 \text{ m}^3/\text{s}$ en Valencia cuando la capacidad del viejo cauce en la ciudad era de sólo $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$. Tras numerosos estudios técnicos se decidió construir un nuevo cauce con trazado por terrenos rurales al sur de la ciudad y capaz por sí solo de evacuar un caudal de $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$, fijado como avenida de referencia. El viejo cauce del río quedaba así liberado de desaguar el Turia y disponible para otros usos que mejorarían el desarrollo de la ciudad, tal y como en efecto se ha llevado a cabo. En la actualidad, el viejo cauce está integrado plenamente en el ordenamiento urbano y en él se han desarrollado numerosos equipamientos tales como parques, el palacio de la Música, el Pabellón de las Ciencias y las Artes, etc.

Son también destacables los estudios realizados en el CEDEX en la plana de inundación del río Júcar (finalizados en el año 2006), la cual se caracteriza por ser un territorio que sufre un régimen extremo de caudales con importantes crecidas que producen desbordamientos, inundan las márgenes y son causa de daños considerables en los terrenos y poblaciones que alcanzan. Las avenidas históricas más severas que ha sufrido este territorio fueron las de 1864 ($13.000 \text{ m}^3/\text{s}$) y la de 1982 ($15.000 \text{ m}^3/\text{s}$, que supuso además el colapso de la presa de Tous). Este último suceso fue el punto de partida para analizar en profundidad la situación y plantear soluciones al problema, participando en dicho proceso de forma activa el Centro de Estudios Hidrográficos. En concreto, desde el Laboratorio de Hidráulica se modeló físicamente en el año 2000 la plana de inundación del Júcar, construyéndose un complejo modelo a escala 1:175 (de más de 400 m de longitud) que facilitó la definición de las obras a incluir en el Plan de Defensa de Inundaciones de la Confederación Hidrográfica del Júcar. En el año 2008 se retomaron los trabajos fluviales en modelo físico en el río Júcar, comenzándose a estudiar la capacidad de la desembocadura de uno de los brazos del río Júcar por el estany de Cullera.

Por su complejidad, algunos entornos fluviales han sido especialmente estudiados en el Laboratorio de Hidráulica del CEH. Es el caso, por ejemplo, de la ciudad de Málaga, en donde se han realizado numerosos modelos físicos del río Guadalmedina (entre los años 1989 y 1992) y posteriormente del Guadalhorce (de 1991 a 1997) a su paso por dicha ciudad, cuyas conclusiones facilitaron después la ejecución de las obras acometidas. Incluso posteriormente (en 2007) se volvió a trabajar en el río Guadalhorce, esta vez por las afecciones causadas al cauce del río por la ampliación prevista del aeropuerto de Málaga.

La cuenca del Júcar es otro entorno en el que se han concentrado muchos de los estudios fluviales realizados en el Laboratorio de Hidráulica. Así, además de las referidas actuaciones en el río Turia a su paso por Valencia o la de la plana de inundación del Júcar, en este Organismo de cuenca se han estudiado numerosas actuaciones en

ríos mediante modelo físico, como por ejemplo, las realizadas entre los años 1993 y 2003 en los barrancos del Carraixet, Poyo, Torrente, Chiva y Pozalet o en el río Seco.

En cualquier caso, aparte del citado Laboratorio de Hidráulica del CEDEX, muchas Universidades españolas disponen también de Laboratorios de Hidráulica de muy alta cualificación que trabajan sobre todo para las respectivas Comunidades Autónomas en las que se encuentran localizados y en ámbitos profesionales especializados (dinámica fluvial, estructuras hidráulicas, hidráulica ambiental, etc.). A este respecto, es de destacar la creación de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España RLHE promovida por el CEDEX en el año 2006 e integrada por los principales Laboratorios de Hidráulica de España, la cual tiene como objetivo último de constituir un foro o espacio de encuentro entre los principales centros de investigación en materia de ingeniería hidráulica experimental de España que permita detectar complementariedades, contribuir al fortalecimiento de la actividad de I+D en el campo específico de la ingeniería hidráulica e impulsar proyectos de investigación aplicada y de desarrollo tecnológico e innovación en común en las materias específicas en las que la Red trabaja. En el tiempo transcurrido desde la creación de la RLHE, se han celebrado una gran cantidad de seminarios, encuentros científicos, se ha promovido el desarrollo de proyectos de investigación en común y, en suma, se ha potenciado de manera importante la actividad de investigación en hidráulica experimental en nuestro país.

Pero como se indicaba al principio de este apartado, en paralelo a la modelación física para la resolución de problemas hidráulicos complejos, los ingenieros hidráulicos dispusieron de otra herramienta para la misma finalidad desde la década de los 60 del siglo pasado que era la aplicación general de los modelos matemáticos a la hidráulica del flujo en lámina libre, con el advenimiento y desarrollo de los ordenadores y métodos de programación.

El uso de la modelación matemática aplicada a los problemas de la ingeniería del agua, y de manera simplificada, tuvo, a su vez, dos posibilidades: la utilización de modelos comerciales desarrollados por instituciones públicas o privadas que tratan las ecuaciones de comportamiento de una forma bastante simplificada para hacer asequible su uso (convenientemente revisadas, eso sí) o la elaboración de modelos ad hoc con una aplicación válida, en el mejor de los casos, a un muy reducido número de casos que motivaron la necesidad de esos modelos específicos (estos modelos fueron desarrollados sobre todo desde centros de investigación y entornos universitarios).

En la actualidad, y tal y como se pone de manifiesto en esta comunicación en otros apartados, la modelación matemática en el campo específico de la hidráulica del flujo en lámina libre y sus interacciones con estructuras hoy en día se aplica sistemáticamente en redes de flujos unidimensionales (en su mayoría) y bidimensionales, reduciéndose el análisis a flujos tridimensionales a unos pocos modelos numéricos en fase de calibración en centros de investigación públicos.

En cualquier caso, la evolución de las dos herramientas mencionadas (modelación física y numérica) siguió, inicialmente, caminos paralelos con escasos puntos en común, dando lugar a dos cuerpos de doctrina diferenciados a los que alternativamente se acudía, según el caso.

Sin embargo, desde la década de los 80 ó 90 del siglo pasado, dichos caminos de aplicación práctica comenzaron a converger entre sí debido a la reconsideración de un conjunto de conceptos (la física del problema, el campo de aplicación de las leyes de semejanza, etc.)

Y es aquí donde la modelación híbrida tiene su importante papel, puesto que el desfase entre la naturaleza tridimensional del problema real y la caracterización uni o bidimensional del análisis numérico se puede cubrir, y de hecho ya es una realidad en el campo que nos ocupa, mediante un análisis cíclico interactivo entre la modelación matemática y la modelación física. Así pues, ante un problema hidráulico complejo (como son las interacciones suelo – agua – estructuras, de manera inevitablemente tridimensional y turbulento), la técnica de la modelación matemática en la actualidad dispone de las herramientas suficientes para simular su comportamiento con un grado de aproximación suficiente, si bien sigue siendo incapaz de reproducir los efectos tridimensionales de las condiciones de contorno locales complejas.

En este aspecto, la modelación física, utilizando los resultados parciales de la simulación numérica previa, puede aportar la información que la hidráulica computacional necesita, iniciando un proceso de realimentación cíclica que permite mejorar la calidad de la información obtenida con ambas herramientas y avanzar hacia una solución extrapolable con la máxima fiabilidad al prototipo cuyo funcionamiento se estudia.

Esta modelación híbrida físico matemática en la hidráulica fluvial se ve potenciada además en los últimos años de manera muy intensa con trabajos de calibración y toma de datos de forma directa y muy intensiva directamente en el prototipo en estudio en la naturaleza, lo que permite calibrar de manera mucho más precisa que hace años los resultados de los modelos físicos o matemáticos con la realidad simulada. Esto es posible en buena medida gracias al abaratamiento y simplificación de las técnicas de instrumentación, toma de datos y

posterior tratamiento y almacenamiento de la información registrada, lo que facilita enormemente el uso de los modelos físicos o numéricos en el campo de la ingeniería del agua, abriendo un camino imparable en el futuro.

La realidad es que en la actualidad todos los Laboratorios españoles que integran la Red de Laboratorios de Hidráulica de España RLHE trabajan en mayor o menor medida conforme a las directrices indicadas en párrafos anteriores, combinando técnicas de modelación numérica y física y calibrando sus resultados con una gran cantidad de datos registrados de los prototipos.

En los seminarios que la Red celebra periódicamente se ponen de manifiesto muchas de las experiencias desarrolladas por los institutos que la integran para facilitar el intercambio de conocimientos entre unos centros y otros.

Así, por ejemplo, el Instituto Húmen viene trabajando de manera muy activa en el conocido como proyecto Doñana 2005, en el cual se está calibrando un modelo hidrodinámico propio con las medidas obtenidas en cinco estaciones permanentes de medida en la marisma de Doñana que registran a intervalos de diez minutos las variables hidrometeorológicas siguientes: nivel de agua, precipitación, temperatura del agua y del sedimento de fondo a distintas temperaturas, temperatura y humedad del aire, velocidad y dirección del viento y radiación solar incidente y reflejada.

Otro ejemplo puede ser el proyecto CENIT SOSTAQUA en el cual se ha realizado un análisis pormenorizado de los flujos de contaminación movilizados durante el tiempo de lluvia en un sistema de saneamiento y drenaje unitario de una cuenca urbana densa del noroeste de España en el que se pone de manifiesto la complejidad y amplio espectro de contaminantes que se movilizan, incluidos metales pesados, contaminantes emergentes y sustancias prioritarias entre otros, para con estos resultados poder calibrar diversos modelos hidráulicos y de contaminación usados habitualmente en este sector (SWMM y Wallingford Infoworks CS).

2 La modelación matemática en el ámbito de la hidráulica fluvial en la actualidad

La modelación matemática del flujo de agua en un río es una técnica para determinar las variables hidráulicas de (calado, velocidades, caudal, etc.) a partir de la resolución por métodos numéricos de las ecuaciones de comportamiento. La modelación matemática es siempre una aproximación a la realidad, que será tanto mejor cuanto más se adapten las ecuaciones de partida y el esquema numérico para su resolución al fenómeno real que se está estudiando.

La técnica de la modelación matemática ha ido evolucionando de forma paralela al incremento de la capacidad de los ordenadores y al desarrollo del cálculo numérico en general. De esta manera se ha ido avanzando desde los primeros modelos 1D con secciones transversales sencillas de los años 1960 a los modelos 2D con calado promedio en los años 80, llegando a los primeros modelos 3D completos más recientemente.

Con todo, en la actualidad es perfectamente posible abordar estudios para el análisis del comportamiento hidrodinámico de llanuras de inundación (y de comportamiento de ríos en general) con modelos matemáticos bidimensionales, siendo posible que (tal como se especifica en el apartado 3 de esta comunicación), en el futuro inmediato este tipo de análisis sea requerido de manera sistemática por las administraciones públicas para caracterizar el riesgo de inundaciones y evaluar los posibles resultados de las actuaciones consideradas.

En la práctica real en España, los modelos matemáticos más utilizados en la actualidad en el ámbito de la hidráulica fluvial son los 1D y los 2D con calado promedio (o de flujo somero), utilizando las clásicas ecuaciones de Saint Venant. La consideración del transporte de sedimentos es mucho más dispar, estando en un grado de desarrollo y maduración menor que la modelación de la hidrodinámica (en muchos modelos matemáticos de ríos se calcula por separado el transporte de sedimento transportado como carga de lecho y como carga en suspensión para luego sumar ambos efectos y con la carga total analizar la evolución morfológica del cauce).

Con todo lo anterior, existen una gran heterogeneidad de herramientas disponibles para este tipo de análisis, que en ocasiones puede introducir algo de confusión a los potenciales usuarios. En el presente apartado se va a presentar un breve resumen de la situación actual de las herramientas disponibles y más frecuentemente utilizadas en nuestro país al respecto.

Cabría lugar, en primer lugar, diferenciar entre los modelos matemáticos comerciales y los desarrollados en centros de investigación públicos, básicamente en entornos universitarios. Los primeros (los modelos

comerciales) presentan la ventaja de una mayor amigabilidad en su uso (pues se presentan en su mayoría con interfaces relativamente sencillas de manejar y visuales) si bien suelen introducir simplificaciones en el tratamiento de las ecuaciones constitutivas, buscando la mayor generalidad posible en su uso. Son, en consecuencia, difícilmente adaptables a situaciones específicas y además tienen un coste económico variable, según modelos, frente a los desarrollados en centros de investigación que suelen ser de descarga gratuita. A cambio, los modelos comerciales suelen ofrecer un buen servicio de mantenimiento y asesoramiento.

De los modelos desarrollados en centros de investigación españoles, seguramente los más relevantes en los últimos diez años han sido el modelo CARPA (elaborado por el Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña) y el TURBILLON (desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y de Medioambiente GEAMA de la Universidad de A Coruña) que se fusionaron en el año 2010 a través del CEDEX en el conocido como modelo IBER (ver apartado 4) de esta comunicación). Los dos modelos originales (CARPA y TURBILLON) tenían en cualquier caso unos esquemas de cálculo similares basados en la técnica de los volúmenes finitos cuyo embrión estaba, a su vez, en los resultados del Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Zaragoza

Entre los modelos comerciales más utilizados en España, pueden diferenciarse dos grandes categorías. En la primera de ellas situaríamos al modelo GUAD 2D desarrollado también a partir de los resultados del Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Zaragoza y distribuido y comercializado por la empresa INCLAM, el cual constituiría el único modelo de carácter netamente español. Este modelo ha tenido y tiene una introducción y un uso bastante importante en las diferentes Confederaciones Hidrográficas. En la otra categoría podríamos encajar los modelos desarrollados en otros países y de uso frecuente en España, desarrollados en centros públicos de investigación en muchos casos, entre los que pueden destacarse como los más utilizados los siguientes:

- HEC. Desarrollado por el US Army Corps of Engineers de los Estados Unidos de América, es seguramente el modelo matemático unidimensional más conocido y aplicado a la hidráulica fluvial. Es un software de descarga libre (desde la dirección <http://www.hec.usace.army.mil/>) cuyas primeras versiones datan del año 1964 y que en la actualidad tienen módulos para el cálculo en régimen variable y con transporte de sedimentos.
- MIKE. Este modelo, desarrollado en Dinamarca por el Danish Hydraulic Institute DHI constituye un entorno integral para la modelización hidrodinámica en una (MIKE 11) y en dos (MIKE 21) dimensiones. Después de los HEC, es uno de los modelos más conocidos y utilizados en el mundo para la modelación hidrodinámica
- TELEMAC. Desarrollado inicialmente en Francia por Electricité de France EDF este modelo en elementos finitos tiene módulos para la simulación de flujos en 1D, 2D y 3D, existiendo también la posibilidad de considerar el transporte de sedimentos
- DELFT 3D. Este modelo fue desarrollado por DELTARES y permite la simulación de flujos en 2D y 3D.
- INFOWORKS. Es el modelo matemático de HR Wallingford desarrollado en la época en la que esta organización era un centro de investigación público. En la actualidad, el modelo está completamente integrado en GIS y tiene módulos para el modelado de ríos (InfoWorks RS) y también para otros ámbitos de la ingeniería del agua como abastecimientos (InfoWorks WS), saneamientos (InfoWorks CS), así como módulos costeros y para la gestión de los recursos hídricos. En España la distribución la realiza la empresa Sistemas de Ingeniería Civil y Ambiental

Los anteriores son seguramente los más utilizados y conocidos en España, si bien en el mercado hay otros más (como el SOBEK, TUFLOW, RIVERINE, FLUVIAL 12, etc.) Todos los modelos anteriores son, en general, suficientemente conocidos (unos más que otros, naturalmente) habiéndose realizado en ocasiones comparaciones entre unos y otros que permiten ver las diferencias de uso entre ellos.

El mayor avance acaecido en el último año al respecto de los modelos matemáticos comerciales antes referidos es el hecho de que en 2011 se haya optado por ofrecer algunos de ellos en código abierto (open source) lo que abre una nueva forma de entender la modelación numérica.

Así, por ejemplo, en el entorno del modelo TELEMAC que fue inicialmente desarrollado por EDF en Francia, se ha constituido un Consorcio integrado por diversos centros de investigación franceses (el propio EDF, el laboratorio de puertos CETMEF y la consultora Sogreah-Artelia), ingleses (HR Wallingford y el Laboratorio de Daresbury) y alemanes (el centro público BAW) que han puesto a disposición gratuita de los usuarios el modelo TELEMAC junto con otro modelo hidrodinámico (el MASCARET, desarrollado hace 20 años por EDF y CETMEF) en sus versiones 2D y 3D, junto con los módulos para el transporte de sedimentos (SISYPHE), para la calidad de las aguas (DELWAQ) y otros en el ámbito portuario y costero (TOMAWAC y ARTEMIS). Esta

iniciativa se complementa con la creación de un potente Club de Usuarios que celebra seminarios, reuniones científicas y canaliza las sugerencias e inquietudes de los usuarios de estos modelos. A todo ello se puede acceder desde el sitio web <http://www.opentelemac.org/>.

Delatares, por su parte, ha tenido también una iniciativa similar reciente, poniendo también en código abierto su modelo DELFT 3D (en concreto, el módulo hidrodinámico FLOW, el hidromorfológico MOR y el de simulación de oleajes WAVE) desde el 1 de enero de 2011. Al igual que en el caso anterior, la iniciativa se acompaña de la creación de un club de usuarios, de un blog y de Grupos de Discusión. La dirección de Internet desde la que se puede acceder es la siguiente: <http://oss.deltares.nl/en/web/opendelft3d/download>

3 Algunas ideas sobre la necesidad de modelación hidráulica en la gestión del agua en la actualidad en España

3.1 Introducción

Lejos de pensar que las necesidades de modelación numérica o especialmente física en el ámbito de la hidráulica fluvial estén satisfechas en un futuro próximo en nuestro país, hay en marcha una cantidad importante de iniciativas en el ámbito de la gestión de nuestros ríos desde la administración hidráulica española que, para su correcta aplicación, se necesitará de un impulso grande en el ámbito de la modelación híbrida tal como se entiende en la actualidad conforme a lo explicado en este texto.

En concreto, la Dirección General del Agua, como máximo responsable de la gestión de los recursos hídricos en nuestro país, está desarrollando en la actualidad numerosas iniciativas en el ámbito de la hidráulica fluvial que requieren de un excelente conocimiento del funcionamiento hidromorfológico de los ríos españoles para la correcta aplicación de los Planes y Estrategias que tiene en curso.

A modo de ejemplo de lo anterior, en los apartados siguientes se hace un somero repaso a tres iniciativas de diferente rango legislativo que en la actualidad está promoviendo la Dirección General del Agua y que dan una buena idea de las necesidades tecnológicas asociadas a su correcta aplicación.

3.2 El Reglamento de la Planificación Hidrológica (RPH) y la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH)

El Reglamento de la Planificación Hidrológica de 2007 y, sobre todo, la Instrucción de Planificación Hidrológica de 2008, constituyen las herramientas administrativas básicas del proceso planificador de los recursos hídricos en nuestro país e introducen muchas y muy elevadas exigencias en cuanto a la caracterización de los ríos respecto a textos legislativos anteriores, lo cual debería redundar en una intensificación en el uso de las técnicas de modelación numérica y física en el ámbito de la hidráulica fluvial para su correcta aplicación.

De la lectura detallada de la IPH podrían desprenderse una gran cantidad de ejemplos al respecto del alcance de las elevadas exigencias de la Instrucción sobre el conocimiento del comportamiento de los ríos, pero quizás el mejor resumen se desprende de lo especificado en el artículo 2.2.2 “Masas de agua superficial muy modificadas y artificiales” en el cual se pide identificar, pero sobre todo valorar, la incidencia en los ríos de las alteraciones físicas producidas por actividad humana de muy diversa índole, en concreto las siguientes: presas, azudes, canalizaciones, protecciones de márgenes, dragados y extracciones de áridos”. La IPH, en el citado artículo 2.2.2 concreta, en ocasiones incluso con mucho detalle, el alcance de la valoración que se debería hacer de la afección de las citadas alteraciones humanas.

Así, por ejemplo, para valorar las presiones que afectan a los ríos en el 3.2.2 “Presiones sobre las masas de agua superficiales”, y en el apartado 3.2.2.4 “Regulación del flujo y alteraciones morfológicas” se obliga a “estimar y determinar la incidencia de la regulación significativa del flujo del agua en las características globales del flujo y

en los equilibrios hídricos. En el caso de los ríos se considerarán, además, las alteraciones debidas a modificaciones longitudinales, como canalizaciones, protecciones de márgenes y coberturas de cauces. También se considerarán las alteraciones producidas por el desarrollo de actividades humanas sobre el cauce, como dragados, extracción de áridos, explotación forestal, infraestructuras terrestres y otras actividades que supongan la alteración o pérdida de la zona de ribera”.

De esta manera, y a modo de ejemplo, en el caso de las presas, la IPH estipula que deberían evaluarse los efectos causados aguas abajo de las presas determinando la longitud del tramo alterado teniendo en cuenta la capacidad de recuperación del río y las características en cuanto a aporte de sedimentos, nutrientes, etc. de los afluentes situados aguas abajo (de manera simplificada, y solo en el caso de no disponer de estimaciones más precisas se permite asumir de manera aproximada que el tramo alterado se extienda hasta la confluencia con el primer afluente no afectado por este mismo tipo de alteración y con características similares).

En el caso de los encauzamientos fluviales, la exigencia de la IPH es similar, pues en ella se dice que se valorará la posible incidencia aguas arriba y aguas abajo del encauzamiento por alteración de los procesos de erosión y sedimentación.



Figura 1 Escala de peces en la naturaleza con un canal de nado adosado (central de Vadocondes, CH Duero) y escala de peces en laboratorio de hidráulica del CEDEX. Infraestructuras necesarias para evaluar el efecto barrera de las obras hidráulicas

Para cuantificar el efecto barrera de las obras hidráulicas, la IPH exige también la necesidad de identificar las especies piscícolas migratorias presentes, analizando al menos su zona de distribución, la época del año en que tiene lugar la migración, los posibles estadios fisiológicos de los peces en el momento de la migración y sus características biomecánicas, tales como capacidad máxima de salto, velocidad máxima de natación y capacidad para reptar sobre el obstáculo o sobre las orillas para cada uno de los estadios fisiológicos considerados.

Las exigencias de la IPH alcanzan también a la caracterización del régimen de caudales ecológicos, exigiéndose en este caso de manera taxativa que “la simulación de la idoneidad del hábitat se realizará, preferentemente, mediante modelos bidimensionales. Si se utilizan modelos unidimensionales deberá justificarse su empleo”

Los párrafos anteriores constituyen nada más que cuatro o cinco ejemplos de las exigencias de la actual IPH al respecto del conocimiento que debe tenerse del funcionamiento de los ríos, si bien podrían haberse citado muchos más ejemplos. En cualquier caso, como conclusión clara de lo anterior puede establecerse que la valoración de la incidencia de las alteraciones antes citadas no es nada trivial, pues para hacerlo de manera rigurosa habría que aplicar técnicas de modelación híbrida, combinando modelación física en condiciones

complejas (incluyendo modelos de lecho móvil) y numérica (abarcando tanto modelación unidimensional como bidimensional, considerando el transporte de sedimentos y la turbulencia del flujo), acompañado todo ello de un trabajo de campo notable.

3.3 Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI)

El Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, siguiendo los principios de la Directiva 2007/60 sobre evaluación y gestión de riesgos de inundación, ha puesto en marcha el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), un instrumento de apoyo a la gestión del espacio fluvial, la prevención de riesgos, la planificación territorial y la transparencia administrativa.

La citada Directiva establece, entre otros objetivos, la necesidad de acometer las dos siguientes actuaciones: la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación, EPRI (antes del 22 de diciembre de 2011), y la elaboración de Mapas de Peligrosidad por Inundaciones y de Mapas de Riesgo de Inundación que muestren las consecuencias adversas potenciales asociadas con diversos escenarios de inundación (antes del 22 de diciembre de 2013).

El eje central del SNCZI es dar cumplimiento a las anteriores exigencias, a través del conocido como “[visor cartográfico de zonas inundables](#)”, que permite a todos los interesados visualizar los estudios de delimitación del Dominio Público Hidráulico (DPH) y los estudios de cartografía de zonas inundables, elaborados por el MARM y aquellos que han aportado las Comunidades Autónomas.

El visor sirve de ayuda a los organismos de cuenca en la emisión de informes sobre autorizaciones en el DPH y zona de policía, en la gestión de avenidas en conexión con el S.A.I.H y en la planificación de las actuaciones de defensa frente a inundaciones, agiliza la planificación y gestión de inundaciones por los servicios de Protección Civil, facilita la transmisión de información sobre zonas inundables a las administraciones competentes en planificación territorial y empresas promotoras y permite a los ciudadanos conocer la peligrosidad de una zona determinada.

Como concepto de fondo de este Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables subyace la necesidad de disponer en las Confederaciones Hidrográficas de cartografías actualizadas y veraces de zonas inundables que permitan la protección del dominio público hidráulico y que refuerce la capacidad predictiva de avenidas, mejorando la capacidad de gestión de las mismas. En el espíritu del SNCZI (y de acuerdo con la Directiva 2007/60 sobre evaluación y gestión de riesgos de inundación) está el considerar en la delimitación de la zona de Dominio Público Hidráulico criterios no solamente hidrológicos (como se había venido realizando de manera tradicional), sino también consideraciones geomorfológicas y ambientales.

Expuesto lo anterior, es claro que para el desarrollo rigurosos de este Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, las necesidades de modelación matemática bidimensional (con criterios homogéneos y comunes de unas cuencas a otras, pero a la vez con modelos particularizados y adaptados a la realidad de la hidrografía de nuestro país y a las exigencias e intereses de la DGA) resultan claras y están constituyendo una de las actividades de mayor intensidad de trabajo en las Comisarías de Aguas de las Confederaciones Hidrográficas en la actualidad.

3.4 La Estrategia Nacional de Restauración de Ríos (ENRR)

La Estrategia Nacional de Restauración de Ríos (ENRR) es una iniciativa promovida por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, la cual constituye un conjunto de actuaciones cuyo objetivo es la mejora y recuperación de los ecosistemas fluviales en consonancia con el artículo 11 de la Directiva Marco del Agua, en el que se establece que para lograr la consecución de los objetivos medioambientales del artículo 4, los Estados miembros establecerán un programa de medidas en sus respectivos ámbitos hidrográficos. La presentación oficial de dicha Estrategia se realizó en la cuenca del Duero, mediante la celebración de una jornada diseñada a tal efecto en febrero del año 2007.

La ENRR es una propuesta de gestión actual de nuestros ríos cuya finalidad fundamental es la recuperación de nuestras masas fluviales mediante la adopción de un conjunto de medidas que permitan llegar a restaurar, en unos casos, y a mantener en otros, su comportamiento como ecosistemas. En definitiva, llegar a alcanzar el buen

estado ecológico de los ríos mejorando su funcionamiento en los plazos previstos para el cumplimiento de la mencionada Directiva Marco.

La ENRR, no obstante, también plantea otros objetivos específicos más allá de los específicamente tecnológicos como puedan ser los siguientes :

- Fomentar la integración de los ecosistemas fluviales en las políticas de uso y gestión del territorio con criterios sostenibles.
- Contribuir a la mejora de la formación en temas de gestión sostenible de los ríos y su restauración.
- Aportar información y experiencias para mejorar las actuaciones que se están realizando en el ámbito de la restauración de los ríos en España.
- Fomentar la participación ciudadana en la gestión de los ecosistemas fluviales.

Con estos objetivos se pretende lograr una serie de resultados centrados básicamente en aumentar el conocimiento de la dinámica natural de los ríos españoles, percibiendo mejor la relación entre cada río y su cuenca vertiente así como entre unos tramos y otros del mismo río, valorando los efectos añadidos de las actuaciones en el tiempo y en el espacio.

En el marco de esta Estrategia se han llevado a cabo los siguientes trabajos:

- Publicación por parte del MARM de una Guía metodológica para la elaboración de proyectos de restauración de ríos
- Mesas de trabajo sobre aspectos sectoriales relacionados con la conservación y recuperación de ríos
- Jornadas, cursos y seminarios sobre restauración de ríos
- Programa de voluntariado ambiental
- Proyectos de restauración de ríos en las cuencas intercomunitarias

Con todo lo anteriormente expuesto, en las diferentes Confederaciones Hidrográficas se está procediendo a elaborar una serie de proyectos y actuaciones que pudieran tener cabida en la ENRR, consistentes en actuaciones preferentes desde un punto de vista de la mejora del medio ambiente fluvial con aspectos tales como:

- Mejora de la conectividad longitudinal, transversal y vertical
- Restauración de la vegetación de ribera
- Mejora del hábitat fluvial
- Uso público y educación ambiental

Nuevamente, la correcta definición de estos proyectos requiere de trabajos serios de modelación uni y bidimensional considerando el transporte de sedimentos y en ocasiones el apoyo puntual en modelos físicos de detalle.

4 Los trabajos del CEDEX en el ámbito de la modelación matemática en la ingeniería del agua

4.1 Introducción

Para dar apoyo a las necesidades anteriores de la Dirección General del Agua (junto a otras más que se originan en otras Subdirecciones de dicha Dirección), el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en paralelo a la intensa actividad en el campo de la modelación física de estructuras hidráulicas y de ingeniería fluvial tradicionalmente desarrollada en este organismo, ha intensificado de manera importante su actividad en el ámbito de la modelación matemática de fenómenos hidráulicos.

Lo anterior no podía ser de otra manera, pues la creciente complejidad de los problemas hidráulicos planteados imposibilita en ocasiones su resolución mediante el uso exclusivo de los modelos físicos, requiriendo también el apoyo de la modelación matemática. Modelación física y matemática constituyen (como se ha puesto de manifiesto en apartados anteriores de esta comunicación), en suma, herramientas complementarias que los modernos Laboratorios de hidráulica no pueden dejar de emplear simultáneamente.

Esta actividad de modelación matemática del Laboratorio de Hidráulica se concreta tanto mediante el uso de programas de cálculo comerciales para la resolución de estudios concretos, como mediante el desarrollo de modelos propios para su empleo en trabajos específicos. En los apartados siguientes se detalla el alcance de los trabajos realizados en el ámbito de la modelación numérica en los últimos años (sobre todo en el campo de la hidráulica fluvial, pero también en el de las estructuras hidráulicas) desde el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX.

No obstante lo anterior, debe precisarse que el apoyo tecnológico del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX a la Dirección General del Agua para la aplicación de las anteriores iniciativas y otras más excede en mucho a los trabajos realizados por el Laboratorio de Hidráulica, pues desde otras Áreas de nuestro Organismo (como el Área de Recursos Hídricos o la de Estudios y Planificación) se trabaja de manera intensa en estas mismas materias. Por ejemplo, desde el Área de Recursos Hídricos en junio de 2011 se presentó el Mapa de Caudales Máximos asociados a distintas probabilidades de recurrencia en la red de ríos que gestiona la DGA a través de las distintas Confederaciones Hidrográficas, el cual constituye una pieza fundamental del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables

4.2 Modelación numérica en el ámbito de la hidráulica fluvial

Seguramente la acción más relevante y visual del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX en el ámbito de la hidráulica fluvial en los últimos años ha sido la presentación en el año 2010 del modelo matemático conocido bajo el nombre de IBER el cual ha sido elaborado junto con el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA de la Universidad de A Coruña, el grupo FLUMEN de la Universidad Politécnica de Cataluña y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE.

Este modelo numérico ha sido gestado en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua, configurado, en consecuencia, como una herramienta de apoyo a las exigencias técnicas de las Confederaciones Hidrográficas en la aplicación de la legislación sectorial vigente en materia de aguas. Se ha configurado como un software libre de descarga directa y fácilmente adaptable a los requerimientos informáticos más generales. Dicha descarga es gratuita, así como toda la información necesaria para su control y manejo desde el punto de vista del usuario técnico.

IBER fue presentado públicamente en una Jornada celebrada en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en el mes de junio de 2010, en la que se contó con un elevado número de asistentes (más de 250) lo que da prueba del interés de la iniciativa. A día de hoy hay cerca de 1.000 usuarios registrados en la web, procedentes casi todos ellos de España.,

Desde un punto de vista técnico, el modelo Iber consta de un módulo hidrodinámico que permite la simulación bidimensional de cauces (y en consecuencia posibilita la definición de zonas inundables, la delimitación de vías de intenso desagüe o en general la zonificación del Dominio Público Hidráulico), un segundo módulo de turbulencia y un tercer módulo de transporte de sedimentos para la cuantificación de la evolución de la carga sólida, tanto por arrastre de fondo como en suspensión.

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad bidimensionales, conocidas como ecuaciones de St.Venant 2D. Estas ecuaciones asumen diversas hipótesis que se cumplen razonablemente en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios y zonas costeras, siempre y cuando no existan procesos relevantes asociados a diferencias de salinidad, de temperatura o al viento. En la actualidad, los modelos numéricos basados en las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad bidimensionales son los más utilizados en estudios de evaluación de zonas inundables, dinámica fluvial, corrientes de marea, transporte de sedimentos y calidad de aguas.

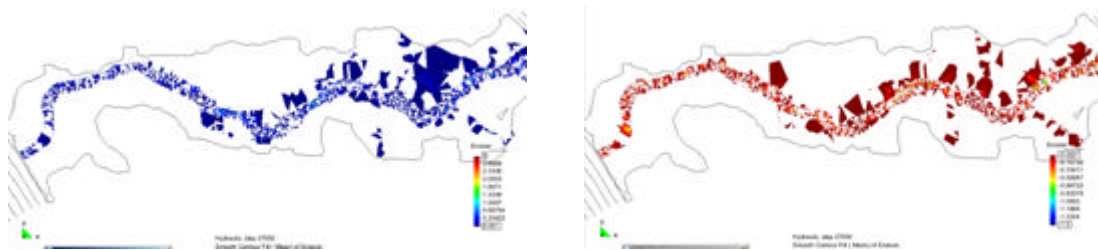


Figura 2 Análisis de erosiones y sedimentaciones en el río Tietar

Una de las principales características del modelo Iber es la incorporación de diversos modelos de turbulencia para el cálculo de las tensiones tangenciales turbulentas, los cuales se resuelven en el módulo de turbulencia. Los modelos de turbulencia intervienen tanto en el cálculo de la hidrodinámica como en el del transporte en suspensión.

En el módulo de transporte de sedimentos se resuelven las ecuaciones de transporte por carga de fondo y por carga en suspensión. Teniendo en cuenta ambos modos de transporte se calcula la evolución de la cota del fondo debida a procesos de sedimentación y erosión mediante el estudio acoplado de ambas ecuaciones.

El caudal sólido de fondo se calcula mediante formulaciones empíricas en función de la tensión de fondo, mientras que el transporte en suspensión se resuelve con la ecuación de convección-difusión promediada en profundidad para la concentración de sedimento.

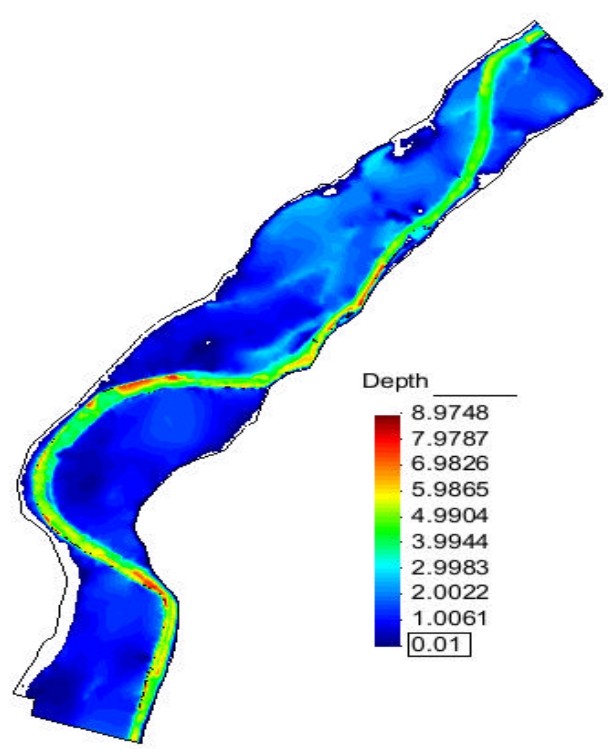


Figura 3 Análisis de calados en el meandro de Quinzanas en el río Narcea

Por último, el entorno Iber incluye módulos de preproceso de datos y postproceso de resultados basados en el sistema GiD (Interfaz gráfica desarrollada por el CIMNE). Ambos módulos son compatibles con entornos SIG (Sistemas de Información Geográfica).

Aparte de estos módulos ya configurados en la versión actual, existen otras líneas de trabajo en curso para futuras aplicaciones, y que serán incluidas en el modelo Iber como módulos adicionales en versiones futuras: definición de caudales ecológicos, transporte de sustancias reactivas, ciclos del oxígeno y nitrógeno en ríos y estuarios, análisis de contaminantes microbiológicos en ríos y estuarios, etc.

Esta capacidad de evolución hace del Iber un modelo numérico dinámico, abierto a mejoras o adaptaciones en su módulo de cálculo y a la introducción de nuevas ecuaciones constitutivas. Todo ello integrado en una interfaz modificable, donde es posible crear pestañas o modos de visualización específicos para las necesidades del usuario en base a un pre- y post-proceso dinámico (GiD). Todas estas cualidades hacen del Iber un modelo con gran capacidad de adaptación a las exigencias constantes de administraciones y usuarios, ya que puede incluir todas aquellas prestaciones que la Administración considere necesarias para dar cumplimiento a cálculos que se requieran en leyes y planes específicos: Instrucción de Planificación Hidrológica, Plan Nacional de Calidad de las Aguas, Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, etc.

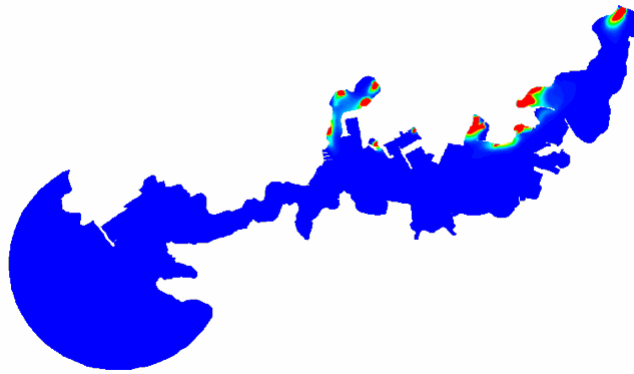


Figura 4 Concentración de E. Coli en la Ría del Ferrol por vertidos



Figura 5 Superposición cartográfica en el río Valira (Andorra)

El modelo Iber se complementa con otras acciones a su alrededor, configurando todo ello lo que va a conocerse bajo la denominación Aula Iber. Se trata de una plataforma de divulgación y formación que se estructura en torno a la web de Iberaula (www.iberaula.es). Esta web ofrece toda la información asociada al modelo numérico y a las actividades que se desarrollan para su difusión, como la descarga del propio programa y los manuales asociados. La web cuenta también con secciones para la difusión de proyectos e informes técnicos reales sobre diferentes casos aplicados que se han llevado a cabo en distintos puntos de España, así como proyectos de

investigación presentados en diversos congresos y que han usado el modelo Iber como herramienta de cálculo. Dentro de la plataforma, existe también un foro de discusión donde los propios usuarios pueden intercambiar dudas e impresiones, y sirve de referencia para analizar las demandas y mejoras para futuras versiones del modelo.

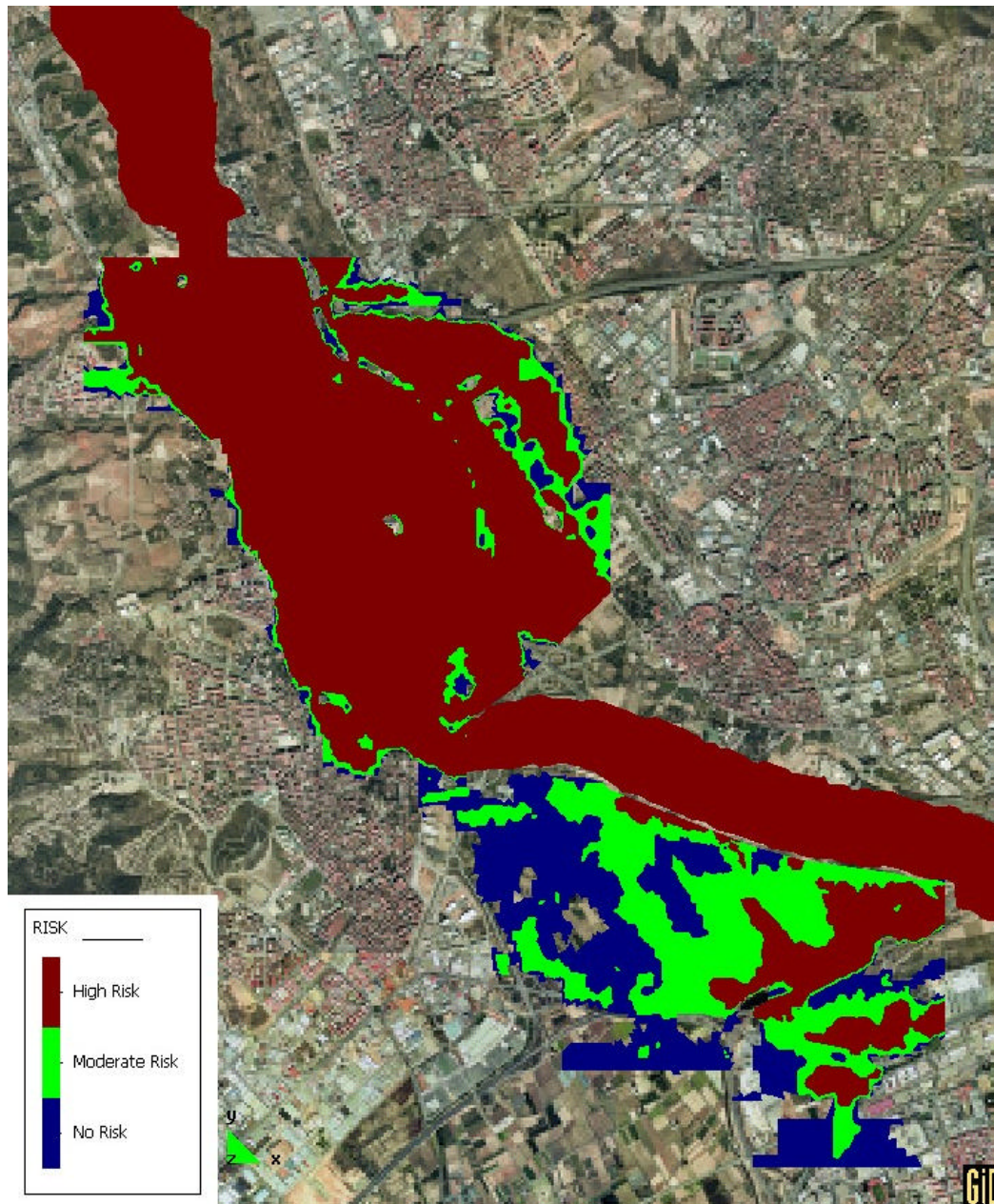


Figura 6 Análisis de riesgo de inundaciones en el río Llobregat

También se encuadra dentro de esta plataforma una estructura formativa consistente en la organización de cursos de formación orientados a técnicos de las distintas administraciones y consultoras relacionadas con la gestión de aguas, e impartidos por personal del Centro de Estudios Hidrográficos y de las universidades implicadas.

Durante 2010 se han organizado cuatro cursos de formación sobre IBER en España (dos en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, uno en la CH del Ebro y otro en la Universidad de A Coruña), así como un curso en Iberoamérica, en concreto en el marco del Congreso Latinoamericano de la IAHR, celebrado en Punta del Este (Uruguay) en el mes de noviembre de 2010.

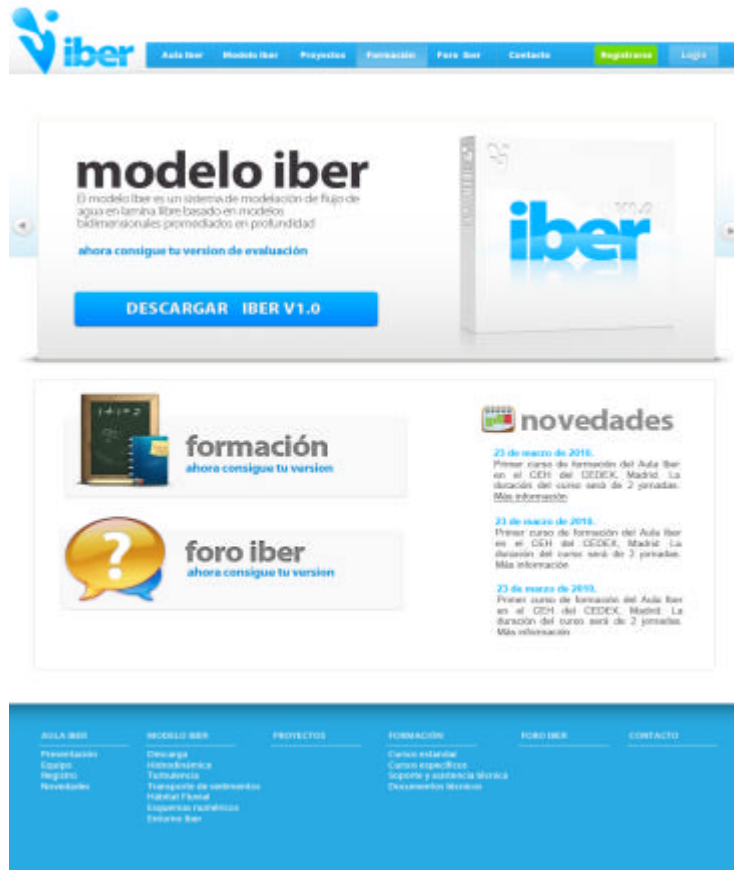


Figura 7 Página principal de la web de Iberaula (www.iberaula.es)

4.3 Modelación numérica en el ámbito de las estructuras hidráulicas

El CEDEX dispone de un modelo hidrodinámico tridimensional MDST con el que se realizan estudios hidrodinámicos complejos en estructuras hidráulicas. MDST es un software, desarrollado en el CEDEX (en el Centro de Estudios de Puertos y Costas CEPYC, coordinado por su Director J.M. Grassa), de filosofía lagrangiana que discretiza el fluido en partículas y resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes mediante el método SPH para flujo cuasi-incompresible.

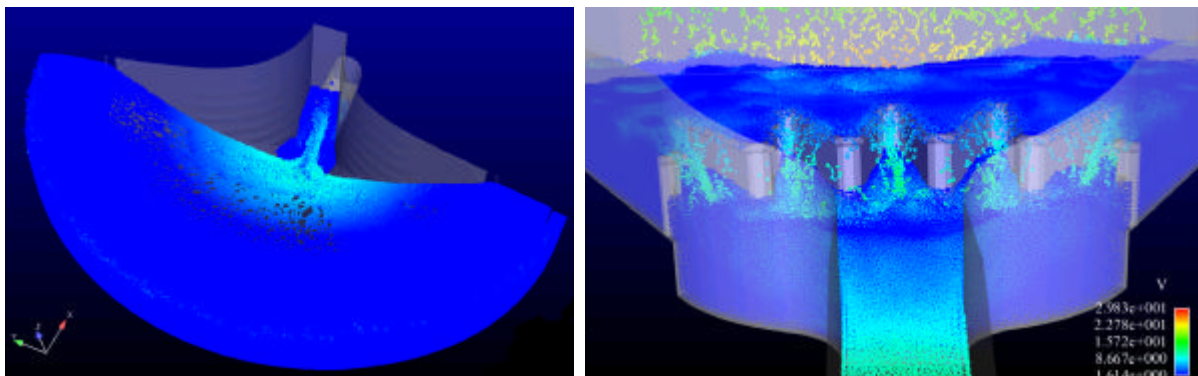


Figura 8 Simulación SPH del aliviadero de la presa de Calanda con dos tipologías de vertedero diferente de vertederos.

El empleo de técnicas de supercomputación, gracias al desarrollo de la versión paralela MPI, permite abordar estudios de casos reales de grandes dimensiones y gran complejidad hidráulica. Se han realizado trabajos encaminados a la validación del método y su aplicabilidad a estudios hidrodinámicos de estructuras hidráulicas con bastante éxito, que han dado lugar a diferentes publicaciones.

Con este modelo se realizan estudios para caracterizar el funcionamiento de vertederos de diferentes tipos y obtener curvas de capacidad, estados de presiones sobre el paramento, identificar zonas de despegue y depresiones.

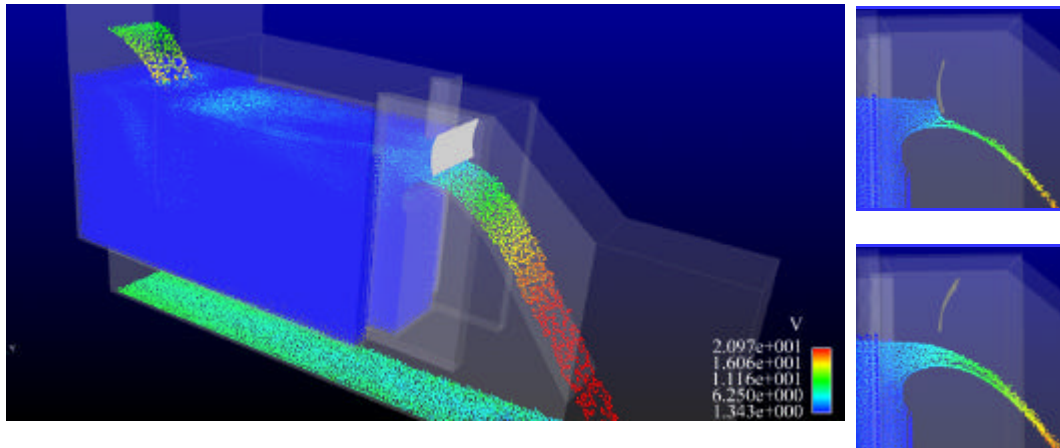


Figura 9 Simulación SPH del aliviadero de Alarcón

MDST también permite reproducir dispositivos de disipación de energía, como cuencos de amortiguamiento, o estudiar la presiones en la solera de un cuenco de disipación bajo por el impacto de un chorro. Además se han abierto líneas de investigación para flujos aireados en aliviaderos y transporte de sedimentos.

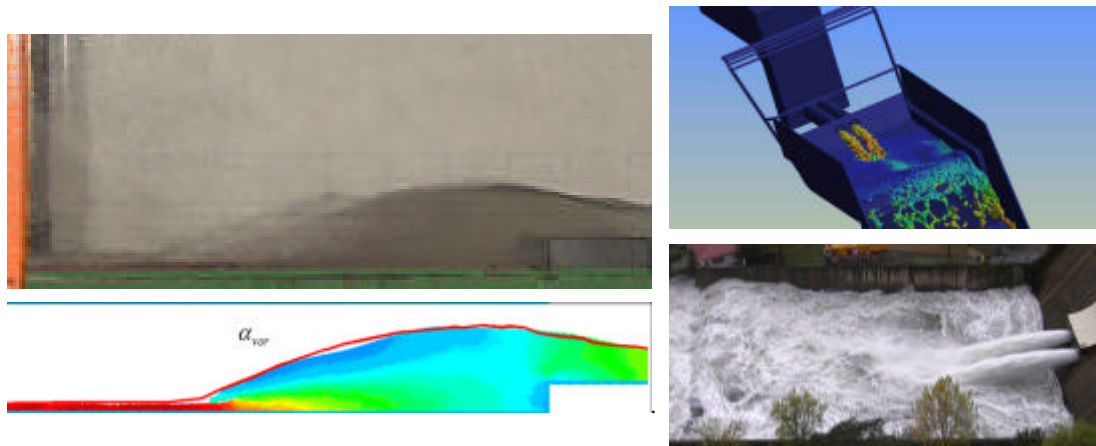


Figura 10 Simulación SPH de un resalto hidráulico y del cuenco de la presa de Villar del Rey

Bibliografía

FERNANDEZ BONO, Juan F. La modelación híbrida como técnica de análisis y diseño óptimo de las obras hidráulicas de defensa contra inundaciones en entornos urbanos. Congreso Iberoamericano sobre Técnicas Aplicadas a la Gestión de Emergencias para la Reducción de Desastres Naturales, 1. Ponencias, comunicaciones. Valencia, España. Universidad Politécnica, 1992

FERNANDEZ BONO, Juan F. Introducción a la modelación matemática de lecho móvil. Análisis crítico. Jornadas Técnicas sobre Hidráulica Fluvial. CEDEX, 2008

GARROTE, L; TRUEBA, J; LAGUNA, F. Comparación entre diferentes modelos matemáticos comerciales. Jornadas Técnicas sobre Hidráulica Fluvial. CEDEX, 2008

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO. Reglamento de la Planificación Hidrológica, 2007

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO. Instrucción de Planificación Hidrológica, 2008

TOOBES, L; CHANSON, H. Numerical limitations of hydraulic models. 34th IAHR World Congress. Brisbane, Australia, 2011