

sastres de una manera más global, prestando atención a las evaluaciones del riesgo y la vulnerabilidad.

Para reducir eficazmente las pérdidas por crecidas, las autoridades están reconociendo la importancia de una restauración fluvial adecuada, una gestión medioambiental firme y medidas preventivas basadas en el conocimiento de la naturaleza de la vulnerabilidad a las crecidas.

También hay que reformular constantemente las estrategias de gestión de las crecidas y de las sequías.

Se necesitan estrategias modernas para adoptar una perspectiva de sostenibilidad y destacar el uso correcto y de manera integrada del potencial del ciclo hídrico, las planicies de inundación y las zonas costeras. Dicha perspectiva se basa en enfoques de anticipación; capacitando a las comunidades locales para tomar decisiones, fomentando la resistencia a los desastres, mejorando las capacidades de adaptación locales y socioeconómicas y garantizando la igualdad entre la gente.

Predicción de crecidas y respuesta a las mismas: cómo reducir las pérdidas por crecidas a la vez que gestiona el agua de manera más eficaz

29

Por Curtis B. BARRETT*

Introducción

La aparición de crecidas y de sequías ha aumentado en todo el mundo. Además, ahora es mayor la vulnerabilidad de comunidades locales, provincias y estados, o países y regiones. Resulta esencial que los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales aumenten sus capacidades para reducir estas pérdidas y alteraciones. Este artículo describe la manera en que se puede satisfacer de forma parcial la creciente necesidad de una gestión hídrica mejor y de la mitigación de desastres por medio de un equipo coordinado de hidrólogos y meteorólogos. Las importantes mejoras en tecnología, adquisición de datos y modelización hidrometeorológica han dado como resultado una mayor capacidad de predicción tanto en los SHN como en los SMN que puede ser utilizada para reducir las pérdidas por extremos hidrológicos y contribuir a lograr soluciones de gestión hídrica integrada para comunidades, estados, países y regiones. La tecnología y ciencia emergentes, tanto en la especialidad de hidrología como en la de meteorología, prometen importantes mejoras en la precisión de las predicciones futuras.

Cómo mitigar los desastres relacionados con el agua

Están creciendo rápidamente las pérdidas económicas mundiales debidas a episodios relacionados con la meteorología (principalmente crecidas). Las recientes y catastróficas inundaciones que han sufrido Bangladesh, China, Europa y la India prueban esta tendencia alarmante. A la vez que estas inundaciones desastrosas devastaban algunas partes del mundo, las sequías afectaban a los EE.UU. y África. Esta tendencia en el efecto de los extremos hidrológicos viene originada por varios factores, entre los que se incluyen una población creciente en las planicies de inundación mundiales, los cambios en el uso del suelo y la urbanización y un aumento cada vez mayor de los episodios extremos de precipitación. Más del 25 por ciento de la población mundial vive en zonas sometidas a riesgo de desastres naturales. Los episodios extremos relacionados con la meteorología seguirán produciéndose en el futuro (y de hecho pueden aumentar en magnitud y en frecuencia).

El empleo de enfoques estructurales y no estructurales puede mitigar los desastres. En general debe adoptarse un enfoque múltiple de la mitigación analizando la gestión de las crecidas de forma integrada. El uso de medidas estructurales tales como diques, em-

* Director de Proyecto de Hidrometeorología del SMN de la NOAA, Asesor Hidrológico de la AR IV

bales, protección de estructuras frente a las inundaciones y controles del uso del suelo ha jugado un papel importante en la mitigación de las crecidas. Sin embargo, los enfoques estructurales están siendo más difíciles de aplicar debido a los altos costes económicos y a las consecuencias medioambientales. Los enfoques no estructurales consisten en zonificar las planicies de inundación, en proteger los elementos situados en zonas inundables, en crear programas que desincentiven el vivir en planicies de inundación, tales como seguros frente a crecidas. Crear un programa de respuesta y de predicción de inundaciones y fluvial intensifica todos los enfoques (estructurales y no estructurales) que se pueden adoptar en el problema de la reducción de crecidas. Las predicciones fluviales también son una componente crítica para la gestión de los recursos hídricos. Los países, estados y comunidades se están dando cuenta de que el agua es limitada y de que su reparto debe determinarse por valores económicos, sociales y medioambientales. Las predicciones fluviales, sobre todo para ríos transfronterizos, ofrecen a los responsables de la toma de decisiones información para optimizar el uso del agua y minimizar los conflictos.

Hay muchos tipos de desastres relacionados con el agua. Las crecidas y las crecidas repentinas, los corrimientos de tierra y los aludes de lodo, las sequías y la contaminación pueden provocar enormes pérdidas humanas y alteraciones económicas. Los incrementos de la demanda de agua, asociados con la disminución de los suministros de la misma y las condiciones climatológicas extremas están creando tensiones en nuestra sociedad.

Cómo crear un sistema de predicción de crecidas y de respuesta a las mismas

Para crear un sistema viable de predicción y alerta de crecidas para las comunidades con riesgo se requiere

la combinación de datos meteorológicos e hidrológicos, herramientas de predicción y predictores cualificados. Un sistema de predicción de crecidas debe dar tiempo suficiente para que respondan las comunidades. Cuanto mayor sea dicho tiempo, más se reducirán los daños y las muertes. Las predicciones deben ser lo suficientemente precisas como para fomentar la confianza de forma que las comunidades y los usuarios lleven a cabo acciones efectivas cuando sean avisados. Las predicciones erróneas reducen la credibilidad y dificultan las acciones de respuesta.

Los sistemas de alerta de crecidas tienen que ser fiables y deben estar diseñados para funcionar bajo las situaciones más graves de crecidas. Los mayores beneficios de un programa efectivo de alerta de crecidas se producen cuando la inundación es grave, generalizada y/o repentina y cuando las comunidades y organizaciones están preparadas para mitigar sus efectos.

La experiencia y las lecciones aprendidas han demostrado que un sistema de respuesta, alerta y predicción de crecidas de extremo a extremo consta de los siguientes elementos o etapas, que deben conectarse para lograr reducir las pérdidas a través de las predicciones. Estos elementos son: la recogida y comunicación de datos; la predicción hidrológica y la generación de productos de predicción; la difusión de las predicciones a los usuarios; la toma de decisiones y el apoyo a la decisión; y las acciones a llevar a cabo por los usuarios. (Figura 1).

La interacción entre las componentes tecnológicas del sistema integrado de predicción de crecidas puede representarse como una cadena compuesta de muchos eslabones. Cada eslabón debe ser completamente funcional y fuerte para que se obtengan beneficios del sistema. Cuando un solo eslabón está debilitado o no funciona adecuadamente falla el sistema entero. En otras palabras, si se genera una predicción

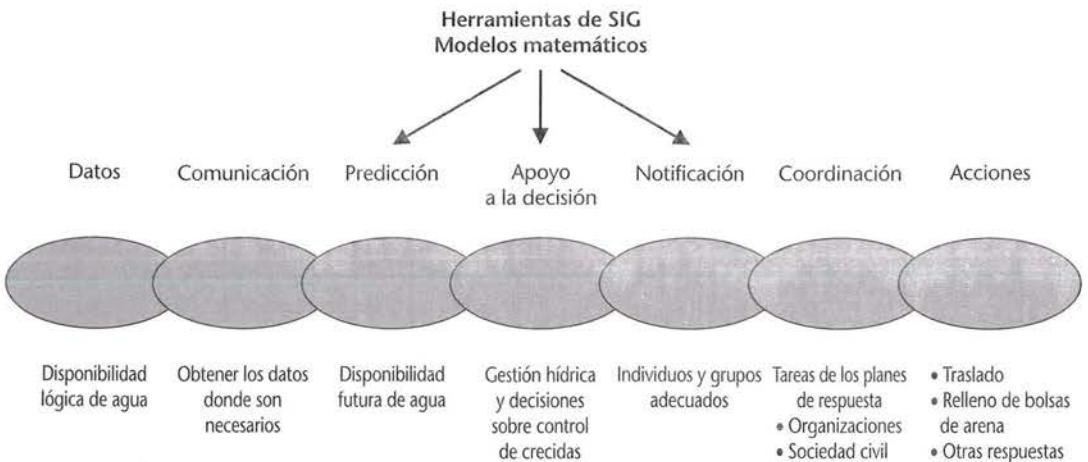


Figura 1 — Sistema integrado de predicción y alerta de crecidas y de respuesta a las mismas con IWRM

perfecta de crecidas pero no llega a la población en peligro, entonces el sistema de alerta no es eficaz. Igualmente, si la población en peligro recibe el alerta pero no sabe qué acciones debe llevar a cabo, entonces el sistema sigue sin alcanzar su objetivo.

En los diez últimos años ha habido enormes mejoras en la tecnología para suministrar predicciones fluviales y de crecidas más fiables. Sin embargo, estas herramientas (los sistemas de datos y los modelos) deben estar enlazadas y utilizarse de forma adecuada al generar predicciones y alertas. Incluso los países más pobres pueden permitirse muchas de las nuevas tecnologías disponibles para apoyar las predicciones y las alertas.

Recogida y transmisión de datos hidrometeorológicos

Muchos países utilizan observadores voluntarios o asalariados para realizar observaciones y transmitir datos a una oficina de recolección central. Para ríos y corrientes que crecen lentamente este proceso lento puede ser bastante apropiado para generar predicciones para los usuarios. Sin embargo, mantener listas operativamente las redes basadas en observadores humanos puede suponer un desafío muy grande. Las redes tradicionales pluviométricas e hidrométricas pueden ser bastante eficaces si se facilitan los datos en tiempo real. La OMM ha informado de que las redes de observación hidrológica se están deteriorando a un ritmo alarmante.

Sistemas automáticos de datos

El uso de medidores y sensores automáticos está aumentado en todo el mundo. Las redes hidrometeorológicas automáticas están creciendo al aceptarse que los datos deben recogerse rápidamente para sostener muchas aplicaciones en tiempo real, tales como la predicción de crecidas repentinas, el control de crecidas y las prácticas de gestión hídrica. Las estaciones meteorológicas automáticas, los aforos de caudales y los sensores de precipitación automáticos pueden desplegarse en zonas apartadas y ofrecen una recogida y una distribución continuas y fiables de datos críticos para multitud de usuarios y de otros sectores interesados en los recursos hídricos. Los sistemas automáticos de datos constan de sensores meteorológicos e hidrológicos, de un transmisor de radio u ordenador (registrador de datos) y de un lugar receptor o enlace descendente que recibe y procesa los datos para poder aplicarlos. Hay muchos tipos de sistemas automáticos de datos hidrometeorológicos que utilizan tecnología de comunicaciones por línea, por satélite o impulso meteórico. Esta rápida transmisión de información hidrometeorológica es extremadamente útil para los predictores hidrológicos, los usuarios del agua y demás agentes implica-

dos porque se puede acceder a las descargas y/o a Internet de forma instantánea.

Radar

El radar es una herramienta muy popular, poderosa y aún cara que puede utilizarse para estimar la precipitación sobre zonas extensas. La aplicación de las estimaciones de la precipitación obtenidas a partir del radar sirve como herramienta principal en la predicción de crecidas y de crecidas repentinas en Japón, los EE.UU. y muchos países de Europa. Numerosos países, incluidos Rumania, Polonia y China, están creando sistemas de radar como parte de proyectos de modernización hidrometeorológica a gran escala. El uso del radar combinado con las observaciones de precipitación de pluviómetros y las técnicas para eliminar los sesgos puede ofrecer estimaciones de alta resolución de la precipitación que se pueden aplicar a los modelos de predicción de crecidas y de crecidas repentinas.

Satélites

El uso de satélites geoestacionarios y de órbita polar para obtener grandes volúmenes de productos meteorológicos e hidrológicos está avanzando rápidamente. Los datos de teledetección pueden utilizarse ahora para ofrecer estimaciones de la precipitación, extensión de la cubierta de nieve, tipo de vegetación, uso del suelo, evapotranspiración y humedad del suelo e inundación de la crecida. Esta información cada vez es más útil en regiones del mundo con escasez de datos, donde se necesitan predicciones de crecidas y de la disponibilidad de agua. Se dispone de estimaciones de precipitación por satélite en muchas partes del mundo y constituyen una manera barata de estimar la precipitación en zonas remotas. Las estimaciones de la precipitación por satélite se están empezando a utilizar en América Central como parte del proyecto de Reconstrucción MITCH; en México como parte del proyecto PROMMA, de la OMM y el Banco Mundial; en África como parte del Sistema de alerta temprana para casos de hambruna (FEWS) (de USAID); y en algunas zonas de Asia y de América del Sur. Las estimaciones por satélite tienen grandes incertidumbres inherentes a la hora de estimar la precipitación. En la mayoría de los casos los datos de satélite pertenecen a los Servicios Meteorológicos Nacionales y sería deseable una gran colaboración con los SHN.

Predicción de crecidas

Se dispone de numerosos modelos patentados y de dominio público para su uso en la predicción de crecidas. Los modelos varían en complejidad. A veces el modelo puede ser sencillamente una relación estadística entre la precipitación y la escorrentía con una ecuación de tránsito, mientras que otros modelos pueden ser mu-

chos más sofisticados y complejos. Esencialmente, las condiciones hidrológicas, climatológicas y geomorfológicas de la cuenca fluvial y las necesidades de las comunidades expuestas a inundaciones dentro del sistema fluvial dictan el grado de sofisticación de la solución del modelo. Los modelos hidrológicos pueden clasificarse en no distribuidos, semidistribuidos o distribuidos y funcionan por episodios o continuamente. Para predecir flujos y etapas a lo largo de los ríos los hidrólogos utilizan modelos de precipitación y escorrentía acoplados a modelos de tránsito fluvial. La información necesaria para estos modelos puede variar desde simples niveles hídricos en una sección transversal situada aguas arriba del lugar de predicción a un conjunto más amplio de variables. La información en tiempo real de la precipitación es una de las entradas básicas del modelo. Otros parámetros importantes incluyen la humedad del suelo, la temperatura, el caudal de agua, la humedad del aire, la evaporación y el nivel del agua en lagos y pantanos. Los datos deberían satisfacer también las necesidades relacionadas con la precisión y la disponibilidad temporal oportuna. Si la precipitación es sólida, entonces se aplican modelos de fusión de nieve. Los modelos de precipitación y escorrentía varían en precisión y complejidad desde los modelos sencillos de índice de antecedentes hasta los modelos de cuenca conceptual de múltiples parámetros. El uso de predicciones de flujos de crecida utilizando Redes Neuronales Artificiales es otro enfoque de la modelización que se ha aplicado con éxito.

Hay muchas variedades de estas categorías básicas de modelos y la mayoría varía según la manera en que se parametrizan los procesos hidrológicos. A lo largo de las dos últimas décadas se ha producido un progreso importante en la mejora de la ciencia y el funcionamiento de los modelos. El funcionamiento del modelo varía según el tipo de característica de la cuenca fluvial que se modeliza, la disponibilidad de datos para calibrar los modelos y la experiencia y conocimiento de la mecánica del modelo del hidrólogo que lo aplica. Los datos son generalmente el factor limitante para alcanzar una precisión aceptable en aplicaciones operativas. El Sistema de Hidrología Operativa para Fines Múltiples (HOMS) de la OMM ofrece una colección de modelos hidrológicos de los que algunos pueden aplicarse a la predicción hidrológica.

En la actualidad se está prestando mayor atención a los modelos probabilísticos que tienen en cuenta las incertidumbres de los datos porque los gestores hídricos requieren una base más objetiva para tomar decisiones sobre el uso del agua. Los modelos probabilísticos reconocen incertidumbres futuras y expresan flujos y etapas futuras como un conjunto de incertidumbres basado en condiciones o incertidumbres hidroclimatológicas históricas al usar modelos de predicción numérica del tiempo acoplados (predicción de la precipitación futura desde horas a meses en el futuro).

El proceso de calibración de los modelos hidrológicos y la definición de los parámetros del modelo es ahora más objetivo, más rápido y produce resultados más aceptables. La evolución desde ordenadores centrales de ejecución por lotes a software de calibración interactiva ejecutado en estaciones de trabajo o en rápidos ordenadores personales ha mejorado enormemente la capacidad de los hidrólogos para definir rápidamente los parámetros de los modelos con mayor confianza. También la investigación continuada del uso de datos de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para definir parámetros del modelo significa que los modelos hidrológicos pueden ejecutarse en la actualidad en cuencas sin sensores con resultados razonables.

Sistemas de predicción hidrológica

En los diez últimos años las bases de datos y el software de proceso de bases de datos se han acoplado con modelos hidrológicos para producir sistemas de predicción hidrológica. Los sistemas de predicción hidrológica utilizan datos hidrológicos y/o meteorológicos y procesan los datos que usan los modelos hidrológicos, que ofrecen entonces productos de predicción de ríos y



Figura 2 — Acoplamiento de los sistemas meteorológico y climatológico a los sistemas hidrológicos

crecidas. Esta integración y miniaturización de la tecnología hidrológica ha abierto la posibilidad de ofrecer a los países en vías de desarrollo sistemas hidrológicos sofisticados que son baratos y sostenibles. Los sistemas hidrológicos tienen actualmente interfaces gráficas de usuario bien diseñadas que ofrecen interacciones sencillas entre el predictor hidrólogo y las entradas y salidas de datos. La Figura 2 representa un diagrama que ilustra la manera en la que un sistema integrado de predicción hidrológica utiliza distintas entradas de datos y ofrece productos de salida para satisfacer las distintas necesidades de los usuarios.

Las ciencias de los modelos meteorológicos, climatológicos e hidrológicos han avanzado de manera importante a lo largo de la última década. Las mejoras en los modelos mundiales de predicción numérica del tiempo ofrecen, en la actualidad, predicciones de precipitación de mayor resolución y más precisas. El uso de modelos de mesoescala está aumentando y suministra las entradas necesarias a los sistemas de predicción hidrológica. La precisión de las predicciones de precipitación ha mejorado hasta el punto de que su aportación a las predicciones hidrológicas mejora los resultados para los primeros días. Incluso las predicciones climatológicas a largo plazo pueden utilizarse para condicionar el uso de la climatología a producir predicciones probabilísticas mensuales y estacionales para grandes cuencas fluviales.

Como ahora es más importante (que en el pasado) el uso de predicciones meteorológicas para la hidrología, los SHN y los SMN tienen que desarrollar una política de estrecha coordinación para maximizar la calidad y el valor de los productos y los servicios a la comunidad de usuarios de recursos hídricos.

Difusión de datos y predicciones a los usuarios

Se ha producido un progreso importante en la tecnología de las comunicaciones para permitir una transmisión rápida de datos, predicciones e información a grandes distancias y a poblaciones alejadas. Cuanto más rápido puedan enviarse datos y predicciones a los usuarios más tiempo crítico puede darse a las acciones de respuesta, lo que origina que se salven vidas, se reduzcan los daños a la propiedad y se hagan funcionar las estructuras de recursos hídricos.

En el pasado, la comunicación de información vital dependía de los teléfonos, que a veces se averiaban durante episodios hidrológicos extremos, cuando más necesarias eran. En la actualidad, los datos, predicciones y avisos pueden distribuirse por satélite, radios de RF, teléfonos móviles y también emisoras de radio de AM y FM. La llegada de Internet ha revolucionado las comunicaciones mundiales. En muchos sistemas hi-

drológicos en funcionamiento los datos y predicciones se colocan de forma automática en sitios de Internet donde muchos usuarios y organizaciones envían y reciben información. En el proyecto de Reconstrucción del Huracán MITCH de la NOAA terminado en 2001 algunos Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales de América Central y usuarios de recursos hídricos reciben datos y predicciones por Internet.

En África, el proyecto RANET de la NOAA ofrece predicciones y datos meteorológicos e hidrológicos a pueblos remotos. Las predicciones y los datos hidrometeorológicos son transmitidos por satélite a emisoras de radio de AM y FM. Las emisoras de radio difunden la información, que es recibida por los agricultores a través de receptores de radio.

El futuro de la predicción hidrometeorológica

Los avances en la predicción hidrometeorológica producirán predicciones más precisas, oportunas, fiables y específicas del lugar a todos los segmentos de la sociedad. Las mejoras se producirán en la disponibilidad de datos, la modelización, la generación de productos de predicción y en la difusión a los usuarios.

Es probable que en el futuro mejoren la cantidad y calidad de los datos a medida que se pongan en marcha en todo el mundo sistemas de datos más automatizados. También se están desplegando cada vez más sistemas de radar en cuencas fluviales con problemas hídricos. Las mejoras para fusionar la precipitación obtenida de pluviómetros, radares y satélites se traduce en mejores cálculos de la precipitación, temporal y espacialmente. Compartir esta información entre los SMN y los SHN y los usuarios produce múltiples beneficios a partir de estos conjuntos de datos e incrementa la probabilidad de mantener estas inversiones en alta tecnología.

Es probable que una mayor investigación y aplicación de modelos hidrológicos distribuidos tenga importantes mejoras en la predicción hidrológica, sobre todo para predecir crecidas repentinas. La precisión de los datos ha mejorado para pequeñas escalas espaciales y temporales, preparando el terreno para la predicción de crecidas repentinas. El uso de información SIG vinculada a parámetros de modelos hidrológicos distribuidos y no distribuidos ha mejorado el rendimiento de estos modelos. Ahora se puede realizar la unión de modelos hidrodinámicos de tránsito con resultados de datos SIG en mapas de inundación que muestran cómo afectarán las inundaciones a las infraestructuras construidas por el hombre.

Por último, la mejora de los modelos mundiales de predicción numérica del tiempo y el desarrollo y la aplicación de modelos de mesoescala están dando

como resultado mejores predicciones de precipitación a escalas más pequeñas. El uso de modelos de conjunto acoplados con modelos hidrológicos de conjunto ofrece la base para predicciones fluviales a corto plazo más precisas y la capacidad de ofrecer predicciones fluviales a largo plazo (estacionales) para ríos más grandes que puedan gestionarse de forma más eficaz. Las mejoras en la predicción climatológica pueden observarse en la predicción del suministro de agua a través del acoplamiento de estos modelos.

Conclusiones

El aumento alarmante de las pérdidas económicas debidas a crecidas y sequías es el resultado de la mayor población en planicies de inundación, la urbanización y la aparición de más extremos hidrológicos. El desarrollo de medidas estratégicas de mitigación en el marco del desarrollo sostenible para reducir las pérdidas por desastres relacionados con el agua es una prioridad de la comunidad internacional. Las estrategias de mitigación de desastres requieren que la predicción vaya asociada a acciones de respuesta. En la actualidad, las crecidas y las sequías pueden predecirse con mayor precisión, debido a los avances en la modelización hidrológica y meteorológica, y también a los mayores sistemas de vigilancia, tales como la teledetección. Los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales tienen un papel fundamental a la hora de reducir los desastres.

La cantidad y calidad de los datos disponibles para la predicción hidrológica están aumentando en muchas regiones del mundo. El uso de sistemas de datos automáticos, unido al uso de imágenes de satélites, puede ofrecer cálculos razonables de precipitación para los modelos y sistemas de predicción. Hay distintos tipos de modelos y de sistemas de modelización que pueden aplicarse a las cuencas fluviales para obtener una precisión aceptable de la predicción fluvial y de crecidas. Los sistemas integrados de predicción hidrológica utilizan todos los datos disponibles, ofrecen elecciones en los modelos y realizan productos de predicción que se pue-

den distribuir a los usuarios a través de numerosas vías de comunicación, incluida Internet.

A medida que mejoran las tecnologías de las comunicaciones, la fiabilidad y la velocidad de la entrada de datos y la transmisión de los productos de predicción se ofrece mayor tiempo de reacción a la comunidad de agentes interesados de las cuencas fluviales. Los avances en la obtención de datos SIG y en el acoplamiento de modelos hidrológicos con datos de elevación digital están produciendo una nueva generación de productos de mapas de inundación.

Los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales tienen la posibilidad de ganar credibilidad trabajando juntos, mejorando estrechamente los rendimientos del servicio de predicción y compartiendo datos, predicciones e información con una comunidad de usuarios diversa al servicio de la humanidad.

Referencias

- BARRETT, C. B. y P. PILON *et al.*, 2003: *Guidelines for Reducing Flood Losses*, New York.
- BARRETT, C. B. *et al.*, 1985: Hydrology Subcommittee of the Interagency Advisory Committee on Water Data, *Guidelines on Community Local Flood Warning and Response Systems*, Springfield.
- BARRETT, C. B., 1999: *Successful Development and Engineering of Global Integrated Water Management Systems*, American Society of Civil Engineers, International Activities Committee, roundtable discussion paper, Washington, DC.
- GEORGAKAKOS, K. P.: Advances in Forecasting Flash Floods, The CCNAA-AIT Joint Seminar on Prediction and Damage mitigation of Meteorologically induced natural Disasters, Taiwan, mayo de 1992.
- KNEALE, P., S. OPENSHAW, A. MCDONALD y S. CARVER, 1998: *Neural Networks for Flood Forecasting*, <http://www.gog.leeds.ac.uk/projects>.
- TODINI, E.: *Present operational flood forecasting systems and possible improvements*, Bologna, Italy. <http://www.bham.ac.uk/CivEng/rbm/lect.pdf>.
- US Department of Commerce, 2002: *Final Report on Hurricane Reconstruction Program, Central American and the Dominican Republic*.
- Organización Meteorológica Mundial y Organización Educativa, Científica y Cultural de las Naciones Unidas, 1997: *El agua del mundo, ¿hay suficiente?*