

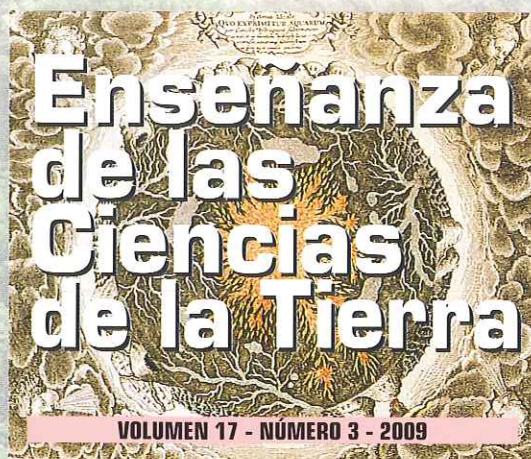
VOLUMEN 17
NÚMERO 3 - 2009

Enseñanza de las Ciencias de la Tierra

Monográfico:

Riesgos geológicos externos

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA PARA LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS DE LA TIERRA



ÍNDICE

Editorial	229
Presentación	
– Riesgos geológicos y educación. <i>Juan Gabriel Morcillo</i>	230
Temas del día	
– Riesgos geológicos: técnicas de análisis y mitigación. <i>Miguel Llorente y Luis Laín</i>	232
– España, territorio de riesgo. <i>Jorge Olcina Cantos</i>	242
Fundamentos conceptuales y didácticos	
– Riesgos por avenidas e inundaciones fluviales. <i>Andrés Díez, Miguel Llorente, Juan Antonio Ballesteros y Virginia Ruiz</i>	254
– Las avenidas torrenciales en cauces efímeros: ramblas y abanicos aluviales. <i>M. Guillermina Garzón Heydt, José A. Ortega Becerril y Júlío Garrote Revilla</i>	264
– Riesgos litorales. <i>Javier Benavente, Laura del Río y F. Javier Gracia</i>	277
– Movimientos de ladera. <i>Ramon Copons y Anna Tallada</i>	284
– Subsistencia del terreno. <i>Roberto Tomás, Gerardo Herrera, José Delgado y Fernando Peña</i>	295
– Riesgo de subsidencia kárstica en áreas urbanas: el caso de Zaragoza. <i>José L. Simón, M^ª Asunción Soriano, Andrés Pocoví, Luis E. Arlegui, Antonio M. Casas, Carlos L. Liesa, Arancha Luzón, Antonio Pérez, Óscar Pueyo, Emilio Pueyo, Tania Mochales, Fco. Javier Gracia Abadías y Diego Ansón</i>	303
– Sistemas radar aplicados a la investigación de subsidencia y movimientos de ladera. <i>Gerardo Herrera, Roberto Tomás, Juan Manuel López-Sánchez, Oriol Monserrat, Geraint Cooksley y Joaquín Mulas</i>	316
Experiencias e ideas para el aula	
– El delta del Ebro: Aula viva para la educación medioambiental y el análisis de los riesgos costeros. <i>María Antonia Fregenal</i>	325
– Internet y los riesgos naturales: fuente de recursos para la docencia e investigación. <i>Emilio Martínez Ibarra y Jorge Olcina Cantos</i>	338
Informaciones	
– Información de la AEPECT	353
– Ficha de inscripción a la AEPECT	354
– Normas para los autores	355
– Precios de las publicaciones de la AEPECT	356

RIESGOS POR AVENIDAS E INUNDACIONES FLUVIALES

Inland River Flood Risk

Andrés Díez, Miguel Llorente, Juan Antonio Ballesteros y Virginia Ruiz (*)

RESUMEN

Las inundaciones tienen variados orígenes, lo que determina la existencia de diferentes tipos de inundaciones (naturales-artificiales, terrestres-costeras, avenidas-crecidas, riadas-in situ). Las catástrofes naturales ocurridas como consecuencia de las inundaciones se encuentran entre las que han generado un mayor número de víctimas mortales y pérdidas económicas en España. En los efectos e impactos de las inundaciones influyen: la profundidad de agua, su permanencia temporal, la velocidad de la corriente, la capacidad erosiva, el arrastre de sólidos y su depósito, y otros fenómenos geológicos asociados (movimientos de ladera, sufusión). Los grandes grupos de técnicas para el análisis de la peligrosidad de inundaciones son: históricos y paleohidrológicos, geológicos y geomorfológicos, e hidrológicos e hidráulicos; lo ideal es utilizar todos ellos de forma integrada, calibrada y complementaria. Entre las medidas de mitigación del riesgo existen las estrategias predictivas, preventivas y correctoras, destacando como idóneo el empleo de la ordenación del territorio como medida preventiva de carácter no estructural. Finalmente se proponen una serie de actividades y ejercicios prácticos para el aula, campo y laboratorio sobre análisis de la peligrosidad de inundaciones fluviales.

ABSTRACT

Flood genesis is varied, hence there are different kinds of floods (natural/artificial, inland/coastal, flash floods/cruets, in-situ floodings). Natural catastrophes related to floods are among those causing most casualties and economic loss. Among the effects and impacts of floods it can be found: water depth, its durability, water velocity, erosion capacity, sediment transport and deposition, and other geologic process associated (landslides, pipings). Regarding the surveying methods, the following groups can be pointed up: historical-palaeohydrological, geological-geomorphological and hydrology-hydraulics. All of them should rather be used in an integrated way, calibrating and complementing one another. Among the measures for mitigating risk, there exist predictive preventive or corrective measures, where the preventive non structural measure of spatial planning should rather be pointed up as the most effective. Last but not least, several practical cabinet, field and laboratory exercises about the flood hazard analysis are proposed.

Palabras clave: inundación, peligro geológico, riesgo natural, periodo de retorno, riada
Keywords: flood, geological hazard, natural risk, return period, flash flood

INTRODUCCIÓN

¿Qué es una inundación?

Una inundación es la acción y efecto de inundar, esto es, cubrir los terrenos y a veces las poblaciones. La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, define inundación como la sumersión temporal de terrenos normalmente secos, como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada. La Agencia Federal de Gestión de Emergencias de los EE.UU. (FEMA) cuantifica incluso la superficie anegable para que se considere

inundación: una condición temporal y general de inundación completa o parcial de dos o más acres de terrenos normalmente secos o de dos o más propiedades, o sea, un exceso de agua (o barro) sobre terrenos normalmente secos. Por último, la nueva Directiva europea de gestión del riesgo de inundación define ésta como el "anegamiento temporal de terrenos que no están normalmente cubiertos por agua" (artículo 2.1). A pesar de la indefinición de expresiones como "normalmente secos" o "no están normalmente cubiertos por el agua", lo que queda claro es que suponen la inundación de zonas que, a escala temporal humana, pasan más tiempo emergidas que sumergidas bajo las aguas.

(*) Área de Investigación en Peligrosidad y Riesgos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España (MICINN), Rtos Rosas 23, 28003 Madrid. andres.diez@igme.es; m.llorente@igme.es; ja.ballesteros@igme.es; v.ruiz@igme.es

¿Qué tipos de inundaciones existen?

Las inundaciones se pueden clasificar en diversos tipos y modalidades de actuación, atendiendo a diferentes criterios:

a) Según el lugar geográfico donde se producen: terrestres, interiores o de tierra adentro (*inland*) vs litorales o costeras (objeto de otro artículo en este mismo monográfico); urbanas vs rurales.

b) Según la causa general que produce la inundación: naturales vs antrópicas; inducidas, agravadas, aceleradas...

c) Según el tipo del agua que produce la inundación: marinas vs agua dulce.

d) Según el origen y tipología de las precipitaciones que causan la inundación (Camarasa, 2002): frontales, convectivas (trombas), orográficas...

e) Según la época o estación del año en la que se producen: estivales, otoñales, invernales, primaverales, monzónicas...

f) Según su relación o no con la red de drenaje: riadas o arriadas (se asocian a ríos, arroyos y torrentes) vs arreicas (sin vinculación con redes fluviales); fluviales (asociadas a ríos, torrenciales o torrentes (asociadas a torrenteras y barrancos) y ramblazos (en ramblas y rieras).

Ello ha permitido hacer diferentes clasificaciones según esos criterios o sus posibles combinaciones (ver Díez-Herrero *et al.*, 2008b, página 18).

Las inundaciones naturales (eliminando las generadas por causas exclusivamente humanas, como las fugas y roturas en conducciones o almacenamientos) son básicamente de dos tipos: terrestres, en las que aguas dulces anegan territorios del interior de los continentes; y litorales o costeras, en las que las aguas marinas o lacustres-palustres invaden los sectores limítrofes con el dominio terrestre; entre ambos tipos existen diferentes combinaciones y situaciones intermedias. Por lo tanto, dada la diversidad de fenomenología, es más correcto hablar en plural de este tipo de riesgo, o sea, de riesgo de inundaciones.

¿Cuál es el origen de las inundaciones terrestres?

El origen de las inundaciones terrestres suele ser dual: o bien el desbordamiento de corrientes fluviales (ríos, arroyos, torrentes, etc.); o bien el encharcamiento de zonas llanas o endorreicas sin vinculación con la red fluvial, tanto por acumulación de la precipitación sin que circule sobre la superficie terrestre (precipitación '*in situ*'), como de origen hidrogeológico asociado a surgencias o elevación de la superficie freática sobre la superficie del terreno.

En el primer caso, el aumento de caudal por encima de la capacidad del cauce para albergarlo, conlleva el desbordamiento y la ocupación de las márgenes o riberas, para aumentar la sección capaz de desaguar ese caudal.

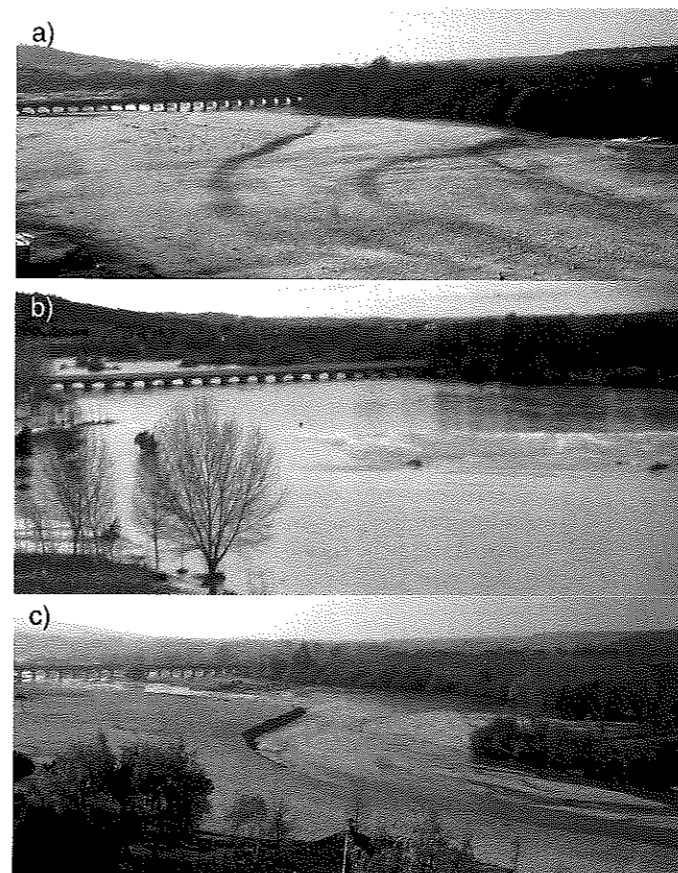


Fig. 1. Secuencia de fotografías de una inundación por desbordamiento del cauce del río Alberche en su confluencia con arroyo Perales (Cuenca del Tajo) en las proximidades de Aldea del Fresno (Madrid). Desde el punto de vista de su clasificación se trataría de una inundación terrestre, rural, natural (aunque parcialmente inducida), de agua dulce, frontal con componente orográfica, invernal, siendo una riada fluvial parcialmente torrencial. Puede apreciarse cómo en la situación inicial (a), la llanura de inundación está formada por un cono de confluencia elongado, en el que se distinguen al menos cuatro niveles de replanos de terrazas, separados por pequeños escarpes de encajamiento del canal del arroyo Perales (hacia la derecha). Tras la inundación de toda la llanura (b), durante la bajada del nivel de las aguas (c), dichas terrazas han sido modificadas, aunque su trazado sigue controlando los niveles de inundación y la peligrosidad asociada a la misma (distribución del campo de velocidades). De ahí que la configuración geomorfológica sea tan importante en el estudio de las inundaciones y sus riesgos asociados.

Los eventos más frecuentes, y a los que se dedica este artículo, son las inundaciones naturales que se producen tierra adentro, en relación con la red de drenaje (riadas) y originadas por el desbordamiento de los cauces durante dos fenómenos hidrológicos: crecidas y avenidas. Estos términos, lejos de ser sinónimos como mucha gente cree, reflejan eventos diferentes, aunque pueden producirse simultáneamente. Una avenida (del latín *advenire*) es la llegada de la corriente desde aguas arriba hacia la posición del observador; si se añade el calificativo de súbita o repentina (*flash flood*), esta 'venida hacia' se produce con carácter casi instantáneo, donde la curva de ascenso del hidrograma tiene alta pendiente, con tiempos de concentración menores de 6-12 horas. Por el contrario, una crecida (del latín *crescere*) precisa que el aumento de caudal y por consiguiente de la altura de lámina de agua, se produzca de forma lenta y progresiva (*gradual flood*), por lo que la curva de ascenso tendrá baja pendiente, y el tiempo base del hidrograma puede abarcar horas, días e incluso meses (Figura 2).

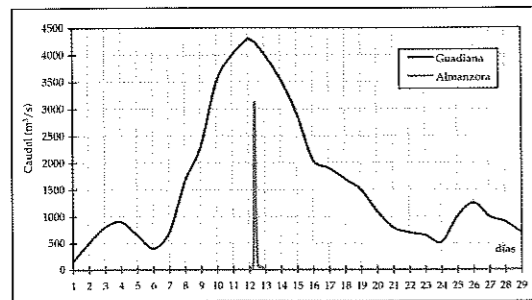


Fig. 2. Hidrogramas comparados de una crecida del río Guadiana (negro) y una avenida súbita de la rambla de Almanzora (gris). Fuente: Libro Blanco del Agua (Ministerio de Medio Ambiente, 2000).

Mientras que las avenidas súbitas son características de pequeñas cuencas hidrográficas torrenciales, de formas circulares en planta, con altas pendientes, litologías impermeables, suelos delgados, escasa vegetación y precipitaciones intensas; las crecidas son típicas de las grandes cuencas fluviales, elongadas en planta, con pendientes suaves, litologías permeables, suelos bien desarrollados, abundante vegetación y precipitaciones poco intensas y prolongadas en el tiempo. Mientras que las crecidas se relacionan con precipitaciones generalizadas y de larga duración (frontales) o fusión progresiva de mantos nivales y deshielo glaciar (en España casi anecdótico); las avenidas súbitas pueden originarse con precipitaciones intensas concentradas (orográficas y/o convectivas), roturas de represamientos naturales (p.e. lagos, lagunas y presas de castores) o artificiales (p.e. puentes obstruidos), e inadecuado funcionamiento o rotura de obras hidráulicas (azudes, presas de embalse, balsas, depósitos, diques artificiales...). Incluso se han propuesto métodos cuantitativos para diferenciar entre ambos tipos de fenómenos como desastres, basados en el denominado índice de eficiencia operativa,

calculado como el cociente entre el tiempo de concentración y el tiempo de reacción de los medios de rescate (Kobiyama y Fabris, 2007).

Otras causas de inundaciones terrestres con menor incidencia son la formación y aumento de nivel en lagos formados por represamientos causados por movimientos de ladera (p.e. Olivares, Granada), avances glaciares, actividad biológica (presas de castores) u obstáculos artificiales (puentes, embalses); el aumento del nivel freático por encima de la superficie topográfica como consecuencia de descargas de acuíferos, como ocurre en las depresiones cársticas (polje de Zafarraya, Granada); o la fusión repentina de nieve o hielo inducida por actividad volcánica (lahares y *jökulhlaup*).

IMPORTANCIA SOCIO-ECONÓMICA DE LAS AVENIDAS E INUNDACIONES

Las inundaciones son los desastres naturales con mayor repercusión socioeconómica, tanto a escala mundial como en lo que se refiere a nuestro país. Parece ser que los mayores desastres ocurridos en el Planeta en relación con las inundaciones han tenido lugar en China, donde la enorme población que ha habitado desde hace miles de años las márgenes y riberas de sus grandes ríos, ha condicionado una interferencia ancestral de las actividades humanas con las inundaciones; además con registro documental que se remonta a varios miles de años atrás. Cinco grandes inundaciones acontecidas en este país se sitúan entre los diez mayores desastres naturales por el número de víctimas mortales (web de la EM-DAT): la inundación del río Yangtse Kiang en 1931 produjo cerca de 3,7 millones de víctimas, y más de 28 millones de afectados; otras dos acontecidas en 1959 y 1887 se aproximaron a los dos millones de muertos; la del año 1939 en el norte del país se estima que produjo medio millón de fallecidos; y la acontecida en Kaifeng, provincia de Henan, en 1642, generó más de 300.000 muertes. Más recientemente basta recordar, las consecuencias de las riadas que, en las últimas décadas, han afectado a países como Mozambique, Filipinas, China, Venezuela o Estados Unidos, por citar algunos eventos que han tenido repercusión mediática. En Europa, las grandes inundaciones que tuvieron lugar en el centro del continente durante 2002, supusieron un punto de inflexión en la preocupación de las instituciones europeas sobre este problema. En España, las inundaciones han causado numerosos y graves desastres, de algunos de los cuales sólo se tiene referencias vagas y poco precisas. Entre los más recientes destacan: las inundaciones en Levante del año 1982, con más de 1.800 millones de euros de pérdidas; las que afectaron a Málaga y el Sureste durante 1989, que supusieron cerca de 1.200 millones de euros; las del País Vasco y Cantabria de 1983, con cerca de mil millones de euros; o las inundaciones del Turia en Valencia en 1957, con más de 60 millones de euros (de entonces) en pérdidas. Según un estudio realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en colaboración con el Con-



Fig. 3. Vista parcial de la inundación producida por el desbordamiento del río Eresma (Cuenca del Duero) a su paso por las inmediaciones de la Ciudad de Segovia (Alcázar al fondo), anegando los sótanos de la Casa de la Moneda. Dicha 'ceca' es considerada la fábrica mecanizada de moneda más antigua del mundo que todavía sigue en pie. 29 de enero de 2009. Foto: Mariano Otero (Unidad de Protección Civil de Segovia).

sorcio de Compensación de Seguros, dependiente del Ministerio de Economía y Hacienda (Ferrer et al., 2004), las pérdidas económicas directas por inundaciones durante el periodo 1987-2002 ascendieron a casi 12.000 millones de euros, es decir, el equivalente al 0,1 % del PIB. Además de esto, se prevén pérdidas cercanas a los 26.000 millones de euros en los próximos 30 años.

Por lo que respecta a las víctimas mortales en España, clásicamente se han señalado las inundaciones de Murcia en 1651 y de Cataluña-Vallés en 1962, como los eventos con mayor número de víctimas, próximas ambas al millar. A continuación

están las inundaciones en: Murcia de 1879 (unas 800 víctimas); Lorca (Murcia) en 1802 (700); Cataluña en 1874 (unos 600 muertos) y 1971 (aprox. 400); superan también el centenar de fallecidos los desastres de la ribera baja del Júcar en 1779, Consuegra (Toledo) en 1891, Murcia y Almería en 1963, y el Sureste en 1973. Sólo en la última década y media se han producido más de 200 víctimas mortales en España, con un goteo anual continuo. Como puede comprobarse, a pesar de la gravedad de las pérdidas humanas, las cantidades resultan insignificantes comparadas con otros sucesos, como los accidentes de tráfico. Sin embargo las inundaciones generan una mayor preocupación y alarma social por tres circunstancias: afectan prácticamente a todo el territorio, dando sensación de que su ocurrencia es imprevisible y aleatoria; las víctimas se sienten como sujetos pasivos de la inundación, ya que ellos directamente no la provocan; y producen concentraciones de víctimas mortales que tienen enorme repercusión mediática. Los casos de la avenida del barranco de Arás (Biescas), con 86 víctimas mortales; del Cerro de los Reyes (Badajoz), con 21; o de Yebra (Guadalajara), con 10, hacen bien patente este hecho.

ANÁLISIS DEL RIESGO POR AVENIDAS E INUNDACIONES FLUVIALES

El análisis del riesgo por avenidas e inundaciones fluviales, como el de cualquier otro riesgo natural, requiere la descomposición del riesgo en sus componentes principales: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad; para posteriormente proceder a su integración y estudio conjunto (Figura 4).

Los métodos y técnicas de estudio de la exposición y vulnerabilidad ante avenidas e inundaciones

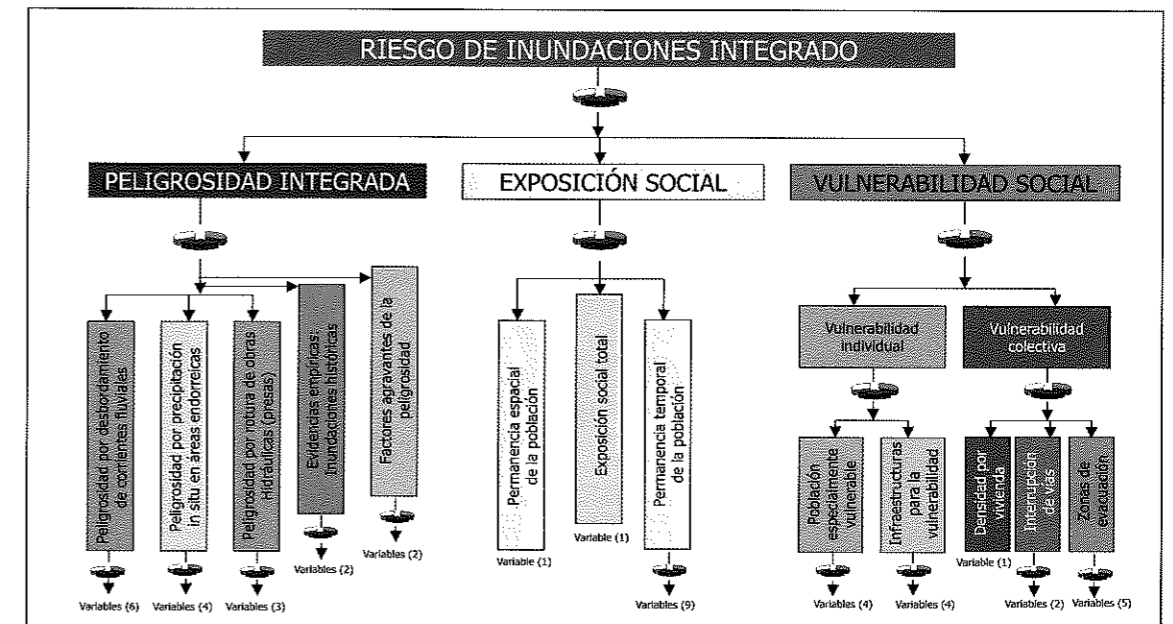


Fig. 4. Esquema metodológico sobre los sucesivos análisis y desagregaciones (símbolo del círculo partido en porciones) llevados a cabo para el análisis del riesgo social por inundaciones realizado para el Plan Especial de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones de Castilla-La Mancha (PRICAM; Díez et al., 2008a).

son semejantes a los procedimientos para cualquier otro riesgo natural, eso sí, con las particularidades de la incidencia de los peligros intrínsecos a la inundación sobre las personas, bienes y servicios. De esta manera, en el estudio de la exposición se suele diferenciar entre exposición social (personas) y económica (bienes y servicios); la primera se analiza a partir de variables de la distribución espacio-temporal de los individuos, considerando factores como población total expuesta, densidad de población, grado de permanencia temporal en una determinada ubicación, etc. La exposición económica se estudia a partir de la elaboración de catálogos e inventarios de bienes y servicios expuestos, usando bases de datos socioeconómicas y herramientas de contabilidad analítica comunes. Por lo que se refiere al análisis de la vulnerabilidad asociada a las inundaciones, igualmente se diferencia entre social y económica, y se valora la fragilidad intrínseca en escalas de 0 a 1 ó de 0 a 100 (siendo 0 el valor de vulnerabilidad nula ante el peligro). En el análisis de la vulnerabilidad social se suele diferenciar igualmente entre vulnerabilidad individual (por rangos de edad, discapacidades, enfermedades crónicas...) y colectiva (infraestructuras que aumentan o disminuyen la vulnerabilidad, como la existencia de centros de evacuación, alternativas de asistencia, etc.; ver Díez Herrero *et al.* 2008a, páginas 55 a 57).

Un ejemplo de cómo se realiza este tipo de análisis del riesgo por inundaciones para los aspectos sociales en un ámbito territorial extenso (toda una comunidad autónoma) puede encontrarse en Díez Herrero *et al.* (2008a). Y otro ejemplo antagónico, de análisis económico del riesgo de inundaciones

en un ámbito muy reducido (un único edificio) puede consultarse en De Mora y Díez (2008).

Debido a la fuerte componente espacial que tienen el propio riesgo de inundación, sus elementos (peligrosidad, exposición y vulnerabilidad), y los parámetros de la peligrosidad (severidad, dimensión espacio-temporal y probabilidad), frecuentemente los resultados de los análisis de riesgo se expresan en forma cartográfica, dando lugar a toda una serie de mapas de riesgos integrados (social y económico) y de peligrosidad por avenidas e inundaciones (Díez y Pujadas, 2002; Díez Herrero *et al.*, 2008b), que deben ser adaptados a la finalidad de su aplicación y la escala de trabajo (Ruiz *et al.*, 2008).

Elementos y parámetros de la peligrosidad por avenidas e inundaciones fluviales

Así como el análisis de la exposición y vulnerabilidad por inundaciones tienen elementos y variables comunes a otros tipos de riesgos, el estudio de la peligrosidad tiene una serie de particularidades intrínsecas al propio fenómeno desencadenante y su análisis científico. De esta manera, cuando se realiza un análisis de peligrosidad por inundaciones, deben estudiarse tres conjuntos de parámetros:

1) **Severidad o intensidad del peligro;** se trata de caracterizar el tipo o tipos de inundaciones que son susceptibles de producirse en una zona, detallando los parámetros esperables en cuanto a: profundidad de lámina de agua y su variación espacial; velocidad de la corriente y variaciones en el campo de velocidades; carga sólida transportada, tanto en volumen como en tipología (granulometría);

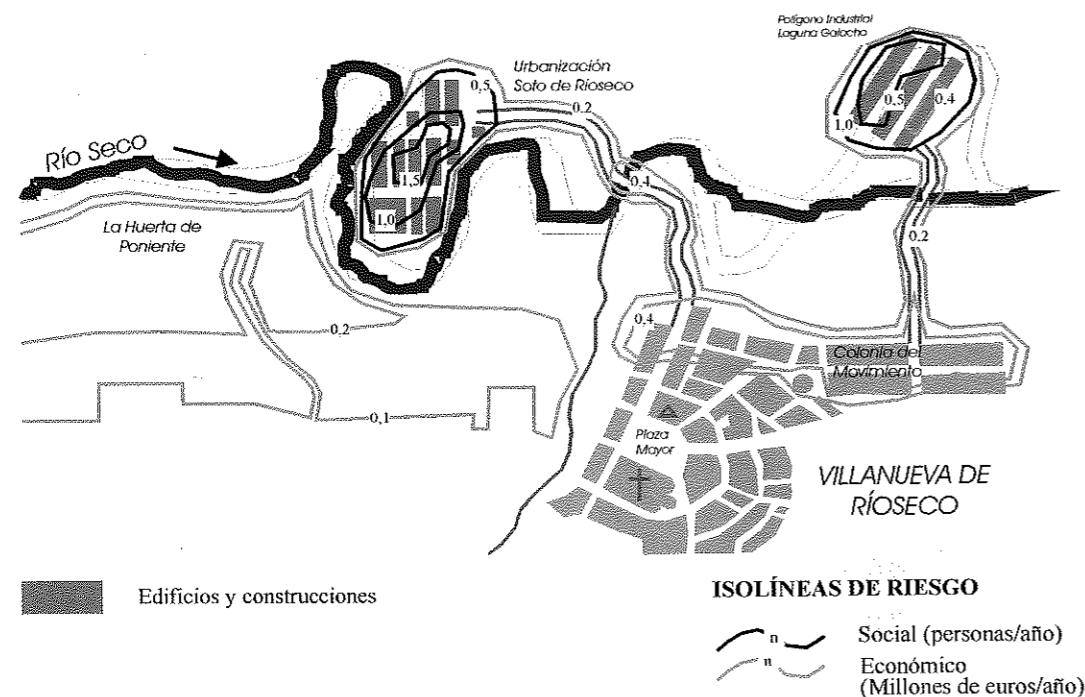


Fig. 5. Ejemplo de un mapa de riesgo de inundaciones integrado (con isóneas para el riesgo social y económico), de ámbito municipal, para el municipio idealizado de Villanueva de Ríoseco. Adaptado de Díez y Pujadas (2002).

potenciales variaciones morfológicas por erosión y/o depósito; y otros fenómenos geológicos asociados o desencadenados por la avenida o inundación (movimientos de ladera, sufusión, expansividad de arcillas, reactivación kárstica...).

2) **Dimensión espacio-temporal del fenómeno;** comprendiendo tanto el área que quedará cubierta por la inundación, como la duración de la misma y sus efectos; y también los denominados tiempos característicos, unos intervalos temporales que se establecen en el propio hidrograma de la avenida, o entre éste y el hietograma de precipitación (p.e. el tiempo de concentración), y que son cruciales para establecer la peligrosidad potencial de las inundaciones en una determinada localización.

3) **Probabilidad o frecuencia de la inundación;** este parámetro, expresado con el controvertido concepto de periodo de retorno o con su inverso la probabilidad anual de no excedencia (criticados por muchos por su carácter meramente estadístico y poco representativo), muchas veces constituye por sí sólo el único objeto del análisis de la peligrosidad. Si bien la probabilidad se suele relacionar únicamente con el periodo de retorno de un determinado caudal, sería preciso incorporar otros parámetros de la severidad en su estimación.

Métodos y técnicas de análisis de la peligrosidad por avenidas e inundaciones fluviales

En nuestro país, al igual que en el resto de Europa, el análisis de la peligrosidad se realiza empleando de forma combinada y complementaria una serie de técnicas y procedimientos, que a grandes

rasgos pueden agruparse en tres aproximaciones metodológicas: métodos histórico-paleohidrológicos, métodos geológico-geomorfológicos y métodos hidrológico-hidráulicos (Figura 6). A parte están los métodos de fundamento botánico o ecológico, como los dendrogeomorfológicos y los liquenométricos, aún en fase de investigación.

Los **métodos históricos** emplean marcas sobre elementos artificiales (edificaciones, vías de comunicación, obras públicas, etc.), documentación histórica (manuscritos e impresos de archivos, bibliotecas y hemerotecas) y testimonios (orales o audiovisuales) para reconstruir la extensión cubierta o la cota alcanzada por las aguas durante una crecida desencadenada en el periodo histórico. Una aplicación simple de esta metodología consiste en suponer que si el agua alguna vez ha alcanzado ciertos niveles puede alcanzarlos también en un futuro no muy lejano, determinando esta zona como de crecida histórica. Algo más sofisticados son los estudios que traspone estos niveles a caudales circulantes mediante modelos hidráulicos y les asignan una determinada probabilidad, permitiendo que se introduzcan como datos complementarios en el análisis estadístico de caudales procedentes del registro ordinario.

Los **métodos paleohidrológicos** del registro geológico emplean determinados tipos de depósitos o marcas de las inundaciones pretéritas (anteriores al periodo histórico o de las cuales no se dispone de información histórica), con o sobre elementos datables mediante técnicas paleontológicas, dendrocronológicas, radiométricas (Carbono 14, termoluminiscencia, luminiscencia óptica de estumulación láser, etc.) o arqueológicas. De esta forma

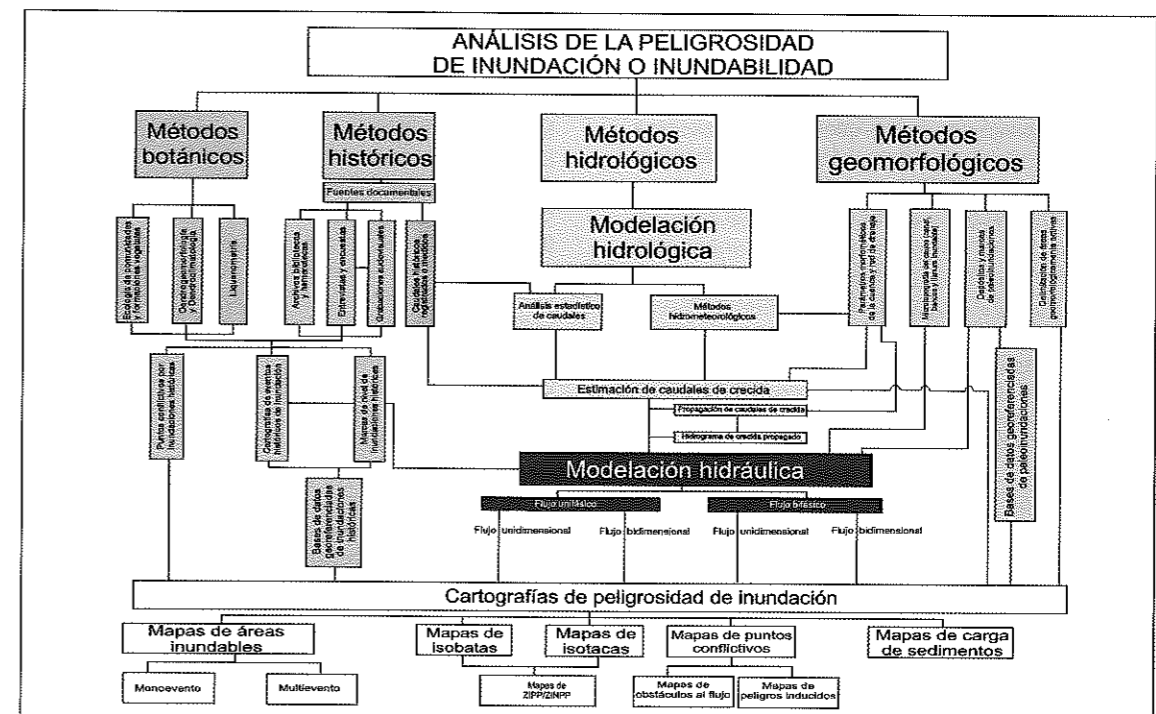


Fig. 6. Cuadro sinóptico de los diferentes grupos de métodos para el análisis de la peligrosidad de inundaciones, sus relaciones, y los tipos de cartografías resultantes (modificado y resumido de Díez, 2002). ZIPP, zona de inundación peligrosa para las personas; ZINPP, zona de inundación no peligrosa para las personas.

puede igualmente asignarse una probabilidad de ocurrencia a los caudales resultantes de la modelización hidráulica a partir de esos niveles y velocidades, integrándose de la misma manera en el análisis estadístico de caudales como datos no sistemáticos.

Los **métodos geológico-geomorfológicos** emplean la disposición y tipología de las formas del terreno y los depósitos generados durante o tras el evento de avenida. Con ello se pueden delimitar las áreas geomorfológicamente activas dentro del cauce fluvial y sus márgenes, y por tanto susceptibles de ser inundadas en el marco de la dinámica natural de la corriente fluvial, su frecuencia cualitativa de inundación, e incluso inferir órdenes de magnitud de parámetros como la profundidad, velocidad de la corriente o carga sólida transportada. En muchas ocasiones, y dado su carácter descriptivo, estas técnicas han sido tildadas de cualitativas y poco útiles, pero últimamente están cobrando fuerza al ser las únicas que consideran fenómenos naturales difícilmente modelizables con otras técnicas, como la avulsión o la migración del canal, y tener en cuenta las tendencias evolutivas naturales del sistema fluvial.

Los **métodos hidrológicos e hidráulicos** persiguen, respectivamente, la estimación de los caudales generados en una cuenca o corriente y el cálculo de las velocidades y calados con los que circularán por un determinado tramo fluvial. Los métodos hidrológicos pueden partir de los datos de caudales, aplicando análisis estadístico de los valores máximos; o de los datos de precipitación, mediante modelos hidrometeorológicos de transformación lluvia-escorrentía basados en fórmulas y métodos como el racional, hidrograma unitario, avenida máxima probable, onda cinemática, etc. Los métodos hidráulicos parten de diferentes hipótesis de flujo (unifásico-bifásico, uni-bi-tridimensional, uniforme-variado, permanente-variado, laminar-turbulento, lento-rápido,...) que simplifican las ecuaciones físicas que lo modelizan, cuya resolución permite estimar diferentes parámetros (profundidad, velocidad, energía,...).

Estos grandes grupos de métodos no son excluyentes, sino al contrario, deberían emplearse y aplicarse todos ellos de forma integrada y complementaria para el estudio de la peligrosidad de inundaciones, siempre que sea posible por existir las fuentes de información que precisan. Información más detallada sobre estas técnicas y métodos, sus posibilidades de aplicación y limitaciones de uso, puede consultarse en Díez-Herrero *et al.* (2008b).

MEDIDAS PALIATIVAS DE LAS AVENIDAS E INUNDACIONES FLUVIALES

La mitigación del riesgo de inundaciones, o al menos la minimización de las consecuencias en el caso de que el riesgo se materialice en una catástrofe o desastre, clásicamente se ha abordado mediante tres grandes grupos de medidas (Figura 7): predictivas, preventivas y correctoras (Ayala-Carcedo, 2002).

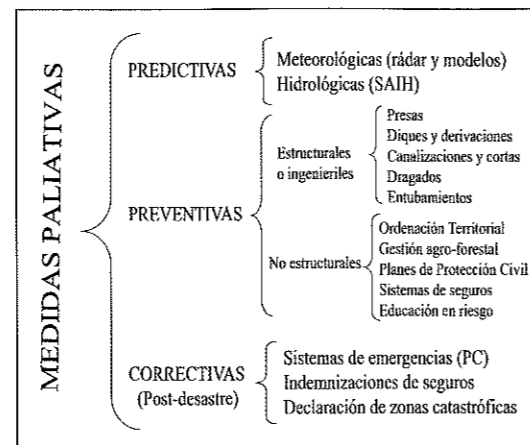


Fig. 7. Clasificación básica de las medidas paliativas que son de aplicación para mitigar el riesgo y los desastres asociados con las avenidas e inundaciones terrestres.

Las medidas predictivas buscan evitar la exposición y vulnerabilidad al peligro tratando de conocer dónde y cuándo se producirá la inundación. Para ello se utilizan predicciones meteorológicas, como los avisos de situaciones adversas basados en el uso del rádar meteorológico y modelos de simulación (HIRLAM); o predicciones hidrológicas, basadas en la modelación en tiempo real a partir de la información de las redes foronómicas ordinarias o sistemas automáticos de información hidrológica (SAIH). Algunos técnicos opinan que estas medidas no son más que un tipo de medidas preventivas no estructurales, al no ser capaces de predecir temporalmente el fenómeno.

Las medidas preventivas buscan evitar la exposición y vulnerabilidad al peligro tratando de conocer dónde se producirá la inundación, reduciendo su peligrosidad, o minimizando la vulnerabilidad de los elementos expuestos (personas o bienes). Estas medidas clásicamente se han dividido en dos grupos, estructurales y no estructurales, en función de si su aplicación conlleva la construcción de estructuras u obras de ingeniería. Dentro de las medidas estructurales se encuentran la construcción de presas de embalse y azudes para la laminación de crecidas y avenidas, diques o malecones artificiales, limpieza y dragado de cauces, canalizaciones y encauzamientos, cortas de meandros, desviación de cauces, canales o túneles de derivación, drenajes, etc. Entre las medidas no estructurales están la ordenación del territorio en áreas inundables, la gestión integral de cuencas hidrográficas y la corrección hidrológico-agroforestal, la planificación preventiva de protección civil, los sistemas de aseguramiento progresivos, y la educación e información en el riesgo.

Las medidas correctoras buscan únicamente minimizar los efectos de la inundación una vez que ésta ya ha ocurrido, con medidas de protección civil (emergencia, rescate y evacuación), pagos de pólizas de seguro y la declaración de zonas catastróficas e indemnizaciones especiales.

Ante el escaso desarrollo y la limitada efectividad de las medidas predictivas, y la insatisfacción social que produce la única aplicación de medidas correctoras, la mayor parte de las actuaciones de las administraciones públicas se dirigen hacia las medidas preventivas, y en particular las denominadas no estructurales como la ordenación del territorio, por ser éstas las más acordes con el desarrollo sostenible.

La ordenación del territorio se centra en la exposición, por lo que precisa figuras de planificación que restrinjan los usos en determinados sectores del territorio, evitando u ordenando así la presencia de elementos en riesgo en esas zonas. Sin embargo, en el caso del riesgo de inundaciones también se puede emplear la ordenación del territorio para reducir la peligrosidad, actuando en la génesis y propagación de las crecidas y avenidas; y la vulnerabilidad, definiendo tipologías y volúmenes en las zonas donde existen elementos expuestos. Así pues, la utilidad preventiva de la ordenación del territorio para la mitigación de las inundaciones se puede concretar en cuatro aspectos (Díez Herrero, 2008b):

- Definición de usos para minimizar la peligrosidad (revegetación de cuencas, áreas de desbordamiento preferente para laminación aguas arriba, etc.).
- Preservación de suelo del proceso de desarrollo urbano y establecimiento de medidas de protección (suelo no urbanizable, rústico o rural), para disminuir la exposición.
- Definición de la estructura, usos, intensidades y tipologías de desarrollo urbano (suelo urbanizable), o regulación de los usos y de las renovaciones y reformas necesarias (suelo urbano o urbanizado), para reducir la vulnerabilidad.
- Normalización de los materiales de construcción.

Para ello puede emplearse diversa legislación y normativa, desde escala supranacional (Directiva europea de gestión del riesgo de inundaciones), nacional (leyes del suelo y aguas; planes hidrológicos de cuenca; y reglamentos y directrices de protección civil, dominio público hidráulico...), autonómica (leyes autonómicas del suelo, medio ambiente y turismo; directrices territoriales; planes especiales de protección civil, etc.) e incluso municipal. Una recopilación de dicha legislación puede encontrarse en Olcina (2007) y Díez Herrero *et al.* (2008b; Anexo B).

PROPUESTAS DE ACTIVIDADES DE ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD DE AVENIDAS E INUNDACIONES

A continuación se presentan, como meras propuestas sin desarrollar en todas sus posibilidades, una serie de ideas de actividades sobre la aplicación de los contenidos relacionados con el riesgo de inundaciones fluviales, para ser realizadas tanto en el aula, el laboratorio y el campo; y para diferentes niveles educativos para los que se creen más adecuadas.

Actividades para el aula

- **Educación Primaria:** encuestas a familiares y vecinos. Se trata de promover que los alumnos realicen encuestas y entrevistas a familiares y vecinos adultos, idealmente a las personas más ancianas de su entorno familiar, en las que les interroguen sobre cuáles han sido las inundaciones históricas que recuerdan, las fechas en las que se produjeron, los lugares que afectaron y los daños que recuerdan que causaron. Con estas encuestas-entrevistas, los alumnos las pondrán en común en el aula, observando si se dan coincidencias de fechas y lugares entre los diversos encuestados en un mismo espacio geográfico.

- **ESO:** búsqueda en hemerotecas e Internet. Se trataría de aprovechar el tratamiento informativo de las catástrofes asociadas a inundaciones históricas en los medios de comunicación (fundamentalmente prensa escrita), como recurso didáctico. Para ello se propone seguir la metodología propuesta por Brusi *et al.* (2008) con los siguientes pasos: recolección de noticias en hemerotecas e Internet, análisis de noticias, y elaboración de fichas de catástrofes, para dar forma a una sencilla mini-base de datos local.

- **Bachillerato:** ejercicio Alameda del Parral. Se propone el desarrollo de una práctica de gabinete para la realización de un sencillo estudio de la peligrosidad por avenidas, utilizando el análisis estadístico de caudales, tal y como se detalla en el taller desarrollado en Díez Herrero (2008a); además existe abundante material de apoyo al docente en la página web www.riada.es (Material didáctico), como soluciones al ejercicio, presentaciones con diapositivas para su realización en el aula, etc.

- **Grado/Postgrado:** ejercicio HEC-GeoRAS. Se propone una práctica que precisa el uso de un aula de informática con ordenadores personales en los cuales se tienen que instalar una serie de programas y aplicaciones, tanto de uso libre (HEC-RAS, extensión HEC-GeoRAS) como paquetes comerciales de SIG (ArcView GIS, Spatial Analyst, 3D Analyst). Todo ello con el objetivo de combinar modelos hidráulicos y sistemas de información geográfica que permitan obtener de forma automática mapas de inundabilidad, batimetrías, velocidades, etc. (Díez Herrero, 2002). Esta práctica, con la zona de estudio imaginaria del arroyo Valsequillo, ya ha sido ensayada con éxito con diferentes grupos de alumnos, desde primeros cursos de licenciatura y grado, hasta cursillistas de masters y módulos de postgrado y especialización (Díez, 2005; Figura 8). Un guión detallado de una marcha analítica semejante, empleando esas mismas herramientas informáticas para el estudio de zonas inundables por rotura de una presa, puede encontrarse en Marín Rubís (2006).

Actividades para el campo

En los últimos dos años se han diseñado y puesto en práctica sendas actividades de campo centradas en la observación *in situ* de los efectos de fenómenos geológicos que han supuesto catástrofes y desastres históricos, o bien de situaciones actuales

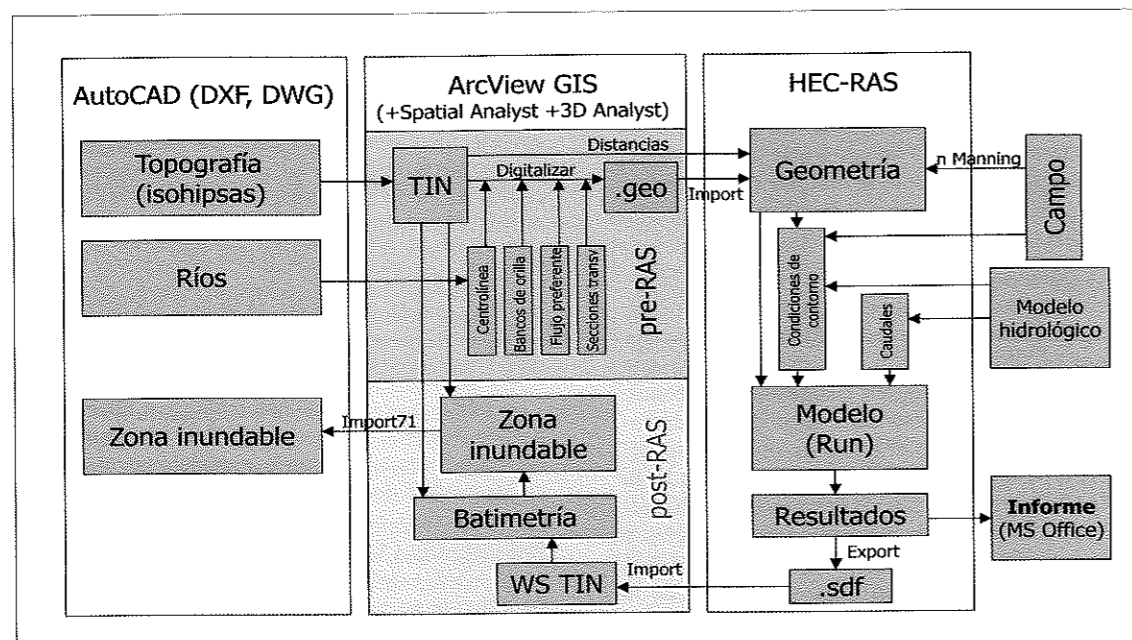


Fig. 8. Esquema metodológico para la realización del ejercicio práctico de delimitación de zonas inundables usando SIG y modelos hidráulicos.

de riesgo. Estas excursiones, denominadas "A todo riesgo I y II. Convivir con los desastres geológicos cotidianos" (Díez Herrero *et al.*, 2007 y 2008c) están pensadas para realizarse empleando un autobús o andando, respectivamente; y se ha puesto a disposición de los docentes abundante material para su preparación y aprovechamiento didáctico en distintos niveles educativos (Díez Herrero *et al.*, 2008d).

Ambas excursiones contienen paradas, observaciones y posibles actividades en lugares donde han tenido lugar o tienen lugar en la actualidad inundaciones, comprendiendo tanto inundaciones por encharcamiento en zonas endorreicas (Dehesa del Guadarrama en Villalba, El Campillo en Fuentemilanos), como por desbordamiento de corrientes fluviales (río Eresma en la Fuencisla y la Alameda del Parral).

Actividades para el laboratorio

Para el laboratorio se proponen únicamente dos actividades, una más clásica y otra algo más compleja, para que ambas sean susceptibles de realizarse de forma realista:

- **Canal de experiencias hidráulicas;** se trata de construir una maqueta a escala sobre un tablón de madera aglomerada alargado (rectangular) cuya dimensión mayor debe ser la distancia existente entre dos pilas (fregaderos) contiguas del laboratorio, idealmente entre 1 y 1,5 m de longitud; el ancho del tablón puede ser entre 60 y 80 cm. Sobre el tablón se modelarán con arcilla de manualidades las formas características de un fondo de valle fluvial aluvial típico, con un canal de un río (si se quiere meandriforme, o si no, rectilíneo), y una llanura de inundación formando una franja paralela a ambas orillas del canal, separada por un pequeño escarpe de la primera terraza. Una vez finalizado el modela-

do, se inclinará ligeramente el tablón (apenas unos grados), y colocando el extremo superior del canal del río bajo el grifo de uno de los fregaderos, y el extremo inferior del tablón en el segundo fregadero; luego se irá abriendo progresivamente el paso del agua del grifo, haciendo que circule por el canal hasta desembocar en el otro fregadero. Con la apertura del grifo se pueden ir reproduciendo a escala los hidrogramas de las crecidas y avenidas del río, y observando dónde y cómo se van produciendo los desbordamientos del agua desde el canal a sus márgenes. También se puede añadir en el lecho del canal arena fina o limo (tipo 'Pedramol'), que simule la carga sólida, y observar cómo el río transporta y deposita los materiales en la llanura durante las inundaciones. Por último, se puede ir cambiando la configuración de nuestro sistema fluvial a escala, quitando o poniendo meandros, barras, islas, etc., o modificando la pendiente del tablero, y observar y anotar los cambios que se producen en las inundaciones asociadas.

- **Fotointerpretación estereoscópica de geomorfología fluvial;** se trataría de realizar una sencilla cartografía de elementos geomorfológicos del sistema fluvial asociados a las inundaciones (barras, derrames, llanura de inundación, meandros abandonados, etc.; ver tabla de elementos reconocibles en Díez Herrero *et al.*, 2008b, página 69). Para ello se emplearán las características fotografías aéreas verticales para visión estereoscópica, como se describe en múltiples obras y libros de prácticas (Centeno *et al.*, 1994).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de las actividades divulgativas que se desarrollan desde el Instituto Geo-

lógico y Minero de España en el marco del Año Internacional del Planeta Tierra; y en particular para dar a conocer a la comunidad educativa del ámbito de las Ciencias de la Tierra los diversos proyectos de investigación que se realizan financiados por diferentes organismos, como son Dendro-Avenidas (MICINN CGL2007-62063 HID) y Encomienda-Avenidas (DGA-IGME). Los autores desean agradecer a D. Mariano Otero, de la Unidad de Protección Civil de Segovia (Subdelegación del Gobierno), la cesión de la fotografía de la figura 3, ilustrativa de una inundación reciente.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayala-Carcedo, F.J., (2002). Estrategias y medidas de mitigación del riesgo de inundaciones. Gestión de zonas inundables. En: F.J. Ayala-Carcedo y J. Olcina Cantos (Coords.), *Riesgos Naturales*. 52, 977-995, Editorial Ariel, Ariel Ciencia, 1ª edición, 1512 pp., Barcelona.
- Brusi, D., Alfaro, P. y González, M., (2008). Los riesgos geológicos en los medios de comunicación. El tratamiento informativo de las catástrofes naturales como recurso didáctico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16.2, 154-166.
- Camarasa, A.M., (2002). Crecidas e inundaciones. En: F.J. Ayala-Carcedo y J. Olcina Cantos (Coords.), *Riesgos Naturales*. 46, 859-877, Editorial Ariel, Ariel Ciencia, 1ª edición, 1512 pp., Barcelona.
- Centeno, J.D., Fraile, M.J., Otero, M.A. y Pividal, A.J., (1994). *Geomorfología práctica. Ejercicios de Fotointerpretación y Planificación Geoambiental*. Editorial Rueda. Madrid, 66 pp.
- De Mora Jiménez, E. y Díez Herrero, A., (2008). Análisis del riesgo de inundación en localizaciones puntuales: el edificio Sabatini (Toledo). En: I. Galindo Jiménez, L. Laín Huerta y M. Llorente Isidro (Eds.), *El estudio y la gestión de los riesgos geológicos*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos, 12, 3, 39-52, Madrid, IGME y Consorcio de Compensación de Seguros (MEH).
- Díez Herrero, A., (2002). Aplicaciones de los sistemas de información geográfica al análisis del riesgo de inundaciones fluviales. En: *Los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión de los Riesgos Geológicos y el Medio Ambiente* (Laín Huerta, L., ed.). Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 85-112.
- Díez, A., (2005). *Geología Ambiental. Cuaderno de Prácticas*. 19 pp.; SG-10/2005. Registro General de la Propiedad Intelectual (29-04-2005, 10:55 h.). Número de asiento registral 00/2005/1975.
- Díez Herrero, A., (2008a). Taller: ¡Doctor, doctor... que se me inunda la casa! *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16.1, 35-42.
- Díez Herrero, A., (2008b). Metodología para la elaboración de mapas de riesgos por inundación. En: Regueiro, M. (Ed.), *Guía metodológica para la elaboración de cartografías de riesgos naturales en España*, 56-79. Ministerio de Vivienda e Ilustre Colegio Oficial de Geólogos. Madrid, 187 pp.
- Díez Herrero, A., Garrote Revilla, J., Bañlo Calvo, R., Laín Huerta, L., Mancebo Mancebo, M.J. y Pérez Cerdán, F. (2008a). Análisis del riesgo de inundación para planes autonómicos de protección civil: RICAM. En: I. Galindo Jiménez, L. Laín Huerta y M. Llorente Isidro (Eds.), *El estudio y la gestión de los riesgos geológicos*.

Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos, 12, 4, 53-70, Madrid, IGME y Consorcio de Compensación de Seguros (MEH).

Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L. y Llorente-Isidro, M., (2008b). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia nº 1, 190 pp., Madrid.

Díez Herrero, A., Laín Huerta, L., Martín-Duque, J.F. y Vicente Rodado, F., (2008c). *A todo riesgo II. Convivir con los desastres geológicos cotidianos*. Guión de la excursión científico-didáctica de la Semana de la Ciencia 2008. IGME, UCM y IE Universidad, Madrid-Segovia, 42 pp. http://www.dendro-avenidas.es/didactica/a_todo_riesgo_ii.pdf

Díez Herrero, A., Martín-Duque, J.F., y Vicente Rodado, F., (2007). *A todo riesgo. Convivir con los desastres geológicos cotidianos*. Guión de la excursión científico-didáctica de la Semana de la Ciencia 2007. IGME, UCM y USEK, Madrid-Segovia, 69 pp. http://www.dendro-avenidas.es/didactica/excursion_a_todo_riesgo_2007.pdf

Díez Herrero, A., Martín Duque, J.F. y Vicente Rodado, F. (2008d). Propuesta de actividad didáctica de campo sobre riesgos geológicos en la zona centro de la península Ibérica. En: A. Calonge, L. Rebollo, M.D. López-Carrillo, A. Rodrigo e I. Rábano (Eds.), *Actas del XV Simposio sobre Enseñanza de la Geología*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Cuadernos del Museo Geominero, 11, 109-118.

Díez, A. y Pujadas, J., (2002). Mapas de riesgos de inundaciones. En: F.J. Ayala-Carcedo y J. Olcina Cantos (Coords.), *Riesgos Naturales*. 53, 997-1012, Editorial Ariel, Ariel Ciencia, 1ª edición, 1512 pp., Barcelona.

Ferrer, M. (Dtora.), González de Vallejo, L.I., García López-Davalillo, J.C., Rodríguez, J.A., Estévez, H., Trimboli, M., (2004). *Pérdidas por terremotos e inundaciones en España durante el periodo 1987-2001 y su estimación para los próximos 30 años (2004-2033)*. Instituto Geológico y Minero de España y Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid, 126 pp.

Kobiyama, M. y Fabris, R., (2007). Quantitative method to distinguish flood and flash flood as disasters. *SUI-SUI Hydrological Research Letters*, 1, 11-14.

Marín Rubís, A., (2006). *Clasificación de presas y evaluación del riesgo con el modelo HEC-RAS*. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. Minor thesis. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3273/9/53815-9.pdf>.

Ministerio de Medio Ambiente (2000). Libro Blanco del Agua en España. Ed. Dirección General del Agua (MIMAM), Madrid, 637 pp.

Olcina Cantos, J., (2007). *Riesgo de inundaciones y ordenación del territorio en España*. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, 381 pp., Murcia.

Ruiz, V., Díez, A., Laín, L., Llorente, M., (2008). Elaboración de Mapas de Peligrosidad de Inundaciones según su ámbito de aplicación y escala: propuesta metodológica. *Geo-Temas*, 10, 1409-1412. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 4 de diciembre de 2008 y aceptado definitivamente para su publicación el 11 de mayo de 2009.