



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DEL TERRENO, CARTOGRÁFICA Y GEOFÍSICA

**EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO MEDIANTE
MÉTODOS AVANZADOS Y TÉCNICAS GIS.
APLICACIÓN A LA CIUDAD DE BARCELONA.**

TESIS DOCTORAL
(Volumen I)

Autora:

M^a Nieves Lantada Zarzosa

Directores:

Dr. Luis G. Pujades Beneit

Dr. José A. Gili Ripoll

Barcelona, 2007

CAPÍTULO 2

EL RIESGO EN ENTORNOS URBANOS

2.1 Introducción

La ocurrencia de un terremoto, el daño físico directo causado y su distribución espacial es sólo el inicio de una catástrofe cuyas dimensiones dependen en gran manera, además del grado de daño, del grado de preparación y de la capacidad de respuesta de la sociedad. El terremoto establece las condiciones iniciales de degradación del sistema urbano y constituye el punto de salida de una carrera hacia la recuperación de la normalidad, entendida como las condiciones físicas, socioeconómicas y de calidad de vida comparables a las existentes antes del terremoto. Normalmente, el número de víctimas depende drásticamente de la rapidez y eficiencia de los servicios sanitarios, el impacto económico depende de la capacidad de recuperación del sistema productivo, pero también ambos aspectos dependen del acierto de la toma de decisiones durante la gestión de la emergencia creada. Así pues, los estudios de riesgo son particularmente complejos pero necesarios. Su complejidad se debe, entre otras causas, a la dificultad en la predicción de la ocurrencia y características de los fenómenos naturales

potencialmente catastróficos, a la gran variedad del parque de edificios y equipamientos, a las condiciones del suelo, a la heterogénea distribución de la población y a la existencia de una gran cantidad de actividades y servicios, públicos y privados, cuya interrupción induce daños adicionales a los causados por el fenómeno natural. Su necesidad reside en que la sociedad moderna produce acumulación de población, infraestructuras y valor socioeconómico en grandes ciudades; el conocimiento predictivo y preventivo de las condiciones catastróficas esperadas han de ayudar a una mejor gestión de la catástrofe cuando ésta se presente. Desafortunadamente los grandes desastres naturales siguen golpeando nuestros pueblos y ciudades.

Por consiguiente, la estimación del riesgo en zonas urbanas es cada vez más necesaria y requiere un tratamiento multidisciplinar que tenga en cuenta no sólo el daño físico en edificios e infraestructuras y las pérdidas humanas y económicas, sino también los aspectos sociales, organizativos e institucionales relacionados con el nivel de desarrollo de la comunidad. Las iniciativas recientes para el análisis del riesgo sísmico incorporan aspectos orientados hacia esta evaluación holística del riesgo. El proyecto europeo Risk-UE (Masure y Lutoff, 2002), incorpora aspectos de exposición del sistema urbano que van más allá del daño físico directo. Cardona (2001) introduce índices globales que tienen en cuenta la capacidad de respuesta de la sociedad y su resiliencia, es decir, su capacidad de absorber los efectos del fenómeno destructivo y controlar sus implicaciones. Los trabajos e índices de Cardona (2001) tienen continuidad y progreso en el estudio de Carreño (2006) donde se definen y construyen índices cuantitativos que permiten evaluar estos aspectos globales que incorporan el daño físico directo junto con otros aspectos socioeconómicos y características de capacidad para afrontar la emergencia, como por ejemplo la preparación, la resiliencia y la gestión. En dicho estudio también se hace una breve revisión del modelo de recuperación de desastres de Comfort (1999) que se basa en la experiencia de once grandes terremotos bien documentados y que usa los conceptos de riesgo colectivo y sistemas complejos.

Con todo y tal como se ha indicado en el primer capítulo, el objetivo de esta tesis es la evaluación de la vulnerabilidad y fragilidad de los edificios residenciales de

Barcelona y la obtención de escenarios de daño a un gran nivel de detalle y definición. Aunque también se abordan otros aspectos como, por ejemplo, el número de víctimas y el coste económico, éstos se obtienen de forma simplificada a partir de las probabilidades de los estados de daño para escenarios sísmicos razonables. En cualquier caso, los escenarios de daño físico directo inmediato a la ocurrencia del terremoto es la foto fija, el dato fundamental, de donde deben partir estimaciones más sofisticadas de escenarios holísticos.

Así pues, el presente capítulo es conceptual y se dedica a la descripción de palabras, términos y conceptos relacionados con el riesgo en general y con el riesgo sísmico en entornos urbanos en particular. Por completitud, se han incluido también dos anejos. El Anejo C describe otras estructuras e infraestructuras distintas a los edificios residenciales, cuyo análisis queda fuera de esta investigación, pero que constituyen otros sujetos y aspectos de investigación futura para complementar y completar los resultados aquí obtenidos. El Anejo B describe la herramienta del Sistema de Información Geográfica (*Geographical Information System*, GIS) que se ha utilizado para la introducción, depuración y análisis de los datos espaciales georreferenciados de la ciudad de Barcelona, así como para la representación de los resultados obtenidos en este estudio.

2.2 El riesgo: palabras y conceptos

Es importante recordar que con frecuencia se emplea el término *riesgo* para referirse a lo que hoy se denomina *amenaza* o *peligrosidad*, y también que, el término *vulnerabilidad* se emplea muchas veces con el mismo significado que el de *riesgo*. Sin embargo, se trata de términos que corresponden a conceptos diferentes cuya definición facilita la comprensión del concepto de *riesgo*. La definición de *riesgo sísmico* proporcionada por la *United National Disaster Relief Office*, puede encontrarse en UNDRO (1979), así como en Dolce *et al.* (1994), junto con una descripción del análisis del riesgo sísmico. Con objeto de diferenciar entre los términos riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad, se presentan a continuación las siguientes definiciones dadas por Varnes (1984):

- Peligrosidad Natural (H , *Natural Hazard*): es la probabilidad de que un fenómeno natural potencialmente dañino suceda en un sector determinado y dentro de un intervalo específico de tiempo.
- Vulnerabilidad (V): se define como el grado de pérdidas que un determinado elemento o conjunto de elementos experimenta como consecuencia de un fenómeno natural de magnitud dada. Aunque se utilizan diferentes escalas, se puede expresar en una escala normalizada que varía desde 0 (sin daños) hasta 1 (pérdida total).
- Grado de daño o pérdidas (D): se relaciona con las consecuencias negativas producidas o que se pueden producir por la ocurrencia de un fenómeno natural. Estas consecuencias no deseadas pueden ser la pérdida de vidas humanas, daños materiales en vías de servicio y líneas vitales, y daños estructurales en edificios.
- Elementos del territorio (E): Constituyen la población, propiedades, actividades económicas, incluyendo los servicios públicos que están expuestos a un peligro natural en un área dada.
- Riesgo en sentido estricto (R_s): Es el grado de pérdidas esperadas en un determinado elemento debidas a un fenómeno natural específico de una magnitud particular y en un período de exposición determinado. El riesgo se suele expresar mediante la convolución de la peligrosidad y la vulnerabilidad del elemento expuesto:

$$R_s = (H) \otimes (V) \quad [2.1]$$

-Riesgo en sentido global (R_t): Expresa una valoración global de las consecuencias del evento en el sector analizado, en función de la pérdida de vidas humanas, heridos, propiedades dañadas, o perturbación de la actividad económica como consecuencia de un determinado fenómeno natural, y se calcula como la convolución entre el riesgo específico, y los elementos de riesgo:

$$(R_t) = (E) \otimes (R_s) = (E) \otimes (H) \otimes (V) \quad [2.2]$$

El término *hazard*, que en inglés se refiere a peligro, a estar propenso a sufrir la acción de algo, a azar, se expresa en este trabajo como *amenaza*, por el concepto de presagio, advertencia o potencial de ocurrencia que significa esta palabra en español.

Algunos autores de habla inglesa expresan el término de amenaza como *threat*, con el mismo significado que tiene *hazard*. Del mismo modo, en este trabajo se utilizará *amenaza* para referirse a lo que otros autores denominan *peligro* o *peligrosidad*.

Conservando el marco conceptual del informe “*Natural Disasters and Vulnerability Analysis*” (UNDRO, 1979), y con posterioridad a Varnes (1984), Milutinovic y Petrovsky (1985) y después Coburn y Spence (1992), se eliminó de la Ecuación [2.2] la variable E , (elementos en riesgo), por considerarse implícita en el concepto de vulnerabilidad V . Esta forma de expresar el riesgo, ampliamente aceptada en el campo científico y técnico, fue planteada por Cardona (2001) de la siguiente manera:

$$Rie|t = (Ai, Ve)|t \quad [2.3]$$

De esta forma, el riesgo Rie , de un elemento e caracterizado por una vulnerabilidad Ve , por causa de un peligro o amenaza A , caracterizada por una intensidad o cantidad Ai , durante un período de exposición t , se define por la probabilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento e , como resultado de la ocurrencia del suceso A con una intensidad mayor o igual a Ai . Tanto la amenaza o peligro, como la vulnerabilidad del elemento, se entienden en sentido probabilista; es decir Ai se define mediante la probabilidad de que ocurra un suceso caracterizado por una cantidad igual o mayor que Ai y Ve se define mediante la probabilidad de que el elemento e pertenezca a un tipo o clase de vulnerabilidad Ve .

En el caso de los riesgos naturales, al ser imposible intervenir sobre la amenaza, es comprensible que los trabajos y estudios de la literatura técnica muestren especial interés en los estudios de vulnerabilidad y las técnicas de prevención-mitigación para reducirla, ya que el objetivo final es conseguir así la reducción del riesgo.

Cualquier acción preventiva tomada antes, durante o después de la ocurrencia de un fenómeno natural destructivo intentando reducir sus consecuencias, se denomina *mitigación*. Ejemplos de acciones mitigadoras son la planificación urbanística o las medidas para incrementar la resistencia y comportamiento de los edificios e infraestructuras, para aumentar la seguridad de las personas o para reducir las pérdidas económicas y el impacto social de la ocurrencia del fenómeno natural destructivo. Las experiencias de intervención para reducir la vulnerabilidad y el

impacto de las catástrofes naturales han demostrado que el coste de la inversión supone un ahorro considerable en el coste de la catástrofe. Castillo (2005) en su estudio del riesgo sísmico de la ciudad de Mérida en Venezuela, estima cómo una intervención en disminuir la vulnerabilidad de los edificios con un costo estimado del 6% del valor de construcción repercute en un ahorro importante en el coste económico y en vidas humanas cuando ocurre el terremoto. La ciudad de Mérida está situada en una zona considerada de peligrosidad alta, donde los periodos de retorno para una intensidad VIII y IX son de 100 y 850 años respectivamente. El coste del refuerzo de los edificios existentes en la zona de estudio, se evalúa en 1.1 millones de dólares. Un terremoto de intensidad VIII causaría un daño valorado en 1.3 millones de dólares en el escenario con edificios sin reforzar y de 0.04 millones de dólares considerando los edificio reforzados. En el caso de un terremoto de intensidad IX estos costes serían de 5.5 millones de dólares para el caso sin intervenir y de 0.3 millones de dólares para el caso intervenido. Las víctimas mortales pasarían de 45 a 2 para el escenario de intensidad VIII y de 275 a 10 en el caso del terremoto de intensidad IX.

2.3 Riesgos naturales y Sistemas de Información Geográfica

Los riesgos naturales son fenómenos o procesos que tienen lugar en la biosfera y que pueden constituir un evento dañino para el hombre, sus estructuras e infraestructuras o sus actividades; el calificativo “*natural*” elimina fenómenos como la guerra, la polución y la contaminación química. Una definición altamente aceptada es la de “*aquellos elementos del entorno físico, dañinos para el hombre y causados por fuerzas ajenas a él*” (Burton *et al.*, 1978).

Los riesgos naturales han tomado en los últimos años una importancia significativa, en parte debido a la cobertura de las telecomunicaciones, pero también debido al rápido desarrollo que están experimentando las áreas urbanas, en las que se concentra una gran actividad económica e industrial. Los cambios producidos en el medio ambiente por la acción del hombre incrementan este peligro. Todo ello genera la

necesidad de disponer de la documentación apropiada que proporcione una ayuda a la toma de decisiones políticas y económicas.

Según su origen, los fenómenos naturales pueden ser clasificados en: atmosféricos, geológicos (especialmente sísmicos y volcánicos), hidrológicos, hidrogeológicos y biológicos. Los sucesos peligrosos pueden variar en magnitud o intensidad, frecuencia, duración, extensión, velocidad de aparición, dispersión espacial y espacio-temporal.

En 1998, se publicó en Munich la tercera edición del mapa del mundo de riesgos naturales, “*World Map of Natural Hazards*” (Munich, 1998), que muestra, de forma concisa, la distribución geográfica y la magnitud de los riesgos naturales de todo el globo terrestre, lo que hace posible su comparación a nivel mundial. Este mapa viene acompañado de un catálogo histórico de sucesos, con sus dimensiones y una lista de pérdidas humanas y económicas, producidas por cada uno de ellos, generado todo ello con ayuda de una herramienta GIS.

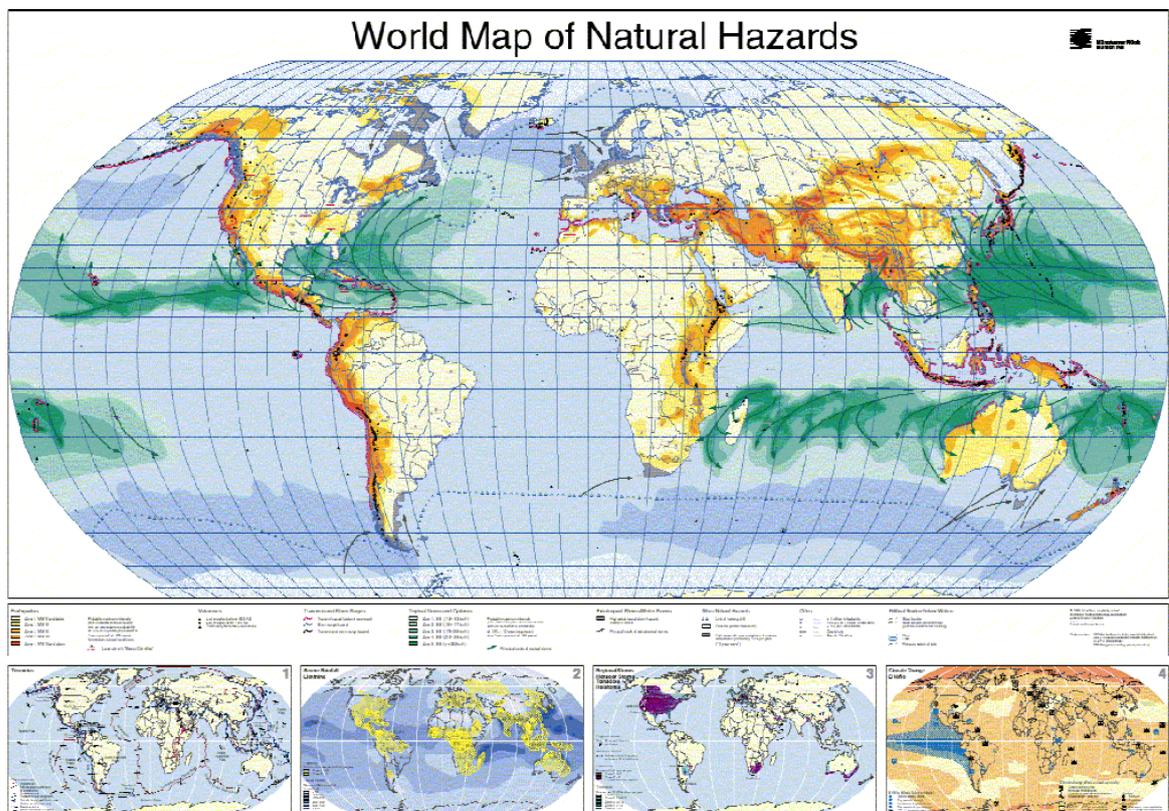


Figura 2.1. Mapa del mundo de riesgos naturales (Munich, 1998).

Para llevar a cabo cualquier estudio de riesgos naturales, se requiere información espacial de la superficie de estudio, como son sus características topográficas (mediante modelos digitales de elevaciones y sus mapas derivados), además de otras características espaciales como por ejemplo la geología, la hidrología y los usos del suelo. En general, el conocimiento de estas características se necesita para grandes extensiones de terreno. La gestión de esta información se suele realizar mediante Sistemas de Información Geográfica, ya que estas herramientas permiten combinar un gran volumen de datos de diferente tipo, incluyendo un adecuado manejo de las bases de datos y una rápida y detallada presentación gráfica de resultados (Alafont y Ortiz, 1999). Actualmente la integración en un GIS de modelos matemáticos para la evaluación del riesgo sísmico, puede facilitar la simulación, ya que acelera el análisis espacial de las variables y de los parámetros requeridos. Como consecuencia de todo ello, en la última década, los estudios de riesgo sísmico mediante estas técnicas se han incrementado notablemente, tanto a nivel local o urbano (Cella *et al.*, 1994; Polovinchik y Klyachko, 1995; Ayala *et al.*, 1996; Blais *et al.*, 1996; Villacis *et al.*, 2000; Mena, 2002), como a nivel regional (King y Kiremidjian, 1994; Wang y Huand, 2000) y global (Chen *et al.*, 1997).

A continuación se analizan diversos trabajos relacionados con los riesgos naturales para describir con mayor detalle el alcance de las técnicas GIS en este tipo de estudios. En concreto se analizan someramente los riesgos atmosféricos, las avalanchas, los riesgos hidrogeológicos y climáticos, los deslizamientos de ladera, los volcanes, las inundaciones y los tsunamis. El riesgo sísmico se trata de forma independiente en el apartado siguiente.

Dentro de los riesgos atmosféricos, se pueden identificar diferentes fenómenos tormentosos según la fuerza del viento: Las denominadas “*tropical storms*” o tormentas tropicales, con vientos de hasta unos 115 km/h (grado 8 a 11 en la escala Beaufort); cuando las tormentas tropicales alcanzan un grado 12 en la escala Beaufort, se denominan “*hurricanes*” o huracanes, en el Atlántico y el noreste del Pacífico; sin embargo, son conocidas como “*tropical cyclones*” o ciclones tropicales en el océano Índico, mares de Australia y sur del Pacífico, y “*typhoons*” o tifones en

el noroeste del Pacífico. Las islas y zonas costeras son las más afectadas por este tipo de tormentas, que pueden llegar a tener vientos con velocidades de hasta 300 km/h. Los huracanes tienen un diámetro de entre 100 y 200 km, mientras que el área afectada por la tormentas tropicales puede llegar a tener 500 km de ancho. Por otro lado, los tornados son fenómenos muy localizados si se comparan con los ciclones tropicales y las tormentas extra-tropicales, pero son extremadamente intensos. Como puede observarse en la Figura 2.2, los tornados avanzan a lo largo de franjas muy estrechas de terreno, con un diámetro medio de unos 100 m, y un recorrido de tan solo unos kilómetros (Berz *et al.*, 2001).

Debido al carácter tan local e impredecible de los tornados, la utilización de los Sistemas de Información Geográfica se ha orientado principalmente a la evaluación post-evento, más que a la modelización o simulación orientada a la mitigación. El efecto devastador de este tipo de tormentas dificulta, en gran medida, la toma de datos después del suceso, al desaparecer los posibles puntos de referencia, tales como edificios o calles por quedar ocultas bajo los escombros. La evaluación de los daños sufridos puede llevarse a cabo mediante la combinación de información procedente de diferentes fuentes, por un lado de los planos parcelarios y callejeros de la zona afectada, y por otro, de las fotografías aéreas tomadas unos días después de la tempestad.



Figura 2.2. Área urbana afectada por el paso de un tornado. Fotografía tomada por el Aerial Oklahoma, Inc. (Yuan, 2005).

Los análisis del daño producido por tornados se han realizado tradicionalmente mediante la interpretación de fotos aéreas. Pero empleando las imágenes multispectrales de alta resolución disponibles actualmente, tales como la del satélite IKONOS (1-5m de resolución) o la del QuickBird (0.6-2.5 m), es posible efectuar un estudio detallado del efecto de los riesgos atmosféricos en grandes extensiones (Yuan, 2005).

La combinación de técnicas GIS e imágenes multispectrales de percepción remota, sobre las cuales analizar el *Normalized Difference Vegetation Index* o Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI), permiten detectar el cambio de la vegetación antes y después del paso del tornado. Los distintos métodos analíticos aplicados mediante el análisis del NDVI por Yuan *et al.* (2002), demuestran la posibilidad de realizar una fácil detección de los distintos grados de daño producidos a lo largo del recorrido del tornado, aunque resulta más efectivo en zonas rurales que en áreas urbanas.

Al igual que ocurre con el resto de riesgos naturales, la información referente a los eventos históricos de avalanchas ocurridos en una determinada zona puede gestionarse mediante un GIS. Pero además, el uso de este tipo de programas permite la inmediata representación espacial y georreferenciada del recorrido seguido por cada suceso, así como la zona afectada (Martí *et al.*, 1998). Si además se utiliza la capacidad de los GIS para trabajar con datos en 3D, se pueden generar Modelos Digitales del Elevaciones (MDE o DEM) y obtener mapas derivados de estos, tales como mapas de pendientes y mapas de orientaciones. Posteriormente, el análisis de esta información mediante la superposición topológica facilita la obtención de modelos estadísticos de predicción de la propagación y el alcance de los aludes (Furdada, 1996).

Por otro lado, también es posible mediante un GIS realizar el seguimiento de una zona monitorizada con diferente instrumentación que proporcione datos hidrogeológicos y climáticos en tiempo real, así como la explotación y representación espacial de dicha información (Candinali *et al.*, 1996; Lazzari y Salvaneschi, 1996). Estas herramientas facilitan la obtención de los parámetros morfométricos necesarios para realizar estudios de deslizamientos superficiales

mediante técnicas multivariantes, así como la evaluación de las condiciones de rotura e identificación de áreas potencialmente inestables, y las condiciones de movilidad del desplazamiento (Baeza, 1994; Cardinali *et al.*, 1996; Santacana, 2001). En la Universidad Politécnica de Valencia se ha desarrollado una herramienta GIS, sobre el programa ArcView, para estructurar y actualizar todos los datos necesarios para este tipo de estudios (UPV, 2003).

La gestión del riesgo volcánico implica una mayor complejidad a la hora de diseñar metodologías para su evaluación o mitigación, ya que deben analizarse diversos procesos individuales y, por tanto, también deben tenerse en cuenta un gran número de parámetros. Los peligros volcánicos son diversos, entre ellos destacan las coladas de lavas, la caída de cenizas, los lahares y los flujos piroclásticos, entre otros. Pues bien, pese a que entre estos fenómenos existen grandes variaciones en el orden de magnitud de la superficie afectada o en la velocidad de propagación, las técnicas GIS aportan una gran ayuda para la estimación del riesgo volcánico: a la hora de desarrollar procedimientos de cálculo automático de las diversas fases de cálculo que deben llevarse a cabo; para incluir en el cálculo modelos numéricos que permitan establecer la distribución espacial y temporal de los productos de una determinada erupción; al evaluar cómo afectará a cada punto del espacio del área de estudio. El empleo, cada vez más generalizado, de modelos numéricos de procesos volcánicos ha provocado que cada vez sea más frecuente la incorporación de datos procedentes del GIS en ellos, y, a su vez, que estos modelos generen resultados en un formato compatible con los mismos, para finalmente generar mapas de peligrosidad (Felpeto *et al.*, 2001).

Existen numerosos estudios referentes al estudio del riesgo de inundaciones en los que se ha comprobado que la combinación mediante técnicas GIS de mapas geológicos, topográficos y de usos del suelo, es la mejor opción para la creación de mapas de riesgo de inundaciones, con la representación de la extensión de la superficie inundada y su profundidad (Aboelata *et al.*, 2002; Vatti *et al.*, 2003; Zerger y Wealands, 2004). Algunos estudios incorporan en el GIS imágenes de percepción remota para obtener información a nivel regional y local de la superficie inundada en anteriores catástrofes, e incluso de la profundidad del agua, mediante la

combinación de la imagen con un modelo digital de elevaciones. Este tipo de mapas, combinados con mapas de divisiones administrativas y de densidad de población, son de vital importancia para las autoridades públicas, ya que ayudan a orientar la toma de decisiones en la creación de medidas correctoras, en la gestión y control de futuras emergencias, y en el desarrollo de las zonas urbanas e industriales del territorio (Islam y Sado, 2002).

Los maremotos son grandes olas marinas generadas tras una fuerte sacudida del mar inducida por un terremoto, un deslizamiento o una erupción volcánica en el suelo marino o en la costa. Generalmente, se denominan con la palabra de origen japonés “*tsunami*”: “*Tsu*” significa puerto o bahía y “*nami*” ola. Las zonas expuestas a este tipo de fenómenos se limitan a zonas costeras de un máximo de 1 km tierra adentro, dependiendo de la topografía costera.

El gran desarrollo que están sufriendo las costas, desde el punto de vista industrial y turístico, hace que el estudio de riesgo de *tsunami* tome cada vez más importancia en la conciencia de la población y autoridades; sobretodo, a raíz del terremoto de 8.9 grados en la escala Rischter ocurrido en el océano Pacífico el 26 de diciembre de 2004, cuyas olas alcanzaron las costas de Indonesia, Sri Lanka y Tailandia, causando más de 150000 muertos.

Los GIS pueden ayudar a la gestión de los diferentes parámetros que contribuyen al aumento de la vulnerabilidad de las zonas urbanas situadas en la costa; como por ejemplo las características topográficas del terreno, cobertura vegetal, características de los edificios (cimientos, material, edad, altura, ventanas en la planta baja), la densidad de población o los datos económicos (Papathoma *et al.*, 2003).

En la Figura 2.3 se puede observar el diagrama de flujo de tareas y actividades seguido por Sugimoto *et al.* (2003), para la predicción de pérdidas humanas debidas a tsunamis en una zona urbana, mediante un Sistema de Información Geográfica.

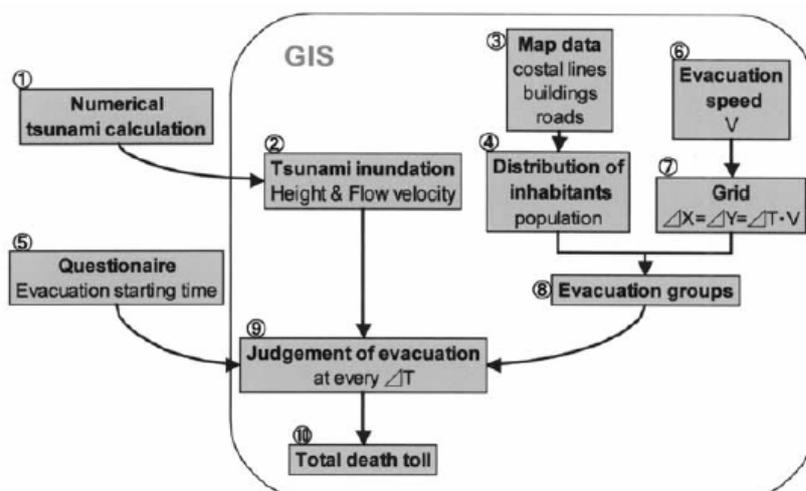


Figura 2.3. Diagrama de flujo para la predicción de pérdidas humanas en caso de tsunami empleando técnicas GIS (Sugimoto et al., 2003).

Así pues, los Sistemas de Información Geográfica se han convertido en una herramienta imprescindible en todo análisis de riesgo, y este trabajo no es una excepción. En él se usa, de manera extensa e intensa, el sistema informático *ArcView*, que se ha considerado conveniente para las peculiaridades del análisis del riesgo sísmico en entornos urbanos. Para no desenfocar el hilo conductor de este capítulo, que se centra en el riesgo en entornos urbanos, los aspectos descriptivos y técnicos de este *software* se han descrito en el Anejo B. Allí encontrará el lector interesado los contenidos y las descripciones de las herramientas y utilidades proporcionadas por este Sistema de Información Geográfica.

2.4 El riesgo sísmico

Los terremotos se consideran generalmente como una de las fuerzas más destructivas producidas por acción de la naturaleza, además de ser causantes de una fuerte influencia psicológica de forma masiva. Sin embargo, a nivel mundial y a largo plazo, el número de muertos y la magnitud de las pérdidas económicas causadas por las tormentas y las inundaciones exceden a las de los seísmos (Berz et al., 2001).

A continuación y en los siguientes apartados, se desarrollan los conceptos de riesgo definidos anteriormente en este capítulo, particularizados para el caso del fenómeno

sísmico. Los aspectos concretos concernientes a la definición de los escenarios sísmicos, a la cuantificación de la vulnerabilidad o fragilidad de los edificios y a los estados, funciones y matrices de probabilidad de daño se desarrollan a lo largo de los capítulos siguientes. También se desarrollan en el momento y lugar adecuado de esta memoria los aspectos para cuantificar las víctimas, el valor económico y otros aspectos relacionados con las consecuencias catastróficas del evento sísmico, como por ejemplo el número de personas sin hogar y el volumen de escombros producido.

Actualmente en España, el estudio del riesgo sísmico es imprescindible, tal y como dice la “Directriz Básica de Planificación de Protección Civil” ante el riesgo sísmico (BOE, 1995), para *“conocer las posibles consecuencias de una catástrofe sísmica en el territorio considerado, lo cual permitirá hacer las previsiones de los medios y recursos necesarios para una intervención y localizar la infraestructura de apoyo previsiblemente utilizable para la ayuda del área afectada”*. Dicha directriz define el concepto de riesgo sísmico como *“el número esperado de vidas perdidas, personas heridas, daños a la propiedad, y alteración de la actividad económica debido a la ocurrencia de terremotos”*.

Como se ha establecido en el apartado 2.2. se pueden resumir en tres los aspectos que intervienen en la evaluación del riesgo sísmico: la peligrosidad, la vulnerabilidad y el coste.

La *peligrosidad sísmica* se entiende como la probabilidad de que en una determinada zona y en un periodo de tiempo determinado se igualen o excedan unos niveles de intensidad o aceleración causada por terremotos. La *vulnerabilidad sísmica* de un elemento se define por su incapacidad de resistir las acciones sísmicas.

El daño sísmico en un sistema dado se define por el deterioro de sus características, (funcionales, estructurales y no estructurales), debido a una acción sísmica determinada. Depende de la intensidad de la acción sísmica y de la vulnerabilidad del sistema, y se suele cuantificar mediante funciones que relacionan la vulnerabilidad y la severidad del terremoto con el daño, de forma que, para un escenario sísmico concreto, permiten estimar las matrices de probabilidad de daño. El *coste* consiste en la valoración económica de esta degradación o inutilización de

los objetos, funciones o servicios del sistema. En general, la estimación del coste económico se basa en las probabilidades de ocurrencia de los estados de daño y del valor de mercado del bien dañado. El ATC-13 (1985) establece los estados de daño en función de unos porcentajes del coste de reparación del bien dañado respecto al coste de reposición. El coste de reposición se puede obtener del valor monetario del bien en el mercado del lugar y período del análisis. Junto con las probabilidades de cada estado de daño se obtiene el coste económico correspondiente. La integral de los costes esperados para todos los bienes dañados arroja el coste económico global de la crisis sísmica considerada. Las vidas humanas, los heridos graves y leves, en número de familias sin hogar y otros aspectos relevantes como, por ejemplo, el volumen de escombros, suelen estimarse a partir de fórmulas empíricas basadas también en las probabilidades de los estados de daño, y en la experiencia de terremotos pasados.

2.5 Ciudades: urbes y megaurbes

La segunda mitad del siglo XX se ha caracterizado por un aumento exponencial de la población mundial con la consiguiente creciente ocupación urbana del suelo. El siglo XX ha visto así el desarrollo y crecimiento de las grandes ciudades modernas que cuando exceden de 10 millones de habitantes se suelen llamar *megaurbes*. Las ciudades de Méjico, Seúl, Nueva York y Sao Pablo, con más de 20 millones de habitantes en el área directa de su influencia, son las 4 mayores megaciudades del mundo. Este fenómeno de ocupación concentrada del suelo, frecuentemente espontánea y desordenada, es la causa del aumento del daño causado por las catástrofes sísmicas en la segunda mitad del siglo XX. El número de grandes terremotos permanece constante pero su influencia sobre las grandes ciudades aumenta. En efecto, en general, los mayores desastres producidos por terremotos han sido aquellos en que el hipocentro se encontraba debajo o muy cercano a una gran ciudad. La alta concentración de población, edificios, infraestructuras y valor las constituye en zonas con una elevada exposición de bienes y, en consecuencia, con una alta potencialidad de pérdidas.

En consecuencia, una buena planificación del territorio que procure la descentralización de los equipamientos y la limitación de la densidad en las ciudades, puede reducir los elementos en riesgo e incorporar mejoras en el entorno y en los servicios disponibles. La creación de parques, por pequeños que sean, hace que funcionen como “pulmones” de la ciudad, ayudando a la hidrología urbana, a su humedad y microclima, y proporcionando zonas que pueden ser ocupadas por los servicios de emergencia o la población evacuada, incluso como refugios temporales, sobre todo en caso de incendios. La ciudad de Méjico convirtió en parques urbanos varias zonas de edificios colapsados tras el terremoto que sufrió en 1985. Otros países sin embargo, han tomado ya medidas de este tipo antes de la ocurrencia del terremoto, como Japón, que empezó a comprar terrenos en las zonas de mayor concentración de población a medida que estaban disponibles, con el objetivo de disponer de, al menos, 3 metros cuadrados de zona verde por cada habitante.

Es difícil fijar recomendaciones estándar acerca de la densidad de población, ya que varía considerablemente de unas ciudades a otras y de unos países a otros, y depende considerablemente del parque de edificios disponible y del tipo de terreno sobre el que se encuentren.

Por otra parte, en zonas con un elevado peligro sísmico, las relaciones entre los terremotos y sus efectos en el precio del suelo son bien conocidas, cambiando la distribución y forma de la ciudad a largo plazo. Los altos precios del suelo en algunas zonas hacen que se realicen construcciones más altas y más económicas, con las implicaciones negativas que tendrán en futuros terremotos, debido al aumento de la densidad de población y al descenso del nivel de seguridad. En general, las autoridades locales no suelen controlar los precios de los terrenos de la ciudad, pero inciden en ellos de una forma muy clara mediante la provisión de determinados servicios y equipamientos en su planificación urbanística, lo cual hace que unas zonas sean más demandadas o deseables que otras. El conocimiento de la dinámica del precio de los terrenos de la ciudad puede ser importante para una planificación de territorio más segura desde del punto de vista del riesgo sísmico.

2.5.1 El daño físico

Aunque en este trabajo sólo se efectúa un análisis del daño sísmico en edificios residenciales, en el Anejo C se realiza una descripción y un análisis detallado de los elementos de una ciudad en relación a su sensibilidad al riesgo sísmico. Éstos incluyen los edificios residenciales y esenciales, el patrimonio arquitectónico y cultural y las infraestructuras, como son las líneas vitales que permiten el abastecimiento de bienes y servicios, la movilidad de los ciudadanos y mercancías, la comunicación y el saneamiento.

Pero ciertamente las pérdidas producidas por los terremotos no se acaban en la estimación del coste de reparación o reconstrucción del daño físico causado a los edificios e infraestructuras de la ciudad, sino que se extienden más allá de las consecuencias directas provocadas por la vibración del terreno. Estos efectos indirectos producidos por el terremoto son principalmente de tres tipos: secuelas secundarias que aparecen tras el terremoto, daños de tipo no estructural de los edificios e infraestructuras y pérdidas económicas debidas al deterioro de las instalaciones con la consiguiente pérdida de prestaciones que provoca un mal funcionamiento del sistema productivo y socio-económico. Estos factores han sido siempre menos estudiados, debido a su complejidad y a la limitada información disponible, realizándose normalmente en base al juicio de expertos. Sin embargo, sus efectos también deben tenerse en cuenta tanto en los estudios de riesgo sísmico como en el diseño de planes de emergencia, y deben ser evaluados en la medida de lo posible.

En cuanto a los elementos no estructurales, se pueden diferenciar dos tipos: los elementos del edificio como son el revestimiento, ventanas, divisiones y servicios, o el mobiliario que tenga en su interior. El daño sufrido por este tipo de elementos en el caso de los edificios residenciales puede incluirse directamente en la matriz de probabilidad de daño. La metodología HAZUS (FEMA/NIBS, 1999) propone unos porcentajes del 1, 5, 25 y 50% para el daño leve, moderado, severo y completo respectivamente. Pero si se trata de otro tipo de edificios, por ejemplo edificios esenciales, es necesario un conocimiento más detallado del contenido y, en el caso de

instalaciones industriales, disponer también del inventario de materias primas y productos almacenados.

Entre los daños indirectos, también de tipo físico, inducidos por los terremotos se suelen considerar los incendios, los deslizamientos y desprendimiento de tierras, desplazamientos permanentes del suelo causados por licuefacción y por el movimiento de fallas, tsunamis, inundaciones y fallos en instalaciones industriales, entre otros. Todos ellos afectan de forma distinta a todos los elementos existentes en la ciudad, y para ellos también deben tomarse medidas durante la emergencia en caso de que puedan ser previstos.

Históricamente, los fuegos han destacado por ser uno de los desastres secundarios más severos, posteriores al terremoto. Su causa puede ser muy diferente, desde grandes vibraciones del suelo que rompan las conducciones de gas o combustible causando fugas o explosiones, hasta vuelco de estufas, o fallos en calefacciones, luces o cualquier otro material inflamable. Fuegos de pequeña importancia pueden avanzar rápidamente por todo el edificio en función de los materiales que se encuentren en su interior, pasando incluso de uno a otro edificio si las dos construcciones están muy cercanas. Los fuegos surgidos tras un terremoto en diferentes ciudades de Japón y California, como por ejemplo Kanto en 1923 o San Francisco en 1906, produjeron importantes pérdidas humanas y económicas. Como consecuencia, muchas ciudades japonesas y californianas disponen actualmente de regulaciones gubernamentales sobre el tipo de materiales de construcción y la proximidad entre edificios, para proteger las áreas urbanas de potenciales incendios. Debido a la gran variedad de variables que influyen en las pérdidas producidas por los incendios (número de fuegos simultáneos, condiciones climáticas, tipo de material combustible, efectividad de los equipos de bomberos, etc), este tipo de daños secundarios se hace muy difícil de establecer mediante procedimientos cuantitativos. Únicamente en Japón, y posteriormente en Estados Unidos, se han desarrollado modelos para determinados edificios con estructura de madera, mediante relaciones semi-empíricas que relacionan las pérdidas con el número de edificios colapsados. Sin embargo, los resultados presentan aún una gran incertidumbre (Scawthorn *et al.*, 1981; Porter *et al.*, 2006). Para un efectivo

funcionamiento de los equipos de bomberos ante la emergencia, es necesario haber tenido en cuenta diferentes factores con anterioridad, durante la planificación: por un lado, la comprobación de la capacidad y correcto funcionamiento de la red de distribución de agua que los bomberos emplearán en la emergencia; incluir rutas de acceso para los camiones de bomberos, y formas de evacuación de la población; y prever la incorporación de brigadas de zonas limítrofes a la afectada, o incluso equipos militares o grupos de voluntarios civiles.

Los movimientos del terreno posteriores a un sismo, tales como corrientes de lodo, caída de bloques o deslizamientos de ladera, son con frecuencia muy destructivos, aunque para que se produzcan deben darse ciertas condiciones geológicas, de gradiente de la pendiente y de contenido de agua en el terreno. Estos factores pueden evaluarse para crear diferentes mapas de susceptibilidad según la diferente intensidad de la sacudida.

La licuefacción es un fenómeno producido por la vibración del terreno, causado por el aumento de la presión intersticial que, a partir de un valor, impide el contacto entre las partículas; esto hace que el terreno pierda su resistencia al corte, transformándose temporalmente a un estado licuado. En estas condiciones el terreno pierde su capacidad portante y la cimentación de la estructura que se encuentra en él falla, provocando el colapso de ésta. Los terrenos más susceptibles a sufrir licuefacción son aquellos suelos granulares con niveles freáticos altos, no consolidados y no cohesivos, que generalmente se pueden identificar a partir de estudios y mapas geológicos de detalle. Las probabilidades de que se produzca licuefacción pueden estimarse para determinados depósitos conocidos a partir de ensayos *in situ*, fórmulas empíricas y mediante juicio experto.

Otro tipo de movimiento del terreno inducido por un terremoto es el movimiento relativo de ambos lados de una falla, este movimiento puede ser horizontal, vertical o combinación de ambos. El movimiento puede finalmente acabar en una deformación más regional, y alternativamente pueden producirse otras deformaciones locales que pueden llegar a ser muy destructivas a pocos cientos de metros de la falla. Las infraestructuras lineales como por ejemplo, carreteras y conducciones subterráneas de agua, gas, etc, son particularmente sensibles a estas deformaciones permanentes

del suelo. Otro efecto local, generalmente asociado a las fallas, es la amplificación del movimiento del suelo en la región cerca del final de la falla en la dirección de la propagación.

Por otra parte, para evitar inundaciones producidas por la rotura de presas y diques que puedan afectar a todo un asentamiento urbano es importante reducir rápidamente sus niveles de agua y realizar su inspección tras ocurrir el terremoto; la estructura puede fallar incluso varios meses después, al haber disminuido la resistencia de la infraestructura por causa del terremoto siendo incapaz de soportar el normal incremento del nivel del agua por las lluvias, deshielo u otras razones. Un estudio del daño potencial que puede producir la rotura de este tipo de obras requiere un estudio de vulnerabilidad sísmica de su estructura, el área susceptible de ser inundada en caso de fallo y la vulnerabilidad de las instalaciones y equipamientos de dicha zona inundada (FEMA, 1997).

Determinadas industrias situadas en áreas de peligrosidad sísmica, que utilizan materiales químicos, o almacenan combustible u otros materiales explosivos, suponen un peligro adicional para la población en caso de producirse un terremoto. Los procesos llevados a cabo en ellas pueden no ser peligrosos en sí, pero sin embargo, sí pueden liberar gases nocivos en caso de fallo de las conducciones o de incendios producidos durante el terremoto. De entre todas las instalaciones y empresas que manejan materiales peligrosos, destacan claramente las centrales nucleares, debido a las graves consecuencias que producirían en caso de sufrir daño por la gran toxicidad de los gases radioactivos que liberarían a la atmósfera. Pese a que la probabilidad de fallo en estas instalaciones es muy baja, ya que se diseñan y construyen con unos altos márgenes de seguridad y código sismorresistente, deben siempre contemplarse en los planes de emergencia.

2.5.2 La población

Uno de los objetivos más importantes de todo estudio de riesgo es salvar vidas humanas. Para ello es fundamental conocer el número de víctimas esperadas, entendiendo por víctimas tanto los heridos como los fallecidos. Esta información es

crucial para el diseño de planes de emergencia. La documentación existente acerca del número de víctimas en terremotos pasados es escasa, siendo además muy difícil la estimación de pérdidas humanas, por causa de las diferencias en el número de víctimas dependiendo del momento en que se produce el terremoto (estación del año, día de la semana y hora), y de la intensidad de éste, así como de la entidad o fuente que efectúe la estimación. La estimación del número de víctimas suele estar fuertemente sesgada. A pesar de estas limitaciones, se estima que el 25% del total de muertes producidas por terremotos en el siglo XX fueron causadas por daños no estructurales en los edificios o provocadas por otros efectos inducidos por el terremoto, como incendios, caída de bloques, deslizamientos o coladas de fango. Este tipo de desastres es muy difícil de predecir, pero normalmente causan una baja proporción de las muertes totales. La mayor parte de las víctimas es debida al colapso de los edificios, alrededor del 90% de las muertes, si se excluyen las producidas por otros desastres post-terremoto. Por otro lado, aunque el terremoto produzca en la mayoría de edificios daños de tipo bajo o moderado, el número total de víctimas puede ser muy variable de unos terremotos a otros (Coburn y Spence, 1992). Todo ello hace que sea tan importante realizar un buen estudio de vulnerabilidad de las tipologías constructivas existentes.

2.5.3 Aspectos económicos

Coburn y Spence (2002) estiman que el valor económico del daño causado por 1248 terremotos destructivos ocurridos en el mundo en el siglo pasado (desde 1900 a 1999) asciende a más de 1,000,000,000,000 dólares (ajustado al valor del dinero en el año 2000). Esta estimación es muy aproximada y proviene de diferentes fuentes y calidades, que además utilizan diferente terminología para expresar las pérdidas económicas producidas por un terremoto. Pero no cabe duda que estos terremotos del siglo XX producirían unos costes mucho mayores si ocurrieran actualmente, debido a la mayor densidad de población y mayor coste para reparar o reconstruir las actuales infraestructuras y edificios, más sofisticados y complejos.

La destrucción física provocada por un terremoto en las infraestructuras y servicios públicos, tales como escuelas, hospitales, redes de transporte, redes de suministro eléctrico, de agua o gas, afectan de forma importante no sólo a la administración pública, sino también a las empresas, a los trabajadores y a la población de la zona afectada. El impacto provocado por las pérdidas económicas del desastre puede ser severo y tener repercusiones nacionales e internacionales.

Por una parte se encuentran los costes directos, relacionados con la inversión económica necesaria para reparar o sustituir las infraestructuras y servicios públicos dañados. En los que se incluyen los relativos al coste de las operaciones de emergencia que movilizan a servicios de emergencia, policía, bomberos, hospitales y ejército, que pueden costar millones de euros en salarios y coste de material, y que son en gran parte pagados por el gobierno.

Adicionalmente a los costes directos, deben tenerse en cuenta las pérdidas indirectas, también llamadas “*no tangibles*”, que no son cuantificables formalmente y que también generan un descenso de la productividad económica de la zona, e incluso a veces cambios en los mercados financieros del país. Entre este tipo de pérdidas se encuentra el sufrimiento humano generado por la pérdida de la vivienda o de los miembros de la familia, y los efectos psicológicos que ello produce; la recesión o inestabilidad política, la interrupción de las redes de telecomunicaciones que impiden el contacto con los familiares, clientes o proveedores de una empresa; o la pérdida del patrimonio histórico y cultural con el que se identifica la sociedad. Las pérdidas de negocios y puestos de trabajo requieren, por parte del Estado, de programas sociales de ayuda a las personas sin trabajo, así como de préstamos para los pequeños empresarios, que permitan revitalizar económicamente la región afectada. Este tipo de pérdidas pueden estimarse mediante modelos de “*input-output*”, y procedimientos estándares como los desarrollados por Brookshire *et al.* (1997).

En resumen, las pérdidas económicas causadas por un terremoto incluyen el coste total de reparar las propiedades dañadas, el coste de las operaciones de emergencia y el coste de las pérdidas en la producción económica. Todo ello hace que sea muy difícil cuantificarlas de forma precisa, por lo que su estimación suele ser de forma

muy aproximada, limitándose su utilización en estudios estadísticos o comparaciones entre eventos individuales.

El informe del *Applied Technology Council* (ATC-13, 1985) expone la metodología empleada para inventariar los datos necesarios para predecir el impacto económico de un gran terremoto en California (EEUU). La información que se ha de incluir es: el tamaño, la situación, las características estructurales, el valor y la función social de cada instalación y cuando éstas son edificios, han de incluir también su contenido. Adicionalmente en muchos casos también es necesario conocer las principales características del lugar donde están construidas.

En esta tesis se analiza el daño físico directo esperado en los edificios residenciales de Barcelona por causa sísmica. En el capítulo 9 se expone el modelo escogido para la cuantificación del coste económico que conlleva este tipo de daño. Otras estimaciones de costes van más allá de los objetivos de este estudio.

2.5.4 Escenarios

Durante siglos la cartografía ha sido considerada una disciplina en la que se combinaban aspectos técnicos y artes gráficas, siendo el resultado un mapa sobre papel que reflejaba el estado real actual de un territorio. Sin embargo, actualmente, con la incorporación de los ordenadores en los procesos de generación de los productos cartográficos, los mapas se han convertido en algo más que una representación del territorio, son elementos fundamentales para su gestión y planificación.

La incorporación de los Sistemas de Información Geográfica nos ayudarán a la modelización de determinados fenómenos localizados sobre el territorio, así como a la representación cartográfica de los diversos escenarios generados. Por tanto, estas herramientas servirán de ayuda en la toma de decisiones y simulación de fenómenos naturales. Para ello se hace imprescindible contar no sólo con personal cualificado en GIS, para una correcta gestión de la información espacial, sino también de expertos en el tema tratado, que presten una atención especial a los procesos de

análisis y cálculo, así como una interpretación correcta de los resultados obtenidos y su adecuación a las necesidades propuestas.

2.6 Sistemas complejos y riesgo global

Hoy en día existe un amplio consenso en que las catástrofes naturales en general, y las sísmicas en particular, trascienden el daño físico causado en los edificios, en las infraestructuras y en la población. Las dimensiones del desastre dependen también de la resiliencia de la sociedad y de su capacidad de respuesta. Comfort (1999) realiza un enfoque del riesgo sísmico incluyendo los aspectos organizativos y de gestión de la emergencia creada. Incluye conceptos como el de “*riesgo compartido*” o “*riesgo colectivo*” (*Shared Risk*) y, desde un punto de vista matemático formal, considera la respuesta de la comunidad urbana como la respuesta de “*sistemas complejos*” (*Complex Systems*) que incluyen también el concepto de “*procesos auto-organizativos*” (*Self Organizing Processes*). El problema es claramente no lineal y su evolución temporal es altamente impredecible debido a la idea, fácilmente comprensible, de la introducción del concepto de auto-adaptación de los sistemas dinámicos sociales, y que depende, además de las capacidades propias del sistema, de la evolución temporal de la gestión de la emergencia. Por lo tanto, otro concepto clave, en este tipo de estudios, es el de los *modelos de transición* en entornos regulados por sistemas dinámicos complejos, en los que tienen una influencia crucial los conceptos de liderazgo, mando y control. La evolución temporal de estos sistemas complejos, pero controlados, debe minimizar los aspectos que introducen anarquía, debe optimizar los aspectos de redundancia, y prever el conocimiento exacto y preciso de la situación real en cada instante de la evolución de la gestión de la emergencia, implementando sistemas de comunicación e integración de la información. Cada paso puede y debe ser decidido en función del estado del sistema global en este instante y del resultado del paso previo. El estudio y el análisis de la respuesta a la emergencia creada en once terremotos recientes permiten a Comfort (1999) avanzar en los aspectos cuantitativos de la caracterización del comportamiento de estos sistemas complejos mediante el seguimiento y análisis de distintas emergencias ocurridas en entornos con características dispares y en

sociedades con niveles de desarrollo desiguales. La *Tabla 2.1* incluye la lista de los terremotos estudiados. Otros estudios recientes también intentan diseñar descriptores, índices y cuantificadores que tengan en cuenta esta evaluación holística del riesgo sísmico (Cardona, 2001; Carreño, 2006). Se destacan a continuación algunos aspectos relevantes de este tipo de enfoques del análisis del riesgo.

Los riesgos naturales representan un riesgo público ya que afecta a todos los residentes de la comunidad expuesta, hayan o no contribuido a las condiciones de producción de la amenaza. Por tanto, este riesgo invoca la respuesta colectiva y pública, de la comunidad y de sus instituciones, para mitigar el daño de la amenaza. Existen muchas comunidades que viven bajo este tipo de amenaza contra su bienestar durante largos períodos de tiempo. Sus miembros generalmente conocen el peligro y pueden tomar acciones individuales para reducir el riesgo; sin embargo, la sociedad en su conjunto sigue siendo vulnerable porque sus miembros e instituciones son incapaces de tratar el problema de forma colectiva para reducir el riesgo e incrementar su capacidad de respuesta.

Los gestores públicos del riesgo son los responsables ante los ciudadanos de las acciones que éstos tomen o no, para el interés del bienestar público. No obstante, pese al esfuerzo realizado para impulsar políticas y planes de reducción del riesgo, los planificadores y responsables en la toma de decisiones no han tenido mucho éxito en reducirlo o, si alguna vez lo han logrado, ha sido una rara excepción y por un período muy breve (Comfort 1999).

La ausencia de organización institucional y de la comunidad, una débil preparación para la respuesta ante la emergencia, la inestabilidad política y una economía débil contribuyen al aumento del riesgo. Por ello, las consecuencias potenciales negativas están relacionadas no sólo con los efectos del fenómeno destructivo, sino también con la resiliencia de la comunidad (Carreño, 2006).

Las situaciones de desastre proporcionan una rara oportunidad para observar el comportamiento colectivo y los procesos de auto-organización generados para la emergencia, en un breve período de tiempo, siendo una clara prueba de la política existente en la comunidad, su estado de preparación, y la capacidad para la respuesta

a un evento adverso. En particular, los terremotos son desastres repentinos y muy destructivos que requieren la atención y esfuerzos de todos los miembros de la comunidad. Las importantes pérdidas que provocan afectan a toda la colectividad. El daño no es sólo de naturaleza física sino también funcional, social, económica y psicológica, y afecta no sólo a los individuos e instituciones sino también al funcionamiento del sistema que debe recuperar la normalidad.

Otro aspecto importante es la capacidad de aprendizaje de estos sistemas complejos para disminuir el impacto de estos sucesos e incrementar su capacidad de respuesta. Así por ejemplo, en el terremoto de 1933 en Loma Prieta ($M=6.3$), que produjo el colapso de cientos de edificios de mampostería no reforzada y 120 muertos, encontramos un claro ejemplo de cómo influye la memoria colectiva del terremoto en las elecciones y comportamiento de los diferentes miembros y organizaciones del sistema. Durante los seis años posteriores al suceso los políticos y profesionales interesados en la política sísmica del estado iniciaron un importante esfuerzo para revisar los códigos de edificación contra el riesgo sísmico. Como consecuencia, posteriores terremotos ocurridos en California, como el de Witthier Narrows en 1987 ($M=5.9$, 8 muertos), Loma Prieta en 1989 ($M=7.1$, 63 muertos) y Northridge en 1994 ($M=6.7$, 59 muertos), presentaron un ratio menor de víctimas mortales y menor grado de daño en los edificios.

Para desarrollar un sistema de respuesta posterior al desastre debe involucrarse en su diseño a toda la sociedad, es decir, a la población, a las instituciones públicas y privadas, así como a las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales. Este riesgo compartido colectivamente por individuos, instituciones y sistemas, representa un problema de tipo multidisciplinar de difícil solución, que requiere conceptos y métodos para facilitar el mantenimiento e intercambio de información y compromiso entre los múltiples grupos existentes dentro del sistema afectado, con diferentes niveles de responsabilidad, capacidad, comprensión y habilidad. Por tanto, la principal función del sistema de gestión para responder a una amenaza inmediata del entorno es apoyar los procesos de la integración y de la transición entre las diferentes unidades que lo componen hacia una meta común. Todos estos procesos de comunicación, retroalimentación, y auto-organización, orientados a la reducción del

riesgo, son dependientes de la información e implican un proceso continuo de aprendizaje colectivo.

En base a sus investigaciones sobre los once desastres sísmicos analizados (véase **Tabla 2.1**), Comfort (1999) formula un modelo dinámico de gestión de emergencias. El modelo considera cinco aspectos fundamentales: 1) *Condiciones iniciales*, 2) *Búsqueda de información*, 3) *Intercambio de información*, 4) *Aprendizaje* y 5) *Acción colectiva*. Las condiciones iniciales definen aquellas circunstancias existentes en la comunidad expuesta antes de que ocurra el terremoto. La *búsqueda de información* comprende las acciones orientadas a adquirir información sobre el evento dañino, organizarla para compartirla entre los participantes en el proceso de respuesta y, junto con otros conocimientos de la comunidad, utilizarla como fundamento de la acción. El *intercambio de información* crea las condiciones y la base para una comprensión compartida de los problemas que se deben afrontar. El *Aprendizaje* debe ser propio de cada institución u organización (*Intra*) pero también interinstitucional e interorganizacional (*Inter*); en este apartado se incluyen las acciones orientadas a dimensionar y entender el impacto y los efectos del terremoto sobre el normal funcionamiento de la comunidad. Finalmente, la *acción colectiva* reúne las medidas que resultan de los cuatro procesos anteriores; estas disposiciones deben suponer cambios concretos y tangibles en la capacidad y rendimiento para aminorar el riesgo futuro, así como, eventualmente, recomendaciones para cambios cuya realización ulterior debe planificarse.

Como resultado de la aplicación de su modelo a los procesos de recuperación de once catástrofes sísmicas, y en base al análisis de diferentes indicadores, Comfort (1999) clasifica los sistemas de respuesta analizados según cuatro categorías en función de tres cualidades de estos sistemas. Las tres cualidades de los sistemas de respuesta hacen referencia a: a) *infraestructura tecnológica*, b) *flexibilidad organizativa*, c) *capacidad de ser abiertos a otras culturas*. Las cuatro clases de sistemas son: 1) *No adaptativos*, 2) *Adaptativos emergentes*, 3) *Adaptativos operativos* y 4) *Auto adaptativos*. La **Tabla 2.1** resume la clasificación de las once catástrofes analizadas por Comfort (1999) en función de la evaluación de los indicadores según las calificaciones de bajo, medio y alto.

Tabla 2.1. Clasificación de los sistemas de respuesta a una catástrofe sísmica y principales características (Comfort, 1999).

		Propiedades del sistema			Clasificación de los desastres sísmicos analizados
		Estructura tecnológica	Flexibilidad organizativa	Apertura cultural	
CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS	No adaptativo	Baja	Baja	Baja	San Salvador (El Salvador) 1986; Provincia de Napo (Ecuador) 1987; Norte de Armenia, 1988.
	Adaptativo emergente	Baja	Media	Emergente	Ciudad de México (México) 1985; Provincia de Limón (Costa Rica) 1991; Erzinkan (Turquía) 1992.
	Adaptativo operativo	Media	Media	Media	Whitier Narrows, California (EEUU) 1987; Loma Prieta, California (EEUU) 1989; Marathwada (India) 1993.
	Auto adaptativo	Alta	Alta	Alta	Northridge, California (EEUU) 1994; Hanshin (Japón) 1995.

Cardona (2001) y Carreño (2006) también trabajan en la línea de una evaluación global del riesgo sísmico en los términos que ellos definen como *evaluación holística del riesgo*. Su modelo, aunque nace de la experiencia sísmica, la trasciende para ser aplicable a la evaluación de la habilidad de la colectividad golpeada por un desastre para superarlo y recobrar la normalidad y los niveles de desarrollo y crecimiento anteriores a los efectos del desastre. Para medir la eficiencia en la gestión de catástrofes, proponen un índice de gestión de riesgos (*DRMi*), consistente y robusto, que les permite cuantificar y comparar patrones de funcionamiento y definir objetivos y estrategias para mejorar la eficacia en los sistemas y procesos de recuperación.

Esta tesis contiene modelos y desarrollos avanzados para la evaluación del impacto inmediato de un terremoto sobre edificios residenciales. Por lo tanto, aunque no incide en la evaluación holística del riesgo, sí que forma parte de ella, especialmente en el conocimiento del impacto físico real de la catástrofe a la que se deberá hacer frente. En este sentido es una contribución significativa a las cuatro primeras fases del modelo de Comfort (1999). Define el punto de partida o las *condiciones iniciales*

de la ciudad de Barcelona. *Recopila información* sensible al riesgo sísmico, información que es *compartida* con los servicios de protección civil de Cataluña y de Barcelona y con otras instituciones. Permite *aprender y comprender*, con gran rigor y detalle, los efectos de los terremotos sobre la ciudad. La vocación de la tesis es de utilidad, de orientar *la acción* para prevenir y aminorar el riesgo sísmico de Barcelona.

2.7 Resumen y conclusión

Este capítulo es eminentemente descriptivo y conceptual. Introduce una visión general de la problemática de los riesgos y catástrofes naturales así como las palabras y conceptos involucrados en este tipo de estudios. Obviamente se hace especial énfasis en el tema sísmico. También se aprovecha para enmarcar la investigación, que hace referencia al daño físico esperado en los edificios residenciales de una ciudad donde el peligro sísmico es bajo pero la vulnerabilidad alta y, en consecuencia, el daño esperado puede llegar a ser considerable. Esta revisión conceptual se efectúa dentro de un amplio marco de modelos de análisis de riesgo sísmico como tarea multidisciplinar que implica a toda la comunidad y que, en consecuencia, debe ser compartido por individuos, instituciones y colectividades. Los detalles más técnicos referentes al inventario de edificios, estructuras e infraestructuras sensibles al riesgo sísmico y a la gestión de escenarios mediante Sistemas de Información Geográfica se han separado en dos anejos, concretamente en los anejos C y B respectivamente.

Se apunta y analiza el hecho del crecimiento de las catástrofes naturales causadas por una ocupación creciente y desordenada del suelo debido al incremento de la población mundial y a su tendencia a aglomerarse en grandes conurbaciones o megaciudades, y se establecen los elementos fundamentales del riesgo sísmico que incluyen el daño físico directo, su influencia en la población y otros aspectos socio-económicos. Se describe el concepto de escenario como una forma avanzada de predecir la distribución espacial y georreferenciada de la acción sísmica esperada y de sus efectos. Se reconoce el hecho de la complejidad del análisis y evaluación del

riesgo y se aprovechan los estudios de Comfort (1999), Cardona (2001) y Carreño (2006) para introducir los sistemas complejos que rigen la respuesta colectiva y compartida para la recuperación de un desastre, así como otros aspectos e índices holísticos o globales de análisis del riesgo, índices que tienen en cuenta el nivel de desarrollo de la comunidad golpeada, su fragilidad socioeconómica y su resiliencia. En este contexto global se concluye que este estudio contiene modelos y desarrollos avanzados para la evaluación del impacto inmediato de un terremoto sobre edificios residenciales, constituyendo un estadio preliminar, necesario y fundamental como punto de partida hacia evaluaciones posteriores de la capacidad de respuesta de la sociedad. En este sentido, este estudio, además de las numerosas y significantes aportaciones metodológicas que contiene, contribuye a cuatro de las cinco fases del modelo de respuesta de Comfort (1999), estableciendo condiciones iniciales, recopilando y gestionando una gran cantidad de información, que es compartida con otras instituciones de la ciudad. La simulación de escenarios sísmicos permite aprender y comprender los efectos potenciales de los terremotos sobre la ciudad. Esta tesis, finalmente debe contribuir también al quinto estadio del modelo de Comfort (1999), pues contiene un enorme potencial para orientar la acción y la toma de decisiones orientadas a la prevención y disminución del riesgo sísmico de Barcelona, pero también a la planificación, optimización y gestión de la respuesta a una eventual emergencia sísmica. La adecuación de esta respuesta colectiva y compartida debe ser el camino hacia una eficaz y rápida recuperación de los estándares socio-económicos de progreso y bienestar, dañados, deteriorados o anulados.

2. EL RIESGO EN ENTORNOS URBANOS	21
2.1 Introducción	21
2.2 El riesgo: palabras y conceptos	23
2.3 Riesgos naturales y Sistemas de Información Geográfica	26
2.4 El riesgo sísmico	33
2.5 Ciudades: urbes y megaurbes	35
2.5.1 El daño físico	37
2.5.2 La población	40
2.5.3 Aspectos económicos	41
2.5.4 Escenarios	43
2.6 Sistemas complejos y riesgo global	44
2.7 Resumen y conclusión	49
Figura 2.1. Mapa del mundo de riesgos naturales (Munich, 1998).	27
Figura 2.2. Área urbana afectada por el paso de un tornado. Fotografía tomada por el Aerial Oklahoma, Inc. (Yuan, 2005).	29
Figura 2.3. Diagrama de flujo para la predicción de pérdidas humanas en caso de tsunami empleando técnicas GIS (Sugimoto et al., 2003).	33
Tabla 2.1. Clasificación de los sistemas de respuesta a una catástrofe sísmica y principales características (Comfort, 1999).	48

Referencias

- Aboelata, M., Bowles, D. S. y McClelland, D. M. (2002). GIS Model for Estimating Dam Failure Life Loss. *Proceedings of the Tenth Conference risk-based decision making in water resources X*, Santa Barbara, CA, United States, American Society of Civil Engineers, 126-145.
- Alafort, L. S. y Ortiz, J. (1999). Análisis de la peligrosidad sísmica en el Alto Aragón utilizando un Sistema de Información Geográfica. *I Jornadas de Sistemas de Información Geográfica en los riesgos naturales y en el medio ambiente*, Madrid, 97-109.

- ATC-13 (1985). *Earthquake damage evaluation data for California, ATC-13*. Applied Technology Council. Redwood City, California. 492 pp.
- Ayala, D. F., Spence, R. J. S., Olivera, C. S. y Silva, P. (1996). Vulnerability of buildings in historic town centres: a limit-state approach. *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco (México), Elsevier Science Ltd, 8.
- Baeza, C. (1994). Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. pp.
- Berz, G., Kron, W., Loster, T., Rauch, E., Schimetschek, J., Schmieder, J., Siebert, A., Smolka, A. y Wirtz, A. (2001). "World map of natural hazards - a global view of the distribution and intensity of significant exposures". *Natural Hazards* **23** (2-3): 443-465.
- Blais, N. C., Seligson, H. A. y Petrow, A. J. (1996). Use of rapid damage assessment and geographic information systems for emergency response in the northridge earthquake. *Proceedings of the eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco (Mexico), Elsevier Science Ltd, 8.
- BOE, Boletín Oficial del Estado (1995). *Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico*. 15294-15304 pp.
- Brookshire, D. S., Chang, S. E., Cochrane, H., Olson, R. A., Rose, A. y Steenson, J. (1997). "Direct and indirect economic losses from earthquake damage". *Earthquake Spectra* **13** (4): 683-702.
- Burton, I., Kates, R. W. y White, G. F. (1978). *The environment as Hazard*. Oxford University Press, New York. 240 pp.
- Candinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F. y Reichenbach, P. (1996). GIS-based predictive models of landslide occurrence. *Workshop on Geographical Information Systems and Major Hazards*, Walferdange (Grand Duchy of Luxemburg).
- Cardona, O. D. (2001). Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 322 pp.
- Carreño, M. L. (2006). Técnicas innovadoras para la evaluación del riesgo sísmico y su gestión en centros urbanos: Acciones *ex ante* y *ex post*. *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 278 pp.

- Castillo, A. (2005). Seismic risk scenarios for buildings in Mérida, Venezuela. Detailed vulnerability assessment for non-engineered housing. *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 348 pp.
- Cella, F., Grimaz, S., Meroni, F., Petrini, V., Tomasoni, R. y Zonno, G. (1994). A case study for seismic vulnerability assessment using GIS connected to Expert System. *Conférence Utilisateurs Européenne*, Paris (France), 26.
- Coburn, A. y Spence, R. (1992). *Earthquake Protection*. John Wiley & Sons, Chichester, England. 355 pp.
- Coburn, A. y Spence, R. (2002). *Earthquake Protection (2nd edition)*. John Wiley & Sons, Chichester, England. 420 pp.
- Comfort, L. K. (1999). *Shared Risk: Complex Systems in Seismic Response*. Elsevier Science Ltd., Kidlington, Oxford (UK). 322 pp.
- Chen, Q. F., Chen, Y., Liu, J. y Chen, L. (1997). "Quick and approximate estimation of earthquake loss based on macroscopic index of exposure and population distribution". *Natural Hazards* **15** (2-3): 217-229.
- Dolce, M., Zuccaro, G., Kappos, A. y Coburn, A. (1994). Report of the EAEE Working Group 3: Vulnerability and risk analysis. *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, 3049-3077.
- Felpeo, A., Araña, V., Ortíz, R., Astiz, M. y García, A. (2001). "Assessment and modelling of lava flow hazard on Lanzarote (Canary Islands)". *Natural Hazards* **23**: 247-257.
- FEMA, Federal Emergency Management Agency (1997). *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. FEMA-273, US Federal Emergency Management Agency. pp.
- FEMA/NIBS: Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences (1999). *HAZUS' 99 technical manual. Earthquake Loss Estimation Methodology*, Washington, D.C., USA. pp.
- Furdada, G. (1996). Estudio de los aludes de nieve en el Pirineo occidental de Catalunya: predicción espacial y aplicaciones de la cartografía. *Tesis doctoral*. Dpto. Geología Dinámica, Geofísica y Paleontología. Universidad de Barcelona. Barcelona. pp.
- Islam, M. M. y Sado, K. (2002). "Development Priority Map for Flood Countermeasures by Remote Sensing Data with Geographic Information System". *Journal of Hydrologic Engineering* **00007** (00005): 346-355.

- King, S. A. y Kiremidjian, A. S. (1994). *Regional seismic hazard and risk analysis through geographic information systems*. Jonh A. Blume Earthquake Engineering Center. Stanford University, Stanford. 168 pp.
- Lazzari, M. y Salvaneschi, P. (1996). Integrating GIS and artificial intelligence for landslide hazard monitoring. *Workshop on Geographical Information Systems and Major Hazards*, Walferdange (Grand Duchy of Luxemburg).
- Martí, G., Oller, P., García, C., Mases, M., Martínez, P. y Roca, A. (1998). The avalanche paths cartography in the Catalonia Pyrenees. *I Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Aguadulce (Almería), 498.
- Masure, P. y Lutoff, C. (2002). *WP03. Handbook on Urban System Exposure (USE) assessment to natural disasters*. BRGM, Marsella (Francia). 48 pp.
- Mena, U. (2002). Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 240 pp.
- Milutinovic, Z. y Petrovsky, J. (1985). Earthquake vulnerability and loss assessment for physical and urban planning. *Proceedings of the International Conference on Reconstruction, Restoration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas*, IZIIS. Skopje, Yugoslavia.
- Munich Reinsurance Company (1998). *World Map of Natural Hazards*. 3a ed., Munich. pp.
- Papathoma, M., Dominey-Howes, D., Zong, Y. y Smith, D. (2003). "Assessing tsunami vulnerability, an example from Herakleio, Crete". *Natural Hazards and Earth System Science* **3** (5): 377-389.
- Polovinchik, E. F. y Klyachko, M. A. (1995). Development of Geoinformational System (GIS) for analysis and management of seismic risk on the urban areas. *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Balkema. Rotterdam, Duma, 1141-1146.
- Porter, K. A., Scawthorn, C. R. y Beck, J. L. (2006). "Cost-effectiveness of stronger woodframe buildings". *Earthquake Spectra* **22** (1): 239-266.
- Santacana, N. (2001). Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 399 pp.
- Scawthorn, C., Iemure, H. y Yamada, Y. (1981). "Seismic damage estimation for low and mid-rise buildings in Japan". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **9** (2): 93-115.

- Sugimoto, T., Murakami, H., Kozuki, Y., Nishikawa, K. y Shimada, T. (2003). "A human damage prediction method for tsunami disasters incorporating evacuation activities". *Natural Hazards* **29** (3): 585-600.
- UNDRO (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis. Report of Expert Group Meeting*. Geneve. pp.
- UPV, Universidad Politécnica de Valencia (2003). SIG de Control de Deslizamiento de Laderas, Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Varnes, D. J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Natural Hazards. n° 3. UNESCO, Paris. 63 pp.
- Vatti, M., Remata, S. R. y Chigbu, P. (2003). Simulations of "the historic Southeast Louisiana and Southern Mississippi flood activity during May 8-10th, 1995" to build a prototype GIS/RS based ERAISA (Environmental Risk Assessment Integrative Systems Approach) for Gulf Coastal States of the United States. *2003 IGARSS: Learning From Earth's Shapes and Colours, Jul 21-25 2003*, Toulouse, France, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2520-2522.
- Villacis, C., Cardona, C. N. y Tucker, B. (2000). Implementation of fast earthquake scenarios for risk management in developint countries. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, CD-ROM.
- Wang, X. y Huand, X. (2000). The earthquake disaster prediction and decision support system in southern area of Fujian province of China. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, CD-ROM.
- Yuan, M. (2005). "Beyond mapping in GIS applications to environmental analysis". *Bulletin of the American Meteorological Society* **86** (2): 169-171.
- Yuan, M., Dickens-Micozzi, M. y Magsig, M. A. (2002). "Analysis of tornado damage tracks from the 3 May tornado outbreak using multispectral satellite imagery". *Weather and Forecasting* **17** (3): 382-398.
- Zerger, A. y Wealands, S. (2004). "Beyond Modelling: Linking Models with GIS for Flood Risk Management". *Natural Hazards* **33**: 191-208.