

## **II. GEOGRAFÍA GENERAL**

# Un procedimiento para elaborar mapas de riesgos naturales aplicado a Honduras

## *The making of natural hazards maps, applied to Honduras*

Ismael AHAMDANECH ZARCO<sup>1</sup>, Concepción ALONSO RODRÍGUEZ<sup>2</sup>, Joaquín BOSQUE SENDRA<sup>3</sup>, José Antonio MALPICA VELASCO<sup>2</sup>, Miguel MARTÍN-LOECHES<sup>4</sup>, Esther PÉREZ ASENSIO<sup>5</sup>, Javier TEMIÑO VELA<sup>4</sup>

Recibido: 5 de febrero de 2003

Aceptado: 7 de abril de 2003

### RESUMEN

Se plantea un método, basado en la Teoría de la Evidencia de Dempster-Shafer, para construir mapas de riesgos. Se explican procedimientos para la creación de mapas de exposición a inundaciones y para medir la vulnerabilidad del territorio. Para llevar a cabo los análisis se emplea el programa SIG IDRISI. El área analizada es Honduras.

### PALABRAS CLAVE

Cartografía de riesgos  
Exposición territorial a inundaciones  
Vulnerabilidad del territorio  
Teoría de la evidencia de Dempster-Shafer  
Teoría borrosa  
Honduras IDRISI

### ABSTRACT

A method based on the theory of Evidence of Dempster-Shafer to build risk maps is proposed. Procedures to create maps of flooding exposition and to measure territorial vulnerability are explained. The analysis are carried out using IDRISI software GIS and the area under study is Honduras.

### KEY WORDS

Risk  
Cartography  
Flooding exposition  
Territorial vulnerability  
Theory of Evidence of Dempster-Shafer  
Fuzzy theory  
Honduras. IDRISI

<sup>1</sup> Departamento de Estadística, Estructura Económica y Organización Económica Internacional de la Universidad de Alcalá.

<sup>2</sup> Departamento de Matemáticas de la Universidad de Alcalá.

<sup>3</sup> Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá.

<sup>4</sup> Departamento de Geología de la Universidad de Alcalá.

<sup>5</sup> CICODE, Universidad de Alcalá.

**SUMARIO** 1. Introducción. 2. Los componentes de la cartografía de riesgos. 3. La medición de la exposición y de la vulnerabilidad a los peligros. 4. La construcción de mapas de riesgos. 5. Conclusiones. 6. Referencias bibliográficas.

## 1. Introducción

El trabajo que aquí se presenta es el resultado de un proyecto de investigación desarrollado por el Centro de Iniciativas de Cooperación al Desarrollo (CICODE) de la UAH, por encargo de Cruz Roja Española, en colaboración con profesores de los departamentos de Geografía, Geología, Estadística, Estructura Económica y Organización Económica Internacional y Matemáticas de la Universidad de Alcalá.

El objetivo principal del proyecto era dotar a la Cruz Roja Española de un instrumento de análisis geográfico que permita la formulación de planes, programas y acciones relativas a la prevención de desastres. Para ello, se intentaba obtener los siguientes resultados: a) Generación de una serie de mapas de exposición a las principales amenazas que azotan el territorio hondureño de forma más o menos periódica. b) La identificación global de zonas de riesgos catastróficos con incidencia sobre la vida, la salud y las actividades económicas en Honduras a efectos de la localización precisa y la gradación de posibles daños (escenarios catastróficos).

Para ello se han utilizado los procedimientos, ya bien conocidos, de cartografía de riesgos (Láin, 2000), en el siguiente apartado se detallan los componentes usuales de un mapa de riesgos.

## 2. Los componentes de la cartografía de riesgos

En primer lugar, tenemos que definir el concepto de mapa de riesgo y sus componentes. De manera general, la cartografía de riesgos tiene como objetivo «identificar las áreas geográficas susceptibles de sufrir daño en caso de que una amenaza se haga realidad» (Lowry *et al.*, 1995).

Habitualmente (Jiménez y Láin, 2000, Bosque Sendra *et al.*, 2000), se considera que el riesgo ante un peligro (natural o de origen humano) se puede medir mejor considerándolo compuesto de dos elementos: la exposición al peligro, lo que a veces se denomina peligrosidad natural, y la vulnerabilidad del territorio ante un peligro. Vamos a precisar cada uno de estos conceptos.

La *exposición* sería la probabilidad de que un suceso potencialmente dañino ocurra en un lugar y dentro de un periodo de tiempo definido.

Por lo tanto, su determinación requiere realizar dos tipos de operaciones, por un lado establecer la exposición territorial al peligro, es decir, qué zonas se verán más afectadas y cuales lo serán menos, y por otra parte, cuantas veces puede ocurrir un fenómeno dañino dentro de un periodo de tiempo determinado, por ejemplo un año.

Evidentemente ambos datos son muy específicos y diferentes para cada fuente de peligro. Las zonas expuestas a una inundación no suelen coincidir con las que pueden sufrir un terremoto, etc. Por lo tanto, como se verá más adelante, para cada una de las amenazas estudiadas en este trabajo se ha utilizado un procedimiento diferente para establecer las zonas expuestas y el nivel de la gravedad de esa exposición.

De manera muy general, podemos considerar que la localización (distancia y posición espacial) respecto al foco de ese hecho dañino es el mayor determinante de la exposición. Por supuesto también depende del alcance y propiedades dañinas de la posible catástrofe y de las condiciones del medio físico para propagar sus efectos.

Igualmente la determinación del periodo de retorno, es decir de la probabilidad de que ocurra un hecho dañino en un intervalo temporal, también es muy específico de cada peligro, y su cálculo se suele basar en el estudio de los fenómenos peligrosos ocurridos a lo largo de la historia pasada para, en función de ello, establecer una probabilidad de ocurrencia. En este trabajo este aspecto no se ha tratado en profundidad.

En resumen, para elaborar los mapas de riesgos finales vamos a establecer las zonas de Honduras expuestas a la acción de diversos fenómenos peligrosos, diferenciando así zonas más o menos libres de amenazas y otras con más posibilidades de ser afectadas por los daños.

La *vulnerabilidad* del territorio a los riesgos, la podemos definir como: «susceptibilidad de la vida, propiedades y medio ambiente para ser dañados en caso de catástrofe», o como «el nivel de resistencia a las pérdidas que un lugar tiene cuando es afectado por un fenómeno dañino».

Depende de la fragilidad tanto del medio natural, como de la población humana y de sus actividades. Normalmente supone la identificación de grupos humanos y usos del suelo sensibles.

Por lo tanto, la vulnerabilidad territorial hace referencia al potencial de una población para experimentar graves daños en caso de accidente y está relacionada con aspectos como el estándar de vida, salud y nivel cultural o con la existencia de sistemas de protección civil; hay grupos de población especialmente vulnerables (ancianos y niños, enfermos, sectores marginales) como lo son también ciertos usos del suelo o actividades (hospitales, escuelas, determinados cultivos).

El *riesgo* es el resultado de la conjunción de exposiciones y vulnerabilidades. Una vez definidos los mapas de exposición al riesgo y vulnerabilidad territorial podemos, combinándolos, obtener el mapa síntesis de riesgo, que es considerado, por lo tanto, como una consecuencia de la interacción de exposición y vulnerabilidad. El mapa de riesgos, por lo tanto, será el resultado de cruzar y combinar los mapas de exposición y vulnerabilidad.

De esta manera, el mapa de riesgo muestra una valoración global de las consecuencias de un fenómeno dañino en cada uno de los lugares analizados, en función de las posibles pérdidas de vidas humanas, heridos, propiedades dañadas, o alteración de las actividades económicas derivada de la acción del fenómeno citado.

### 3. La medición de la exposición y de la vulnerabilidad a los peligros

Los elementos incorporados en el apartado de amenazas de nuestro modelo de riesgos se han reducido a dos debido básicamente a la disponibilidad de los datos que se pudieron reunir: las inundaciones debidas a desbordamiento de ríos y cauces fluviales, y los deslizamientos de laderas.

#### a) Exposición a inundaciones derivadas de los ríos y cauces fluviales

El objetivo prioritario de este mapa es localizar aquellas zonas del país que tienen una posibilidad elevada de sufrir inundaciones. Las inundaciones generalmente están ligadas directamente a uno o varios de los siguientes procesos genéticos: a) Desbordamientos naturales del agua de los cauces durante momentos de precipitaciones muy intensas, debido a que el caudal de agua fluyente supera a la capacidad natural del cauce. b) Encharcamientos en zonas llanas, mal drenadas y en sustrato impermeable. c) Obras públicas, como carreteras, ferrocarriles, canales de riesgo y edificaciones, que reducen el caudal máximo que es capaz de evacuar un cauce sin desbordar, o bien que reducen la capacidad drenante de las llanuras de inundación en momentos críticos. d) Deslizamientos de laderas que desciendan hasta ocupar total o parcialmente la zona aluvial, actuando a modo de embalse. e) Zonas de desembocadura de ríos cuyo desagüe se dificulta por las fuertes mareas.

En este estudio se ha considerado que para conseguir el objetivo propuesto, de acuerdo con la escala cartográfica requerida y a la vista de la escasez de información, no era recomendable abordar los cuatro últimos aspectos. En consecuencia el estudio se centró en intentar caracterizar zonas inundables por desbordamientos fluviales naturales. Dichos desbordamientos están ligados a las llanuras de inundación de los ríos.

El método utilizado se ha basado en el mapa geológico de Honduras (IGN, 1991), el mapa topográfico (IGN, 1994) y el de pendientes (generado a partir de un modelo digital del terreno con un pixel de 50 m, la resolución de todos los mapas utilizados en este trabajo). Se han considerado únicamente las tres categorías siguientes: zonas de alta susceptibilidad a la inundación, zonas de susceptibilidad moderada a la inundación, y zonas no inundables (Martín Loeches *et al.*, 2002).

Los criterios utilizados para definir qué parte del territorio de Honduras se incluye en cada una de estas categorías son los siguientes:

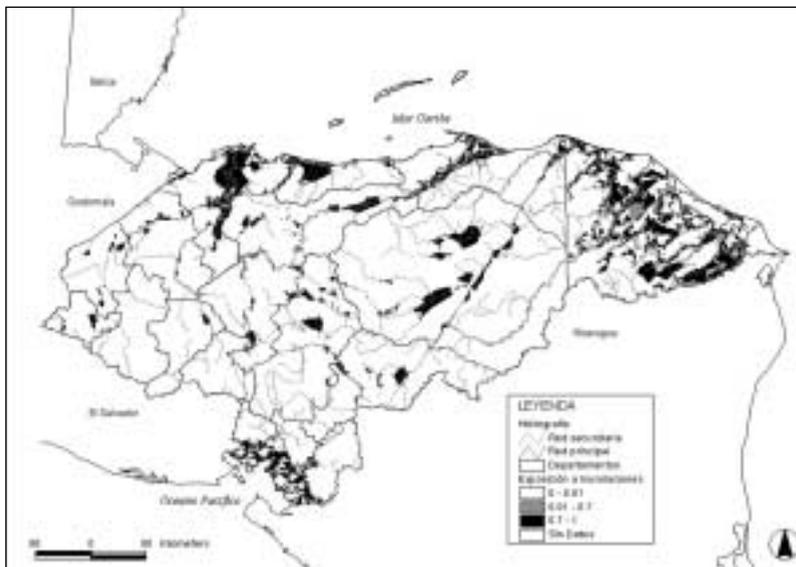
- Zonas de alta susceptibilidad a la inundación: son aquellas zonas cartografiadas (en el mapa geológico) como cuaternario aluvial, con pendientes inferiores o iguales al 2% y situadas hasta 3 m de altura por encima del cauce de los ríos.
- Zonas de susceptibilidad moderada a la inundación: son aquellas zonas cartografiadas como cuaternario aluvial, con pendientes inferiores o iguales al 2% y situadas entre 3 y 10 m de altura por encima del cauce de los ríos.
- Zonas no inundables: el resto de zonas que no cumplen las condiciones anteriores.

De este modo se obtiene un mapa que muestra la diferente situación de cada zona de Honduras respecto a la exposición a inundaciones. Este mapa y los siguientes mencionados en este texto se

han obtenido mediante la utilización del programa IDRISI, evidentemente los mapas iniciales han sido convertidos u obtenidos en formato digital mediante diversos procesos.

Es importante recordar que nuestro objetivo final, como ya se ha mencionado, es combinar éste y otros mapas para obtener la cartografía del riesgo; para llevar a cabo esta combinación de mapas es necesario que todos ellos se encuentren expresados dentro de un mismo intervalo de valores, por ello el mapa obtenido se ha convertido a una escala que varía entre 0 y 1, el cero indica el valor mínimo de exposición a las inundaciones y el 1 el máximo. Esta normalización al intervalo  $[0,1]$  se realiza utilizando funciones borrosas (orden FUZZY) disponibles en IDRISI. Es necesario indicar que el riesgo es directamente proporcional a la exposición, es decir que, valores cercanos a cero de exposición señalan, si el resto de los factores se mantienen constantes, valores bajos de riesgo.

Un último aspecto importante de este mapa, y de los tres siguientes, es el grado de incertidumbre que podemos suponer afectan a los valores cartografiados en él. Es decir, tenemos que admitir que, ya sea por los posibles errores de los mapas fuente usados para construir este mapa de exposición, ya sea por las casi seguras insuficiencias del procedimiento empleado para su construcción, este mapa contiene un cierto nivel de incertidumbre que es importante establecer ya que será empleado para matizar y precisar el mapa de riesgos que vamos a obtener. En este caso particular la incertidumbre se ha estimado en un valor del 20%, basado en los cálculos de los autores del mapa en relación al grado de conocimiento existente en los datos de partida. Este grado de conocimiento será formalizado más adelante y se conocerá con el nombre de credibilidad.



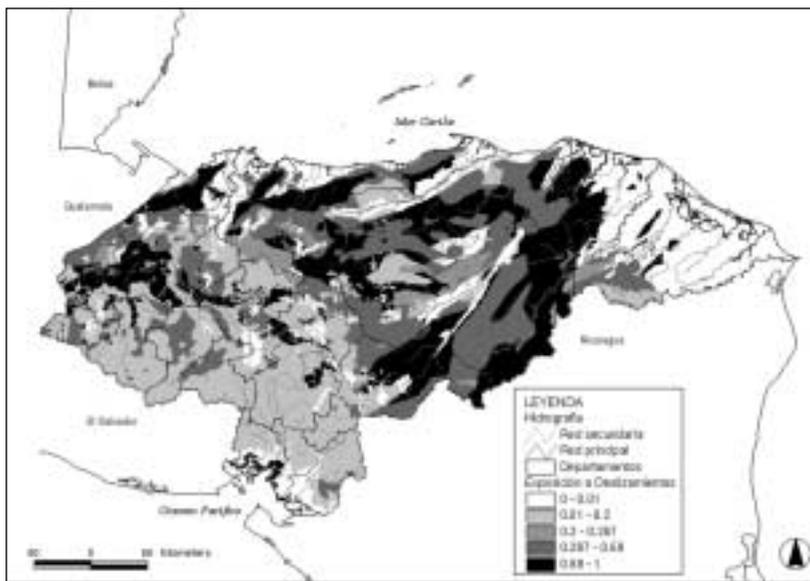
**Figura 1.** Mapa de exposición a las inundaciones provocadas por desbordamientos fluviales naturales. La incertidumbre del mapa es del 20%. Los valores están escalados del 0 al 1, de forma que valores próximos a 1 indican una alta susceptibilidad a sufrir inundaciones.

Como se puede apreciar en el mapa de inundaciones final (Fig. 1.) las zonas que de forma masiva presentan algún grado de susceptibilidad a la inundación son los grandes valles, destacando la costa atlántica con las zonas de San Pedro Sula y Colón, y la costa del Pacífico con los departamentos de Choluteca y Valle, así como el departamento de Gracias a Dios, uno de los de mayor susceptibilidad a este fenómeno.

b) *Exposición a deslizamientos de laderas*

El mapa de susceptibilidad del terreno por deslizamientos y movimientos de laderas de Honduras a escala 1/500.000 fue realizado según el Convenio de la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) con el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) para asistencia técnica al Fondo Hondureño de Inversión Social (FHIS), un año después del paso del huracán Mitch, cuando estaba aún en vigor el Decreto de Emergencia declarado tras este desastre de devastadoras consecuencias que sumió a Honduras en un arduo proceso de reconstrucción (Hernández *et al.*, 2000) y ha sido utilizado en el proyecto cedido amablemente por sus autores.

La figura 2 muestra este mapa. Como en el caso anterior se ha convertido a la escala entre 0 y 1, para que pueda ser utilizado correctamente con los restantes. La incertidumbre asociada a este mapa se estima en un 40%, por razones semejantes al caso anterior.



**Figura 2.** Mapa de exposición a los deslizamientos de ladera. La incertidumbre del mapa es del 40%. Los valores están escalados del 0 al 1, de forma que valores próximos a 1 indican una alta susceptibilidad a sufrir deslizamientos de ladera.

Las zonas más expuestas a los deslizamientos se concentran fundamentalmente en la zona centro y oriental del país, a excepción del departamento de Gracias a Dios, el de más baja densidad poblacional y mayor superficie de selva virgen del país, aunque también están catalogadas como de riesgo muy alto o alto los departamentos de Copán y Santa Bárbara de la costa occidental. Por el contrario, son las zonas del sur del país las menos expuestas a los deslizamientos de ladera, son tierras bajas que forman una llanura a lo largo de la costa del Pacífico; así como los grandes valles del norte, el Valle del Sula o el Valle del río Aguán o el departamento de Gracias a Dios en el noreste, zona conocida comúnmente como la Mosquitia.

c) *La vulnerabilidad de la población*

Como ya hemos indicado, la vulnerabilidad está relacionada con el efecto de las distintas catástrofes (es importante destacar que no sólo naturales, si bien estas son las más importantes en los análisis de la vulnerabilidad y las únicas consideradas en este caso) sobre la población afectada. El punto clave es la intuición de que determinadas características socioeconómicas pueden influir en la capacidad de asimilación por las poblaciones de los distintos desastres. Por ejemplo, un determinado desastre tendrá (en términos relativos) mayor impacto humano en zonas pobladas que en aquellas sin habitantes.

En el caso de Honduras hemos podido determinar la existencia de dos tipos de departamentos administrativos, aquellos que sufrieron graves daños durante el huracán Mitch y aquellos otros que salieron mejor librados de esta terrible catástrofe (Ahamdanech et al., 2002). El siguiente paso en el análisis fue tratar de delimitar las características socio-económicas que hacen que un departamento esté en un determinado grupo o en el otro. El modelo teórico que se formuló en el mencionado trabajo fue el siguiente:

$$V = F(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \quad (1)$$

Donde:

$X_1$  = Tasa de alfabetización (porcentaje de población alfabetizada).

$X_2$  = Tasa de desnutrición (porcentaje de población desnutrida).

$X_3$  = Densidad de carreteras por km<sup>2</sup>.

$X_4$  = Características de la vivienda (ladrillo, adobe,...).

$X_5$  = Población de riesgo (porcentaje de niños y ancianos).

(Todas estas variables miden situaciones previas al paso del huracán por la zona).

Y, evidentemente, V toma los valores 1 y 2, es decir, vulnerabilidad alta (sufre graves daños por la acción del Mitch) y vulnerabilidad baja (no sufre daños importantes).

Por desgracia, las estadísticas disponibles sobre Honduras no nos permitieron usar esta ecuación, diversas variables no se podían medir en los distintos departamentos, por lo que, finalmente, el modelo quedó así:

$$V = F(X_1, X_2) \quad (2)$$

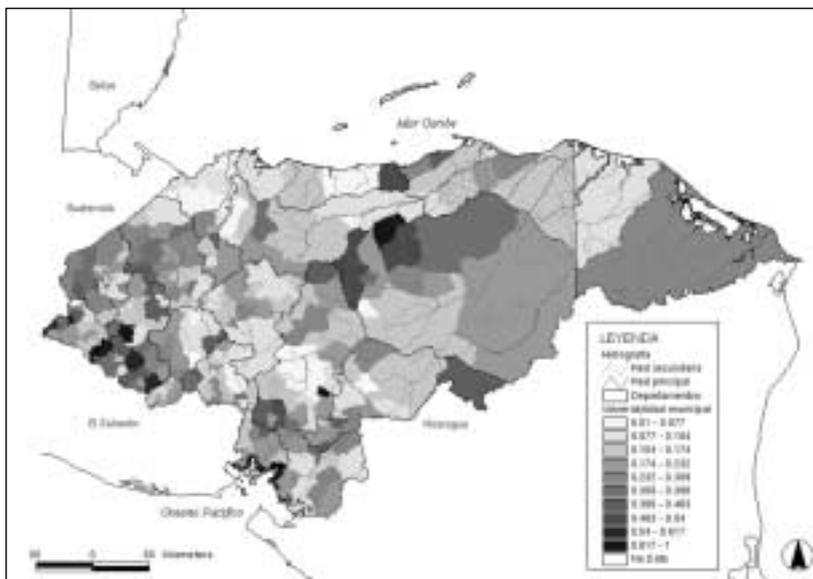
Donde las dos variables explicativas son, como hemos visto más arriba, la tasa de alfabetización ( $X_1$ ) y la tasa de desnutrición ( $X_2$ ).

Esta formulación permite, empleando el análisis discriminante (Uriel, 1995), predecir qué departamentos de Honduras presentaron alta vulnerabilidad, y cuales la tenían baja, durante el periodo del huracán Mitch. Para ello se determinaron las siguientes funciones de clasificación:

$$\begin{aligned} V. ALTA &= 1.843 * X_2 + 2.630 * X_1 - 123.553 \\ V. BAJA &= 1.909 * X_2 + 2.835 * X_1 - 139.627 \end{aligned} \quad (3)$$

Se pudo comprobar que la clasificación, realizada con estas ecuaciones, es coherente con los datos observados de vulnerabilidad en cada departamento, de modo que se concluye que, al menos en parte, la vulnerabilidad de cada departamento, antes del huracán Mitch, se puede medir usando las dos variables explicativas mencionadas.

Pero, una vez comprobada su validez para explicar lo que ocurrió en el año 1998, igualmente se pueden usar estas mismas ecuaciones para predecir el grado de vulnerabilidad territorial de cada departamento, si conocemos sus datos de tasa de desnutrición y tasa de alfabetización en fechas más recientes, por ejemplo el año 2000. Esto es lo que se representa en el mapa adjunto, expresado como los anteriores en una escala numérica entre 0 y 1, ver figura 3. En este caso la incertidumbre del mapa de vulnerabilidad se estima en un 30%.



**Figura 3.** Mapa de vulnerabilidad de la población a escala municipal. La incertidumbre del mapa es del 30%. Los valores están escalados del 0 al 1, de forma que valores próximos a 1 indican una alta vulnerabilidad.

Con el procedimiento explicado arriba se ha medido lo que podemos denominar la vulnerabilidad intrínseca de cada departamento, ligada a la mayor o menor capacidad de evitar los daños causados por una amenaza, no obstante, es evidente, que el impacto de un problema de cualquier tipo es más probable que genere daños mayores en los lugares donde la densidad/cantidad de personas es mayor, por ello un segundo componente que permite matizar la vulnerabilidad de un lugar es el tamaño de la población residente. En nuestro caso se utilizó la población existente en cada departamento de Honduras; así se generó un cuarto mapa (no mostrado en este artículo) que, como siempre, estaba expresado en una escala numérica entre 0 y 1 y cuya incertidumbre se consideró de un 10%.

En resumen, disponemos de cuatro mapas que miden la distribución espacial de los componentes del riesgo (exposición a inundaciones, exposición a deslizamientos, vulnerabilidad intrínseca y población), todos estos componentes se han expresado en variables normalizadas al intervalo  $[0,1]$ , donde siempre los valores próximos a cero indican una cifra reducida de riesgo y los cercanos a 1 lo contrario. La cuestión ahora es cómo combinarlos para generar un mapa sintético de riesgos.

#### 4. La construcción de mapas de riesgos

El *riesgo* se obtiene de relacionar la *amenaza*, o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de una intensidad específica, con la *vulnerabilidad* de los elementos expuestos; como consecuencia de esto, cambios en uno o más de estos parámetros modifican el riesgo. En el caso concreto de Honduras el riesgo analizado es de carácter geológico e hidrológico, por la naturaleza de las amenazas a las cuales está referido, deslaves e inundaciones respectivamente.

Esquemáticamente hablando, el riesgo se podría representar por tanto como la siguiente ecuación:

$$R = A * V \tag{4}$$

siendo R el riesgo, A la/s amenaza/s presentes en cada territorio y V los diferentes factores de vulnerabilidad.

Un problema metodológico importante es cómo combinar los datos procedentes de los mapas de amenazas con los que se obtienen del mapa de vulnerabilidad. Existen diversidad de procedimientos (ver Bosque Sendra *et al.*, 2000 para la descripción de uno de los posibles), y cada uno de ellos proporciona un resultado diferente. Resulta, por lo tanto, importante encontrar una manera de combinar los datos que sea lo más eficaz posible (en el sentido de utilizar bien todas las informaciones disponibles) y lo más adaptado a la forma de razonar de los usuarios de estos temas. En este sentido se dirigen los procedimientos planteados a continuación.

Existen numerosas combinaciones posibles de los cuatro mapas básicos, de entre ellas se ha considerado oportuno obtener las cinco siguientes:

1. Combinación de las cuatro capas, : lo que podemos denominar riesgo total:  
(Inundaciones + deslizamientos + vulnerabilidad + población)
2. Exposición a amenazas (Inundaciones + deslizamientos)
3. Riesgos de inundaciones (Inundaciones + vulnerabilidad + población)
4. Riesgo de deslizamientos (Deslizamientos + vulnerabilidad + población)
5. Riesgo puro (Inundaciones + deslizamientos + vulnerabilidad)

De entre todos los procedimientos posibles de combinación se ha utilizado un método basado en la denominada teoría de la evidencia de Dempster-Shafer.

#### a) *La Teoría de la Evidencia*

La Teoría de la Evidencia (TE) es una generalización de la teoría bayesiana. Fue desarrollada por Dempster (Dempster, 1968) y Shafer (Shafer, 1976), y, por eso, también se conoce por el nombre de teoría de Dempster-Shafer. Con esta teoría se pretende modelizar la forma con que los humanos asignan evidencia a distintas proposiciones. A su vez la TE se puede considerar un caso particular de la teoría borrosa (Yen, 1990). En la década de los sesenta, con el advenimiento de la capacidad computacional de los ordenadores, se vio la necesidad de crear teorías para modelizar el pensamiento humano. La lógica y las matemáticas clásicas presentaban unos modelos muy rígidos para un nuevo fenómeno de interés científico: la incertidumbre con que se desarrolla toda actividad humana. Zadeh (1965) es el primero que plantea y desarrolla la teoría de los conjuntos borrosos. En las casi cuatro décadas transcurridas desde entonces el número de publicaciones relativas al campo de los conjuntos borrosos y sus derivados ha experimentado un crecimiento exponencial. Se puede decir que los desarrollos teóricos han ido por detrás de las aplicaciones. Es en las aplicaciones donde han tenido su mejor aval, multitud de ramas de la ingeniería se sirven de las técnicas borrosas o que tratan con la incertidumbre, y en concreto de la TE.

En la TE es útil distinguir entre hipótesis y proposición. Una hipótesis es una afirmación sobre la veracidad de una sentencia; así por ejemplo, se dice:

hipótesis 1= el pixel con coordenadas de imagen (x,y) pertenece a una cubierta vegetación  
hipótesis 2= el pixel con coordenadas de imagen (x,y) pertenece a una cubierta asfalto.

Una proposición puede ser una hipótesis o una combinación de hipótesis, así las dos hipótesis del ejemplo anterior serían proposiciones. Además también serían proposiciones las siguientes:

P<sub>1</sub>= hipótesis 1;

P<sub>2</sub>= hipótesis 2;

P<sub>3</sub>= el pixel con coordenadas de imagen (x,y) pertenece a una cubierta vegetación o a una de asfalto.

$P_4$  = el pixel con coordenadas de imagen (x,y) pertenece a una cubierta vegetación y a una de asfalto (puede que el pixel tenga parte de ambas).

En este sentido, considérese el conjunto de proposiciones exhaustivas de un experimento. Por ejemplo, en el lanzamiento de un dado la observación del número que aparece en la cara superior comprende seis proposiciones elementales, que se corresponden a los sucesos elementales de la teoría de probabilidad.  $\Omega = \{1,2,3,4,5,6\}$

Además en la TE se tienen en cuenta las proposiciones del tipo sacar par = {2 ó 4 ó 6} y todas las compuestas. En total se tienen dos elevado a la n, y cada una debe tener una asignación de probabilidad o evidencia.

La TE viene a solucionar las dificultades que se tienen para poder fijar las probabilidades a priori o condicionales que exige la aplicación del teorema de Bayes.

Dado un conjunto universal  $\Omega$  finito, una *medida de credibilidad que llamaremos Bel (del término anglosajón Belief)* es una función de la forma:

$$Bel: \wp(\Omega) \rightarrow [0, 1] \tag{5}$$

siendo  $\wp(\Omega)$  el conjunto de subconjuntos de  $\Omega$ . La función *Bel* debe cumplir:

1.  $Bel(\emptyset) = 0, Bel(\Omega) = 1$
2.  $Bel(A_1 \cup \dots \cup A_n) \geq \sum_i Bel(A_i) - \sum_{j < k} Bel(A_j \cap A_k) + \dots + (-1)^{n+1} Bel(A_1 \cap \dots \cap A_n)$

$$\tag{6}$$

La expresión segunda (de la ecuación 6) también se conoce como condición de superaditividad. Si  $\Omega$  es infinito, entonces se requiere también que *Bel* sea continua. Es inmediato deducir que:

$$Bel(A) + Bel(\bar{A}) \leq 1 \tag{7}$$

Para cualquier conjunto,  $A \in \wp(U)$ ,  $Bel(A)$  se interpreta como el grado de credibilidad (basado en la evidencia disponible) de que un elemento dado de  $\Omega$  pertenezca al conjunto A o a cualquier subconjunto cuya intersección con A sea no vacía. Por tanto,

$$P(A) \geq Bel(A), \forall A \in \wp(\Omega) \tag{8}$$

Por otro lado, asociada a toda medida de credibilidad hay una medida de plausibilidad, *Pl*, definida por la ecuación:

$$Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) \tag{9}$$

Las medidas de credibilidad y plausibilidad se pueden caracterizar por la función siguiente:

$$\begin{aligned} \mu: \wp(\Omega) &\rightarrow [0, 1] \text{ tal que} \\ \mu(\emptyset) = 0 \text{ y } \sum_{A \in \wp(U)} \mu(A) &= 1 \end{aligned} \quad (10)$$

Esta función se denomina *asignación de probabilidad básica*. Dada una asignación básica  $m$ , los valores de credibilidad y plausibilidad se determinan de forma única:

$$Bel(A) = \sum_{B | (B \subseteq A)} \mu(B) \quad (11)$$

$$Pl(A) = \sum_{B | (A \cap B \neq \emptyset)} \mu(B) \quad (12)$$

Podemos decir que los valores de evidencia vienen dados por una cota inferior denominada plausibilidad (sería una medida de certeza optimista) y una cota superior denominada creencia o credibilidad (medida de certeza pesimista).

b) *Aplicación al caso del mapa de riesgos naturales en Honduras*

En nuestro caso los mapas ya mencionados: vulnerabilidad, inundación, deslizamientos y población proporcionan información diversa sobre el riesgo. Como se ha dicho más arriba, la TE nos ofrece la oportunidad de mezclar esa información de modo parecido a como lo haría la mente humana, así si se desea detectar zonas de alto riesgo y se dispone de los cuatro mapas antes mencionadas lo lógico es buscar las zonas que presentan alto valor en cada uno de los mapas. La existencia de diferentes mapas (todos ellos en formato raster de IDRISI), con un elevado número de píxeles cada uno, dificulta el análisis de la información mentalmente, presentándose un gran problema para la mezcla o fusión más adecuada de la información de los mapas. La TE es una teoría formal, con una base matemática bien establecida (Kohlas y Monney, 1995), que permite llevar a cabo la operación de fusión de la información. El mapa resultado, por ejemplo, permitirá observar la evidencia de riesgo para las distintas zonas.

En el caso de los datos de Honduras, vamos a considerar sólo dos clases, dos proposiciones: 1.- riesgo y 2.- no-riesgo. Notamos con  $\omega$  la clase riesgo de un pixel y con  $\overline{\omega}$  la clase no existe riesgo. También se considera la incertidumbre  $\theta$  inherente a la teoría de la evidencia, aquella será la causa de que no suceda como en la teoría de probabilidades donde, si la probabilidad de riesgo en un pixel viene dada, por ejemplo, por el valor 0.7, entonces 0.3 sería la probabilidad de no existir riesgo en la posición que representa el citado pixel. En el caso de la TE si el riesgo es de 0.7 y la incertidumbre es de 0.2, la evidencia de que no hay riesgo en la posición dada por el pixel será 0.1. El marco de discernimiento que nos ocupa  $\Theta$ , o conjunto universal, está formado sólo por  $\omega$ ,  $\overline{\omega}$  y  $\theta$ , esto es:

$$\Theta = \{\omega, \bar{\omega}, \theta\} \tag{13}$$

Para cada pixel los valores de evidencia para cada clase (riesgo, no-riesgo e incertidumbre) y para cada uno de los mapas (vulnerabilidad, deslizamiento, inundaciones y población) los notaremos por  $\mu_i$  ( $i=1..4$ )

$$(\mu_i(\omega), \mu_i(\bar{\omega}), \mu_i(\theta)) \tag{14}$$

Con la condición,  $\mu_i(\omega) + \mu_i(\bar{\omega}) + \mu_i(\theta) = 1, \forall i = 1..4$ .

Con los valores  $\mu_i(\omega), \mu_i(\bar{\omega})$  y  $\mu_i(\theta)$  para los cuatro mapas,  $i=1..4$ , se aplica la regla de combinación de evidencias de Dempster (Dempster, 1968) para cada pixel,

$$(\mu_i \otimes \mu_j)(A) = \frac{\sum_{B \cap C = A} \mu_i(B)\mu_j(C)}{\sum_{B \cap C \neq \emptyset} \mu_i(B)\mu_j(C)} \tag{15}$$

$A, B, C \in \Theta$

en el caso del problema de riesgo a amenazas naturales el marco de discernimiento es muy simple:  $\Theta = \{\omega, \bar{\omega}, \theta\}$ . Resulta intuitivo si se representan las evidencias gráficamente con el cuadrado unidad (ver figura 4).

	$\omega$	$\bar{\omega}$	$\theta$	$\mu_j$
$\omega$	$\omega$		$\omega$	
$\bar{\omega}$		$\bar{\omega}$	$\bar{\omega}$	
$\theta$	$\omega$	$\bar{\omega}$	$\theta$	
$\mu_i$				

**Figura 4.** Esquema representativo de la combinación de evidencias.

En un lado del cuadrado se representa un mapa  $\mu_i$ , donde se ponen los valores de las evidencias  $\omega, \bar{\omega}, \theta$ . En el otro lado se representa el otro mapa  $\mu_j$ . La combinación  $\mu_i \otimes \mu_j$ , para un

elemento del marco de discernimiento viene dado por la suma de las áreas de los rectángulos dentro del cuadrado de la figura que se han marcado con ese elemento.

Ya que la regla de combinación de evidencias de Dempster es asociativa se pueden mezclar las evidencias de los cuatro mapas de dos en dos.

$$\mu_f(\omega), \mu_f(\varpi) \text{ y } \mu_f(\theta), \text{ donde } \mu_f = \mu_1 \otimes \mu_2 \otimes \mu_3$$

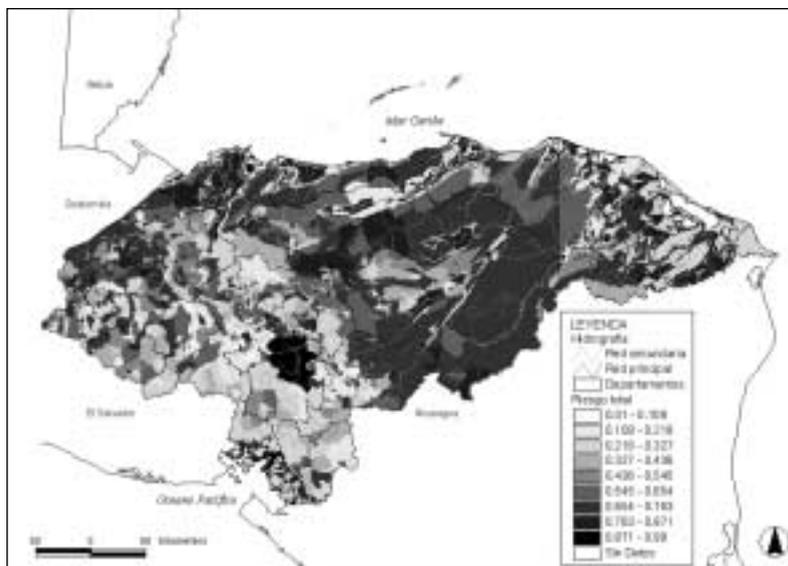
c) *Los mapas finales. Interpretación de los resultados*

Los mapas finales representan la credibilidad (Bel) para la clase riesgo, es decir, lo que se ha notado por  $\mu_f(\omega)$ . Como se ha considerado el modelo más sencillo, con el mínimo de proposiciones (riesgo, no-riesgo) la función Bel coincide con  $\mu$  ya que consta de un solo sumando en (10). Por la misma razón la medida de plausibilidad en este caso no aporta información adicional, ya que no existen proposiciones compuestas. Debido a las características de los datos de partida no tiene sentido complicar el modelo matemático, más cuando se obtienen resultados satisfactorios.

Como ya se ha explicado en el apartado anterior, los mapas finales de riesgo resultan de la combinación de los mapas de amenazas (inundaciones y deslizamientos en nuestro caso), y el mapa de vulnerabilidad. Todos ellos se han obtenido utilizando la función «BELIEF» del programa IDRISI.

Los mapas finales generados son los que se detallan a continuación:

\* Riesgo total: como combinación de los cuatro mapas de partida, inundaciones + deslizamientos + vulnerabilidad + población (Fig. 5).

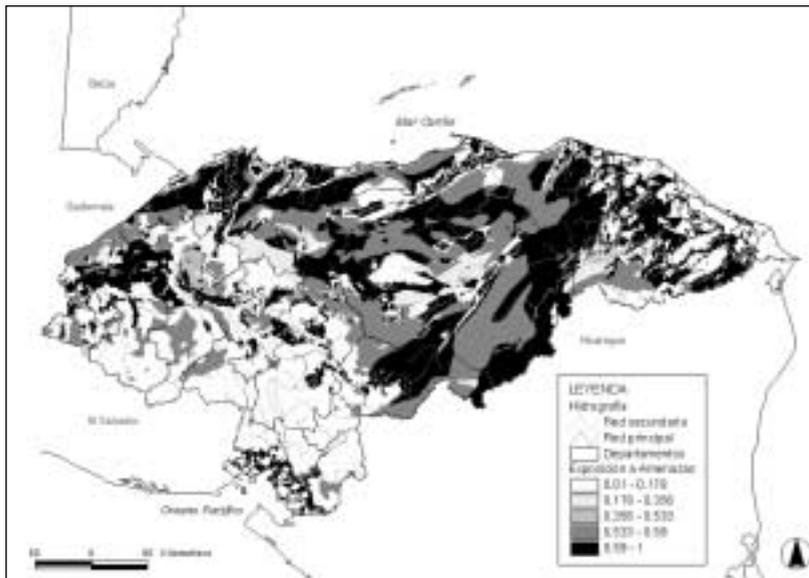


**Figura 5.** Mapa de riesgo total en Honduras. Los valores están escalados del 0 al 1, de forma que valores próximos a 1 indican un alto riesgo.

Al incluir a la población como variable a combinar, aquellas zonas correspondientes a los municipios de más población van a tener valores de riesgo alto (próximos a 1) en este mapa en vez de los valores de riesgo bajo o moderado del mapa de riesgo puro (Fig. 9), debido al peso que dicha población aporta en la combinación final de mapas, tal es el caso por ejemplo del Distrito Central donde se ubica la capital, Tegucigalpa.

Si analizamos este mapa (Fig. 5), observamos que existen unas zonas muy definidas correspondientes a riesgo alto que coinciden a grandes rasgos con lo que se ha venido llamando el «corredor de riesgos», es decir, zonas que históricamente siempre han recibido el peso principal del flagelo de los desastres (PNUD, 1999). Por otra parte, estas zonas de riesgo coinciden con lo que se conoce como el «corredor central de desarrollo», es decir, el eje que une el polo industrial de Puerto Cortés y San Pedro Sula en el norte con el Golfo de Fonseca en el sur, pasando por el Valle de Comayagua y el Distrito Central, donde se encuentra Tegucigalpa.

\* Exposición a amenazas combinadas: como combinación de inundaciones + deslizamientos (Fig. 6).

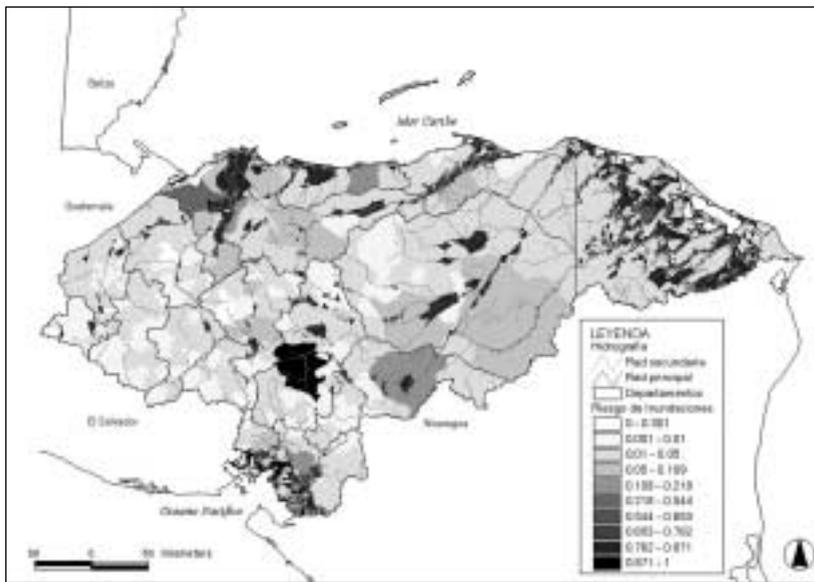


**Figura 6.** Mapa de exposición a amenazas combinadas en Honduras. Los valores están escalados del 0 al 1, de forma que valores próximos a 1 indican una alta exposición a inundaciones.

El mapa correspondiente a la exposición a amenazas combinadas muestra donde se produce riesgo de deslizamiento e inundaciones a la vez y solamente teniendo en cuenta esta información, es decir, no se tiene en cuenta ni la vulnerabilidad de la población ni el número total de habitantes en cada municipio, por tanto no es un mapa de riesgos propiamente dicho sino de exposición a las dos amenazas estudiadas en este trabajo.

Como ya hemos indicado, los fenómenos naturales, como huracanes y tormentas, no son un problema en sí mismos, sino que se vuelven tales por el hecho de que ciertas comunidades o grupos se ven obligados a establecerse en áreas susceptibles al impacto nocivo de fenómenos naturales (PNUD, 1999).

\* Riesgo de inundaciones: como combinación de inundaciones + vulnerabilidad + población (Fig. 7).

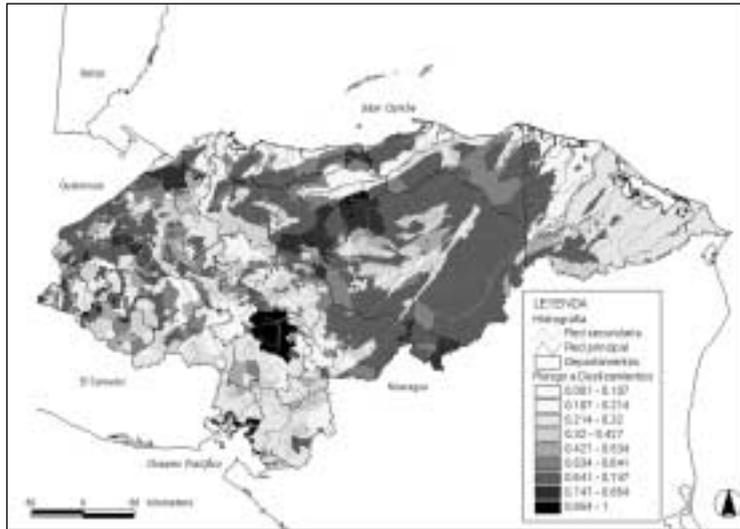


**Figura 7.** Mapa de riesgo de inundaciones en Honduras. Los valores están escalados del 0 al 1, de forma que valores próximos a 1 indican un alto riesgo a sufrir inundaciones.

Las zonas de riesgo alto coinciden a grandes rasgos con el mapa de exposición a las inundaciones mostrado anteriormente (Fig. 1), aunque aparecen como de riesgo alto nuevas zonas que corresponden a los municipios de mayor población o de elevada vulnerabilidad intrínseca.

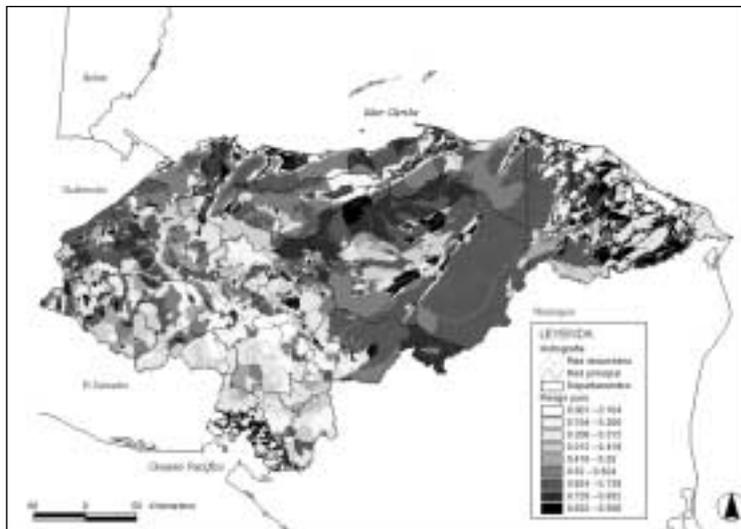
\* Riesgo de deslizamientos: como combinación de deslizamientos + vulnerabilidad + población (Fig. 8)

Es de destacar que en este mapa, al haberse incluido los datos de población como variable a combinar, las zonas correspondientes a los municipios más poblados nuevamente se han catalogado como de riesgo alto (ej.: Distrito Central con Tegucigalpa, o San Pedro Sula).



**Figura 8.** Mapa de riesgo a deslizamientos de laderas en Honduras. Los valores están escalados del 0 al 1, de forma que valores próximos a 1 indican un alto riesgo.

\* Riesgo puro: como combinación de inundaciones + deslizamientos + vulnerabilidad (Fig. 9).



**Figura 9.** Mapa de riesgo puro en Honduras. Los valores están escalados del 0 al 1, de forma que valores próximos a 1 indican un alto riesgo.

En esta ocasión la población de cada municipio no se tiene en cuenta por lo que, a diferencia del mapa de riesgo total (Fig. 5), los municipios más poblados no cobran ya tanta importancia por lo que su riesgo aparece más reducido. Seguramente este mapa es el más realista y adecuado para ser tenido en cuenta en la Ordenación territorial.

## 5. Conclusiones

El procedimiento de Dempster-Shaeffer ha permitido generar mapas de riesgos que resultan fáciles de entender y que tienen en cuenta de la mejor manera posible los datos existentes sobre los factores del riesgo, incluyendo en este sentido las incertidumbres que afectan a estos datos.

Pensamos por ello que este procedimiento resulta de interés para la combinación de datos geográficos y no sólo en este caso particular. Las técnicas borrosas (fuzzy) se están utilizando con éxito en muchos campos científicos y técnicos para modelizar distintos fenómenos naturales, y tienen un gran potencial en el ámbito de los datos geográficos. El carácter propio de gran parte de la información geográfica, inseparable de un cierto grado de incertidumbre, junto a la necesidad de su computación por medios informáticos, se presta a una modelización de los problemas con técnicas borrosas. Los resultados de este trabajo muestran como cuando se quiere combinar información de distintas fuentes, a veces tan dispares como las aquí utilizadas, las técnicas borrosas (la TE como una más) se presentan como una importante opción a tener en cuenta.

El poder computacional de la combinación de información por técnicas borrosas reside en su flexibilidad en el tratamiento de datos de diversa índole. Se convierte en una herramienta para el análisis y toma de decisiones. Además de permitir de manera sencilla construir diversas formas de combinación de los datos iniciales, de manera que se pueden observar diferentes situaciones: riesgo total, riesgo de sufrir inundaciones, etc., como ya hemos visto.

En realidad, el procedimiento matemático empleado, no hace más que modelizar el sentido común que se aplicaría en la fusión de información de las distintas capas o fuentes, y que resume la fórmula (15). La gran cantidad de información (que viene dada por los pixeles de los mapas) exige un tratamiento informático que se apoya de manera natural en el modelo matemático descrito.

## 6. Referencias bibliográficas

AHAMDANECH ZARCO, I., J. BOSQUE SENDRA, y E. PÉREZ ASENSIO

2002 «Vulnerabilidad del territorio ante los riesgos naturales: una propuesta de medición en Honduras tras el paso del huracán Mitch» *Estudios geográficos* (en proceso de evaluación).

BOSQUE SENDRA, J., M. A. DÍAZ MUÑOZ, M. GÓMEZ DELGADO, A. E. RODRÍGUEZ DURÁN, V. RODRÍGUEZ ESPINOSA  
2000 «Sistemas de información geográfica y Cartografía de riesgos tecnológicos. El caso de las instalaciones para la gestión de residuos en Madrid». en *Industria y medio ambiente* Publicaciones de la Universidad de Alicante, Alicante, 2000. pp. 315-326.

DEMPSTER, A. P. A

1968 «Generalization of Bayesian Inference». *J. Royal Statistical Soc.*, 1968, vol 30, pp.205-247.

- HERNÁNDEZ, M., M. FERRER y L. GONZÁLEZ DE VALLEJO  
 2000 «Mapa de susceptibilidad del terreno por deslizamientos de Honduras. Escala 1:500.000», en *Mitigación de desastres naturales en Centroamérica*. Madrid, ITGE y Ediciones AECI (Agencia Española de Cooperación Internacional).
- IGN  
 1991 Interamerican Geodetic Survey: *Mapa geológico de Honduras*, escala 1/500.000.  
 1994 *Mapa Oficial de la República de Honduras*, escala 1/500.000.
- JIMÉNEZ MORENO, J. y L. LAÍN HUERTA  
 2000 «Gestión de riesgos naturales mediante Sistemas de información geográfica en Centroamérica». En *Mitigación de desastres naturales en Centroamérica*. Madrid, ITGE y Ediciones AECI (Agencia Española de Cooperación Internacional).
- KOHLAS, J. y P. A. MONNEY  
 1995 *A Mathematical Theory of Hints: An Approach to the Dempster-Shafer Theory of Evidence*. Springer, Berlin.
- LAÍN HUERTA, L (editor)  
 2000 *Mitigación de desastres naturales en Centroamérica*. Madrid, ITGE y Ediciones AECI (Agencia Española de Cooperación Internacional).
- LOWRY, J. H., H. J. MILLER y G. F. HEPNER  
 1995 «A GIS-based sensitivity analysis of community vulnerability to hazardous contaminants on the Mexico/US border» en *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, n.º 11, pp. 1347-1359.
- MARTÍN LOECHES, M., J. TEMIÑO VELA, J. BOSQUE SENDRA y E. PÉREZ ASENSIO  
 2002 «La reducción de la vulnerabilidad por la Cruz Roja española en Honduras. El caso de la exposición al riesgo de inundación y erosión potencial». En *II Jornadas sobre Sistemas de Información geográfica en riesgos geológicos y medio ambiente*, Madrid, 14-15 de noviembre de 2002. Instituto Geológico y Minero de España.
- PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO  
 1999 *Informe sobre Desarrollo Humano. Honduras: 1999*. PNUD. Tegucigalpa, PNUD.
- SHAFFER, G. A  
 1976 *Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- URIEL JIMÉNEZ, E.  
 1995 *Análisis de datos: Series temporales y Análisis Multivariante*, Madrid, Editorial AC.
- YEN, J.  
 1990 «Generalizing the Dempster-Shafer theory to fuzzy sets» *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 20(3), pp. 559-570.
- ZADEH, L. A.  
 1965 «Fuzzy sets». *Information and Control* 8(3), pp. 338-353.