

EVALUACION DEL RIESGO SISMICO: UN MODELO BASADO EN LA TEORIA DE CONJUNTOS DIFUSOS



M.L. Carreño^{1,2}, O.D. Cardona³ y A.H. Barbat^{1,2}

¹Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE),
liliana@cimne.upc.edu

²Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

³Instituto de Estudios Ambientales (IDEA), Universidad Nacional de Colombia
(campus Manizales), odcardonaa@unal.edu.co

RESUMEN

El riesgo se define, a efectos de gestión, como las posibles consecuencias económicas, sociales y ambientales que pueden ocurrir en un período determinado de tiempo debidas a fenómenos peligrosos. El riesgo requiere una evaluación multidisciplinaria que tenga en cuenta no sólo el daño físico esperado, sino también las condiciones relativas a la fragilidad social y falta de resiliencia, que favorecen a los efectos de segundo orden cuando un fenómeno natural afecta a un centro urbano. El método propuesto de evaluación del riesgo urbano utiliza la teoría de conjuntos difusos para manejar conceptos cualitativos y variables que intervienen en la evaluación.

Palabras clave: enfoque holístico, evaluación del riesgo sísmico, vulnerabilidad socio-económica, conjuntos difusos.

SUMMARY

Risk is defined, for management purposes, as the potential economic, social and environmental consequences of hazardous events that may occur in a specified period of time. The risk requires a multidisciplinary evaluation that takes into account not only the expected physical damage but also the conditions related to social fragility and lack of resilience conditions, which favour the second order effects when a hazard event strikes an urban centre. The proposed method of urban risk evaluation uses the fuzzy sets theory in order to manage qualitative concepts and variables involved in the evaluation.

Keywords: holistic approach, seismic risk evaluation, socio-economic vulnerability, fuzzy sets.

Introducción

En el pasado, el concepto de riesgo se ha definido de una manera fragmentada, de acuerdo a la disciplina científica que lo valora. Desde una perspectiva holística, el riesgo requiere una evaluación multidisciplinaria que tenga en cuenta no sólo el daño físico esperado, el número de víctimas o pérdidas económicas, sino también las condiciones relacionadas con la fragilidad social y falta de resiliencia, que favorecen a los efectos de segundo orden cuando un evento peligroso, como un terremoto, ocurre (Cardona y Hurtado 2000; Carreño et al 2007).

Cardona (2001) desarrolló un marco conceptual y un modelo para el análisis de riesgo sísmico de una ciudad desde una perspectiva holística, que describe el riesgo sísmico por medio de índices. Posteriormente, Carreño (2006), desarrolló un método alternativo para la

evaluación del riesgo urbano, a partir de Cardona (2001) y de Barbat y Cardona (2003).

La Figura 1 presenta el marco conceptual del enfoque holístico para la evaluación del riesgo. Desde esta perspectiva, el riesgo es función de la vulnerabilidad física-o el potencial daño físico-y un conjunto de factores de vulnerabilidad ε_i . que conforman las condiciones de vulnerabilidad del contexto (fragilidad social y falta de resiliencia). La gestión del riesgo requiere una estructura institucional, y políticas públicas, para implementar acciones sobre los factores de vulnerabilidad ε_i para reducir el riesgo.

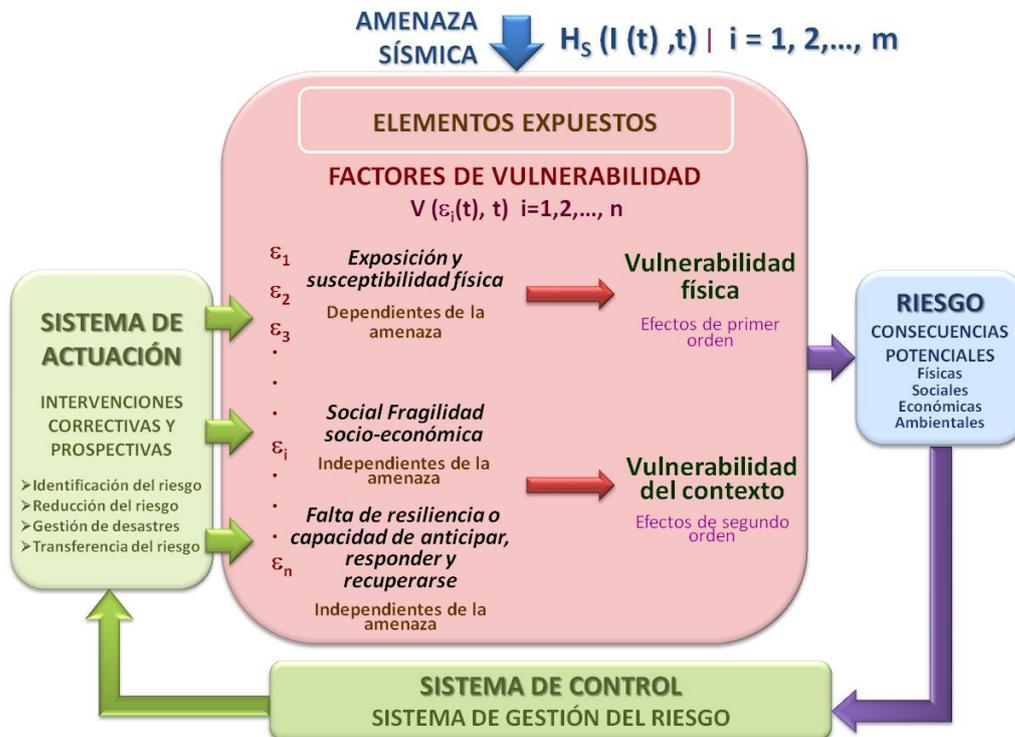


Figura 1. Marco conceptual de un enfoque holístico para la evaluación y gestión del riesgo sísmico. I es la intensidad del evento, V es la vulnerabilidad, y ε_i son los factores de vulnerabilidad. (Adaptado de: Cardona y Barbat 2000; Barbat y Cardona 2003; Carreño 2006)

Evaluación holística del riesgo basado en indicadores

En la evaluación holística del riesgo basada en índices se obtiene un índice de riesgo total afectando el riesgo físico por medio de condiciones de vulnerabilidad del contexto. Este enfoque contribuye a la gestión del riesgo, invita a la acción mediante la identificación de los puntos débiles del centro urbano. La fragilidad socio-económica y la falta de resiliencia son descritas por un conjunto de indicadores que agravan el riesgo físico. El riesgo total se expresa como sigue:

$$R_T = R_F(1 + F) \quad [1]$$

ecuación conocida como la ecuación de Monchos, donde R_T es el índice de riesgo total, R_F es el índice de riesgo físico y F es el coeficiente de agravamiento. Este coeficiente depende de la suma ponderada de un conjunto de factores agravantes asociados a la fragilidad socio-económica, F_{FSi} y la falta de resiliencia, F_{FRj} .

$$F = \sum_{i=1}^m w_{FSi} F_{FSi} + \sum_{j=1}^m w_{FRj} F_{FRj} \quad [2]$$

donde w_{FSi} y w_{FRj} son los pesos de cada uno de los factores i y j y m y n son el número total de descriptores para la fragilidad social y falta de resiliencia, respectivamente. Los factores agravantes F_{FSi} y F_{FRj} se calculan utilizando funciones de transformación.

Los descriptores utilizados tienen distintas unidades, las funciones de transformación estandarizan su valor bruto, transformándolos en factores conmensurables. La Figura 2 presenta el modelo de las funciones de transformación usadas. Son funciones de pertenencia de alto nivel de riesgo y de alto nivel de agravamiento. En la Figura 2, el eje x presenta los valores de los descriptores, mientras que el valor del factor correspondiente (de riesgo físico o agravamiento) está en el eje y , teniendo valores entre 0 y 1. Los valores límite, X_{min} y X_{max} , se definen teniendo en cuenta la opinión de expertos e información sobre desastres pasados. En el caso de los descriptores de la falta de resiliencia, la función tiene forma inversa, el mayor valor del indicador da menor valor de agravación. Los pesos w_{FSi} y w_{FRj} representan la importancia relativa de cada factor y se calculan por medio del Proceso Analítico Jerárquico (Saaty 1980; Carreño 2006; Carreño et al 2007).

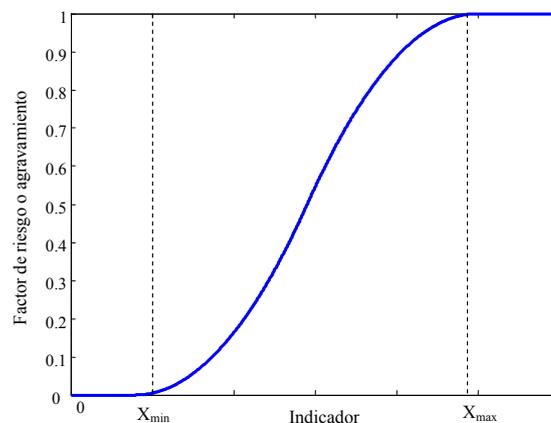


Figura 2. Modelo para las funciones de transformación

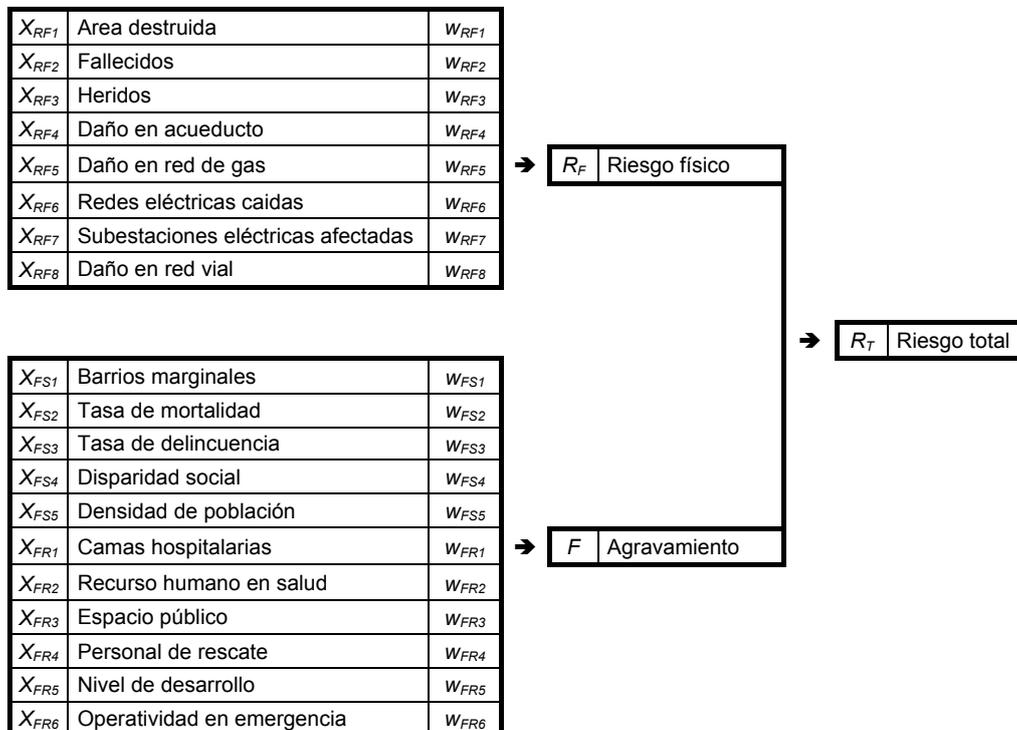


Figura 3. Descriptores de riesgo físico, fragilidad social y falta de resiliencia y sus pesos

El riesgo físico, R_F , es evaluado de la misma forma utilizando la siguiente ecuación:

$$R_F = \sum_{k=1}^p w_{RFk} F_{RFk} \quad [3]$$

La Figura 3 muestra el proceso de cálculo del índice de Riesgo Total, comenzando por los descriptores de riesgo físico, X_{RFk} , y los descriptores del agravamiento, X_{FSi} y X_{FRj} , utilizando los pesos w_{RFk} , w_{FSi} , w_{FRj} . Estos descriptores fueron seleccionados como los más significativos para cada categoría, sin embargo estos pueden cambiarse por otros de acuerdo con la disponibilidad de información para cada caso de estudio. La robustez de esta metodología ha sido estudiada por Marulanda et al (2009). Mayor información sobre esta metodología puede encontrarse en Carreño (2006).

Nueva evaluación holística difusa del riesgo sísmico

Este método alternativo utiliza conjuntos difusos en lugar de índices. El principal objetivo de este nuevo método es medir el riesgo sísmico desde una perspectiva integral que ayude a guiar el proceso de toma de decisiones identificando los factores de vulnerabilidad que deben ser reducidos o intervenidos pero basándose en la opinión de expertos cuando la información no está disponible o es incompleta. Las variables y pasos de la metodología son similares a las del método original (Figura 3): el daño físico potencial y el coeficiente de agravamiento obtenido de las condiciones sociales del contexto. Sin embargo, la diferencia de este método de evaluación radica en el uso de variables lingüísticas en el proceso de calificación de las variables de entrada (descriptores) que reflejan el riesgo físico y las condiciones agravantes. Usando calificaciones como *muy bajo*, *bajo*, *medio*, *alto* y *muy alto* los descriptores obtenidos de los escenarios de pérdidas y de información socio-económica y de resiliencia del centro urbano expuesto son evaluados para calcular el riesgo total en la ciudad.

Los pesos usados, como en el método original, son asignados teniendo en cuenta la opinión de expertos mediante la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (Saaty 1980).

La calificación para cada descriptor es obtenida por medio de conjuntos difusos (L_{RFi} o L_{Fi}). Funciones de pertenencia para los cinco niveles de riesgo físico y de agravamiento son definidas para cada descriptor con base en la opinión de expertos. La Figura 4a presenta las funciones de pertenencia para los niveles de riesgo físico predefinidos para el descriptor área destruida. Usando este tipo de funciones, un índice y una calificación de riesgo físico son obtenidos mediante la unión y defusificación, aplicando el método de centroide de área del grupo de descriptores

$$\mu_{RF}(X_{RFi}) = \max(w_{RF1} \mu_{LRF1}(L_{RF1}), \dots, w_{RFi} \mu_{LRFi}(L_{RFi})) \quad [4]$$

$$R_F = \left[\max(w_{RF1} \mu_{LRF1}(L_{RF1}), \dots, w_{RFi} \mu_{LRFi}(L_{RFi})) \right]_{centroid} \quad [5]$$

El coeficiente de agravamiento, F , es evaluado mediante un proceso similar

$$\mu_F(X_{FSi}, X_{FRi}) = \max(w_{FSi} \mu_{LFi}(L_{Fi}), \dots, w_{FRi} \mu_{LFi}(L_{Fi})) \quad [6]$$

$$F = \left[\max(w_{FSi} \mu_{LFi}(L_{Fi}), \dots, w_{FRi} \mu_{LFi}(L_{Fi})) \right]_{centroid} \quad [7]$$

Las figuras 4b y c presentan ejemplos de las funciones de pertenencia utilizadas para descriptores de fragilidad social y falta de resiliencia, que corresponden a los niveles de agravamiento por *tasa de mortalidad* y *camas hospitalarias*.

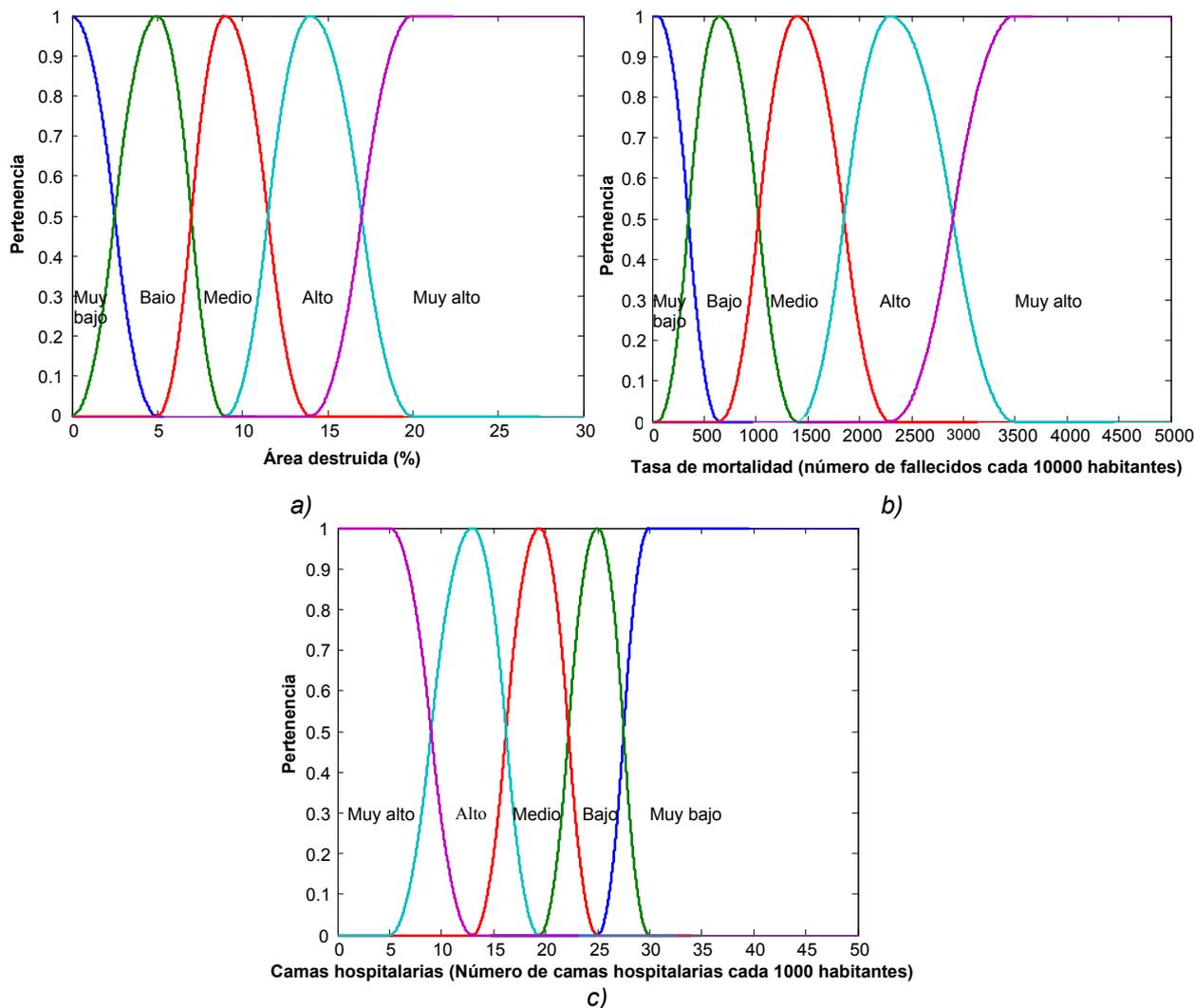


Figura 4. Funciones de pertenencia para: a) niveles de riesgo físico por *área destruida*; b) niveles de agravamiento por *tasa de mortalidad*; c) niveles de agravamiento por *camas hospitalarias*

Finalmente, el riesgo total es calculado aplicando una base de reglas difusas (Tabla 1) a las calificaciones de riesgo físico y agravamiento obtenidas, los niveles son identificados como: *bajo*, *medio-bajo*, *medio-alto*, *alto* y *muy alto*.

Tabla 1. Base de reglas difusas usadas para evaluar el riesgo total

<i>Agravamiento</i>	<i>Bajo</i>	<i>Medio-bajo</i>	<i>Medio-alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Muy alto</i>
<i>Riesgo físico</i>					
<i>Bajo</i>	Bajo	Bajo	Medio-bajo	Medio-bajo	Medio-bajo
<i>Medio-bajo</i>	Medio-bajo	Medio-bajo	Medio-alto	Medio-alto	Medio-alto
<i>Medio-alto</i>	Medio-alto	Medio-alto	Alto	Alto	Muy alto
<i>Alto</i>	Alto	Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
<i>Muy alto</i>	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto

Las figuras 5a y b presentan las funciones de pertenencia usadas para los niveles de riesgo y agravamiento.

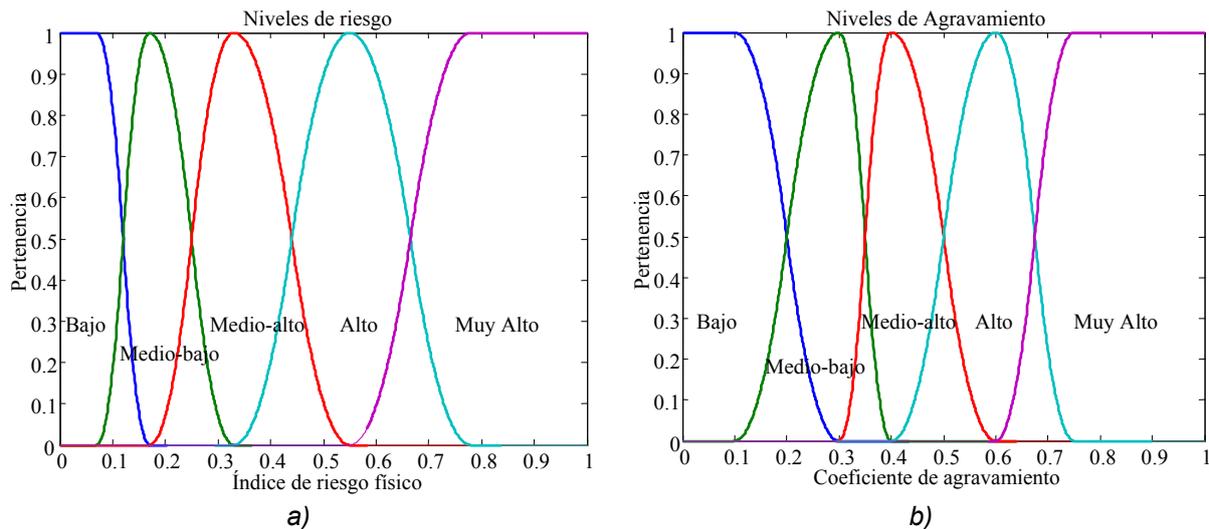


Figura 5. Funciones de pertenencia para: a) niveles de riesgo; b) niveles de agravamiento

Este método tiene la ventaja de que en caso de que la información no esté disponible o esté incompleta, las variables pueden ser reemplazadas por la opinión de expertos locales en la ciudad de estudio.

Caso de estudio: Riesgo sísmico para Barcelona, España

La ciudad está subdividida en 10 distritos y 248 zonas estadísticas pequeñas (ZRP). El riesgo físico se calculó con base en un escenario de riesgo probabilista obtenido en el marco del proyecto RISK-UE (ICC/CIMNE 2004; Barbat et al 2006, 2008, Lantada et al 2009) considerando las 248 ZRP. El agravamiento se calculó para cada distrito. Aquí se comparan los resultados de la metodología propuesta con los de la metodología original.

La Figura 9 presenta los resultados para el nivel de riesgo obtenidos; la mayor parte de la ciudad presenta un nivel medio-bajo (142 ZRPs) y bajo (85 ZRPs) de riesgo físico; 8 ZRPs presentan nivel medio alto y 13 ZRPs del centro de la ciudad presentan un nivel alto de riesgo físico sísmico. La Figura 10 presenta los resultados obtenidos para el coeficiente de agravamiento para los distritos de Barcelona, la peor situación, según estos resultados, es para el distrito de Sant Marti, y el distrito con el menor agravamiento es Sarria-Sant Gervasi. Los niveles de riesgo total se presentan en la Figura 11, donde se observa como la mayor parte de Barcelona (136 ZRPs) tiene un nivel medio-alto de riesgo total, y 77 ZRPs tienen un nivel medio-bajo.

En el caso de Barcelona, cuando se aplica la metodología basada en conjuntos difusos, el riesgo físico presenta niveles más altos, y dentro de la ciudad se observa mayor diferencia entre los niveles de riesgo que se presentan, se observan mejor las diferencias entre las diferentes zonas de la ciudad. Los niveles de agravamiento son, en general, un nivel mayor a los niveles obtenidos con la metodología original, excepto el caso del distrito de Sant Marti; y los distritos de Sant Andreu y Nou Barris que tienen el mismo nivel de agravamiento en las dos metodologías. El ranking de los distritos de acuerdo con el coeficiente de agravamiento es similar al obtenido con la metodología original. El nivel de riesgo total tiene una tendencia similar al riesgo físico; presenta niveles de riesgo mayores pero se observan mayores diferencias entre las zonas de la ciudad.

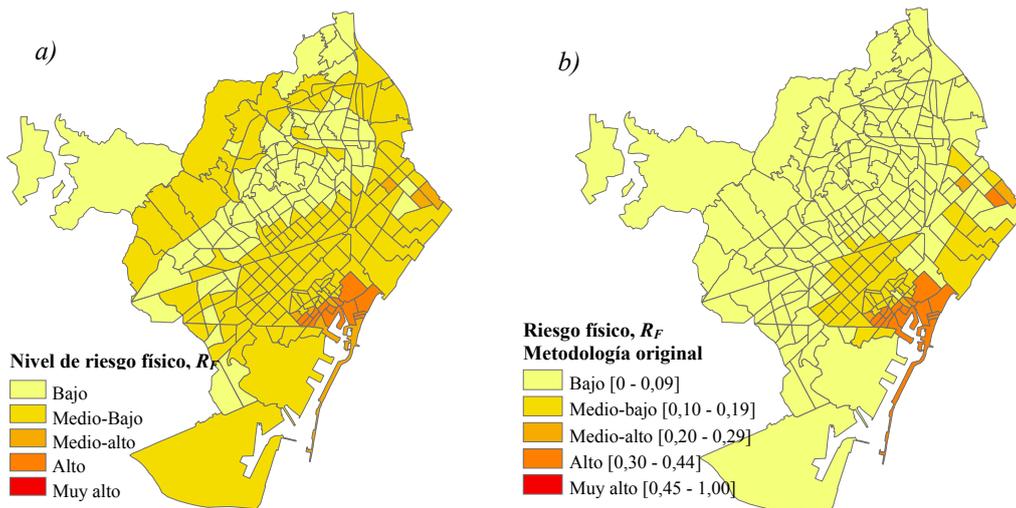


Figura 9. Niveles de riesgo físico para Barcelona: a) metodología propuesta; b) metodología original

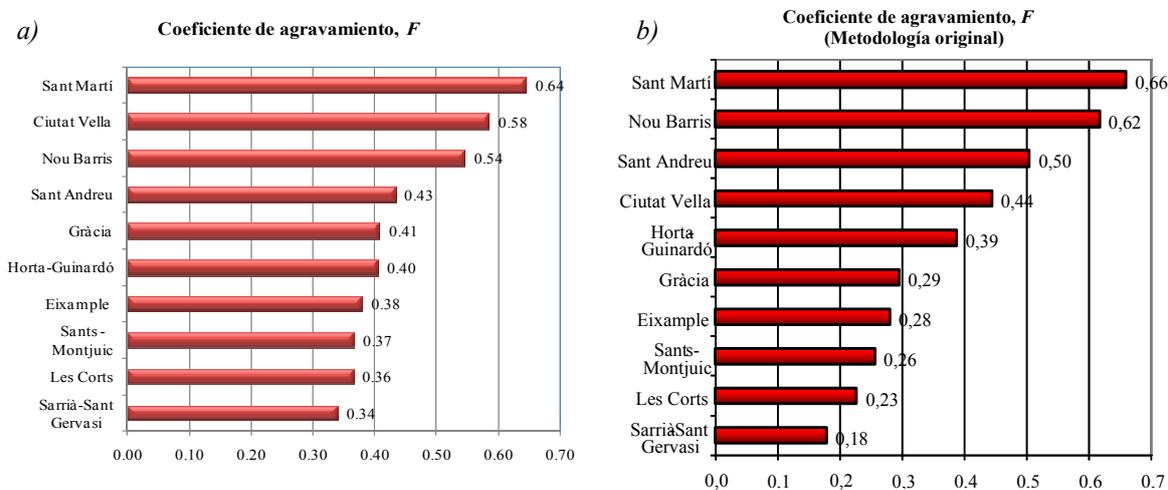


Figura 10. Coeficiente de agravamiento: a) metodología propuesta; b) metodología original

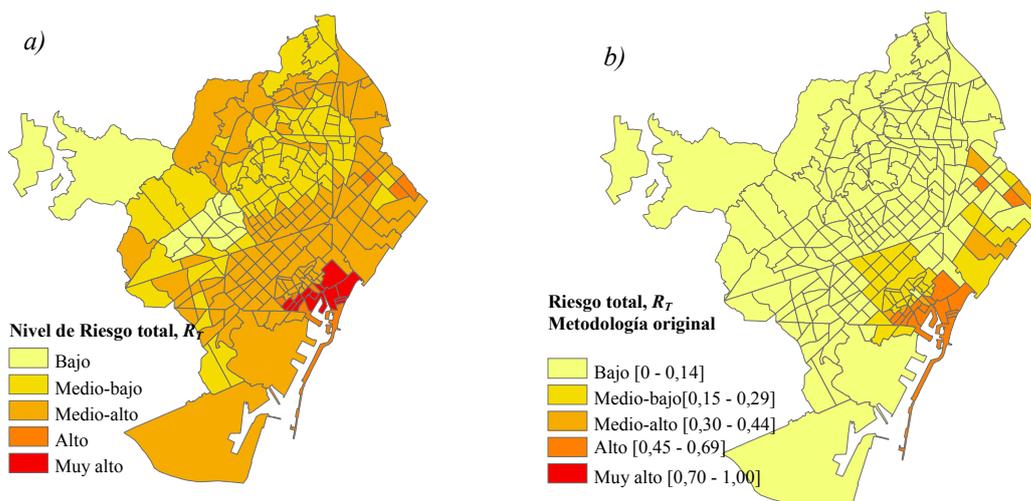


Figura 11. Niveles de riesgo total para Barcelona: a) metodología propuesta; b) metodología original

Conclusiones

En este artículo se ha propuesto una metodología simplificada para la evaluación holística del riesgo sísmico. Este modelo se ha formulado de la forma más realista posible

utilizando conjuntos difusos. Se evalúa el riesgo sísmico físico y las condiciones socio económicas y de falta de resiliencia de la zona de estudio para la determinación de un nivel de riesgo físico, un nivel de agravamiento y un nivel de riesgo total. La propuesta de utilización de los conjuntos difusos en esta evaluación es especialmente útil para aquellos casos en los que la información necesaria no está disponible y puede ser sustituida por la opinión de los expertos. Este modelo facilita la gestión integral del riesgo por parte de los actores involucrados en la toma de decisiones en reducción del riesgo. El método propuesto se ha aplicado a la evaluación holística del riesgo sísmico de la ciudad de Barcelona, ha demostrado ser robusto y permite identificar los aspectos más relevantes del riesgo sin necesidad de un análisis o interpretación adicional de resultados.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Ministerio de Educación y Ciencia de España, programa CONSOLIDER, proyecto SEDUREC, CSD2006-00060. Este trabajo contó también con el apoyo de la Comisión Europea, proyecto MOVE, FP7-ENV-2007-1-211590; y el proyecto INTERREG: POCTEFA 2007-2013/ 73/08.

Referencias:

- Barbat AH, Cardona OD (2003) Vulnerability and disaster risk indices from engineering perspective and holistic approach to consider hard and soft variables at urban level, IDB/IDEA Program on Indicators for Disaster Risk Management, <http://idea.unalmz.edu.co>, Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Barbat AH, Pujades LG, Lantada N, Moreno R (2006) Performance of buildings under earthquakes in Barcelona, Spain. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 21: 573-593.
- Barbat AH, Pujades LG, Lantada N, Moreno R (2008) Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: application to Barcelona, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28: 851–865.
- Cardona OD (2001) Evaluación holística del riesgo sísmico usando sistemas dinámicos complejos, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Cardona OD, Hurtado JE (2000) "Holistic Seismic Risk Estimation of a Metropolitan Center" Proceedings of 12th World Conference of Earthquake Engineering, January-February 2000, Auckland, New Zealand.
- Cardona OD, Barbat AH (2000) El Riesgo Sísmico y su Prevención, Cuaderno Técnico 5, Calidad Siderúrgica, Madrid.
- Carreño ML (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, España.
- Carreño ML, Cardona OD, Barbat AH (2007) "Urban Seismic Risk Evaluation: A Holistic Approach" *Natural Hazards* 40(1):137-132.
- ICC/CIMNE (2004) An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns, WP08 Application to Barcelona, RISK-UE Project.
- Lantada N, Pujades LG, Barbat AH (2009) Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison, *Natural Hazards* 51:501–524.
- Marulanda MC, Cardona OD, Barbat AH (2009) Robustness of the holistic seismic risk evaluation in urban centers using the USRi, *Natural Hazards* 49:501-516.
- Saaty TL (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill Book Co., N.Y.