

EVALUACION DEL RIESGO SISMICO URBANO: UN ENFOQUE HOLISTICO

Martha-Liliana Carreño T.

Universidad Politécnica de Cataluña. Campus Norte UPC, C/ Jordi Girona 1-3, Edificio C1, 08034 Barcelona, España.

liliana@cimne.upc.edu

Omar Darío. Cardona A.

Universidad Nacional de Colombia, Campus Palogrande. IDEA, Cra. 27 No. 64-60, Manizales, Colombia.

odcardona@unal.edu.co

Mabel Cristina. Marulanda F.

Universidad Politécnica de Cataluña. Campus Norte UPC, C/ Jordi Girona 1-3, Edificio C1, 08034 Barcelona, España.

mmarulan@upc.edu

Alex H. Barbat

Universidad Politécnica de Cataluña. Campus Norte UPC, C/ Jordi Girona 1-3, Edificio C1, 08034 Barcelona, España.

alex_barbat@upc.edu

RESUMEN

El riesgo ha sido definido, para efectos de su gestión, como las consecuencias económicas, sociales y ambientales potenciales de eventos peligrosos que pueden ocurrir en un periodo de tiempo específico. No obstante, en el pasado, el concepto de riesgo ha sido definido, en muchos casos, de una forma fragmentada, de acuerdo con cada disciplina científica involucrada en este estudio. Desde la perspectiva de este artículo, el riesgo requiere de una evaluación multidisciplinar que tenga en cuenta, no sólo el daño físico esperado y el número o tipo de víctimas o pérdidas económicas, sino también las condiciones relacionadas con la fragilidad social y la falta de resiliencia que favorecen los efectos de segundo orden (efectos indirectos) cuando un evento peligroso impacta golpea un centro urbano. El método general propuesto de evaluación del riesgo urbano es multi-amenaza y holístico: es decir, es un enfoque integrado y comprensivo para guiar la toma de decisiones. La evaluación del daño físico potencial (enfoque duro) como resultado de la convolución de la amenaza y la vulnerabilidad física de edificios e infraestructura es el primer paso de este método. Subsecuentemente, también se considera un conjunto de condiciones sociales de contexto que agravan los efectos físicos (enfoque blando). En este método, la evaluación holística del riesgo está basada en la utilización de indicadores de riesgo urbano. De acuerdo con este procedimiento, el índice de riesgo físico se obtiene para cada unidad de análisis de los escenarios de pérdida existentes. El índice de riesgo total se obtiene de afectar el primer índice por un factor de impacto que involucra un coeficiente de agravamiento el cual está basado en variables asociadas con las condiciones socio-económicas de cada unidad de análisis. Finalmente, el método propuesto es

aplicado en su forma de amenaza individual a la evaluación holística del riesgo sísmico para las ciudades de Bogotá (Colombia) y Barcelona (España).

Palabras claves: Enfoque holístico, evaluación del riesgo, riesgo sísmico, vulnerabilidad socio-económica.

ABSTRACT

Risk has been defined, for management purposes, as the potential economic, social and environmental consequences of hazardous events that may occur in a specified period of time. However, in the past, the concept of risk has been defined in a fragmentary way in many cases, according to each scientific discipline involved in its appraisal. From the perspective of this article, risk requires a multidisciplinary evaluation that takes into account not only the expected physical damage, the number and type of casualties or economic losses, but also the conditions related to social fragility and lack of resilience conditions, which favour the second order effects (indirect effects) when a hazard event strike an urban centre. The proposed general method of urban risk evaluation is multi hazard and holistic, that is, an integrated and comprehensive approach to guide decision-making. The evaluation of the potential physical damage (hard approach) as the result of the convolution of hazard and physical vulnerability of buildings and infrastructure is the first step of this method. Subsequently, a set of social context conditions that aggravate the physical effects are also considered (soft approach). In the method here proposed, the holistic risk evaluation is based on urban risk indicators. According to this procedure, a physical risk index is obtained, for each unit of analysis, from existing loss scenarios, whereas the total risk index is obtained by factoring the former index by an impact factor or aggravating coefficient, based on variables associated with the socio-economic conditions of each unit of analysis. Finally, the proposed method is applied in its single hazard form to the holistic seismic risk evaluation for the cities of Bogotá (Colombia) and Barcelona (Spain).

Keywords: Holistic approach, risk evaluation, seismic risk, socio-economic vulnerability.

1 LA NOCIÓN DE RIESGO

Muchos enfoques conceptuales de riesgo tienen su origen en los estudios de amenaza tecnológica y algunos de ellos son extrapolados al campo del riesgo de desastres naturales. Tal vez, las primeras investigaciones especializadas en el tema de desastres naturales comenzaron a principios de lo sesenta basadas en las contribuciones pioneras de Gilbert White (1964) desde el punto de vista de la ecología y la geografía. Sociólogos como Enrico Quarantelli (1988) y Russell Dynes (1994) desde 1963 hicieron esfuerzos para explicar la respuesta social de los desastres siguiendo analogías como la respuesta en caso de ataques nucleares. Geógrafos como Robert Kates (197) y Roger Kasperson (1988) y el físico Christopher Hohenemser enfocaron su investigación en riesgos naturales y nucleares. Desde el punto de vista de la ingeniería civil estas investigaciones han sido materializadas en desarrollos realizados en el campo del riesgo físico. Así, comenzando del trabajo en evaluación del daño de Whitman (1973), innumerables metodologías en la evaluación del riesgo sísmico físico han sido desarrolladas en todo el mundo. Más tarde, este proceso evolucionó hacia una visión mas integral del riesgo sísmico incorporando otros de sus aspectos (Coburnm y Spence 1992) hasta alcanzar la metodología generalizada HAZUS (1999), ahora disponible para la evaluación del riesgo multiamenaza. Durante los años 90, muchos investigadores, motivados por la Década Internacional de Reducción de los Desastres Naturales, DIRDN, trabajaron con riesgos y desastres en el mundo. El tema ganó importancia y se ha venido aumentando el reconocimiento

que los términos amenaza, vulnerabilidad y riesgo han tenido diferentes significados e implicaciones desde los diferentes ángulos metodológicos y prácticos (Cardona, 2004).

Un ejemplo de un modelo sistemático de riesgo fue proporcionado por Kates (1971) desde el pensamiento de la escuela ecologista. El describe la noción de “ajuste” de las amenazas naturales considerando las interacciones entre naturaleza, hombre y tecnología. Palmlund (1989) propuso un modelo analógico con la estructura clásica de la tragedia Griega (con actores, escenario, drama y roles) para explicar el desastre ambiental desde la perspectiva política y social. Un contexto clásico o explicación estructural, donde el riesgo es visto como un atributo de las estructuras sociales, es el propuesto por Douglas y Wildavsky (1982). Una teoría cultural del riesgo es propuesta por Rayner (1992), mientras que los enfoques de la escuela de la Economía Política son propuestos por Wesgate y O’Keefe (1976), Wijkman y Timbarlae (1984), Susmal *et al.* (1984) y Chambers (1989). Las contribuciones de Wisner (1993), Cannon (1994), Blaikie *et al.* (1996) y los miembros de la Red de Estudios Sociales de Prevención de Desastres en Latinoamérica (La RED) (Maskrey, 1994; Lavell, 1996; Cardona, 1996; Mansilla, 1996) también deben ser consideradas constructivistas, enfatizando la construcción social de la vulnerabilidad y el riesgo. Una de las contribuciones conceptuales que se derivan en un enfoque multidisciplinario fue hecha por Wilches-Chaux (1989); él propuso diferentes clases de vulnerabilidad (cultural, ambiental, social, económica, física, etc.).

El reporte *Análisis de los Desastres Naturales y Vulnerabilidad* (UNDRO, 1980), basado en la reunión de expertos realizada en 1979, propuso la unificación de desastre relacionada con las definiciones de amenaza (A), vulnerabilidad (V), elementos expuestos (E) y riesgo (R) y sugirió una expresión para asociarlas, considerada un estándar en el presente,

$$R = E \cdot H \cdot V \quad (1)$$

Muchas metodologías de evaluación del riesgo, basadas en esta formulación, han sido desarrolladas desde diferentes perspectivas en las últimas décadas, y, recientemente se desarrolló un enfoque holístico o multidisciplinario para el caso de centros urbanos (Cardona y Hurtado 2000; Masure, 2003).

Cardona (2001) desarrolló un marco conceptual y un modelo para el análisis de riesgo sísmico de una ciudad desde una perspectiva holística. Este modelo considera las variables de riesgo “duro” y “blando” del centro urbano, teniendo en cuenta la exposición, las características socioeconómicas de las diferentes localidades (unidades) de la ciudad y su capacidad de resistir desastres o su grado de resiliencia. El modelo se construyó para guiar la toma de decisiones en la gestión de riesgos, ayudar a identificar zonas críticas de la ciudad y su vulnerabilidad desde diferentes disciplinas profesionales.

2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

Este artículo presenta un método alternativo de evaluación de riesgo urbano basado en el modelo de Cardona (Cardona, 2001; Barbat y Cardona, 2003), utilizando un enfoque holístico y describiendo el riesgo sísmico mediante índices. El daño esperado en edificios y pérdidas en la infraestructura, obtenidas de futuros escenarios de pérdidas, es información básica para la evaluación del riesgo físico en cada unidad de análisis. El índice de daño físico se obtiene a partir de estos datos.

El método propuesto se desarrolla para una evaluación multiamenaza y por lo tanto es necesario disponer de estimaciones de daño físico para todas las amenazas significativas. Frecuentemente, cuando se dispone de información histórica, la principal amenaza puede ser identificada y de esta forma, su situación potencial más crítica.

La evaluación holística del riesgo mediante índices se logra afectando el riesgo físico con un factor de impacto obtenido de las condiciones contextuales como la fragilidad socioeconómica o la falta de resiliencia que agravan el escenario físico de pérdida inicial. Se necesitan datos disponibles de estas condiciones a nivel urbano para aplicar el método. Mas adelante se hace una explicación del modelo y también se describen algunos ejemplos de aplicación para las ciudades de Bogotá, Colombia, y Barcelona, España, para ilustrar los beneficios de este enfoque que contribuye a la efectividad del manejo del riesgo, invitando a la acción, identificando las debilidades duras (hard) y blandas (soft) del centro urbano. La Figura 1 muestra el marco teórico del modelo alternativo.

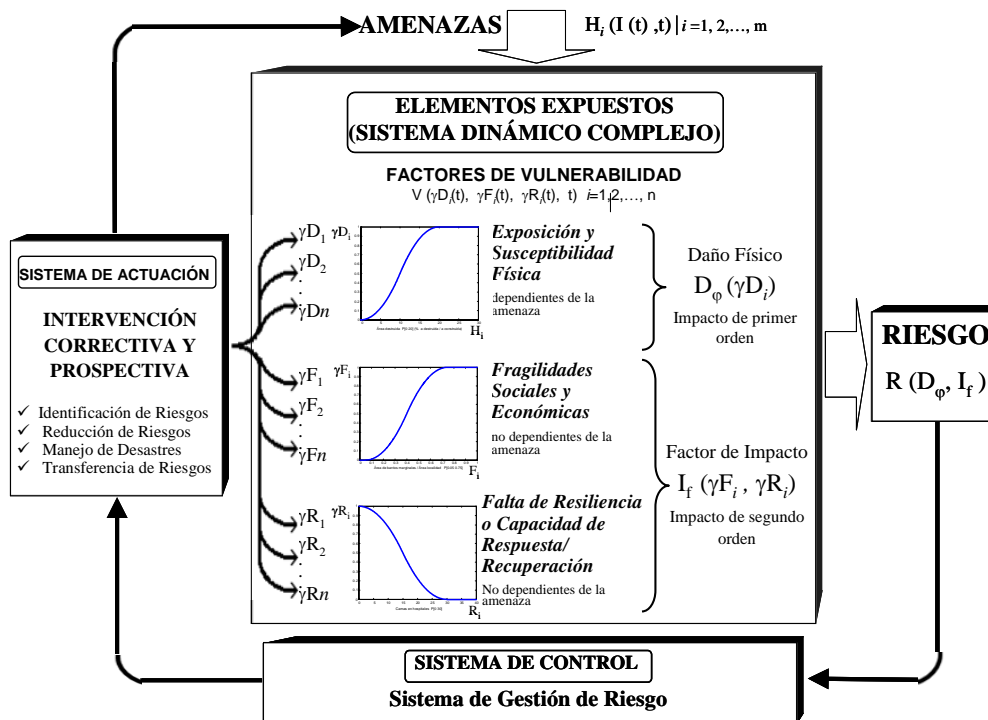


Figura 1 Marco teórico y modelo para el enfoque holístico de riesgo de desastres (adaptado de Cardona y Barbat, 2000)

Desde una perspectiva holística del riesgo, R es una función del daño físico potencial, D_i , y un factor de impacto, I_i . El primero se obtiene de la susceptibilidad de los elementos expuestos γ_{D_i} , a amenazas, H_i , con respecto a sus intensidades potenciales, I , de eventos en un periodo de tiempo t , y el último depende de las fragilidades sociales γ_{F_i} , y los temas relacionados con la falta de resiliencia, γ_{R_i} , de que tan propenso está el sistema socio-técnico o contexto a un desastre. Usando los meta conceptos de la teoría de control y sistemas dinámicos complejos para reducir el riesgo, es necesario intervenir de forma correctiva y prospectiva los factores de vulnerabilidad y cuando sea posible, intervenir directamente las amenazas. El manejo de riesgos requiere de un sistema de control (estructura institucional) y un sistema de actuación (políticas públicas y acciones) para implementar los cambios necesarios en los elementos expuestos o sistemas complejos donde el riesgo es un proceso social.

La evaluación holística del riesgo propuesta en este artículo se realiza utilizando un conjunto de variables de entrada, denominadas descriptores. Estos reflejan el riesgo físico y las condiciones de agravamiento que contribuyen al impacto potencial. Los descriptores, que será discutido más adelante, son obtenidos de los escenarios de pérdidas y de la información de la capacidad socioeconómica y de resistencia de un contexto expuesto (Carreño *et al.* 2005).

El modelo de evaluación holística del riesgo urbano propuesto en este artículo mejora los aspectos conceptuales y metodológicos de la primera propuesta de Cardona (2001), refinando las técnicas numéricas aplicadas y llegando a una herramienta más versátil. El mejoramiento conceptual proporciona un soporte teórico y analítico más sólido al nuevo modelo, eliminando aspectos innecesarios y dudosos del método anterior y dando mayor transparencia y aplicabilidad en algunos casos. El modelo de Cardona permite la evaluación del riesgo sísmico en un centro urbano teniendo en cuenta las características del riesgo físico, amenaza sísmica, exposición física, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia, que identifican las características de la ciudad que incrementan el nivel de riesgo así como también las áreas críticas. Este modelo analiza diferentes tipos de información mediante indicadores y utiliza un proceso de normalización de los resultados basados en la media y la desviación estándar aplicados a cada indicador. Como consecuencia, los resultados obtenidos con el modelo de Cardona permiten una comparación relativa del riesgo sísmico holístico entre diferentes áreas de una ciudad, pero no una comparación, en términos absolutos, con otras áreas urbanas. El modelo de Cardona utiliza un sistema neuro-difuso, con conjuntos difusos que identifican las calificaciones lingüísticas de los descriptores, pero no existe la información necesaria de la calibración de este sistema.

El nuevo modelo aquí propuesto conserva el enfoque basado en indicadores, pero mejora el procedimiento de normalización y calcula los índices finales de una manera absoluta (no relativa). Esta característica facilita la comparación del riesgo entre centros urbanos. En este método, la exposición y la amenaza sísmica han sido eliminadas debido a que se considera que están contempladas en el cálculo del riesgo físico. El descriptor de densidad de población, un componente de exposición en el modelo de Cardona, aquí se consideró, como un descriptor de fragilidad social. El nuevo enfoque conserva el uso de indicadores y de los conjuntos difusos o funciones de pertenencia originalmente propuestos por Cardona, pero de una forma diferente. Otros cambios en el modelo propuesto son las unidades en las que se expresan algunos de los descriptores, en ciertos casos es más importante normalizar los valores de entrada con respecto a la población que con respecto al área de la zona de estudio. Por ejemplo, en el caso del número de camas en hospitales existentes en el área urbana estudiada.

La fragilidad socioeconómica y la falta de resiliencia son un conjunto de factores (relacionados con los efectos indirectos o intangibles) que agravan el riesgo físico (efectos directos potenciales). Así, el riesgo total depende de los efectos directos, o el riesgo físico y los efectos indirectos expresados como un factor de efectos directos. Por lo tanto, el riesgo total puede estar expresado de la siguiente forma:

$$R_T = R_F(1 + F) \quad \text{o} \quad USRi = R_F(1 + F) \quad (2)$$

Esta expresión se conoce como la *ecuación de Moncho*, R_T es el índice de riesgo total, R_F es el índice de riesgo físico y $(1+F)$ es el factor de impacto, en el cual F es el coeficiente de agravamiento que depende de la fragilidad socio-económica, FS , y de la falta de resiliencia del contexto, FR . El riesgo total, para el caso sísmico también se le identifica como Urban Seismic Risk Index, $USRi$, por su denominación en inglés.

El riesgo físico R_F se obtiene mediante la suma ponderada de factores de riesgo físico,

$$R_F = \sum_{i=1}^p w_{RFi} \times F_{RFi} \quad (3)$$

Donde F_{RFi} son los factores de riesgo físico, w_{RFi} es el peso para cada factor y p es el número total de descriptores de riesgo físico. Los pesos suman 1 y se obtienen utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), el cual es usado para obtener la jerarquía de las comparaciones de pares discretos y continuos (Saaty, 2001). Este proceso, explicado en el Apéndice A, se ha llevado a cabo partiendo de la opinión de expertos, recolectada en las tablas A.1 a A.3, mediante el método Delphi. Esta es la forma más adecuada de calcular la importancia relativa de las variables de diferente naturaleza y sus pesos relativos.

La tabla 1 presenta los descriptores propuestos para el riesgo físico y las unidades en las cuales se utilizan. Es importante mencionar que el cálculo de escenarios de riesgo físico no es el objetivo de la metodología desarrollada en este artículo, pero el índice de riesgo físico es obtenido partiendo de las evaluaciones de pérdidas existentes.

Tabla 1 Descriptores de riesgo físico, sus unidades e identificadores

Descriptor	Unidades
X_{RF1} Área destruida	% (área destruida / área construida)
X_{RF2} Muertos	Número de muertos cada 1,000 habitantes
X_{RF3} Heridos	Número de heridos cada 1,000 habitantes
X_{RF4} Roturas red de acueducto	Número de roturas / Km ²
X_{RF5} Roturas red de gas	Número de roturas / Km ²
X_{RF6} Longitud de redes eléctricas caídas	m de longitud caída / Km ²
X_{RF7} Vulnerabilidad de centrales telefónicas	Índice de vulnerabilidad
X_{RF8} Vulnerabilidad subestaciones eléctricas	Índice de vulnerabilidad
X_{RF9} Daño en la red vial	Índice de daño

Los factores de riesgo físico se obtienen utilizando funciones de transformación mostradas en la figura 2, con las que conocido el valor bruto de cada descriptor (número de fallecidos, área destruida, etc.) se obtiene el valor de cada factor de riesgo físico, el cual toma un valor entre 0 y 1. Por ejemplo, la función de transformación para el área construida dañada, de acuerdo con la opinión de los expertos, es 0 cuando este descriptor tiene el valor mínimo y es 1 cuando el área dañada puede llegar a ser del 20% del área construida.

En forma similar se calcula el coeficiente de agravamiento, F , de la suma ponderada de los factores de agravamiento por fragilidad social, F_{FSi} , y por falta de resiliencia, F_{FRj}

$$F = \sum_{i=1}^m w_{FSi} \times F_{FSi} + \sum_{j=1}^n w_{FRj} \times F_{FRj} \quad (4)$$

Donde w_{FSi} y w_{FRj} son pesos que toman en consideración su importancia relativa, suman 1 y son calculados utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), m y n indican el número total de descriptores para fragilidad socio-económica y falta de resiliencia respectivamente.

$$\sum_{i=1}^m w_{FSi} + \sum_{j=1}^n w_{FRj} = 1 \quad (5)$$

La tabla 2 presenta los descriptores propuestos para conformar el coeficiente de agravamiento por fragilidad social y falta de resiliencia. En la tabla 3 se observan los descriptores con las unidades utilizadas. Los factores de agravamiento son calculados mediante las funciones de transformación de la figura 3 y la figura 4, que relacionan los valores brutos de las variables o descriptores que representan la fragilidad social y la resiliencia con los valores correspondientes del agravamiento. El peso w_{FS} o w_{FR} de cada factor F_{FSi} o F_{FRj} se calcula utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ).

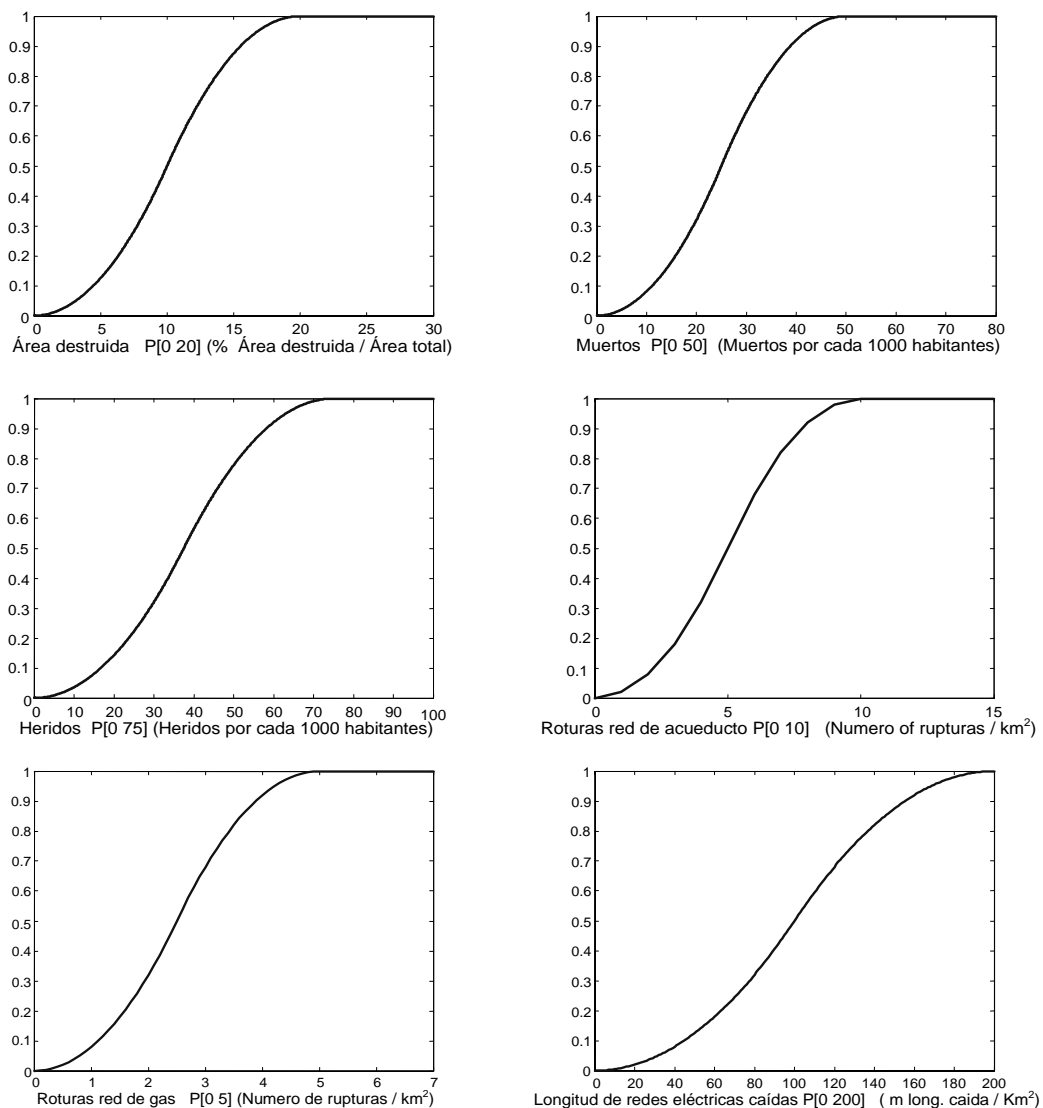


Figura 2 Funciones de transformación utilizadas para normalizar los factores de riesgo físico.

Tabla 2 Descriptores utilizados para estimar el coeficiente F

Aspecto	Descriptor
Fragilidad social	Área de barrios marginales
	Tasa de mortalidad
	Tasa de delincuencia
	Índice de disparidad social
	Densidad de la población
Falta de resiliencia	Camas hospitalarias
	Recursos humanos en salud
	Espacio público
	Personal de socorro
	Nivel de desarrollo de la localidad
	Operatividad en emergencias

Tabla 3 Descriptores de agravamiento, sus unidades e identificadores

Descriptor	Unidades
X_{FS1} Área de barrios marginales	Área barrios marginales / Área localidad
X_{FS2} Tasa de mortalidad	Número de muertos cada 10,000 habitantes
X_{FS3} Tasa de delincuencia	Número de delitos cada 100,000 habitantes
X_{FS4} Índice de disparidad social	Índice entre 0 y 1
X_{FS5} Densidad de población	Habitantes / Km ² de área construida
X_{FR1} Camas hospitalarias	Número de camas cada 1,000 hab
X_{FR2} Recurso humano en salud	Recurso humano en salud cada 1,000 hab
X_{FR3} Espacio público	Área de espacio público/ Área total
X_{FR4} Personal de socorro	Personal de socorro cada 10,000 hab
X_{FR5} Nivel de desarrollo de la localidad	Calificación de 1 a 4
X_{FR6} Operatividad en emergencias	Calificación de 0 a 1*

- Este índice se definió por Carreño *et al.* (2005)

Para determinar las funciones de transformación, en la mayoría de los casos, se utilizaron funciones sigmoideas. Los valores de los descriptores se encuentran en el eje x y los factores correspondientes, o los valores escalados, se encuentran en el eje y . Una vez definida la forma de estas funciones, se fijaron todos sus valores máximos (correspondientes a los valores 1 ó 0 para cada factor) utilizando información existente de desastres pasados así como también apreciaciones de expertos, tanto americanos como europeos. En los casos de falta de resiliencia, de los descriptores del nivel de desarrollo de la comunidad y del plan de emergencias o preparación se utilizó una relación de regresión lineal.

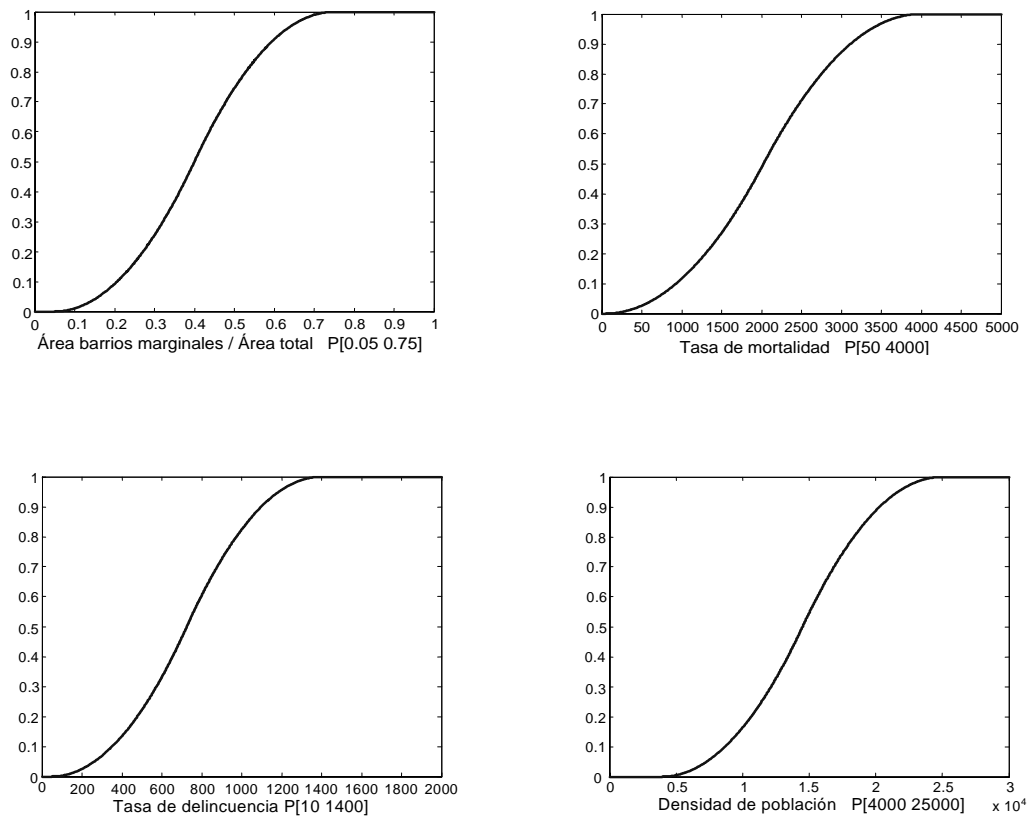


Figura 3 Funciones de transformación utilizadas para normalizar los factores de fragilidad social.

Se considera que los efectos indirectos de los eventos peligrosos, medidos por el factor F en la ecuación 2, pueden ser del mismo orden que los efectos directos. De acuerdo con la Comisión Económica de Naciones Unidas para Latinoamérica y el Caribe, CEPAL, se estima que los efectos económicos indirectos de un desastre natural dependen del tipo de fenómeno (Zapata, 2004). El orden de magnitud de los efectos económicos indirectos para un desastre 'húmedo' (por ejemplo, causado por una inundación) podrían llegar a ser del orden de 0.50 a 0.75 de los efectos directos. En el caso de un desastre 'seco' (por ejemplo, un sismo), los efectos indirectos podrían llegar a ser del orden de 0.75 a 1.00 de los efectos directos. La diferencia radica en el tipo de daño que ocasionan (destrucción de cultivos, infraestructura, viviendas, etc). Esto significa que el riesgo total R_T , podría ser del orden de 1.5 y 2 veces el R_F . En este método se asume que el valor máximo es 2. Por esta razón, en este caso, el factor de impacto, F , toma valores entre 0 y 1 en la ecuación 2.

La Figura 5 muestra el proceso de cálculo del índice de riesgo total para las unidades de análisis, que pueden ser distritos, municipios, comunas o localidades.

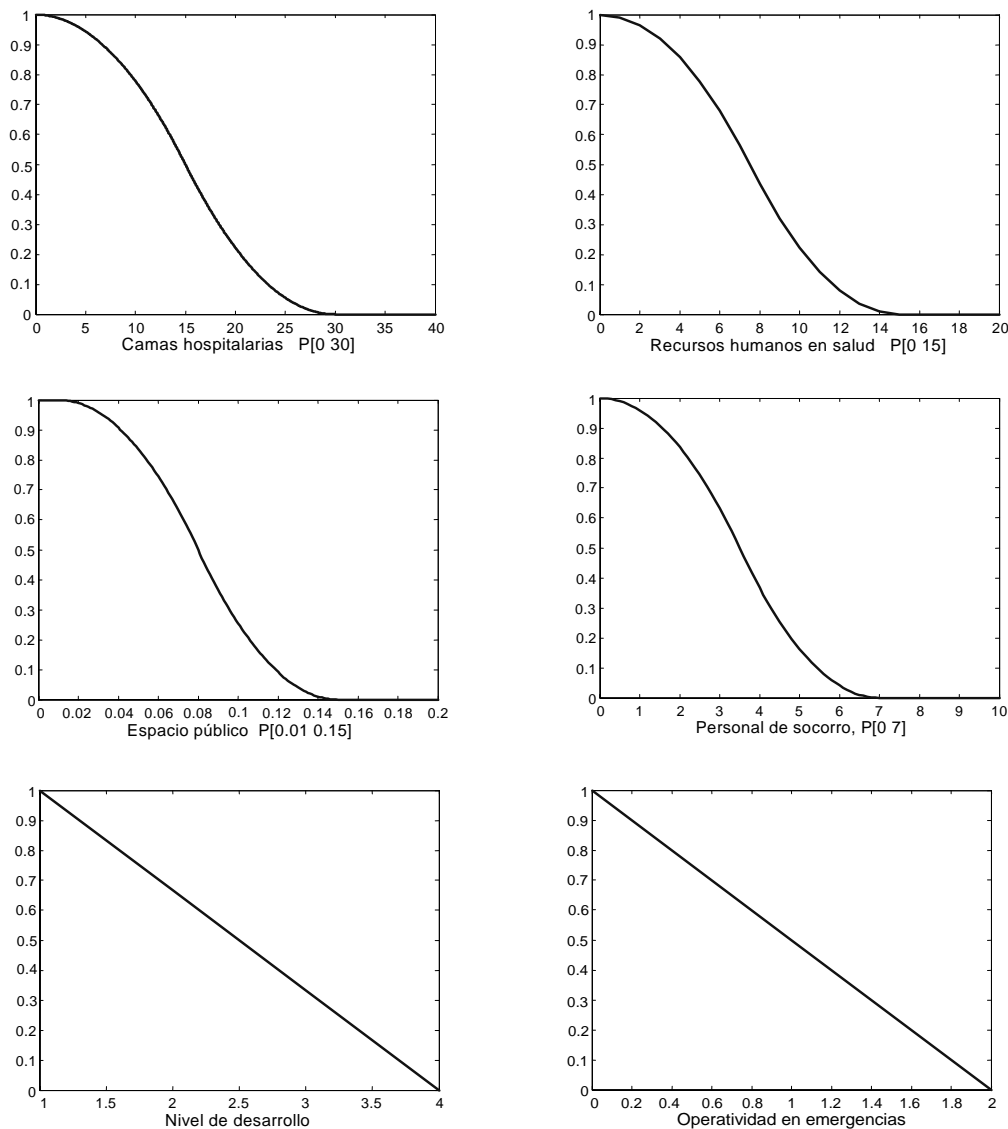


Figura 4 Funciones de transformación utilizadas para normalizar los factores de falta de resiliencia.

Expresar el resultado del índice R_F y de F como una combinación lineal de indicadores relativos implica que no existe interacción entre los mismos o entre dichas variables y los pesos que se utilizan en la ponderación. Esto no es muy realista pero en ocasiones se ha considerado aceptable teniendo en cuenta las incertidumbres e imprecisiones inherentes de los datos y para efectos de simplificación. Una vez los descriptores se han escalado y se han convertido en factores (conmensurables) se debe realizar su ponderación según sea su importancia relativa al interior del índice del cual hacen parte. La participación de cada factor ilustra que tan importante es frente a los demás en la composición del índice de riesgo físico o en el coeficiente de agravamiento. Dado que el riesgo no puede ser medido directamente y los indicadores no están bien correlacionados, la única opción que queda para la ponderación es la evaluación subjetiva por parte de expertos de las importancias relativas de los factores que componen un índice. Aunque esta técnica parece ser indeseable por algunos por la falta de una base explícitamente

replicable, en evaluaciones características dentro de lo que se conoce como ciencia pos-normal (Funtowicz y Ravetz, 1992), como es el caso del riesgo de desastre, ésta es la única opción factible y razonable para capturar el criterio, la experiencia y el juicio de expertos. Como alternativa se ha propuesto el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) que facilita el análisis multicriterio basado en importancias relativas. Una descripción resumida de esta técnica se presenta en el Apéndice A.

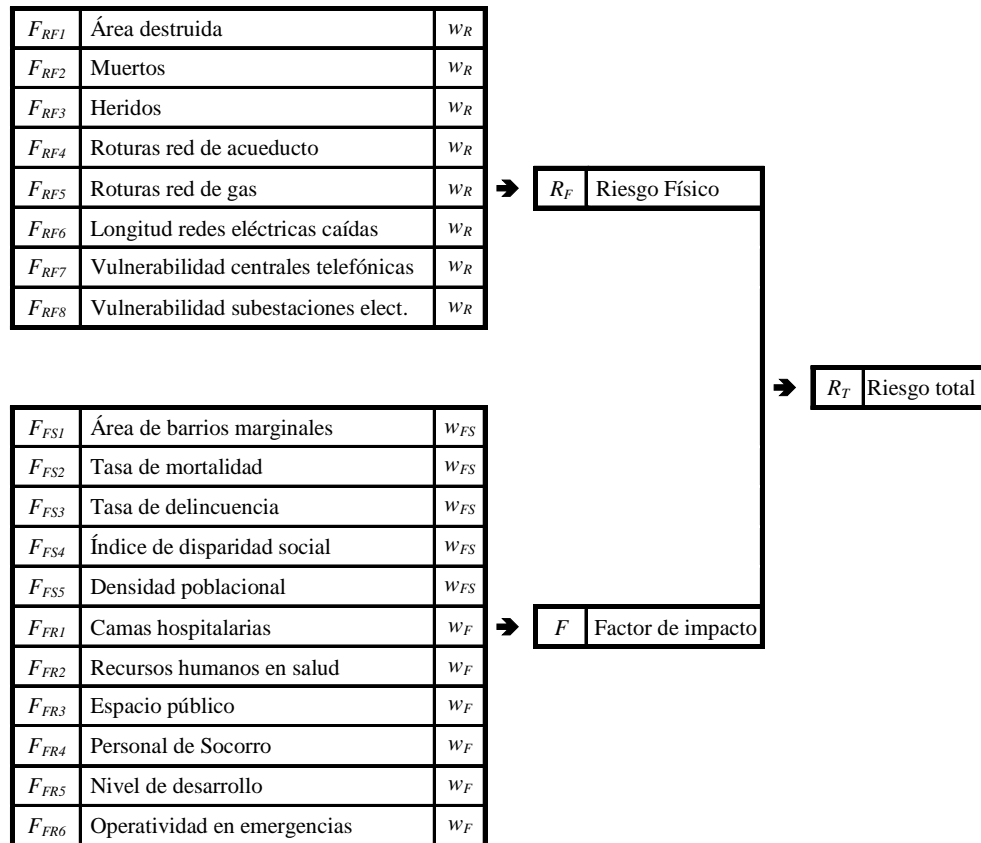


Figura 5 Factores de riesgo físico, fragilidad social y falta de resiliencia y sus pesos

3 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

3.1 Riesgo sísmico de Bogotá

En Bogotá, la capital de Colombia, las localidades o alcaldías menores, son subdivisiones político-administrativas del territorio urbano con competencias claras y criterios de financiación y aplicación de recursos. Se crearon con el objetivo de atender de una forma más eficaz las necesidades de la población de cada territorio. Desde 1992, Bogotá está dividida en 20 localidades, las cuales se pueden ver en la Figura 6: Usaquén, Chapinero, Santafé, San Cristóbal, Usme, Tunjuelito, Bosa, Ciudad Kennedy, Fontibón, Engativa, Suba, Barrios Unidos, Teusaquillo, Mártires, Antonio Nariño, Puente Aranda, Candelaria, Rafael Uribe, Ciudad Bolívar y Sumapaz. En este estudio, se consideraron sólo 19 de estas localidades ya que la localidad

de Sumapaz corresponde a área rural. Estas localidades están subdivididas en 117 unidades territoriales (UPZ).



Figura 6 División político-administrativa de Bogotá, Colombia.

Como es bien conocido, la amenaza sísmica es la amenaza más significativa para Bogotá. El escenario de riesgo sísmico físico ilustrado en la Figura 7 (Universidad de los Andes, 2005) se utilizó como punto de partida para la aplicación del modelo. Este mapa representa el área destruida en celdas predefinidas considerando que un terremoto con magnitud M_s de 7.4 y un período de retorno de 500 años ocurre en la falla frontal de la cordillera oriental (Universidad de Los Andes, 2005). El escenario de riesgo sísmico se calculó mediante simulaciones edificio por edificio, obteniendo los descriptores del riesgo físico para cada UPZ. Sin embargo, la información relacionada con los factores de agravamiento ha sido calculada para cada localidad y no para cada UPZ, como se verá más adelante.

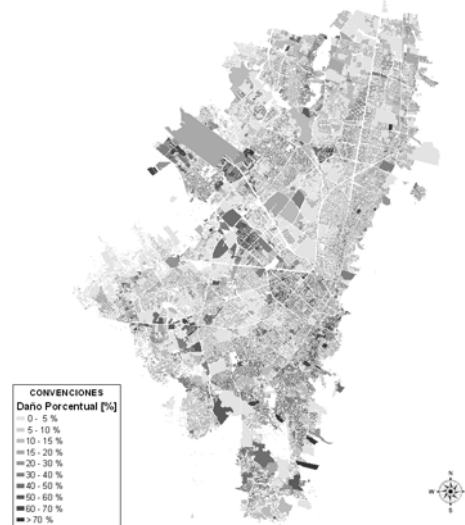


Figura 7 Un escenario de riesgo sísmico físico (Universidad de los Andes, 2005)

Las tablas 4 y 5 muestran los pesos calculados usando el PAJ como se describe en el Apéndice A, para los componentes del riesgo físico y para los factores de agravamiento, respectivamente.

Tabla 1 Pesos para los factores de riesgo físico

Factor	Peso	Valor
F_{RE1}	W_{RE1}	0.31
F_{RE2}	W_{RE2}	0.10
F_{RE3}	W_{RE3}	0.10
F_{RE4}	W_{RE4}	0.19
F_{RE5}	W_{RE5}	0.11
F_{RE6}	W_{RE6}	0.11
F_{RE7}	W_{RE7}	0.04
F_{RE8}	W_{RE8}	0.04

Tabla 2 Pesos para los factores de las condiciones de agravamiento

Factor	Peso	Valor
F_{ES1}	W_{ES1}	0.18
F_{ES2}	W_{ES2}	0.04
F_{ES3}	W_{ES3}	0.04
F_{ES4}	W_{ES4}	0.18
F_{ES5}	W_{ES5}	0.18
F_{ER1}	W_{ER1}	0.06
F_{ER2}	W_{ER2}	0.06
F_{ER3}	W_{ER3}	0.04
F_{ER4}	W_{ER4}	0.03
F_{ER5}	W_{ER5}	0.09
F_{ER6}	W_{ER6}	0.09

Las tablas 6 a 8 muestran los valores de los descriptores utilizados en esta aplicación, los cuales representan el riesgo físico y la fragilidad social y la falta de resiliencia de la ciudad. La tabla 7 muestra los valores de los factores de riesgo físico obtenidos de la aplicación de las funciones de la figura 4. La tabla 9 muestra los factores de agravamiento de los efectos indirectos debidos a la fragilidad social y la falta de resiliencia que se obtienen de la aplicación de las funciones de la figura 2 y 3. El índice de riesgo físico, R_F , y el coeficiente de agravamiento, F , también están indicados en estas tablas. Igualmente, se muestran los valores promedio de la ciudad. Estos son calculados normalizando la densidad de población. La tabla 10 muestra los resultados del riesgo físico, el factor de impacto, el riesgo total de cada localidad y los valores promedios para la ciudad.

Las figuras 8 a 12 muestran gráficamente los resultados de la evaluación holística del riesgo sísmico de Bogotá utilizando el modelo propuesto. Los valores promedio del riesgo físico y el riesgo total por localidad se muestran en las figuras 10 y 12. En estas figuras se puede observar que la localidad de La Candelaria presenta la situación más crítica desde el punto de vista del riesgo sísmico físico y total, ya que su factor de impacto es significativo, aunque no es el mayor en la ciudad. Las localidades con mayor factor de impacto son Usme, Ciudad Bolívar, Ciudad Kennedy y Bosa, donde los valores más bajos son los de Barrios Unidos, Teusaquillo y Chapinero. El mayor riesgo físico lo presentan, además de La Candelaria, las localidades de Santa Fe, Chapinero y Los Mártires, mientras que el menor riesgo físico es el de Ciudad Kennedy y Bosa. Los mayores valores de riesgo total aparece en las localidades de La Candelaria, Santafé y Los Mártires, y los valores menores son los de Ciudad Kennedy, Barrios Unidos y Bosa.

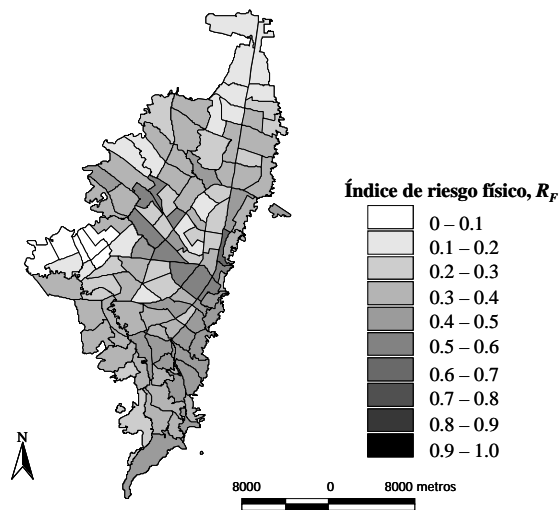


Figura 8 Índice de riesgo físico, R_F , para las UPZ de Bogotá

Tabla 3 Descriptores de riesgo físico, R_F

UPZ	Nombre UPZ	Localidad	X_{RF1}	X_{RF2}	X_{RF3}	X_{RF4}	X_{RF5}	X_{RF6}	X_{RF7}	X_{RF8}
1	Paseo los Libertadores	San Cristóbal	8.5	0	0	0.96	0.17	33.69	0.68	0.90
2	La Academia	Suba	5.6	0	1	0.81	0.17	19.14	0.66	0.77
3	Guaymaral	Suba	5.7	1	5	0.93	0.18	19.14	0.66	0.77
9	Verbenal	Usaquén	8.4	1	3	0.65	0.16	23.87	0.7	0.83
10	La Uribe	Usaquén	12.6	1	4	0.85	0.16	23.87	0.7	0.83
11	San Cristóbal Norte	Usaquén	12.3	1	4	0.67	0.14	23.87	0.7	0.83
12	Toberin	Usaquén	13	6	19	1.08	0.23	23.87	0.7	0.83
13	Los Cedros	Usaquén	12.8	8	17	0.83	0.20	23.87	0.7	0.83
...
110	Ciudad Salitre Occidental	Fontibón	10	11	21	0.89	0.16	5.49	0.64	0.7
111	Puente Aranda	Puente Aranda	21.6	55	181	1.11	0.27	20.19	0.69	0.7
112	Granjas Techo	Fontibón	30.4	102	337	0.94	0.22	5.49	0.64	0.7
113	Bavaria	Kennedy	15.5	22	57	1.14	0.24	10.80	0.54	0.7
114	Modelia	Fontibón	11.7	2	7	1.12	0.29	5.49	0.64	0.7
115	Capellania	Fontibón	27.2	23	74	1.24	0.31	5.49	0.64	0.7
116	Álamos	Negativa	36.3	21	63	1.23	0.33	2.82	0.66	0.8
117	Aeropuerto El Dorado	Fontibón	16.4	2	6	1.27	0.34	5.49	0.64	0.7

Tabla 4 Factores, F_{RF} , y el índice de riesgo físico, R_F

UPZ	Nombre UPZ	Localidad	F_{RF1}	F_{RF2}	F_{RF3}	F_{RF4}	F_{RF5}	F_{RF6}	F_{RF7}	F_{RF8}	R_F
1	Paseo los Libertadores	San Cristóbal	0.361	0	0	0.019	0.00243	0.058	0.68	0.9	0.188
2	La Academia	Suba	0.157	0	0.000356	0.0143	0.0024	0.0181	0.66	0.77	0.113
3	Guaymaral	Suba	0.162	0.0008	0.00889	0.018	0.00249	0.0181	0.66	0.77	0.116
9	Verbenal	Usaquén	0.353	0.0008	0.0032	0.00985	0.00201	0.0288	0.7	0.83	0.179
10	La Uribe	Usaquén	0.726	0.0008	0.00569	0.0157	0.00209	0.0288	0.7	0.83	0.298
11	San Cristóbal Norte	Usaquén	0.704	0.0008	0.00569	0.0105	0.00158	0.0288	0.7	0.83	0.290
12	Toberin	Usaquén	0.755	0.0288	0.128	0.0229	0.00414	0.0288	0.7	0.83	0.324
13	Los Cedros	Usaquén	0.741	0.0512	0.103	0.0148	0.00332	0.0288	0.7	0.83	0.318
...
110	Ciudad Salitre Occital.	Fontibón	0.5	0.0968	0.157	0.0168	0.00215	0.00125	0.64	0.7	0.242
111	Puente Aranda	Pte.Aranda	1	1	1	0.0239	0.00571	0.02	0.69	0.7	0.584
112	Granjas Techo	Fontibón	1	1	1	0.0182	0.00371	0.00125	0.64	0.7	0.579
113	Bavaria	Kennedy	0.899	0.387	0.885	0.0252	0.00444	0.00605	0.54	0.7	0.470
114	Modelia	Fontibón	0.656	0.0032	0.0174	0.0182	0.00655	0.00125	0.64	0.7	0.268
115	Capellania	Fontibón	1	0.423	1	0.0297	0.00788	0.00125	0.64	0.7	0.522
116	Álamos	Negativa	1	0.353	0.949	0.0292	0.00886	0.00045	0.66	0.8	0.515
117	Aeropuerto El Dorado	Fontibón	0.935	0.0032	0.0128	0.031	0.00902	0.00125	0.64	0.7	0.358

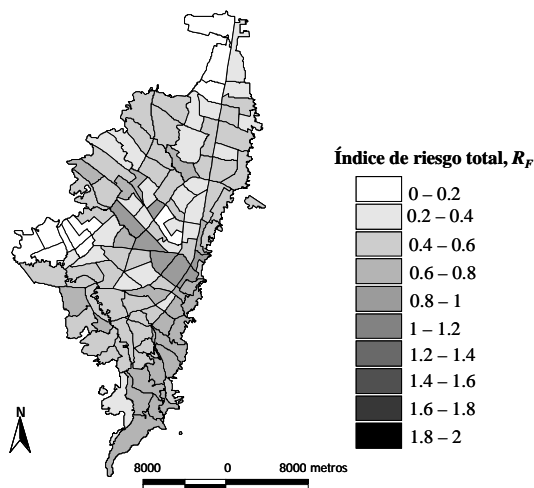
**Figura 9** Índice de riesgo total, R_T , para las UPZ de Bogotá

Tabla 5 Valores de los descriptores de agravamiento para los factores de fragilidad social y falta de resiliencia de Bogotá

Localidad	X_{FS1}	X_{FS2}	X_{FS3}	X_{FS4}	X_{FS5}	X_{FR1}	X_{FR2}	X_{FR3}	X_{FR4}	X_{FR5}	X_{FR6}
Antonio Nariño	0.015	398	120	0.2	28338	4.871	5	0.016	13	2	0.0456
Barrios Unidos	0.002	917	130	0.29	25920	1.254	33	0.150	9	2	0.0456
Bosa	0.249	1366	92	0.51	44458	0.338	3	0.038	4	2	0.0702
Chapinero	0.131	612	249	0	9255	16.265	89	0.032	19	3	0.0724
Ciudad Bolívar	0.239	1866	78	0.92	48968	0.503	3	0.035	7	2	0.1884
Engativa	0.061	2747	53	0.41	34958	0.183	7	0.142	11	2	0.1715
Fontibón	0.129	1028	34	0.39	37558	0.206	4	0.109	2	2	0.0456
Kennedy	0.164	2546	68	0.44	41451	0.756	8	0.084	1	1	0.0456
La Candelaria	0.248	100	86	0.34	13074	2.509	0	0.000	13	1	0.0456
Los Mártires	0.036	621	84	0.33	32227	2.846	103	0.033	48	2	0.0596
Puente Aranda	0.001	1323	32	0.37	37211	0.616	4	0.062	8	2	0.1715
Rafael Uribe	0.237	1618	109	0.5	36759	1.605	11	0.084	6	1	0.1715
San Cristóbal	0.265	1648	55	0.82	41875	3.490	19	0.108	11	1	0.3383
Santa Fe	0.771	694	182	0.36	17764	6.176	143	0.150	46	1	0.0904
Suba	0.110	2621	115	0.41	25886	1.181	15	0.045	4	2	0.177
Teusaquillo	0.002	681	90	0.05	14437	5.556	20	0.112	8	3	0.1315
Tunjuelito	0.161	941	63	0.45	37702	2.540	13	0.084	9	1	0.0552
Usaquen	0.050	1473	74	0.33	20836	3.972	28	0.129	3	2	0.0456
Usme	0.168	850	129	1	32863	0.199	2	0.021	12	2	0.0456

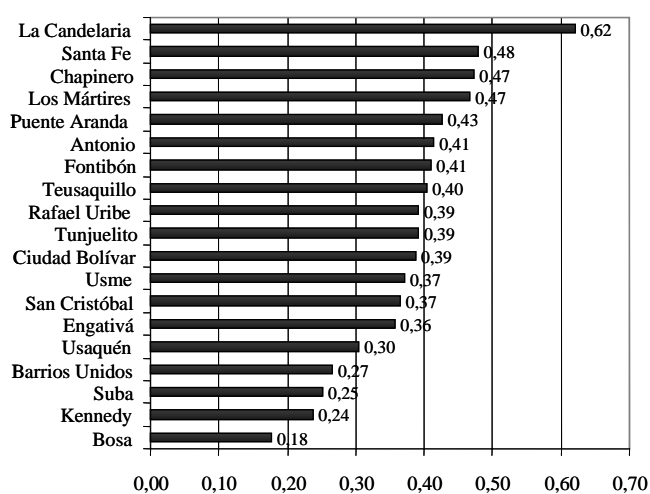
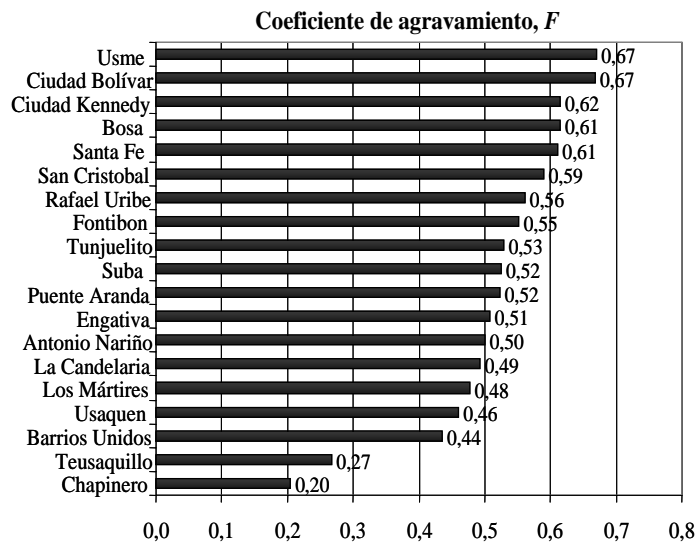
Índice de riesgo físico, R_F **Figura 10** Índice de riesgo físico para las localidades de Bogotá, en orden descendente

Tabla 6 Coeficiente de agravamiento, F , calculado con los factores de agravamiento de fragilidad social y falta de resiliencia

Localidad	F_{FS1}	F_{FS2}	F_{FS3}	F_{FS4}	F_{FS5}	F_{FR1}	F_{FR2}	F_{FR3}	F_{FR4}	F_{FR5}	F_{FR6}	F
Antonio Nariño	0	0.0155	0.00538	0.2	1	0.947	0.778	0.996	0	0.6	0.95	0.50
Barrios Unidos	0	0.0964	0.00702	0.29	1	0.997	0	0	0	0.6	0.95	0.44
Bosa	0.162	0.222	0.00194	0.51	1	1	0.92	0.92	0.367	0.6	0.93	0.61
Chapinero	0.0268	0.0405	0.0435	0	0.125	0.419	0	0.951	0	0.3	0.93	0.20
Ciudad Bolívar	0.146	0.423	0.00086	0.92	1	0.999	0.92	0.936	0	0.6	0.81	0.67
Engativa	0.000494	0.799	0.00000988	0.41	1	1	0.564	0.00653	0	0.6	0.83	0.51
Fontibón	0.0255	0.123	0	0.39	1	1	0.858	0.172	0.837	0.6	0.95	0.55
Kennedy	0.053	0.729	0.000356	0.44	1	0.99	0.436	0.444	0.959	1	0.95	0.62
La Candelaria	0.16	0.00032	0.00142	0.34	0.373	0.986	1	1	0	1	0.95	0.49
Los Mártires	0	0.0418	0.00127	0.33	1	0.982	0	0.946	0	0.6	0.94	0.48
Puente Aranda	0	0.208	0	0.37	1	0.999	0.858	0.724	0	0.6	0.83	0.52
Rafael Uribe	0.143	0.315	0.00382	0.5	1	0.994	0.142	0.444	0.0408	1	0.83	0.56
San Cristóbal	0.189	0.327	0.0000274	0.82	1	0.973	0	0.18	0	1	0.66	0.59
Santa Fe	1	0.0532	0.0191	0.36	0.763	0.915	0	0	0	1	0.91	0.61
Suba	0.0147	0.756	0.00464	0.41	1	0.997	0	0.875	0.367	0.6	0.82	0.52
Teusaquillo	0	0.051	0.00176	0.05	0.494	0.931	0	0.147	0	0.3	0.87	0.27
Tunjuelito	0.0503	0.102	0.000185	0.45	1	0.986	0.0356	0.444	0	1	0.94	0.53
Usaquen	0	0.26	0.000632	0.33	0.921	0.965	0	0.045	0.633	0.6	0.95	0.46
Usme	0.0568	0.082	0.00685	1	1	1	0.964	0.988	0	0.6	0.95	0.67

Tabla 7 Riesgo sísmico de Bogotá

Localidad	R_F	F	R_T
Antonio Nariño	0,41	0,50	0,62
Barrios Unidos	0,27	0,44	0,38
Bosa	0,18	0,61	0,28
Chapinero	0,47	0,20	0,57
Ciudad Bolívar	0,39	0,75	0,65
Engativa	0,36	0,51	0,54
Fontibón	0,41	0,55	0,64
Kennedy	0,24	0,62	0,38
La Candelaria	0,62	0,49	0,93
Los Mártires	0,47	0,48	0,69
Puente Aranda	0,43	0,52	0,65
Rafael Uribe	0,39	0,56	0,61
San Cristóbal	0,37	0,59	0,58
Santa Fe	0,48	0,61	0,77
Suba	0,25	0,52	0,38
Teusaquillo	0,40	0,27	0,51
Tunjuelito	0,39	0,53	0,60
Usaquen	0,30	0,46	0,44
Usme	0,37	0,67	0,62
Bogotá	0,32	0,55	0,50

**Figura 11** Coeficiente de agravamiento para las localidades de Bogotá, en orden descendente

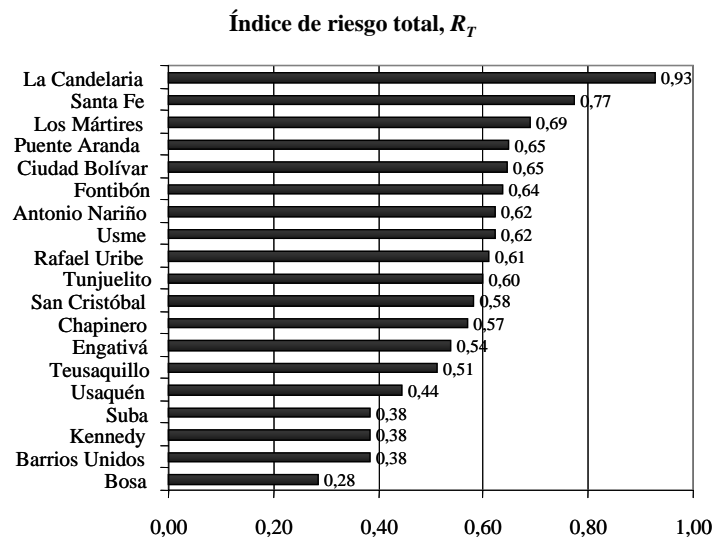


Figura 12 Índice de riesgo total para las localidades de Bogotá, en orden descendente

Bogotá fue estudiada con el primer modelo (modelo Cardona), por lo que es posible comparar los resultados obtenidos. La figura 13 muestra los resultados obtenidos (Cardona, 2001). Este fue el primer análisis integrado del riesgo sísmico de la ciudad. Los resultados obtenidos con el modelo, sólo permiten ordenar las localidades en función de su riesgo total relativo. Aunque los valores del índice son diferentes, la clasificación usando ambos modelos, es similar. Por ejemplo, la localidad de Tunjuelito presenta el menor valor de riesgo total, y la localidad de La Candelaria presenta el mayor riesgo total con el modelo alternativo propuesto y sería el segundo con el modelo anterior. Las otras localidades mantienen un orden similar (figuras 12 y 13).

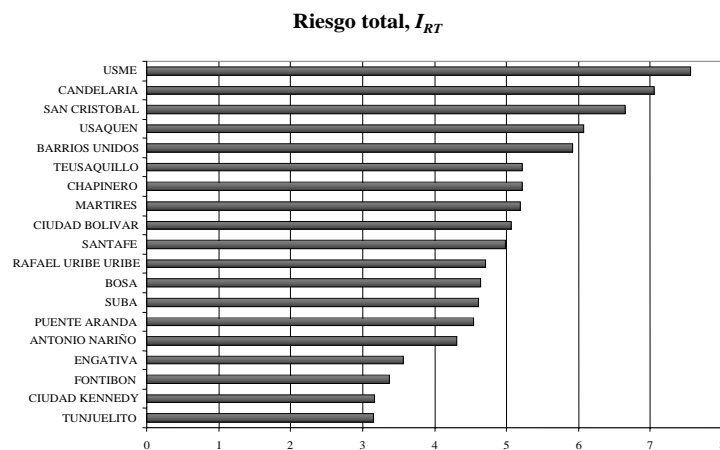


Figura 13 Índice de riesgo total para las localidades de Bogotá, obtenidas con el modelo de Cardona.

3.2 Riesgo Sísmico de Barcelona

La ciudad de Barcelona, España, esta subdividida en 10 distritos (ver figura 14), las cuales están dirigidas por un Alcalde. Los distritos tienen competencias en temas de urbanismo, espacio público, mantenimiento de infraestructuras, etc. Estas localidades son: Ciutat Vella, Eixample, Sants-Montjuïc, Les Corts, Sarrià-Sant Gervasi, Gràcia, Horta-Guinardó, Nou Barris, Sant Andreu and Sant Martí. Los distritos a su vez se subdividen en 38 barrios o zonas estadísticas grandes. Barcelona también está subdividida en 248 zonas estadísticas pequeñas (ZRP). El índice de riesgo físico se calculó de un escenario de riesgo probabilista en el marco del proyecto RISK- UE (ICC/CIMNE, 2004). La figura 15 presenta el escenario de riesgo físico calculado, considerando las 248 zonas ZRP. El factor de impacto se calculó por distrito debido a la disponibilidad de datos a este nivel solamente.



Figura 14 División territorial de Barcelona

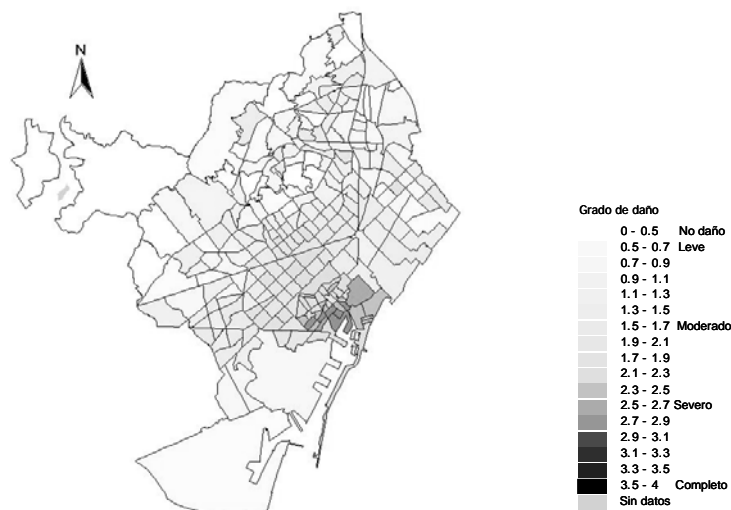


Figura 15 Escenario de riesgo físico para Barcelona, usando los 248 zonas estadísticas menores (ZRP)

La tabla 11 muestra ejemplos de los descriptores de riesgo físico para algunos de los 248 ZRP. La tabla 12 presenta ejemplos de los factores de riesgo físico. La tabla 13 muestra los valores de los descriptores de fragilidad social y falta de resiliencia, y la tabla 14 muestra los factores de agravamiento obtenidos mediante la aplicación de funciones de transformación (Figuras 2 a 4). Adicionalmente, la tabla 14, abajo, muestra los valores promedio de los factores para la ciudad, normalizados usando la densidad de población. La tabla 15 presenta algunos ejemplos de los resultados finales del índice de riesgo físico, el factor de impacto y el índice de riesgo total para cada ZRP. Los pesos son los mismos que los utilizados para Bogotá (tablas 4 y 5). Las figuras 16 a 18 muestran los resultados del índice de riesgo físico, el factor de impacto y el índice de riesgo total para Barcelona usando el modelo arriba propuesto.

Tabla 8 Ejemplos de valores de descriptores de riesgo físico

ZRP	X_{RE1}	X_{RE2}	X_{RE3}	X_{RE4}	X_{RE5}	X_{RE6}	X_{RE7}	X_{RE8}	X_{RE9}
001	16.9	6	12	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.025
002	19.5	10	21	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0
003	19.7	9	19	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0
004	20.5	6	12	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.2
005	20.7	7	15	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.2
006	22.2	5	11	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0
007	24.2	7	14	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.2
008	10.1	3	6	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0
009	8.9	2	5	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0
010	8.3	4	8	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0
...
240	3.9	3	6	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.05
241	1.6	4	8	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0
242	2.4	5	10	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.025
243	11.1	19	40	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.025
244	2.9	7	15	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0
245	8.4	16	34	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0
246	3.3	7	15	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.025
247	3.3	8	18	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.025
248	4.9	9	20	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0

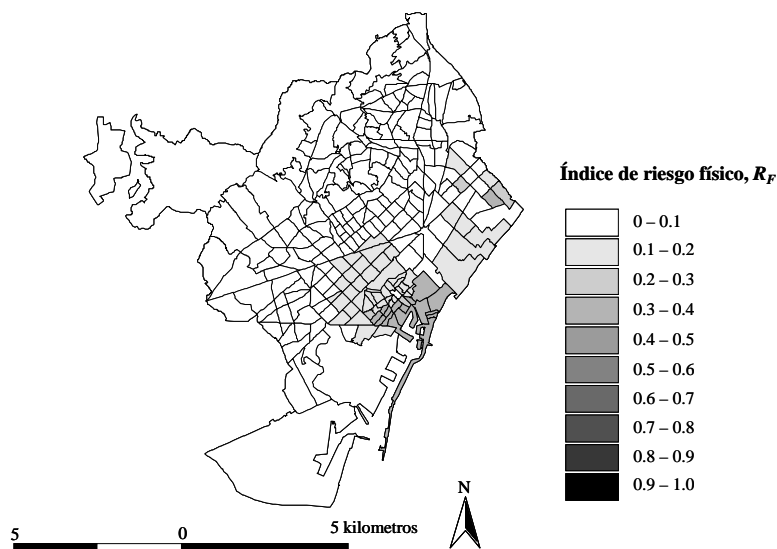


Figura 16 Índice de riesgo físico para Barcelona, usando los 248 zonas estadísticas menores (ZRP)

Tabla 9 Factores e índice de riesgo físico, R_F , para Barcelona

ZRP	F_{RE1}	F_{RE2}	F_{RE3}	F_{RE4}	F_{RE5}	F_{RE6}	F_{RE7}	F_{RE8}	F_{RE9}	R_F
001	0.952	0.0288	0.0512	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.025	0.306
002	0.999	0.08	0.157	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0	0.331
003	1	0.0648	0.128	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0	0.328
004	1	0.0288	0.0512	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.2	0.336
005	1	0.0392	0.08	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.2	0.340
006	1	0.02	0.043	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0	0.316
007	1	0.0392	0.0697	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.2	0.339
008	0.51	0.0072	0.0128	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0	0.172
009	0.396	0.0032	0.00889	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0	0.139
010	0.344	0.0128	0.0228	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0	0.126
...
240	0.0761	0.0072	0.0128	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.05	0.053
241	0.0128	0.0128	0.0228	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0	0.032
242	0.0288	0.02	0.0356	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.025	0.041
243	0.604	0.289	0.564	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.025	0.279
244	0.042	0.0392	0.08	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0	0.048
245	0.353	0.205	0.411	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0	0.183
246	0.0544	0.0392	0.08	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.025	0.054
247	0.0544	0.0512	0.115	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0.025	0.058
248	0.12	0.0648	0.142	0.02	0.02	0.02	0.17	0.32	0	0.078
Barcelona	0.152	0.017	0.033	0.020	0.020	0.020	0.170	0.320	0.031	0.076

Tabla 10 Valores para los descriptores de agravamiento de fragilidad social y falta de resiliencia de Barcelona.

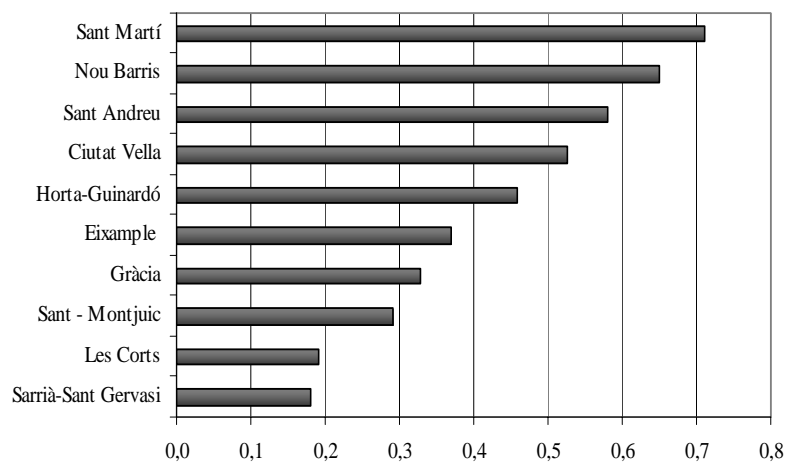
Distrito	X_{ES1}	X_{ES2}	X_{ES3}	X_{ES4}	X_{ES5}	X_{ER1}	X_{ER2}	X_{ER3}	X_{ER4}	X_{ER5}	X_{ER6}
Ciutat Vella	0.2	119	252.87	0.8	12690	4.9650	11	0.0828	15	1	1
Eixample	0	119	60.04	0.3	14186	6.1475	14	0.0180	18	4	1
Sant – Montiuic	0	102	73.61	0.3	6834	0	0	0.1219	15	3	1
Les Corts	0	81	30.99	0.1	14080	10.6864	24	0.0424	18	4	1
Sarrià-Sant Gervasi	0	95	30.99	0	11647	10.8704	24	0.0194	8	4	1
Gràcia	0	115	42.66	0.2	16570	7.1269	16	0.0324	8	4	1
Horta-Guinardó	0.1	95	36.00	0.5	21573	16.1716	36	0.0369	8	2	1
Nou Barris	0.1	95	31.54	0.8	28256	0	0	0.0430	10	1	1
Sant Andreu	0.1	91	31.54	0.5	19890	1.1325	3	0.0198	10	2	1
Sant Martí	0.3	93	42.44	0.8	19069	0	0	0.0337	3	1	1

Tabla 11 Coeficiente de agravamiento, F , calculado con los factores de agravamiento de fragilidad social, F_{FS} , y falta de resiliencia, F_{FR} para Barcelona

Distrito	F_{ES1}	F_{ES2}	F_{ES3}	F_{ES4}	F_{ES5}	F_{FR1}	F_{FR2}	F_{FR3}	F_{FR4}	F_{FR5}	F
Ciutat	0.0918	0.00061	0.0452	0.8	0.342	0.964	0.142	0.461	0	0.5	0.4437
Eixample	0	0.00061	0.000111	0.3	0.471	0.925	0.00889	0.993	0	0.5	0.2796
Sant -	0	0.000347	0.000612	0.3	0.0364	1	1	0.0806	0	0.5	0.2558
Les Corts	0	0.000123	0	0.1	0.461	0.755	0	0.893	0	0.5	0.2270
Sarrià-	0	0.00026	0	0	0.265	0.769	0	0.991	0	0.5	0.1785
Gràcia	0	0.000542	0	0.2	0.678	0.894	0	0.949	0	0.5	0.2947
Horta-	0.0102	0.00026	0	0.5	0.947	0.436	0	0	0	0.5	0.3875
Nou	0.0102	0.00026	0	0.8	1	1	1	0.889	0	0.5	0.6164
Sant	0.0102	0.000215	0	0.5	0.882	0.997	0.92	0.99	0	0.5	0.5042
Sant	0.255	0.000237	0	0.8	0.84	1	1	0.943	0.633	0.5	0.6591
Barcelona	0.04	0.00033	0.00352	0.48	0.69	0.87	0.45	0.75	0.54	0.5	0.42

Tabla 12 Riesgo sísmico de Barcelona

ZRP	R_F	F	R_T
001	0.306	0.444	0,442
002	0.331	0.444	0,479
003	0.328	0.444	0,473
004	0.336	0.444	0,485
005	0.340	0.444	0,491
006	0.316	0.444	0,456
007	0.339	0.444	0,489
008	0.172	0.444	0,248
009	0.139	0.444	0,200
010	0.126	0.444	0,182
...
240	0.053	0.659	0,088
241	0.032	0.659	0,053
242	0.041	0.659	0,068
243	0.279	0.659	0,462
244	0.048	0.659	0,080
245	0.183	0.659	0,303
246	0.054	0.659	0,089
247	0.058	0.659	0,097
248	0.078	0.659	0,130
<i>Barcelona</i>	<i>0.0759</i>	<i>0.42</i>	<i>0.1102</i>

Coeficiente de agravamiento, F , para Barcelona**Figura 17** Coeficiente de agravamiento para los distritos de Barcelona

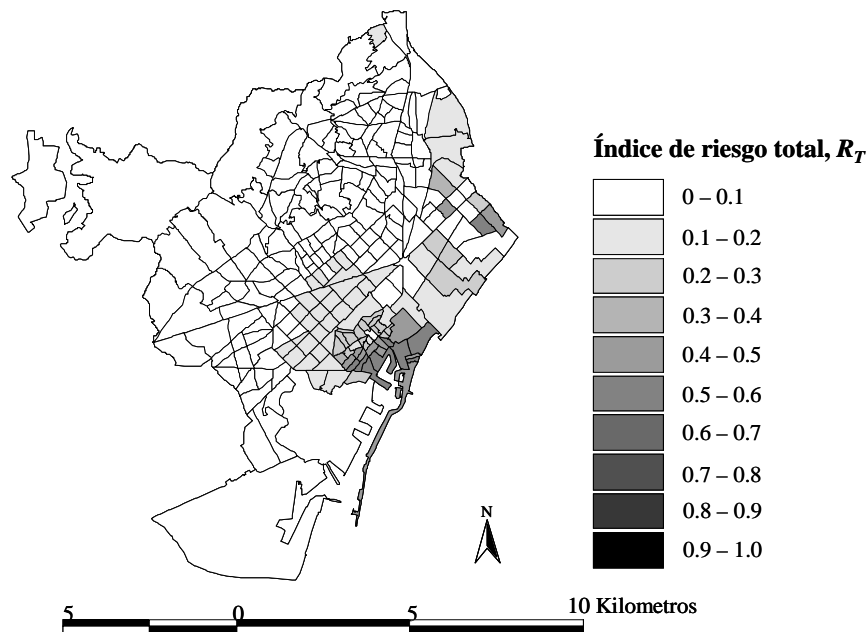


Figura 18 Índice de riesgo total, usando las 248 zonas estadística menores (ZRP)

3.3 Comparación y Discusión de los Resultados

Los resultados obtenidos para Bogotá han sido comparados con los obtenidos para Barcelona. La tabla 16 muestra los valores promedios del riesgo para ambas ciudades. La ciudad de Bogotá está localizada en una zona con amenaza sísmica intermedia, mientras que Barcelona está localizada en una zona con amenaza sísmica baja a moderada. Los valores promedios obtenidos para el índice de riesgo físico, R_F , reflejan claramente esta situación. Cabe mencionar que los resultados obtenidos del coeficiente de agravamiento, F , en las dos ciudades no son muy diferentes. Los valores más bajos de este factor de impacto son similares (0.20 para la localidad de Chapinero en Bogotá y 0.18 para el distrito de Sarriá en Barcelona). La diferencia es más notable para los valores mayores en las dos ciudades (0.67 para la localidad de Usme en Bogotá y 0.71 para el distrito de Sant Martí en Barcelona). Aunque el valor más alto para Barcelona es mayor que el valor más alto para Bogotá, el valor promedio de Barcelona es menor que el de Bogotá, lo que refleja la gran diferencia del riesgo sísmico holístico entre las dos ciudades. La metodología propuesta, permite una evaluación holística del riesgo unificada, lo que permite realizar comparaciones entre otras ciudades diferentes del mundo.

Tabla 13 Comparación de los valores promedio entre Bogotá y Barcelona

Índice	Bogota	Barcelona
Riesgo físico, R_F	0.23	0.08
Factor de Impacto, F	0.66	0.42
Riesgo total, R_T	0.37	0.11

4 CONCLUSIONES

La estimación del riesgo requiere un enfoque multidisciplinar que tenga en cuenta no sólo el daño físico esperado, el número y tipo de víctimas o pérdidas económicas sino también los aspectos sociales, organizacionales e institucionales relacionados con el desarrollo de comunidades, que contribuyen con la creación del riesgo. A nivel urbano, por ejemplo, la vulnerabilidad vista como un factor de riesgo interno, puede ser relacionada no sólo con el nivel de exposición o susceptibilidad física de los edificios y la infraestructura potencialmente afectados, sino también con la fragilidad social y la falta de resiliencia de la comunidad expuesta. La ausencia de organizaciones institucionales y comunitarias, una débil preparación para la respuesta a la emergencia, la inestabilidad política y una economía débil en un área geográfica, contribuyen a aumentar el riesgo. Por todo esto, las consecuencias potenciales negativas no sólo están relacionadas con los efectos de los eventos peligrosos, sino también con la capacidad para absorber los efectos y el control de sus implicaciones en un área geográfica dada.

Se ha sugerido una representación simplificada pero multidisciplinar del riesgo sísmico urbano para la modelación, basado en el uso paramétrico de las variables que reflejan diferentes aspectos del riesgo. Dicho enfoque permite formular un modelo lo más realista posible, en donde mejoras o variables alternativas pueden ser realizadas continuamente. La consideración de aspectos físicos permite la construcción de un índice de riesgo físico. También, las variables contextuales (social, económica, etc.) permitieron la construcción de un coeficiente de agravamiento y mediante éste un factor de impacto. El primero es construido con la información de escenarios sísmicos de daño físico (efectos directos) y el último es el resultado de la estimación de condiciones de agravamiento (efectos indirectos) basados en descriptores y factores relacionados con la fragilidad social y la falta de resiliencia de los elementos expuestos.

Este nuevo modelo para la evaluación holística del riesgo facilita la gestión integral del riesgo por parte de los diferentes actores implicados en la toma de decisiones sobre la reducción del riesgo. Su aplicación permite hacer un seguimiento de la situación de riesgo y la eficacia de las medidas de prevención y mitigación. Los resultados pueden ser analizados y permiten establecer prioridades para la mitigación y acciones de prevención y planeamiento con el fin de modificar las condiciones que tienen una mayor influencia sobre el riesgo de la ciudad. Una vez que los resultados han sido expresados en gráficas para cada localidad o distrito, es fácil identificar los aspectos más relevantes del índice de riesgo total sin necesidad de realizarlos nuevamente para futuros análisis e interpretación de resultados. Finalmente, este método permite comparar el riesgo entre diferentes ciudades del mundo y realizar un análisis de riesgo multiamenaza.

APENDICE A CÁLCULO DE LOS FACTORES DE PONDERACION.

El Proceso Analítico Jerárquico – (PAJ) es una técnica usada para la toma de decisiones con atributos múltiples (Saaty, 1987, 2001; Saaty y Vargas, 1991). Permite la descomposición de un problema en una jerarquía y asegura que tanto los aspectos cualitativos y cuantitativos de un problema sean incorporados en el proceso de evaluación durante la cual la opinión es extraída sistemáticamente por medio de comparaciones entre pares (*pairwise*). El PAJ permite la aplicación de datos, experiencia, conocimiento e intuición de una forma lógica y profunda dentro de una jerarquía como un todo.

El PAJ es una metodología de decisión compensatoria porque las alternativas que son eficientes con respecto a uno o más objetivos pueden compensarse mediante su desempeño con respecto a otros objetivos. En particular, el PAJ como método de ponderación permite a los

tomadores de decisiones derivar pesos contrastantes a los asignados en forma arbitraria (JRC-EC, 2002, 2003).

El núcleo del PAJ es una comparación de atributos entre pares ordinales; subindicadores en este contexto, en los cuales los enunciados de preferencia son identificados. La fortaleza de la preferencia es expresada en una escala semántica de 1 a 9, lo que permite la medida dentro del mismo orden de magnitud. Una preferencia de 1 indica igualdad entre dos subindicadores mientras que una preferencia de 9 indica que un subindicador es 9 veces más grande o más importante que aquel con el que es comparado. Estas comparaciones resultan en una matriz (tabla A.1), en la cual, por ejemplo, el factor F_{RF7} es cinco veces más importante que el factor F_{RF1} .

Los pesos relativos de los subindicadores son calculados utilizando una técnica de vectores propios. Una de las ventajas de este método es que permite verificar la consistencia de la matriz de comparación a través del cálculo de los valores propios y de un índice consistente.

El PAJ tolera la inconsistencia a través de la cantidad de redundancia. Para una matriz de tamaño $n \times n$, sólo comparaciones $n-1$ son requeridas para establecer pesos para los indicadores n . El número real de comparaciones realizadas en el PAJ es $n \times n(n-1)/2$. Esta redundancia es una característica útil como lo es, en forma análoga, la estimación de un número como resultados de obtener el promedio de repetidas observaciones. Esto resulta en un conjunto de pesos que son menos sensitivos a errores de juicio. Además, esta redundancia permite la medición de los errores de juicio al dar medios para calcular una relación de inconsistencia (Saaty 1980; Karlsson 1998).

$$CR = \frac{CI}{CI_{random}} \quad (A.1)$$

Obtenida como la relación entre un índice de consistencia

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (A.2)$$

y el valor del mismo índice de consistencia CI_{random} obtenido para una matriz de comparaciones generada aleatoriamente, donde λ_{max} es el valor propio principal de la matriz de comparación por pares. De acuerdo con Saaty, se asegura una buena exactitud para relaciones de consistencia pequeños (CR menor que 0.1 sugiere como regla de medida gruesa, aunque incluso 0.2 es citado). Si no se consigue esta condición, el problema tiene que ser estudiado nuevamente y la matriz de comparación revisada. Una vez que se logra una buena consistencia, el vector propio principal es calculado y normalizado. Esta normalización se realiza mediante la división de cada elemento del valor propio por la suma de los valores de sus elementos. Los elementos de este valor propio son los valores de los factores de peso. La tabla A.2 muestra los factores de peso obtenidos comenzando por la matriz de comparación de pares de la tabla A.1. La tabla A.3 contiene la matriz de comparación de pares para los factores de agravamiento obtenidos de la opinión de expertos y los pesos calculados mediante la aplicación de PAJ se dan en la Tabla A.4.

Tabla A 1 Matriz de comparaciones para el riesgo físico

	F_{RF1}	F_{RF2}	F_{RF3}	F_{RF4}	F_{RF5}	F_{RF6}	F_{RF7}	F_{RF8}
F_{RF1}	1	4	4	2	3	3	5	5
F_{RF2}	0.25	1	1	0.5	1	1	3	3
F_{RF3}	0.25	1	1	0.5	1	1	3	3
F_{RF4}	0.50	2	2	1	2	2	4	4
F_{RF5}	0.33	1	1	0.5	1	1	3	3
F_{RF6}	0.33	1	1	0.5	1	1	3	3
F_{RF7}	0.20	0.33	0.33	0.25	0.33	0.33	1	1
F_{RF8}	0.20	0.33	0.33	0.25	0.33	0.33	1	1

Valor propio = 8.11

CI = 0.0152

CR = 0.0108

Tabla A2 Importancia para el riesgo físico

	Vector propio principal	Vector prioritario
F_{RF1}	0.7410	0.31
F_{RF2}	0.2420	0.10
F_{RF3}	0.2420	0.10
F_{RF4}	0.4368	0.19
F_{RF5}	0.2496	0.11
F_{RF6}	0.2496	0.11
F_{RF7}	0.0958	0.04
F_{RF8}	0.0958	0.04

Tabla A3 Matriz de comparaciones para el coeficiente de agravamiento

	F_{FS1}	F_{FS2}	F_{FS3}	F_{FS4}	F_{FS5}	F_{FR1}	F_{FR2}	F_{FR3}	F_{FR4}	F_{FR5}	F_{FR6}
F_{FS1}	1	4	4	1	1	3	3	4	4	3	3
F_{FS2}	0.25	1	1	0.25	0.25	0.5	0.5	1	1	0.5	0.5
F_{FS3}	0.25	1	1	0.25	0.25	0.5	0.5	1	1	0.5	0.5
F_{FS4}	1	4	4	1	1	3	3	4	4	3	3
F_{FS5}	1	4	4	1	1	3	3	4	4	3	3
F_{FR1}	0.33	2	2	0.33	0.33	1	1	2	2	0.5	0.5
F_{FR2}	0.33	2	2	0.33	0.33	1	1	2	2	0.5	0.5
F_{FR3}	0.25	1	1	0.25	0.25	0.5	0.5	1	2	0.33	0.33
F_{FR4}	0.25	1	1	0.25	0.25	0.5	0.5	0.5	1	0.33	0.33
F_{FR5}	0.33	2	2	0.33	0.33	2	2	3	3	1	1
F_{FR6}	0.33	2	2	0.33	0.33	2	2	3	3	1	1

Valor propio = 11.24

CI = 0.024

CR = 0.016

Tabla A4 Importancia para el coeficiente de agravamiento

	Vector propio principal	Vector prioritario
F_{FS1}	1.0000	0.18
F_{FS2}	0.2136	0.04
F_{FS3}	0.2136	0.04
F_{FS4}	1	0.18
F_{FS5}	1	0.18
F_{FR1}	0.33928	0.06
F_{FR2}	0.33928	0.06
F_{FR3}	0.21601	0.04
F_{FR4}	0.1895	0.04
F_{FR5}	0.47833	0.09
F_{FR6}	0.47833	0.09

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Banco Interamericano de Desarrollo (BID) por el soporte financiero a través del Programa de Indicadores de Gestión de Riesgos de Desastres para Latinoamérica y el Caribe (Operación ATN/JF-7907-RG) y al Ministerio de Educación y Ciencia de España, Programa PROFIT, proyecto "Desarrollo de nuevas tecnologías en materiales y procesos de fabricación de componentes orientados a su integración en edificios (Habitat 2030)" (PSS-380000-2006-10).

REFERENCIAS

Barbat, A. H. y Cardona O. D.: 2003, "Vulnerability and disaster risk indices from engineering perspective and holistic approach to consider hard and soft variables at urban level", Programa de Indicadores de Riesgo y Gestión de Riesgos BID/IDEA, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Disponible en: <http://idea.unalmz.edu.co>, Universidad Nacional de Colombia, Manizales.

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. and Wisner, B.: 1996, *Vulnerability, the social environment of the disasters* (in Spanish), La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, La RED/ITDG, Bogota.

Cannon, T.: 1994, "Vulnerability analysis and the explanation of Natural Hazards", in A. Varley (ed.), *Disasters Development and Environment*, Wiley, Chichester.

Cardona, O. D.: 1996, "Environmental management and disaster prevention: two associated topics", en M. A. Fernández (ed.), *Cities in Risk* (en Español), La RED, USAID.

Cardona, O.D. (2001). "Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos" Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Cardona, O.D.: 2004, "The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: a necessary review and criticism for effective risk management", in G. Bankoff, G. Frerks, D. Hilhorst (eds.), *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*, Earthscan Publishers, Londres, UK.

Cardona, O.D. and Barbat, A.H.: 2000, *The Seismic risk and its prevention* (in Spanish), Calidad Siderúrgica, Madrid, España.

Cardona, O.D. and Hurtado J.E.: 2000, "Holistic seismic risk estimation of a metropolitan center", en *Proceedings of 12th World Conference of Earthquake Engineering*, Auckland, Nueva Zelanda.

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.

Carreño, M.L., Cardona, O.D. and Barbat, A.H.: 2005, *System of Indicators for the risk*, Monografía de Earthquake Engineering, IS-52, Editor A.H. Barbat, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE),, Barcelona, España.

Chambers, R.: 1989, "Vulnerability, coping and policy", *IDS Bulletin No. 20*, Institute of Development Studies, Sussex.

Coburn, A. and Spence R.: 1992, *Earthquake protection*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.

Douglas, M. and Wildavsky, A.: 1982, *Risk and Culture: An Essay on the Selection of Technological and Environmental Dangers*. Berkeley, Prensa de la Universidad de California.

Dynes, R.R. and Drabek, T.E.: 1994, "The structure of disaster research: its policy and disciplinary implications", *International Journal of Mass Emergencies and Disasters* 12:5-23.

FEMA: 1999, *Earthquake Loss Estimation Methodology, HAZUS*, National Institute of Building Science for Federal Emergency Management Agency, Washington.

Funtowicz, S., & Ravetz, J. 1992, The Role of Science in Risk Assessment. *Social Theories of Risk*. Ed. S. Krimsky y D. Golding. Westport, Praeger: 59-88.

ICC/CIMNE: 2004, *An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns, WP08, Application to Barcelona*, RISK-UE Project.

JRC-EC: 2002, *State-of-the-art Report on Current Methodologies and Practices for Composite Indicator Development*. Applied Statistics Group, Joint Research Centre, European Commission, Ispra, Italia.

JRC-EC: 2003, *First Workshop on Composite Indicators of Country Performance*. Applied Statistics Group, Joint Research Centre, European Commission, Ispra, Italia.

Karlsson J.: 1998, *A systematic approach for prioritizing software requirements*, Ph.D. dissertation No.526, Linkoping, Sverige.

Kasperson, R.E., Renn O., Slovic P., Brown H.S., Emel J., Goble R., Kasperson J.X., and Ratick S.: 1988, "The social amplification of risk: A conceptual framework", *Risk Analysis* 8(2):177-187.

Kates, R. W.: 1971, "Natural hazard in human ecological perspective: hypotheses and models", *Economic Geography*, 47(3), 438-451, Clark University.

Lavell, A.: 1996, "Environmental degradation, risk and urban disaster. Problems and concepts: towards the definition of a research schedule" (in Spanish), in M. A. Fernández (ed.), *Cities in Risk* (in Spanish), La RED, USAID.

Mansilla, E.: 1996, (Ed.) *Disasters: a model to construct*, La RED, Lima, Perú.

Maskrey, A.: 1994, "Community and disasters in Latin America: Intervention strategies" (in Spanish), in Allan Lavell (ed.), *Living at risk: Vulnerable communities and disaster prevention in Latin America* (in Spanish), LA RED, Tercer Mundo Editores, Bogotá, Colombia.

Masure, P.: 2003, "Variables and indicators of vulnerability and disaster risk for land-use and urban or territorial planning", Programa de Indicadores para la Gestión de Riesgos, BID/IDEA. Disponible en: <http://idea.unalmz.edu.co>, Universidad Nacional de Colombia, Manizales.

Palmlund, I.: 1989, *The Case of Estrogens: An Inquiry Into Social Risk Evaluation*, Unpublished doctoral dissertation, Clark University.

Quarantelli, E.L.: 1988, "Disaster studies: an analysis of the social historical factor affecting the development of research in the area", *International Journal of Mass Emergencies*, Vol. 5(3) pp.285-310.

Rayner, S.: 1992, "Cultural theory and risk analysis", in S. Krimsky and D. Golding, (eds.), *Social Theories of Risk*, Praeger, West Port, CT.

Saaty T.L.: 1987, "The analytic hierarchy process: what it is and how it is used", *Mathematical Modeling*, 9, 161-176.

Saaty, T.L. and Vargas, L.G.: 1991, *Prediction, Projection, and Forecasting: Applications of the Analytical Hierarchy Process in Economics, Finance, Politics, Games, and Sports*, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA.

Saaty T. L.: 2001, *Decision making for leaders the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*, Pittsburgh RWS, USA.

Susman, P., O'Keefe, P. and Wisner, B.: 1984, *Global disasters: A Radical Interpretation*, pp. 264-83 in Hewitt 1984.

UNDRO: 1980, *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*, Report of Experts Group Meeting, UNDRO, Geneva.

Universidad de los Andes: 1996, *Seismic microzonation of Santa Fe de Bogotá (in Spanish)*, Ingeominas, 17 volumes, Bogotá, Colombia.

Wesgate, K.N. and O'Keefe, P.: 1976, "Some definitions of disaster", paper No. 4, *Disaster Research Unit*, University of Bradford.

Wijkman, A. and Timberlake, L.: 1984, *Natural Disasters: Act of God or Acts of Man*, Earthscan, Washington.

White, G. F.: 1964, "Choice of adjustment of floods", Research Paper 93, Department of Geography, Universidad de Chicago.

Whitman, R.V.: 1973, *Damage Probability Matrices for Prototype Buildings*, Structures Publication 380, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts.

Wilches-Chaux G.: 1989, *Desastres, ecologism and professional education* (in Spanish), SENA, Popayán, Colombia.

Wisner, B.: 1993, "Disaster vulnerability: scale, power and daily life", *GeoJournal* 30(2):127-40.

Zapata, R.: 2004, personal communication in Washington.