

–Applied Technology Council–, ATC-13/FEMA, en el marco de un escenario sísmico hipotético.

Muertos por sismo, X_{S2} , y heridos por sismo, X_{S3}

Se definen como el número probable de muertos y heridos, utilizando estimativos similares a los propuestos por Whitman *et al.* (1973) y ajustados en el ATC-13/FEMA, en el marco de un escenario sísmico hipotético.

Roturas de la red de acueducto, X_{S4} , roturas de la red de gas, X_{S5} y longitud caída de las redes eléctricas, X_{S6}

Definidos como el número probable de roturas que se presentarían en las redes de acueducto, gas y la longitud caída de la red eléctrica, estimados según la metodología de la ATC-13 (*Applied Technology Council*, 1985), en el marco de un escenario sísmico hipotético.

Vulnerabilidad de centrales telefónicas, X_{S7} , vulnerabilidad de subestaciones eléctricas, X_{S8}

Se definen como el factor de riesgo interno de las centrales telefónicas y subestaciones eléctricas ante la amenaza de un escenario sísmico hipotético, según los parámetros de la ATC-21, y de acuerdo con parámetros adicionales del *Estudio de vulnerabilidad sísmica de edificaciones y líneas vitales* (Microzonificación Sísmica, 1996).

Es importante anotar que, aunque era posible utilizar valores de aceleración espectral o de amenaza sísmica solamente, se consideró de mayor utilidad referir al factor de amenaza los valores ya calculados de las consecuencias en el *Estudio de vulnerabilidad sísmica de edificaciones y líneas vitales*, dado que para efectos de un análisis comparativo del potencial de peligro en caso de terremoto, tiene mayor significado utilizar los valores ya relacionados entre la amenaza y la vulnerabilidad física de los elementos expuestos.

Se consideraron los tres escenarios de pérdidas del *Estudio de vulnerabilidad sísmica de edificaciones y líneas vitales*, para un sismo lejano con una aceleración en el basamento rocoso de 0,038g (3,8% del valor de la gravedad), un sismo cercano moderado de aceleración de 0,12g (12% del valor de la gravedad) y un sismo cercano fuerte de aceleración de 0,20g (20% del valor de la gravedad).

Debido a las características de los suelos de la ciudad (*véase* gráfico 2), el tipo de edificaciones existentes y los espectros de diseño especificados en cada zona (*véase* gráfico 3), podrían esperarse daños o pérdidas en cada escenario que no obedecen a una relación lineal con respecto al valor de la aceleración en la roca, es decir, las pérdidas o daños en cada escenario no tienen una relación proporcional con el valor de aceleración en el basamento rocoso cuando ocurre un sismo. Esto obedece, entre muchas variables, al tipo de suelo –blando o firme–, el tipo de estructura construida sobre ese suelo –de mampostería, aporricada, combinada, etcétera– y a la altura de la edificación –cantidad de pisos–. Por tanto, los resultados de las pérdidas para cada sismo se adicionaron, no obstante que dicho valor acumulado no podría ocurrir en la realidad. Sin embargo, en términos de comparación relativa entre las diferentes localidades, estos valores son indicativos del grado de severidad de los efectos por terremoto en cada una de ellas.

Los cuadros 1A a 1G, presentan los valores reales de los indicadores para cada uno de los escenarios. Los gráficos 5A a 5E muestran los valores de los indicadores para escenario sísmico en histogramas por localidad

Histogramas de cada uno de los indicadores que componen el escenario sísmico – área destruida por sismo, muertos por sismo, heridos por sismo, roturas de acueducto, roturas en la red de gas, longitud caída de la red eléctrica, vulnerabilidad de las centrales telefónicas y vulnerabilidad de las subestaciones eléctricas–, se muestran en los gráficos 6A a 6C. Los valores finales para el escenario sísmico por localidad se exponen en el histograma del gráfico 7.

AMENAZAS AISLADAS, A_1

Las amenazas de inundación y deslizamientos se obtuvieron en parte de los mapas del *Estudio de microzonificación sísmica* y se verificaron con visitas de campo realizadas por expertos. Se definieron varios indicadores, que fueron normalizados de acuerdo con el área de cada localidad. Dichos indicadores son los siguientes:

Área inundable con alta probabilidad, X_{A1} , y área inundable con moderada probabilidad, X_{A2}

Definidas como las áreas que presentan alta y moderada probabilidad de inundación respectivamente. La determinación de estas áreas se obtuvo en forma global para cada localidad con base en la información secundaria y las visitas de campo. Esta información debe considerarse como indicativa dado que aún no existen estudios detallados en todas las localidades que permitan obtener valores más precisos o de mayor resolución

Área con alta susceptibilidad de deslizamiento, X_{A3} , área con moderada susceptibilidad de deslizamiento, X_{A4}

Se definen como las áreas construidas cercanas a zonas habitadas, que presentan alta y moderada probabilidad de deslizamiento respectivamente. Estas áreas fueron determinadas por medio de una recopilación de información existente sobre amenazas geotécnicas en el oriente de Santa Fe de Bogotá y por medio de un mejoramiento de dicha información tal y como se muestra en el informe del Anexo 4. De nuevo se anota que dicha información debe considerarse como indicativa dado que aún no existen estudios detallados en las localidades afectadas, que permitan obtener valores más precisos o de mayor resolución.

Los gráficos 8A a 8E muestran los valores de los indicadores para amenazas aisladas por localidad en histogramas. De igual manera, en los gráficos 9A y 9B, se presentan histogramas de cada uno de los indicadores que componen la amenaza aislada –área inundable con alta y moderada probabilidad y área con alta y moderada susceptibilidad al deslizamiento–. Los valores finales para la amenaza aislada por localidad se exponen en el histograma del gráfico 10.

VULNERABILIDAD, V

La vulnerabilidad se obtuvo de agregar tres componentes que, de acuerdo con la información disponible, reflejarán los valores expuestos y las debilidades físicas, sociales y de organización para enfrentar emergencias. Los componentes del factor de vulnerabilidad son exposición, fragilidad social y resiliencia (falta de). La resiliencia se refiere a la capacidad de recuperación y absorción de los eventos, por tanto, su cuantificación en términos de vulnerabilidad es el inverso o “falta de”. Los componentes del factor se describen a continuación.

EXPOSICIÓN, V_E

La exposición se refiere, en general, a la cantidad de personas, elementos y valores expuestos a las amenazas en cada localidad. De manera indirecta, mide valores estratégicos de tipos económico e institucional relacionados con la dependencia o importancia de dichos elementos no sólo para la localidad sino para la ciudad y, en ocasiones, para la nación, que en caso de ser afectados pueden significar graves traumatismos que incluso comprometen la estabilidad de la ciudad o del país. Se definieron varios indicadores, normalizados de acuerdo con el área de cada localidad. Los indicadores son los siguientes:

Población, X_{E1} , y densidad poblacional, X_{E2}

La población se muestra por cada localidad del distrito. Los datos de población fueron obtenidos del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas –Dane–; la densidad poblacional se trabajó con un sistema de información geográfica –SIG, y se definió como la población del área de la localidad local correspondiente.

Área construida, X_{E3} , área industrial, X_{E4} , área institucional, X_{E5}

Definida como el área construida constituida en su mayor parte por viviendas, zonas comerciales, construcciones para oficinas y construcciones menores, con base en la información proporcionada por Catastro. El área industrial, como su nombre lo indica, corresponde al área que se ocupa para fines industriales y de almacenamiento industrial localizada dentro del distrito capital. El área institucional corresponde a las construcciones especiales de valor estratégico y político, entre ellas edificaciones gubernamentales, embajadas, consulados, centros militares y de policía, etcétera.

Área de estratos económicos 5 y 6, X_{E6}

Se define como el área clasificada en los estratos 5 y 6, según información de la sectorización realizada por el Dane, consignada en el *Estudio de microzonificación sísmica*.

El cuadro 2 presenta los valores no normalizados de las variables utilizadas para representar la exposición por cada localidad

Los gráficos 11A a 11E muestran los valores de los indicadores que componen la exposición –población, densidad poblacional, áreas construidas, industrial e institucional, y área de los estratos 5 y 6–, en histogramas.

Histogramas de cada uno de los indicadores que componen la exposición se muestran en los gráficos 12A a 12C. Los índices de exposición por localidad se muestran en el gráfico 13.

FRAGILIDAD SOCIAL, V_F

Este componente hace referencia a las debilidades que las comunidades tienen en términos económicos y sociales en cada localidad. Aun cuando podrían considerarse otras variables adicionalmente, se tuvieron en cuenta algunas sobre las cuales hubiese información confiable para cada unidad de análisis y que reflejaran en lo posible aspectos diferentes, sin desestimar que en términos estrictos todas están relacionadas entre sí. Se definieron los siguientes indicadores, normalizados de acuerdo con el área de cada localidad.

Área de barrios sin legalizar o marginales, X_{F1} , y área de estratos socioeconómicos 1 y 2, X_{F2}

Definidos como el área de asentamientos urbanos subnormales y el área clasificada en los estratos 1 y 2. La información se obtuvo principalmente de la Departamento Administrativo Distrital de Planeación y de la sectorización realizada por el Dane.

Mortalidad (tasa por mil habitantes), X_{F3} , delitos (tasa por mil habitantes), X_{F4}

Se definen como la cantidad de muertes certificadas –certificados de defunción para expedir las licencias de inhumación y cremación– y los delitos cometidos y denunciados ante las autoridades competentes, tales como asaltos a residencias, atracos a personas, asaltos bancarios y hurto de vehículos en una tasa por mil habitantes. La información se obtuvo de la Secretaría Distrital de Salud, en lo relacionado con las cifras de mortalidad, y del proyecto sistema de información estadística distrital –Sied, 1995–, en lo referente a delitos por mil habitantes.

Índice de disparidad local, X_{F5}

Lo define el proyecto sistema de información estadística distrital como un indicador socioeconómico específico, que discrimina de mejor manera el índice de desarrollo humano de la capital. Según el Sied, el índice incluye en su construcción factores como capital humano, ingresos, necesidades básicas, etcétera. Del informe del Sied vale la pena anotar que las disparidades más evidentes en el distrito capital son las referentes a los niveles de ingreso personal que son resultado de las disparidades en los niveles educativos.

El cuadro 3 muestra el valor de las variables con las cuales se estimó el componente de fragilidad social de cada una de las localidades.

Los gráficos 14A a 14E muestran en los histogramas los valores de los indicadores para la fragilidad social –área de barrios sin legalizar, áreas de estratos 1 y 2, mortalidad, índice de disparidad local y delitos por mil habitantes–. Diagramas de barras de cada uno de los indicadores que componen la fragilidad social se muestran en los gráficos 15A a 15C. Los valores finales para la fragilidad social por localidad se exponen en el histograma del gráfico 16.

RESILIENCIA (FALTA DE), V_r

La resiliencia es la capacidad de respuesta o recuperación posterior al impacto; por tanto, en este caso se refiere a la disponibilidad de recursos físicos, humanos y de organización para la respuesta en caso de emergencia. Para su valoración se escogieron sólo algunas variables que podrían representarla de la mejor manera sin que se presentara excesiva duplicación, es decir, variables que tienden a cuantificar lo mismo. No obstante, es importante mencionar que en términos estrictos todas están relacionadas entre sí y en ocasiones tienden a cuantificar aspectos comunes. Quedaron definidos varios indicadores que, en su mayoría, fueron normalizados de acuerdo con el área de cada localidad. Esos indicadores son los siguientes:

**Camas hospitalarias (no incluye servicio de urgencias), X_{R1} ,
camas en los servicios de urgencias, X_{R2}**

Definidos como el número de camas disponibles según el último reporte realizado por la Secretaría Distrital de Salud, en los servicios de hospitalización y los en servicios de urgencias.

Instituciones de nivel II, X_{R3} , instituciones de nivel III, X_{R4}

Indican el número de instituciones de nivel de atención II y III. Los valores no normalizados, es decir, los valores por localidad para las instituciones de nivel II, fueron determinados así:

- 0: No existen.
- 1: Cantidad menor a 3.
- 2: Cantidad mayor o igual a 3.

De manera análoga se trabajó con las instituciones de nivel III, definiendo los valores no normalizados así:

- 0: No existen.
- 1: Existen.

La información sobre el número de centros médicos por localidad y su nivel de atención, lo mismo que los factores para los valores no normalizados, fue suministrada por la Secretaría Distrital de Salud.

Recurso humano en salud, X_{R5} , recurso humano en salud en los servicios de urgencias, X_{R6}

Definidos como la cantidad de médicos, enfermeras y auxiliares en los servicios distintos a los de urgencias y en los servicios de urgencias respectivamente. La información fue suministrada por la Secretaría Distrital de Salud.

Capacidad de expansión en los servicios de urgencias, X_{R7} , capacidad de albergue con infraestructura sanitaria satisfactoria, X_{R8}

Se definen como la capacidad de expansión de los centros de atención médica en sus servicios de urgencias por localidad, expresada en los valores no normalizados como un porcentaje,

y la capacidad de albergue con infraestructura sanitaria satisfactoria, es decir, con sanitarios, lavamanos y duchas, según información suministrada por la Secretaría Distrital de Salud.

Espacios públicos para atención masiva, X_{R9}

Definido como las áreas de cada localidad que pueden ser utilizadas como centros de atención masiva en caso de una emergencia. Están constituidas por parques, zonas verdes amplias y canchas deportivas públicas, según información tomada del *Estudio de microzonificación sísmica* (1996)

Socorristas defensa civil y Cruz Roja, X_{R10} , personal de bomberos, X_{R11}

Como se indica, están definidos como la cantidad de personal que las instituciones de apoyo –defensa civil, Cruz Roja y bomberos– tienen en cada una de las localidades, según información suministrada por la Secretaría Distrital de Salud.

Estaciones, subestaciones y centros de atención inmediata de la Policía, X_{R12}

Considera el número de centros en los que opera la Policía Nacional en cada localidad –estaciones, subestaciones y CaI–. La información fue suministrada por la Policía Metropolitana de Santa Fe de Bogotá.

Máquinas de bomberos, X_{R13} , ambulancias y otros vehículos, X_{R14}

Establecen la cantidad de vehículos que utilizan tanto la Secretaría Distrital de Salud como las instituciones de apoyo –bomberos, Cruz Roja y Defensa Civil–. Se tienen en cuenta también las ambulancias de la Defensa Civil, la Cruz Roja y otros vehículos.

Nivel de desarrollo de la localidad, X_{R15} , operatividad del comité de emergencias, X_{R16}

Están definidos como el índice de desarrollo socioeconómico de la localidad, obtenido del proyecto sistema de información estadística distrital, y de la calificación dada por la Secretaría Distrital de Salud a cada uno de los comités de emergencia del distrito por localidad.

Los cuadros 4A a 4D presentan los valores de las variables con las cuales se estimó el componente de resiliencia para cada una de las localidades, y el cual, de manera inversa, se convierte en un componente de la vulnerabilidad, es decir, la falta de resiliencia.

Los gráficos 17A a 17J muestran los valores de los indicadores para la resiliencia en histogramas –número de camas en los servicios hospitalarios distintos a los servicios de urgencias y las de los servicios de urgencias; número de instituciones de niveles II y III, recurso humano en salud en los servicios distintos a los servicios de urgencias y el recurso humano del servicio de urgencias; capacidad de expansión de los servicios de urgencias, capacidad de albergue con infraestructura sanitaria satisfactoria, espacios públicos de atención masiva; número de socorristas, bomberos, centros de policía, número de máquinas de bomberos, ambulancias; nivel de desarrollo de la localidad y operatividad del comité de emergencias– en cada localidad.

Los gráficos 18A a 18H muestran los indicadores de resiliencia por localidad. Los valores finales para la resiliencia se exponen en los histogramas del gráfico 19.

PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN

El procedimiento para construir un índice que permita realizar la valoración relativa de la vulnerabilidad y el riesgo de un área, segmento o unidad de análisis, en este caso de cada localidad, requiere las siguientes fases o etapas:

1. Una investigación sistemática de todos los factores que deben ser considerados, de carácter técnico, social, económico, político o cultural, que contribuyen a la vulnerabilidad o al riesgo de la unidad de análisis, tal como se ilustró anteriormente.
2. El desarrollo de un modelo matemático para la organización de dichos factores, que permita entender cómo están relacionados estos factores y cómo su acumulación hace más vulnerable o aumenta el riesgo en la unidad de análisis.
3. La definición de factores o indicadores simples y cualitativos que sinteticen de manera medible el marco conceptual, para efectos de análisis cuantitativos.
4. La combinación o convolución matemática en un índice de valoración de la vulnerabilidad o riesgo.
5. El análisis de las unidades de análisis para efectos de categorización.

ENFOQUE

El índice de vulnerabilidad o riesgo relativo, que dependerá que sea lo uno o lo otro si alguno de los factores que se consideran representa una variable de amenaza natural o antrópica, se puede estimar como una combinación lineal así:

$$I = \sum_i w_i x_i'$$

Donde x_i' son los indicadores que representan los factores que contribuyen a la vulnerabilidad o el riesgo y w_i son sus pesos de importancia relativa en el índice general o total de vulnerabilidad o riesgo.

Expresar el resultado como una combinación lineal implica que no existe interacción entre los indicadores o entre los indicadores y los pesos utilizados para la ponderación, aspecto que puede ser motivo de debate en muchos casos. No obstante, casi todos los índices de este tipo desarrollados hasta la fecha usan un enfoque basado en una combinación lineal y la búsqueda de otros enfoques ha permitido concluir que la combinación lineal es la

mejor disponible. Hacer de un índice de vulnerabilidad o riesgo una función no lineal puede llegar a ser más realista, pero no es claro qué tipo de función podría ser y la complejidad asociada hace que el enfoque termine por ser inconsistente con el objetivo de buscar una metodología sencilla para obtener un índice fácil de evaluar y de fácil entendimiento.

Ahora bien, la combinación lineal requiere escalar los indicadores en unidades conmensurables y determinar el peso asociado con cada indicador, aspectos que se tratan a continuación.

ESCALONAMIENTO

Antes de integrar los indicadores componentes del índice de vulnerabilidad o riesgo mediante una combinación lineal, deben ser escalados en unidades compatibles de medida. Indicadores de población y área construida, por ejemplo, no pueden ser sumados directamente, porque en el primero se utiliza número de personas y en el segundo unidades de área. Suponiendo que un indicador tiene un valor de diez para una unidad de análisis y veinte para otra, el escalamiento interpreta que existe una diferencia de diez unidades al compararlo con otros valores del indicador. Si otras unidades de análisis tienen valores entre diez y once, la interpretación sería diferente de si ellas tienen valores entre cero y mil. El escalamiento es estrictamente una operación matemática que hace parte del proceso de calibración. Cinco opciones de escalamiento se presentan a continuación:

Cada indicador puede ser traducido sin unidades mediante la normalización con respecto a:

1. Los valores máximo y mínimo valor considerados posibles para el indicador:

$$x_{ij}' = (x_{ij} - \text{min posible}_i) / (\text{max posible}_i - \text{min posible}_i)$$

2. Los máximos y mínimos valores observados para el indicador en cierta muestra de unidades de análisis –áreas o segmentos–:

$$x_{ij}' = (x_{ij} - \text{min observado}_i) / (\text{max observado}_i - \text{min posible}_i)$$

3. La media:

$$x_{ij}' = (\bar{x}_i - x_{ij}) / s_i$$

4. La media menos dos desviaciones estándar:

$$x_{ij}' = \{x_{ij} - (\bar{x}_i - 2s_i)\} / s_i$$

Las variables x_{ij} y x_{ij}' son el dato crudo y el valor escalado para el indicador i y el área o segmento j , respectivamente; \bar{x}_i y s_i son la media y la desviación estándar de una muestra de áreas o segmentos para el indicador i . Cada una de las formulaciones antes mencionadas se

refiere a indicadores directamente proporcionales al índice de vulnerabilidad o riesgo. También es posible utilizar indicadores inversamente proporcionales que se expresarían como:

$$(-x_y) \text{ ó } (1 - x_y)$$

Una quinta posibilidad es la determinación de una función para cada indicador, con el fin de relacionar el dato crudo del indicador con el índice de vulnerabilidad o riesgo directamente. Esta opción permite desarrollar tanto el trabajo de escalar como el de ponderar. Aunque este tipo de método permite la consideración de no linealidades, las funciones tienen que determinarse subjetivamente haciendo el escalonamiento y la ponderación en un solo paso, lo que hace difícil conocer si la función fue determinada por la importancia de la ponderación, la importancia del escalonamiento o una combinación de ambos. En ocasiones, como la presente, es preferible separar la ponderación del escalonamiento y aislar la subjetividad de la relativa importancia de los pesos de los factores. En esta técnica el analista fácilmente puede detectar si los resultados están de acuerdo con sus estimaciones subjetivas y alterarlos si no está de acuerdo con ellos.

En las alternativas 1 y 2 cada área o segmento se evalúa relativamente con respecto al más alto y más bajo valor de vulnerabilidad o riesgo. En esta modalidad el índice de vulnerabilidad o riesgo es totalmente dependiente de los valores máximos y mínimos de cada indicador y, por tanto, son peligrosamente sensitivos a la calidad de la estimación –alternativa 1– o de los datos –alternativa 2– usados para determinar dichos valores. La alternativa 3 es preferible en muchos casos a las opciones anteriores por dos razones: primero, no se confunde el escalonamiento con la ponderación y, segundo, evalúa directamente cada área o segmento –unidad de análisis– relativamente con respecto a todas las demás –por medio de la media y la desviación estándar–. Las alternativas 1 y 2 realizan la misma comparación por la valoración relativa de cada área o segmento con la *mejor* y *peor* área o segmento, y por transitividad, con cada una de las otras. En el proceso, sin embargo, los resultados desarrollan una sensibilidad no deseable a los valores del indicador para esas áreas o segmentos. Finalmente, la alternativa 4 es preferible a la 3, aunque las dos opciones son análogas matemáticamente. Simplemente utilizan diferentes técnicas de comparación: la media y la media menos dos desviaciones estándar. Aunque las dos alternativas son igualmente correctas, el uso de una u otra depende de la interpretación de sus resultados. Con la alternativa 3, en una mayor proporción algunos valores del índice de vulnerabilidad o riesgo pueden ser negativos, haciendo difícil su interpretación intuitiva, circunstancia que favorece la alternativa 4 como la mejor elección.

PONDERACIÓN

Una vez los indicadores son conmensurables, su ponderación debe ser determinada. El peso de cada indicador ilustra qué tan importante es el indicador con respecto a los demás en la determinación del índice de vulnerabilidad o riesgo. Muchas investigaciones usualmente se hacen para demostrar cómo cada factor interviene en la vulnerabilidad o

el riesgo; infortunadamente, el conocimiento acerca de la vulnerabilidad y el riesgo está disperso entre una gran cantidad de personas, expertas en diferentes facetas del problema. Un índice de esta naturaleza debe tratar de capturar el conocimiento colectivo de todos los expertos para definir su valor, concebido por un grupo como un todo. La ponderación es correcta siempre que cumpla con esa meta

Una variedad de técnicas de ponderación es usada para la construcción de otros índices compuestos; sin embargo, todos aquellos propuestos con base en técnicas estadísticas requieren o que las variables dependientes puedan ser medidas directamente (por ejemplo, regresión), o que los indicadores estén bien correlacionados (por ejemplo, análisis de componentes principales) Dado que el riesgo no puede ser medido directamente y los indicadores no están bien correlacionados (amenaza sísmica no está relacionada con población), cualquiera de las técnicas con esos prerrequisitos es inapropiada para evaluar la vulnerabilidad o el riesgo. La única opción que queda para la ponderación es la evaluación subjetiva por parte de expertos. Aunque esta técnica parece ser poco deseable para algunos, por la falta de una base explícitamente replicable, es la única opción factible y razonable para capturar el criterio, la experiencia y el juicio de expertos (Davidson, 1997) En el caso del presente estudio se solicitó a expertos del Cederí y de la Secretaría Distrital de Salud proponer el peso de cada uno de los indicadores de acuerdo con su criterio y experiencia.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de la modelación del riesgo por fenómenos naturales para efectos de categorización en el campo de la salud. El gráfico 4 indica la manera como se obtiene el índice de riesgo para cada localidad, con base en sus factores, componentes e indicadores, a los cuales se les asignó un peso de contribución de acuerdo con los criterios de la Secretaría Distrital de Salud y el Cederi. Es importante anotar que la sistematización de este proceso permite realizar ajustes o modificaciones de las variables mencionadas, lo que facilita la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad o sensibilidad de los resultados obtenidos.

Se escogió la metodología de la media menos dos desviaciones estándar para escalar los valores.

$$x_{ij}' = [\bar{x}_i - (x_i - 2s_i)] / s_i$$

Donde las variables x_{ij}' y x_{ij} son valores escalados y el dato real para el indicador i y la localidad j . Respectivamente, \bar{x}_i y s_i son la media y la desviación estándar para los valores en todas las localidades de cada indicador i . Esta formulación se aplica a indicadores directamente proporcionales. En el caso del componente se utilizó la relación inversamente proporcional, expresada de la siguiente manera:

$$x_{ij}' = [x_{ij} + (x_i - 2s_i)] / s_i$$

Los cuadros 5 a 9 presentan los valores de cada indicador ya escalados para su adición en unidades compatibles y los resultados para cada componente de acuerdo con los pesos definidos para la ponderación de cada indicador. El cuadro 10 presenta los resultados de los factores de amenaza y vulnerabilidad y el valor final del riesgo obtenido de la convolución de dichos factores.

Para efectos del análisis comparativo, en los gráficos posteriores se han desarrollado histogramas y tortas que indican los valores escalados en forma relativa de los indicadores que conforman los componentes para cada localidad; de igual manera, se presentan histogramas de los valores individuales y en forma ascendente de cada componente para efectos de categorización. Para cada componente y cada factor se elaboraron mapas que indican los valores relativos con fines de comparación.

Los gráficos 20A a 20E ilustran los componentes de amenaza por localidad –Escenario sísmico y amenazas aisladas–, en diagramas circulares de 3D, mientras que un histograma general que agrupa todas las localidades muestra estos mismos componentes de amenaza en el gráfico 21. La amenaza por localidad se ilustra en el gráfico 22, ordenado en forma ascendente según el resultado de la convolución de los componentes de escenario sísmico y amenazas aisladas.

Mediante diagramas circulares en 3D presentados en los gráficos 26A a 26E se muestran las componentes de vulnerabilidad –exposición, fragilidad social y resiliencia– por localidad. De manera análoga a lo anterior, el gráfico 27 muestra las mismas componentes en un histograma que reúne todas las localidades. Finalmente, el gráfico 28 muestra la vulnerabilidad por localidad mediante un histograma organizado de menor a mayor según el valor obtenido en cada una de ellas.

Para una mejor visualización se elaboraron mapas (gráficos 23, 24 y 25) que muestran los componentes de escenario sísmico, amenazas aisladas y amenaza por localidades.

Los mapas de exposición, fragilidad social, resiliencia y vulnerabilidad se muestran en los gráficos 29, 30, 31 y 32 respectivamente.

El índice de riesgo, que resulta de la convolución de los indicadores de la amenaza y la vulnerabilidad, se muestra en dos gráficos: un histograma general en el gráfico 33, que muestra los componentes del índice de riesgo de las localidades –Vulnerabilidad y Amenaza– y un histograma que muestra el índice de riesgo para todas las localidades, dispuesto de menor a mayor en el gráfico 34. El mapa de índice de riesgo se muestra en el gráfico 35.

En los gráficos 25, 32 y 35 se muestran los mapas de amenaza, vulnerabilidad e índice de riesgo y en el anexo 5 se ilustran histogramas por localidad.

CONCLUSIONES

En este estudio se desarrolló un modelo para la estimación de un índice de riesgo basado en componentes e indicadores, utilizando la metodología realizada por Cardona (1996). La cual permite categorizar en orden de prioridad las diferentes localidades de Santa Fe de Bogotá. En este método se pueden ajustar los valores en forma dinámica, lo que facilita realizar análisis de sensibilidad y sensibilidad ante cada una de las variables involucradas, de tal forma que es posible desprestigiar la participación que puedan tener ciertas variables o el peso asignado a las mismas. Este método permite, igualmente, una vez graficados los resultados comparativos, obtener las conclusiones sin necesidad de realizar un profundo esfuerzo de análisis e interpretación de sus resultados. La principal ventaja de la técnica desarrollada es la posibilidad de desagregar el índice en factores componentes y estos, a su vez, en indicadores, lo que permite identificar las variables que más influyen y que en lo posible deben ser objeto de intervención o mitigación.

A continuación se presentan algunas conclusiones del análisis de los resultados para cada una de las localidades:

1. Según el grado de amenaza al cual se encuentran sometidas las diferentes áreas de la ciudad, se puede concluir que la localidad que tiene el mayor peligro sísmico es Barrios Unidos, en grado muy alto. Le siguen con un alto potencial de peligro sísmico Teusaquillo, Los Mártires y Usaquén, localidades en las cuales ocurrirían grandes roturas en las redes de gas, después de las que se presentarían en Usme y Ciudad Bolívar, extensas longitudes caídas en las redes eléctricas y una alta vulnerabilidad en cuanto a centrales telefónicas y subestaciones eléctricas se refiere. Especial atención demandan las localidades de La Candelaria, Los Mártires y Barrios Unidos, debido al gran porcentaje de heridos que se presentarían en caso de un evento sísmico. En cuanto a peligro por inundaciones, las localidades de Tunjuelito, Bosa, Ciudad Kennedy, Fontibón y Ciudad Bolívar requieren mayor cuidado mientras que por deslizamientos las localidades más amenazadas son San Cristóbal y Rafael Uribe Uribe.
Sin tener en cuenta la amenaza sísmica, las localidades más amenazadas son San Cristóbal, Bosa, Tunjuelito y Ciudad Kennedy. En total, el análisis relativo indica que las localidades más amenazadas por fenómenos naturales son Bosa, La Candelaria y San Cristóbal, a continuación están con un nivel alto Barrios Unidos, Teusaquillo, Santafé, Los Mártires y Usaquén.
2. Desde el punto de vista de la vulnerabilidad, las localidades que presentan mayor valor de exposición son Puente Aranda, Los Mártires, Barrios Unidos y Engativá, probablemente debido al alto porcentaje de área construida que las constituyen. La mayor fragilidad social se encuentra en Usme, San Cristóbal, Bosa y Ciudad Bolívar, localidades que presentan grandes áreas de barrios sin legalizar y se caracterizan por ser zonas en las cuales predominan los estratos 1 y 2 y presentan un alto índice de disparidad local. En cuanto a la falta de capacidad de respuesta, las localidades más débiles son La Candelaria, Ciudad Bolívar, Fontibón y Suba. Su baja capacidad de respuesta está referida a número de camas, instituciones de nivel II, recurso humano en los servicios de urgencias y número de ambulancias; además, son localidades con un nivel de desarrollo que oscila entre 1 y 3. En total, la vulnerabilidad más notable se detecta en las localidades de La Candelaria, Usme, Bosa, Rafael Uribe Uribe y Engativá.
3. El riesgo se presenta comparativamente en mayor grado en las localidades de La Candelaria y Bosa, seguidas de cerca por las de San Cristóbal y Rafael Uribe Uribe.
4. Como se mencionó, con la información debidamente sistematizada, es posible no sólo hacer actualizaciones de información, lo que permitiría un seguimiento de la eficiencia y la efectividad de las medidas de mitigación, sino análisis de sensibilidad y calibración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCALDÍA MAYOR DE SANTA FE DE BOGOTÁ, D.C. (1997). *Bogotá 2000: pacto para una ciudad competitiva con equidad*, Santa Fe de Bogotá.
- CARDONA, O. D. (1986). *Estudios de vulnerabilidad y evaluación del riesgo sísmico; planificación física y urbana en áreas propensas. Seminario nacional sobre prevención y manejo de catástrofes naturales*, Asociación de Ingenieros Estructurales, Medellín.
- CARDONA, O. D. (1990). *Terminología de uso común en manejo de riesgos*, AGID Report No. 13, EAFIT, Medellín.
- DAVIDSON, R. (1997). *An Urban Earthquake Disaster Risk Index*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Stanford University, Report No. 121, Stanford.
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE PLANEACIÓN DISTRITAL (1991). *Hogares con necesidades básicas satisfechas, y necesidades básicas insatisfechas, según sexo y edad del jefe de la familia*. Fuente: Encuesta de pobreza y calidad de vida. Santa Fe de Bogotá.
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE PLANEACIÓN DISTRITAL (1997). *Desarrollos residenciales de Origen clandestino en trámite de legalización*.
- SIED (1995). *Proyecto Sistema de información estadística distrital*, Santa Fe de Bogotá.
- UNDRO (1979). *Natural Desasters and Vulnerability Analysis*, Report of Experts Group Meeting, Geneva.
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES (1996). *Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá*, Ingeominas, 17 volúmenes, Santa Fe de Bogotá.