

MODELACIÓN NUMÉRICA PARA LA ESTIMACIÓN HOLÍSTICA DEL RIESGO SÍSMICO URBANO, CONSIDERANDO VARIABLES TÉCNICAS, SOCIALES Y ECONÓMICAS

Omar D. Cardona A.

*Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
Email: ocardona@uniandes.edu.co*

Jorge E. Hurtado G.

*Departamento de Ingeniería y Arquitectura
Universidad Nacional de Colombia
Manizales, Colombia
Email: jhurtado@emtelnet.net.co*

Resumen: Desde la perspectiva de los desastres naturales, una concepción holística del riesgo, consistente y coherente, fundamentada en los planteamientos teóricos de la complejidad, que considere no solamente variables geológicas y estructurales, sino también variables económicas, sociales, políticas, culturales o de otro tipo, que permita orientar de manera efectiva la toma de decisiones en un área geográfica puede contribuir a mejorar la efectividad de la gestión urbana y facilitar la identificación de medidas factibles y eficientes de reducción del riesgo. Estimaciones obtenidas mediante índices relativos, variables difusas *-fuzzy-* y redes neuronales *-neural networks-* son técnicas matemáticas que pueden facilitar la realización de los análisis de riesgo sísmico de ciudades o áreas de una ciudad desde una perspectiva holística, considerando como punto de partida los modelos convencionales de estimación de pérdidas o escenarios de daños. Este tipo de enfoque integral y multidisciplinar podría tener en cuenta de manera más consistente las relaciones no lineales de los parámetros del contexto, la complejidad y dinámica de los sistemas sociales y contribuir a la gestión efectiva del riesgo por parte de las autoridades y las comunidades; actores fundamentales para lograr una actitud preventiva.

Palabras clave: desastres, riesgo sísmico, vulnerabilidad, estimación holística, evaluación, gestión del riesgo, planificación urbana, emergencias.

1 ENFOQUE HOLÍSTICO

Como consecuencia de la declaración de los años 90, por parte de las Naciones Unidas, como el Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, en la planeación urbano-regional ha surgido un mayor interés en considerar el riesgo que pueden causar fenómenos naturales como terremotos, erupciones volcánicas,

inundaciones, etc. Esta inclusión, sin embargo, ha tenido, en primera instancia, un marcado sesgo tecnológico, que se manifiesta en el hecho de que típicamente la única vulnerabilidad considerada es la relativa a la fragilidad física de los elementos expuestos al fenómeno que se tiene en cuenta.

Desde la perspectiva de los desastres naturales, el riesgo se ha intentado dimensionar, para efectos de la gestión, como las posibles consecuencias económicas, sociales y ambientales que pueden ocurrir en un lugar en un tiempo determinado. Sin embargo, la concepción del riesgo no ha sido integral sino fragmentada, de acuerdo con el enfoque de cada disciplina involucrada en su valoración. Para estimar el riesgo de acuerdo con su definición es necesario tener en cuenta, desde un punto de vista multidisciplinario, no solamente el daño físico esperado, las víctimas o pérdidas económicas equivalentes, sino también factores sociales, organizacionales e institucionales, relacionados con el desarrollo de las comunidades. En la escala urbana, por ejemplo, la vulnerabilidad como factor interno de riesgo, debe relacionarse no solamente con la exposición del contexto material o su susceptibilidad física de ser afectado, sino también con las fragilidades sociales y la falta de resiliencia de la comunidad expuesta. La falta de organización institucional y comunitaria, las debilidades en los preparativos para la atención de emergencias, la inestabilidad política y la falta de salud económica de un área geográfica contribuyen a tener un mayor riesgo. Por lo tanto, las consecuencias potenciales no sólo están relacionadas con el impacto del suceso, sino también con la capacidad para soportar el impacto y las implicaciones del impacto.

La evaluación del riesgo puede llevarse a cabo mediante la siguiente formulación general: una vez conocida la amenaza o peligrosidad H_i , entendida como la probabilidad que se presente un evento con una intensidad mayor o igual a i durante un período de exposición t , y conocida la vulnerabilidad V_e , entendida como la predisposición intrínseca de los elementos expuestos a ser afectados o de ser susceptibles a sufrir una pérdida ante la ocurrencia de un evento con una intensidad i , el riesgo R_{ie} puede entenderse como la probabilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento e , como consecuencia de la ocurrencia de un evento con una intensidad mayor o igual a i ,

$$R_{ie} | t = (H_i \cdot V_e) | t \quad (1)$$

es decir, la probabilidad de exceder unas consecuencias sociales y económicas durante un período de tiempo t dado ¹.

Aquí se propone una conceptualización del riesgo desde la perspectiva de considerar no solamente variables sísmicas y estructurales, sino también variables económicas, sociales, de capacidad de respuesta o recuperación posterremoto, o resiliencia, que permitan orientar de manera efectiva las decisiones de mitigación del riesgo. Una estimación de este tipo podría considerarse holística, es decir integral o completa del riesgo. Para el efecto, se parte de las estimaciones de pérdidas o escenarios urbanos de daños por sismo, debido a que son el resultado de la convolución de la amenaza sísmica, o microzonificación de la ciudad, y la vulnerabilidad física de las edificaciones y de la infraestructura; aspectos a partir de los cuales se define un índice de riesgo físico o *hard*. Posteriormente, se valora un índice de riesgo del contexto o *soft*, resultado de la estimación del descriptor de

amenaza sísmica relativa y su convolución con el descriptor de vulnerabilidad del contexto, que se basa en indicadores de exposición, fragilidad social y resiliencia relativa de las unidades de análisis que conforman el centro urbano. Dichas unidades de análisis pueden ser alcaldías menores, distritos o localidades con alguna autonomía administrativa, que faciliten a la autoridad administrativa de la ciudad a llevar a cabo la gestión del riesgo utilizando los resultados de la estimación holística y multidisciplinaria del riesgo sísmico urbano.

2 INDICES RELATIVOS

El procedimiento propuesto para estimación holística y relativa del riesgo sísmico urbano parte de la identificación de unas unidades de análisis, k , que son las áreas para las cuales se determina el índice de riesgo sísmico total, IR_{T_k} , el cual está expresado por:

$$IR_{T_k} = IR_{H_k} \cdot \delta_{IRH_k} + IR_{S_k} \cdot \delta_{IRS_k} \quad (2)$$

donde IR_{H_k} es el índice de riesgo sísmico duro o físico (*hard*), el cual está basado en descriptores obtenidos de los estimativos de las pérdidas potenciales urbanas que pueden causar futuros terremotos; IR_{S_k} es el un índice de riesgo sísmico del contexto o blando (*soft*), obtenido del producto escalado de los descriptores de amenaza sísmica y de vulnerabilidad del contexto, y δ_{IRH_k} , δ_{IRS_k} son los factores de participación de cada índice para cada área de análisis k ; por su parte

$$IR_{H_k} = \sum_i X_{IR_i} \cdot \delta_{IR_i} \quad (3)$$

donde X_{IR_i} es el valor de cada indicador i obtenido de la información de los escenarios de pérdidas y δ_{IR_i} el factor de participación de cada indicador i , para cada área de análisis k ; y

$$IR_{S_k} = \alpha((HS_k - \beta)(VS_k - \beta) + \beta) \quad (4)$$

siendo HS_k el descriptor de amenaza sísmica del contexto, VS_k , el descriptor de vulnerabilidad del contexto, y α y β constantes de visualización relativas a la media y la desviación estandar de los valores, que se mencionan adelante en la técnica de escalamiento. A su vez

$$HS_k = \sum_i X_{H_i} \cdot \delta_{H_i} \quad (5)$$

siendo X_{H_i} el valor de los indicadores i obtenido del estudio de microzonificación sísmica urbana y δ_{H_i} el factor de participación de cada indicador i , para cada área de análisis k ;

$$VS_k = EV_k \cdot \delta_{E_k} + FV_k \cdot \delta_{F_k} + RV_k \cdot \delta_{R_k} \quad (6)$$

donde, EV_k , FV_k , RV_k son indicadores de exposición, fragilidad social y falta de resiliencia, y δ_{E_k} , δ_{F_k} , δ_{R_k} son sus factores de participación para cada área de análisis k , lo que es equivalente a

$$VS_k = (\sum_i X_{E_i} \cdot \delta_{E_i}) \delta_{E_k} + (\sum_i X_{F_i} \cdot \delta_{F_i}) \delta_{F_k} + (\sum_i X_{R_i} \cdot \delta_{R_i}) \delta_{R_k} \quad (7)$$

siendo X_{E_i} , X_{F_i} , X_{R_i} los valores de los indicadores i que componen la exposición, fragilidad social y falta de resiliencia y δ_{E_i} , δ_{F_i} , δ_{R_i} la participación de cada indicador i , para cada área de análisis k , respectivamente.

Estos índices, descriptores, factores e indicadores se deben definir con base en información disponible para todas las unidades de análisis. Conceptualmente deben reflejar, de la manera más directa posible, lo que se quiere valorar y debe evitarse el uso simultáneo de variables o indicadores que expresen aproximadamente el mismo aspecto. La Figura 1 indica la composición de los índices de riesgo de acuerdo con la nomenclatura mencionada.

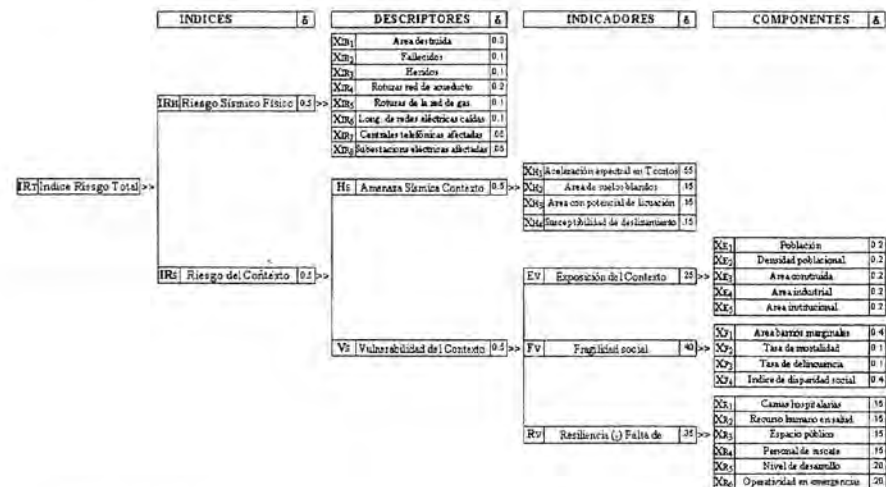


Figura 1. Índices de riesgo sísmico relativo definidos para un centro urbano con sus factores de participación.

2.1 Escalamiento

Antes de integrar mediante una combinación lineal los indicadores en descriptores y a su vez los descriptores en factores e índices, éstos deben ser escalados en unidades compatibles que permitan hacer análisis relativos conmensurables. El área el espacio público para la atención masiva de personas y el personal de rescate, por ejemplo, no pueden relacionarse en forma directa, porque en el primero se utilizan m² y en el segundo personas. La técnica adoptada para este caso es escalar con respecto a la media X_i y la desviación estándar S_i , así:

$$X'_{ik} = \frac{X_{ik} - (X_i - \beta S_i)}{\alpha S_i} \text{ o } X'_{ik} = \frac{-X_{ik} + (X_i + \beta S_i)}{\alpha S_i} \quad (8)$$

donde las X'_{ik} y X_{ik} on el valor escalado y el dato crudo, para la localidad k y el indicador i , y α y β son constantes de visualización relacionadas con la media y la

desviación estándar; así si α es 0.8 y β es 4.0 los valores de los indicadores se escalan con respecto a la media (0.0) más 5.0 (β/α) y la desviación estándar (1.0) se expande 1.25 ($1/\alpha$). Estas constantes se deben mantener durante todo el procedimiento de escalamiento. La ecuación cambia de signo cuando el indicador es inverso al factor que se valora, como es el caso de los indicadores de resiliencia, los cuales son inversos a la vulnerabilidad del contexto.

Expresar el resultado como una combinación lineal implica que no existe interacción entre los indicadores o entre los indicadores y los factores de participación utilizados para la ponderación. 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 aceptable, si se tienen en cuenta las incertidumbres e imprecisiones inherentes de los datos. Por otra parte, hacer de un índice riesgo una función no lineal podría llegar a ser más adecuado, pero no es claro qué tipo de función podría ser y su 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.

2.2 Ponderación

Una vez los indicadores son conmensurables, se debe realizar su ponderación. El factor de participación de cada indicador ilustra que tan importante es el indicador con respecto a los demás en la determinación de un factor componente o del mismo índice de riesgo sísmico. 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 ha sido 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, cualquiera de las técnicas con esos prerrequisitos no es más efectiva. La única opción que queda para la ponderación es la evaluación subjetiva por parte de expertos. Aunque esta técnica parece ser indeseable por 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 expertos². Los factores de participación se pueden obtener mediante redes neuronales que pueden ser entrenadas y los índices pueden valorarse a través de conjuntos difusos. Este tipo de técnica, que se presenta más adelante, facilita el manejo de apreciaciones cualitativas de expertos y variables lingüísticas de valoración mediante funciones de pertenencia.

3 INDICES DE RIESGO SISMICO RELATIVO

Mediante la metodología antes descrita, para un centro urbano conformado por un conjunto de áreas suburbanas, tales como alcaldías menores, distritos, localidades o comunas, la determinación del riesgo sísmico relativo para cada una de las unidades de análisis se obtiene de estimar el índice de riesgo sísmico físico y el índice de riesgo sísmico del contexto. La agregación de estos dos índices permite llegar a una valoración holística o integral del riesgo. En cada ciudad existen indicadores o evaluaciones de orden sísmico, poblacional, estadístico, etc. que pueden utilizarse para determinar de manera aspectos que representen o reflejen las variables que se desean valorar. Para efectos de ilustración aquí se presenta la estimación de índices, descriptores, indicadores y componentes para las 19 alcaldías menores de Bogotá, megaciudad de aproximadamente siete millones de habitantes, capital de Colombia.

3.1 Escenarios de riesgo sísmico

La evaluación de funciones o matrices de vulnerabilidad física usualmente se ha llevado a cabo teniendo en cuenta la información histórica de los daños que han sufrido los edificios por terremotos en el pasado^{3,4,5}. Sin embargo, dicha información está íntimamente ligada a los tipos de construcción y a la tecnología de edificación del área que se estudia. Por esta razón, en rigor, datos obtenidos en ciertos lugares del mundo no son fácilmente utilizables con el mismo objetivo en otros sitios. Ante esta circunstancia, una manera de superar esta falta de información o de evitar usar datos que pueden no ser realistas, es utilizar técnicas de simulación que permitan generar de manera sintética una muestra de los diferentes estados de daño en modelos de edificios que puedan considerarse como representativos de los tipos estructurales que se han construido en el sitio en diferentes épocas. Estas técnicas no más que otra aplicación del denominado método de Monte Carlo. Por este camino han seguido algunos investigadores recientemente^{6,7,8} y en este caso se adoptó este método debido a sus claras ventajas, como su capacidad de explotar el conocimiento consolidado de las diferentes disciplinas de la ingeniería sísmica para producir funciones sintéticas de vulnerabilidad para diferentes zonas urbanas¹.

3.2 Índice de riesgo físico

Para la determinación del índice de riesgo físico (*hard*), en el caso de Bogotá se definieron los siguientes descriptores, los cuales fueron normalizados de acuerdo con el área de cada alcaldía local⁹:

1. *Área destruida por sismo*, XIR_1
2. *Número de fallecidos*, XIR_2 ; *Número de heridos*, XIR_3
3. *Roturas de la red de acueducto*, XIR_4 ; *Roturas de la red de gas* XIR_5 ; *Longitud caída de redes eléctricas* XIR_6
4. *Número de centrales telefónicas afectadas*, XIR_7 ; *Número de subestaciones eléctricas afectadas*, XIR_8

Los descriptores que componen el índice de riesgo físico son estimados de la convolución de la amenaza sísmica, obtenida de la microzonificación de la ciudad, Figura 2, y de la vulnerabilidad física de los edificios y la infraestructura de servicios públicos^{5,10}.



Figura 2: Microzonificación sísmica de Bogotá ¹¹

Los descriptores que componen el índice de riesgo físico son valores estimados de la convolución de la amenaza sísmica, obtenida de la microzonificación de la ciudad y de la vulnerabilidad física de las edificaciones y la infraestructura de servicios públicos

3.3 Índice de riesgo del contexto

El índice de riesgo del contexto (*soft*), para Santa Fe de Bogotá, se definió como el resultado del producto escalado del factor de amenaza sísmica y del factor de vulnerabilidad del contexto para cada alcaldía local. Este producto se debe a que la amenaza y la vulnerabilidad son mutuamente condicionantes y concomitantes para que exista el riesgo; lo que equivale a la convolución de los descriptores que lo componen. A continuación se definen estos descriptores y se relacionan sus indicadores componentes:

1. **Amenaza sísmica del contexto, HS_k** : Definida como una agregación de valores que expresan el nivel de peligro sísmico que se presenta en el área que cubre la

alcaldía menor, caracterizada por particularidades relativas a la acción sísmica. Para su determinación, en este caso, se definieron los siguientes indicadores:

- 1.1 **Aceleración espectral, XH_1**
 - 1.2 **Área de suelos blandos, XH_2**
 - 1.3 **Área con potencial de licuación, XH_3**
 - 1.4 **Área con susceptibilidad al deslizamiento, XH_4**
 2. **Vulnerabilidad sísmica del contexto, VS_k** : Definida como la agregación de valores que expresan aspectos de exposición poblacional, económica y estratégica, ausencia de desarrollo económico y social, debilidades para absorber el impacto, deficiencias en la gestión institucional y falta de capacidad para la respuesta en caso de emergencia, que reflejan y diferencian la vulnerabilidad global de cada alcaldía menor. Para su determinación, se definieron tres indicadores:
 - 2.1 **Exposición, EV_k** : Definida como el volumen normalizado de población, edificaciones y bienes económicos y estratégicos expuestos a la acción sísmica en el área que cubre la alcaldía menor. Para su determinación, en este caso, se definieron los siguientes componentes:
 - 2.1.1 **Población, XE_1**
 - 2.1.2 **Densidad poblacional, XE_2**
 - 2.1.3 **Área construida, XE_3**
 - 2.1.4 **Área industrial, XE_4**
 - 2.1.5 **Área institucional, XE_5**
 - 2.2 **Fragilidad social, FV_k** : Definida como el inverso del déficit de desarrollo, económico y social caracterizado por las condiciones de marginalidad, bajo nivel de salubridad, delincuencia y necesidades básicas insatisfechas de la población ubicada en el área que cubre la alcaldía menor. Para su determinación, en este caso, se definieron los siguientes componentes:
 - 2.2.1 **Área de barrios marginales, XF_1**
 - 2.2.2 **Mortalidad, XF_2**
 - 2.2.3 **Delincuencia, XF_3**
 - 2.2.4 **Disparidad social, XF_4**
 - 2.3 **Falta de resiliencia, RV_k** : Definida como el inverso de la capacidad económica, social e institucional (resiliencia), que representa la debilidad para absorber el impacto de una crisis, la falta de capacidad para responder en caso de emergencia y las deficiencias en la gestión institucional en la alcaldía menor. Para su determinación se definieron los siguientes componentes:
 - 2.3.1 **Camas hospitalarias, XR_1**
 - 2.3.2 **Recurso humano en salud, XR_2**
 - 2.3.3 **Espacio público, XR_3**
 - 2.3.4 **Personal de rescate, XR_4**
 - 2.3.5 **Nivel de desarrollo, XR_5**
 - 2.3.6 **Operatividad en emergencias, XR_6**
- La Figura 3 ilustra los valores de los índices de riesgo sísmico físico y del contexto y la Figura 4 presenta los valores del índice de riesgo sísmico total ordenados de menor a mayor. Este tipo de gráficas permiten categorizar y priorizar las alcaldías que presentan los mayores valores comparativos

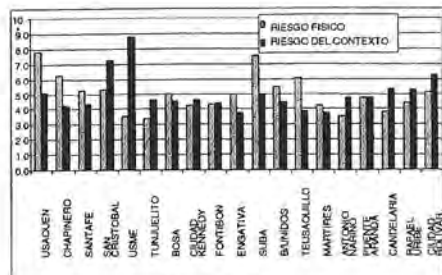


Figura 3: Índice de riesgo sísmico físico y del contexto

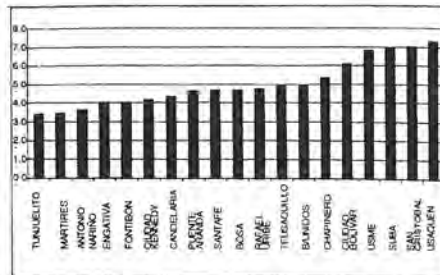


Figura 4: Índice de riesgo sísmico total por alcaldía

4 MODELACIÓN DIFUSA Y NEURONAL

La lógica difusa (también llamada lógica borrosa) constituye uno de los desarrollos recientes de la matemática que mayor impacto ha tenido en ciencias, ingeniería y varias aplicaciones tecnológicas. Para los fines de este trabajo, la lógica difusa reviste gran interés pues, a juicio de los autores, constituye quizás el único lenguaje matemático en el que resulta posible una interacción de las ciencias naturales y sus derivados tecnológicos, de una parte, y las ciencias sociales, de otra. Esto se debe a que, a través de los conjuntos difusos, resulta posible representar los contenidos puramente cuantitativos de la información típicamente suministrada por las ciencias naturales y las ingenierías en términos cualitativos, tales como *alto*, *intenso*, *confiable*, etc., que son los adecuados para la transmisión de información en ciencias sociales. Viceversa, de la descripción cualitativa de la información resulta posible extraer igualmente algunos índices numéricos representativos que permiten la interpretación de variables, la manipulación técnica de resultados, etc. Por este motivo se ha incorporado fácilmente como tema de investigación activa en el campo de la inteligencia artificial¹².

El elemento central de la lógica difusa son las llamadas funciones de pertenencia, con las cuales se trata de modelar matemáticamente los calificativos de una cantidad cualquiera x , tales como, por ejemplo, *alto*, *medio* o *bajo*. El significado de estas funciones es tal que ellas alcanzan su valor máximo cuando la variable es claramente alta, media o baja, según el caso, mientras que en las regiones restantes se da cierta ambigüedad. Por eso, se observa que, en ellas, se da un solapamiento de las funciones correspondientes a los tres calificativos, lo que indica que para los valores de la variable en esas zonas ocurre una vaguedad en la atribución del calificativo. Esto es básicamente lo que diferencia a la lógica difusa, que pretende acercarse al lenguaje cotidiano, de la llamada lógica binaria o Aristotélica, que es el fundamento de la matemática convencional. Es de anotar, sin embargo, que la asignación y forma de las funciones de pertenencia es un tanto arbitraria, lo que de todas maneras se enfila en la aproximación que se trata de hacer por esta vía al pensamiento objetivo. Con el fin de reducir al mínimo esta arbitrariedad, en la aplicación práctica de la lógica difusa se recurre a expertos en cada tema para la asignación de las funciones con la mayor objetividad posible. Por esta razón la lógica difusa es una herramienta indispensable en la creación de los llamados *sistemas expertos*.

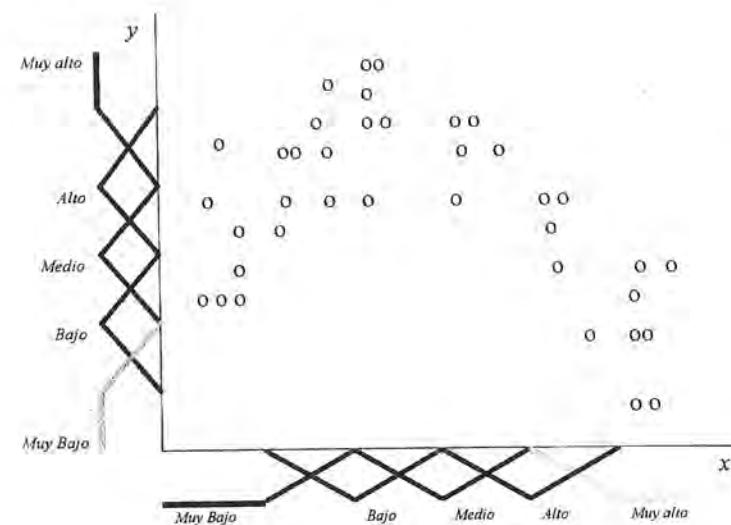


Figura 5. Interpretación difusa de datos numéricos.

La relación de las interpretaciones cuantitativa y cualitativa de la información se ilustra en la Figura 5, en la que los puntos corresponden a los datos observados de la relación entre dos variables x e y , mientras que las funciones de pertenencia ilustran una posible interpretación numérica de la identificación lingüística de estos valores. Con base en estas relaciones de tipo lingüístico se pueden construir silogismos del tipo

$$\text{Si } x \text{ es } A, \text{ y es } B. \quad x \text{ es } A'. \quad \text{luego } y \text{ es } B'.$$

dónde A , A' , B y B' son calificativos, de los cuales se conocen las funciones de pertenencia de los tres primeros, siendo el objetivo del problema calcular la del cuarto. Existen varias técnicas y algoritmos para calcular matemáticamente las funciones de pertenencia de los consecuentes B' de silogismos como éste y de otros más complejos que se dan frecuentemente en la práctica.

Una vez calculadas las funciones de pertenencia de los consecuentes se puede extraer de ellas un valor numérico indicativo así como un calificativo lingüístico aproximado del consecuente. El primer paso se realiza por medio de la llamada *desfufusificación*, que consiste en calcular el centro de la función de pertenencia, de cuya definición se han propuesto varias alternativas en la literatura internacional. Lo segundo se obtiene por la comparación de la función de pertenencia resultante con algunas funciones de pertenencia estándar suficientemente establecidas.

Por otra parte, las redes neuronales han sido utilizadas para enfrentar problemas complejos simulando el funcionamiento del sistema nervioso, intentando imitar los mecanismos de aprendizaje, adaptación y razonamiento del ser humano. Estos algoritmos han demostrado ser muy útiles para múltiples propósitos, tales como el reconocimiento de patrones, imágenes, procesamiento de señales, optimización,

control automático, etc.¹³ Una neurona real esta compuesta por una célula y varias dendritas, las cuales la conectan a otras neuronas. La actividad de la neurona la definen a) la recepción de los impulsos enviados a ella por otras neuronas, b) la transformación y almacenamiento de información y c) la emisión del impulso procesado a otras neuronas. El arreglo de una red neuronal está caracterizado por el número de capas, el número de neuronas asociadas a cada capa, los tipos de conexión y el flujo de información en el arreglo. Se pueden definir tres clases de capas: a) la *capa de entrada*, que son las neuronas que reciben la información que viene de fuentes externas, b) las *capas ocultas*, que hacen parte interna de la red y que no tienen contacto directo con el ambiente externo, y c) la *capa de salida* la cual transfiere la información de la red al exterior. Las arquitecturas de estas redes o arreglos permiten interrelacionar variables diversas mediante “pesos” o incidencias y funciones de transferencia que pueden simular relaciones lineales o no-lineales entre las diferentes neuronas o capas de neuronas, facilitando la modelación de sistemas complejos. Mediante procesos iterativos de ajuste, ponderación y definición de umbrales una red neuronal puede aprender o adaptarse pasando de una situación de “inexperta” a otra de “entrenada”, condición que se logra mediante aprendizaje supervisado, que puede ser correctivo o por refuerzo, y autoaprendizaje o no supervisado. En el primer caso los pesos son corregidos de acuerdo con desviación o la magnitud de un error respecto a una respuesta experta esperada o actualizados con base en el refuerzo de una señal (verdadera o falsa) y el resultado. En el segundo caso, los pesos no son corregidos por expertos externos porque que las soluciones no son conocidas o definidas en el proceso de entrenamiento.

4.1 Estimación neuronal y difusa del riesgo

En vista de la facilidad de pasar de valores numéricos a conceptos lingüísticos y viceversa, la lógica difusa constituye un medio adecuado para tratar de manera homogénea un sistema complejo como el constituido por sociedades humanas inmersas en un entorno natural dinámico, sistema del que se dispone de información tanto cuantitativa como cualitativa sobre sus condiciones. Por este motivo, es razonable adoptarla para la formulación de un modelo holístico de estimación y gestión del riesgo con miras a su mitigación preventiva, modelo que incorpore información tanto técnica como social y política. Previamente se presentó el modelo para estimar el riesgo sísmico de la ciudad de Bogotá, utilizando índices, descriptores, indicadores y componentes que abarcan este tipo de variables.

En esta nueva versión del modelo, se ha construido una red neuronal conformada por una serie de variables en la capa de entrada que se interrelacionan entre sí para conformar capas ocultas de neuronas que asocian información técnica, social, económica que configura el riesgo de manera holística mediante pesos y funciones de pertenencia o de máxima dependencia. El modelo, además, ha incorporado una descripción difusa de los elementos debido a la gran incertidumbre ligada a las variables estimadas técnicamente (tales como aceleraciones espectrales o número de víctimas) y a la vaguedad de los calificativos referentes a las componentes sociales y político-administrativos tales como espacio público o tasa de delincuencia. Por esta razón, en cada caso de aplicación, a cada elemento le es asignado un valor lingüístico y su respectiva función de pertenencia en lugar de un valor numérico.

El esquema de cálculo es el que presenta la Figura 6. Cada elemento x contribuye con su función de pertenencia, la cual tiene un peso c dentro del componente. De cada factor se calcula un índice numérico como el centroide del área de las funciones de pertenencia ponderadas por los factores c . Esto implica que el índice estará determinado, o bien por los componentes cuya función de pertenencia se acerque a criterios lingüísticos como muy alto, muy intenso, etc., o bien por aquellos que, aunque no tengan una función de pertenencia equivalente a tales términos, sí tengan un factor de peso c relativamente alto.

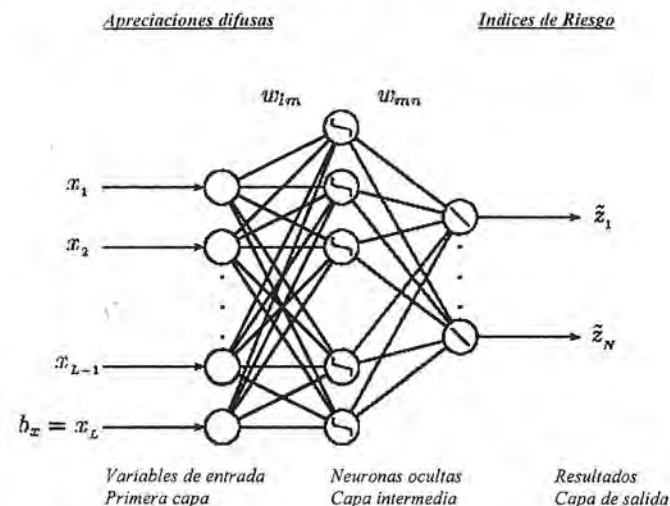


Figura 6 Esquema de cálculo de la red neuronal difusa

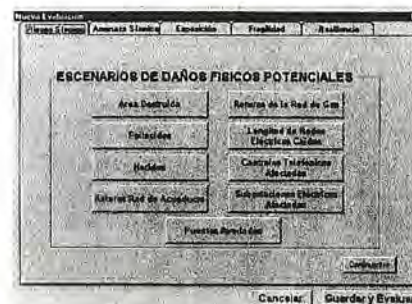


Figura 7 Ingreso de datos de pérdidas y daños físicos



Figura 8 Ingreso de datos de resiliencia

La Figura 7 muestra la pantalla de ingreso de información de datos sobre pérdidas físicas y humanas que usualmente se estiman en estudios de esta naturaleza. Por su parte, la Figura 8 muestra lo correspondiente a la factor de resiliencia, el cual,

por el contrario es uno de los aspectos socio-políticos que se incorporan en este modelo con el fin de hacerlo más integral que los usados convencionalmente para estimación del riesgo, que están basados solamente en estimaciones como las de la Figura 7.

Figura 9 Ingreso de peso y descripción lingüística



Figura 10: Definición de las funciones de pertenencia

La Figura 9 ilustra la entrada del factor de peso y de la descripción en forma lingüística de cada componente. Los términos lingüísticos de cada variable han sido elegidos de manera diferente para cada una de ellas, de suerte que reflejen las valoraciones que se hacen corrientemente de cada una de ellas en el lenguaje especializado. La Figura 10 muestra las funciones de pertenencia que conforma uno de los factores, de las cuales se extrae el índice correspondiente.

Figura 11. Cálculo del valor numérico de un índice parcial o global.

La integración de estos índices de la manera explicada anteriormente conduce a la determinación de un índice general de riesgo. Figura 11. Sin embargo, debe decirse que para fines de gestión del mismo a través de programas de mitigación, los índices parciales que se obtienen a través del proceso constituyen *per se* una valiosa información ya que permiten tomar decisiones sobre reducción preventiva del riesgo en aquellos factores (físicos, sociales o administrativos) que muestren una tendencia dominante en el índice global. Actualmente los autores trabajan en el desarrollo de este modelo en las siguientes vías: a) refinamiento de las funciones de pertenencia

por parte de expertos. b) incorporación de criterios de saturación. Esta situación se da por causa de ciertos componentes que, al alcanzar valores muy altos, causan un elevamiento brusco de los índices. Con esto se pretende modelar el hecho de que algunos desastres son detonados por unos pocos componentes críticos antes que por la suma de las contribuciones de todos ellos, como se tiene en la versión actual. c) contrastación del modelo con datos reales. Este paso es necesario con el fin de validar el modelo para su aplicación en la planeación territorial, económica y social.

5 CONCLUSION

Se han presentado dos modelos para la estimación del riesgo sísmico urbano. Mediante la formulación de índices relativos y utilizando un sistema neuronal difuso. Estas metodologías, aplicadas a Bogotá, Colombia, han permitido categorizar la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de las diferentes alcaldías menores de la ciudad desde una perspectiva holística. El primer método facilita la actualización del valor de las variables, lo que favorece la realización de análisis de sensibilidad y calibración. Se puede llevar a cabo fácilmente el seguimiento del escenario de riesgo y de la efectividad y eficiencia de las medidas de prevención y mitigación. Una vez graficados los resultados, para cada una de las localidades, mediante este método es sencillo identificar los aspectos más relevantes del riesgo sísmico relativo, sin la necesidad de realizar mayores esfuerzos de análisis e interpretación de resultados. El segundo método permite la valoración de las mismas variables mediante apreciaciones lingüísticas, lo que facilita la evaluación incluso de casos en que la información numérica no está disponible. Esta técnica permite calibrar el sistema de evaluación, dado que tiene capacidad de aprendizaje, lo que facilita que el sistema, una vez haya sido entrenado, pueda ser utilizado por personas inexpertas. La principal ventaja de los modelos aquí propuestos es la posibilidad de “devolverse” mediante la desagregación de los índices en descriptores y éstos a su vez en indicadores, o en funciones de pertenencia, e identificar la razón por la cual una localidad presenta un mayor índice de riesgo. Esta virtud permite verificar los resultados y priorizar las acciones prevención y planificación que se deben implementar para intervención y modificación de las condiciones que más influyen en el riesgo sísmico de una ciudad.

6 REFERENCIAS

- [1] Cardona, O.D., Hurtado, J.E. (2000): “Holistic seismic risk estimation of a metropolitan center: Application for Bogotá, Colombia” *Proceedings 12WCEE*, Auckland, New Zealand.
- [2] 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, June 1997, Stanford.
- [3] Whitman, R. V. (1973): “Damage Probability Matrices for Prototype Buildings”. *Structures Publication 380*, Department of Civil Engineering, M.I.T. Boston, Massachusetts.
- [4] Applied Technology Council (1985): *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, ATC-13, FEMA, Redwood City, CA.

- [5] Federal Emergency Management Agency (1997): *Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS*, Technical Manual, Vol. I, II and III, National Institute of Buildings Sciences for FEMA.
- [6] Hurtado, J. E. and Barbat, A. H. (1998): "Monte Carlo techniques in computational stochastic mechanics". *Archives of Computational Methods in Engineering*, 5: 3-30.
- [7] Singhal, A. and Kiremidjian, A. S. (1996): "Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage". *Journal of Structural Engineering*, 122: 1459-1467.
- [8] Abrams, D. P. and Shinozuka, M. (editors) (1997): "Loss Assessment of Memphis Buildings". *Technical Report NCEER-97-0018*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- [9] Cardona O.D., Yamín L.E. (1997): "Seismic Microzonation and Estimation of Earthquake Loss Scenarios: Integrated Risk Mitigation Project of Bogotá, Colombia", *EERI Earthquake Spectra*, 13, N.4, November 1997, Oakland, California.
- [10] Barbat, A., Yepes, F. and Canas, J. A. (1996): "Damage Scenario Simulation for Risk Assessment in Urban Zones". *Earthquake Spectra*, 12:371-394.
- [11] Universidad de los Andes, (1996): *Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá*, Ingeominas, 17 Volúmenes, Santa Fe Bogotá.
- [12] Jang, J.-S. R., et al (1997): *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall, New Jersey.
- [13] Leondes C.T., (Ed.) (1998): *Fuzzy Logic and Expert Systems Applicatios*, Academic Press, San Diego, California.