

## Capítulo 7

# Estimación holística del riesgo sísmico de un centro urbano

### 7.1. Modelización mediante un sistema de índices relativos

Aquí se propone un enfoque conceptual del riesgo sísmico que considera no solamente variables sísmicas y estructurales, sino también variables económicas, sociales, de capacidad de respuesta o recuperación pos-terremoto, o resiliencia, que permitan orientar de manera efectiva las decisiones de prevención. Si el propósito de la estimación del riesgo sísmico es valorarlo en forma holística, es decir de una manera más integral o completa y con fines de desagregación posterior, es necesario proponer modelos que puedan considerar variables diversas de una manera consistente y coherente, aun cuando representen aspectos muy diferentes que en ocasiones no son mutuamente excluyentes, es decir, que estén relacionados de manera no lineal y se desconozca la incidencia de unos sobre los otros y viceversa.

Para modelizar el riesgo sísmico mediante índices se propone partir de las estimaciones de pérdidas de los escenarios urbanos de daños por sismo, debido a que estas estimaciones son el resultado de la convolución de la amenaza, o microzonificación sísmica de la ciudad, con la vulnerabilidad física de los edificios y de la infraestructura. A partir de estos aspectos se propone la definición de un índice de riesgo físico o *hard*. Igualmente, se propone valorar un índice de riesgo del contexto o *soft*, resultado de la estimación de un descriptor de amenaza sísmica relativa y de su convolución con un descriptor de vulnerabilidad del contexto, que de acuerdo con lo planteado previamente se base 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 llevar a cabo la gestión del riesgo utilizando los resultados de la estimación holística y multidisciplinar del riesgo sísmico urbano en cada una de ellas.

El procedimiento propuesto aquí para la 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,  $IRT_k$ , que se expresa mediante la ecuación 7.1, como

$$IRT_k = IRH_k \times dRH_k + IRS_k \times dRS_k \quad [7.1]$$

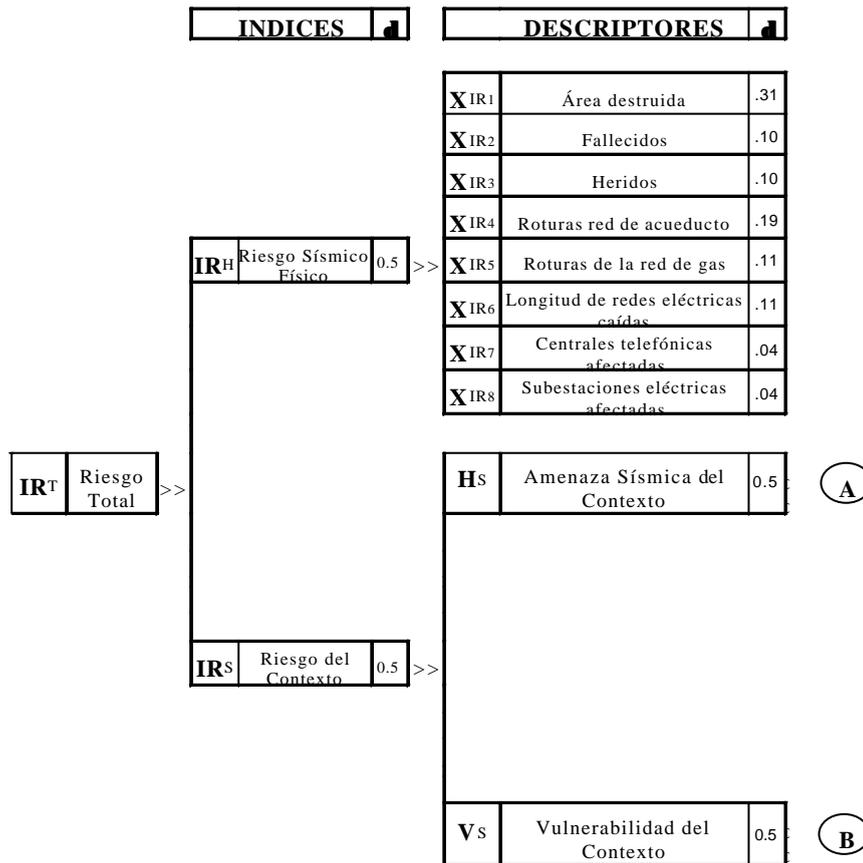
donde  $IRH_k$  es el índice de riesgo sísmico físico (*hard* o duro), que está basado en descriptores obtenidos de los estimadores de las pérdidas potenciales urbanas que pueden causar los futuros terremotos;  $IRS_k$  es un índice de riesgo sísmico del contexto (*soft* o blando), obtenido del valor escalado del producto de los descriptores de amenaza sísmica y de vulnerabilidad del contexto; y  $dlRH_k$  y  $dlRS_k$  son los factores de participación de cada índice para cada área de análisis,  $k$ . El índice de riesgo sísmico físico viene dado por la mediante la ecuación 7.2

$$IRH_k = S_i X_{IR_i} \times dlR_i \tag{7.2}$$

donde  $X_{IR_i}$  es el valor de cada indicador  $i$  obtenido de la información de los escenarios de pérdidas y  $dlR_i$  el factor de participación de cada indicador  $i$ , para cada área de análisis,  $k$ . El índice de riesgo sísmico del contexto se puede estimar mediante la ecuación 7.3, así

$$IRS_k = a((HS_k - b)(VS_k - b) + b) \tag{7.3}$$

donde  $HS_k$  es el descriptor de la amenaza sísmica del contexto,  $VS_k$  el descriptor de la vulnerabilidad del contexto y  $a$  y  $b$  constantes de visualización relativas a la media y la desviación estándar de los valores, que se explican más adelante. La figura 7.1 ilustra los descriptores que podrían conformar los índices de riesgo sísmico físico y riesgo sísmico del contexto.



**Figura 7.1:** Descriptores de los índices de riesgo sísmico físico y del contexto con los factores de participación obtenidos de la opinión de expertos.

Ahora bien, el descriptor de amenaza sísmica del contexto se expresa como

$$HS_k = S_i XH_i \times dH_i \tag{7.4}$$

donde  $XH_i$  es el valor de los indicadores  $i$  obtenidos a partir de un estudio de microzonificación sísmica urbana y  $dH_i$  el factor de participación de cada indicador  $i$ , para cada área de análisis  $k$ ; y el descriptor de la vulnerabilidad del contexto se propone como:

$$VS_k = EV_k \times dE_k + FV_k \times dF_k + RV_k \times dR_k \tag{7.5}$$

donde  $EV_k$ ,  $FV_k$ ,  $RV_k$  son indicadores de exposición, fragilidad social y falta de resiliencia y  $dE_k$ ,  $dF_k$  y  $dR_k$  son sus factores de participación para cada área de análisis  $k$ . La ecuación anterior puede reescribirse en la siguiente forma equivalente

$$VS_k = (S_i XE_i \times dE_i) dE_k + (S_i XF_i \times dF_i) dF_k + (S_i XR_i \times dR_i) dR_k \tag{7.6}$$

siendo  $XE_i$ ,  $XF_i$  y  $XH_i$  los valores de los indicadores  $i$  que componen la exposición, fragilidad social y falta de resiliencia y  $dE_i$ ,  $dF_i$  y  $dR_i$  la participación de cada indicador  $i$  y para cada área de análisis  $k$ , respectivamente.

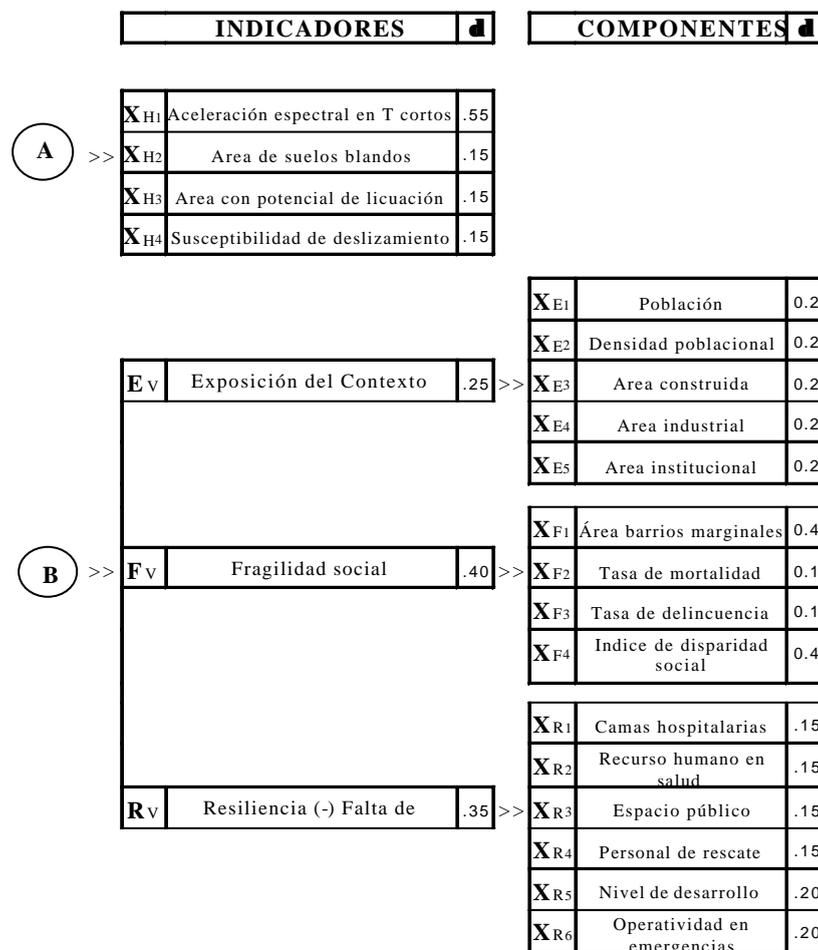


Figura 7.2: Indicadores y componentes de la amenaza y vulnerabilidad del contexto con los factores de participación obtenidos de la opinión de expertos.

La figura 7.2 ilustra los indicadores que podrían considerarse con el fin de estimar la amenaza sísmica para el contexto y los componentes de cada indicador con el que se puede estimar igualmente la vulnerabilidad.

Estos índices, descriptores, factores e indicadores deben definirse con base en información disponible que exista para todas las unidades de análisis. Conceptualmente deben expresar, de la manera más directa posible, lo que se quiere valorar y debe evitarse el uso simultáneo de variables o indicadores que reflejen aproximadamente el mismo aspecto, dado que en este modelo aditivo se supone que las variables son mutuamente excluyentes.

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 o conmensurables que permitan realizar el análisis. Por ejemplo, el área del espacio público para la atención masiva de personas y el personal de rescate no pueden relacionarse en forma directa, porque en el primero se calcula en m<sup>2</sup> y en el segundo en número de personas. La técnica adoptada para este caso es escalar con respecto a la media  $\bar{X}_i$  y la desviación estándar  $S_i$ , de la siguiente forma:

$$X'_{ik} = \frac{X_{ik} - (\bar{X}_i - \hat{a} S_i)}{\hat{a} S_i} \quad \text{ó} \quad X'_{ik} = \frac{-X_{ik} + (\bar{X}_i + \hat{a} S_i)}{\hat{a} S_i} \quad [7.7]$$

donde  $X'_{ik}$  y  $X_{ik}$  son el valor escalado y el dato inicial para la localidad  $k$  y el indicador  $i$ , y  $\hat{a}$  y  $\hat{b}$  son constantes de visualización relacionadas con la media y la desviación estándar. 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 que 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 una combinación lineal y la búsqueda de otros enfoques ha permitido concluir que dicha combinación es aceptable, si se tienen en cuenta las incertidumbres e imprecisiones inherentes de los datos. Por otra parte, hacer de un índice de riesgo una función no lineal podría ser más adecuado, pero no es claro qué tipo de función debería utilizarse y su posible complejidad puede ser inconsistente con el objetivo de disponer de una técnica sencilla basada en un índice fácil de evaluar y de fácil entendimiento.

Una vez que los indicadores sean conmensurables, se debe realizar su ponderación. El factor de participación de cada indicador ilustra la importancia del 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 reflejar el conocimiento colectivo de todos los expertos para definir su valor. La ponderación es correcta siempre que cumpla esa meta. Una variedad de técnicas de ponderación ha sido usada para la construcción de otros índices compuestos (Morris 1979; UNDP 1991; Briguglio 1992/95; Davidson 1997; Lambert 2000; Smolka *et al.* 2000). Sin embargo, todos aquellos índices propuestos con base en técnicas estadísticas requieren que las variables dependientes puedan ser medidas directamente (por ejemplo, regresión) o que los indicadores estén bien correlacionados –por ejemplo, análisis de componentes principales– (Atkins *et al.* 1998, 2000). Dado que el riesgo no puede ser medido



**Tabla 7.2:** Matriz normalizada para obtención de pesos

	EV	FV	EV	Influencia Global	Peso Obtenido
EV	0.25	0.20	0.33	0.26	26
FV	0.50	0.40	0.33	0.41	41
RV	0.25	0.40	0.33	0.33	33
<b>S</b>	1	1	1	1.00	100

El Apéndice B presenta el análisis de consistencia de los valores ajustados para las matrices constituidas con los componentes, indicadores o descriptores de los índices propuestos para determinar el riesgo sísmico total.

La técnica de índices relativos descrita previamente se aplica aquí a la ciudad de Bogotá, Colombia, centro urbano formado por un conjunto de áreas suburbanas denominadas alcaldías menores o localidades, que en otros ámbitos pueden ser comunas o distritos. El riesgo sísmico relativo se obtuvo para cada una de las unidades de análisis a partir de estimar el índice de riesgo sísmico físico y el índice de riesgo sísmico del contexto. La agregación de estos dos índices permitió llegar a una valoración holística o integral del riesgo para este caso demostrativo.

En cada ciudad existen indicadores o evaluaciones de orden sísmico, poblacional, estadístico, etc., que pueden utilizarse para determinar aspectos que representen o reflejen las variables que se desean valorar. Para el caso de Bogotá, Distrito Capital de Colombia, se identificaron valores que existieran para todas las unidades de análisis, es decir para cada una de las alcaldías menores. La información se obtuvo de instituciones de la administración de la ciudad o Alcaldía Mayor y sus diferentes secretarías o dependencias distritales (Alcaldía Mayor de Santafé de Bogotá, D.C. 1997; Departamento Administrativo de Planeación Distrital 1991/97; SIED 1995).

La figura 7.3 presenta la composición del árbol de índices, descriptores, indicadores y componentes para las 19 alcaldías menores de Bogotá, de acuerdo con la nomenclatura utilizada. Los valores de los factores de participación indicados en la figura, para este caso se obtuvieron de apreciaciones de expertos relacionados con la prevención de desastres y planificación de la ciudad. Los valores finales de los pesos de los componentes, indicadores y descriptores se obtuvieron mediante el método AHP mencionado previamente (Hayman 1998; Saaty y Vargas 1991).

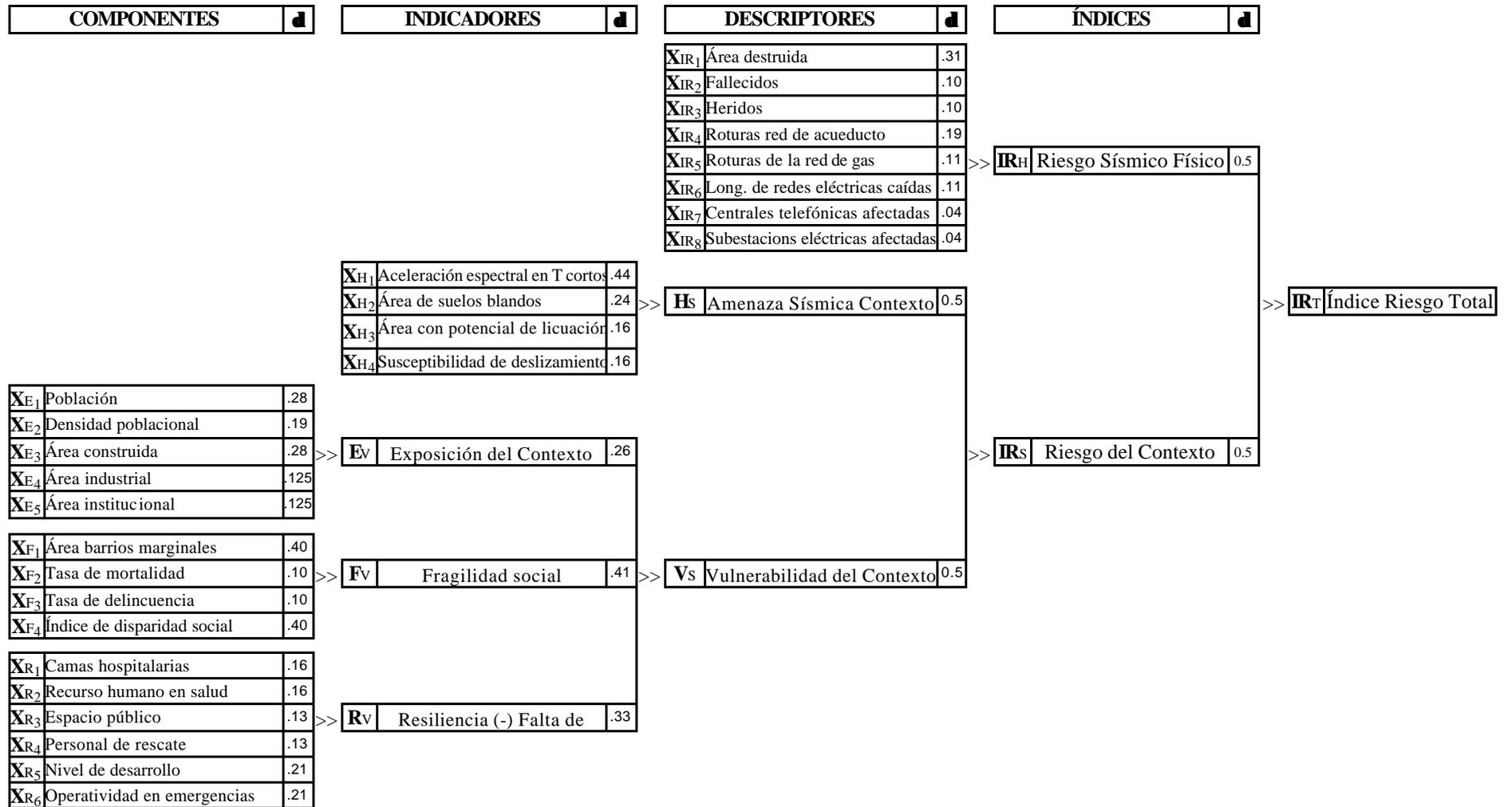


Figura 7.3: Índices de riesgo relativo para las Alcaldías Menores de Bogotá con los factores de participación utilizados.

### 7.1.1. Evaluación del índice de riesgo físico

El análisis del potencial de daño se realizó llevando a cabo una identificación del tipo de edificios que se han construido en la ciudad desde su fundación. Para ello fue necesario hacer una revisión de su crecimiento histórico y de la manera como las tecnologías de la construcción se fueron modificando con el pasar del tiempo. Por otra parte, y teniendo en cuenta que las tipologías de construcción también cambian de acuerdo con la capacidad económica, fue necesario hacer un análisis de los estratos socioeconómicos y de la información en relación con las zonas de uso, limitación de altura de los edificios y zonas de tratamiento que tiene el Departamento Administrativo de Planeación de la ciudad. Finalmente, a partir de la información sistematizada en la Oficina de Catastro y una amplia verificación en el campo realizada por equipos de evaluadores, se logró desarrollar una base de información que permitió conocer qué tipologías de edificios son las más comunes en la ciudad y la manera en que están distribuidas en cada una de las manzanas, barrios y sectores. Teniendo en cuenta que las características dinámicas, de resistencia, rigidez y disipación de energía inelástica de los edificios frente a los terremotos varían notablemente en función del tipo de material del sistema estructural, de la altura, de la técnica de construcción, de la edad, y de otros factores, se clasificaron las tipologías estructurales a considerar en el estudio. En dicha clasificación se tuvieron en cuenta las características arquitectónicas y constructivas observadas del conjunto de edificios de la ciudad.

En total se estudió una área de 405 km<sup>2</sup> correspondiente a 46 000 manzanas sobre un perímetro de la ciudad del orden de 92 km. El área construida total es de 317 millones de metros cuadrados, de la cual las estructuras informales y de mampostería constituyen el 66%, los edificios porticados de hormigón armado de hasta de 5 pisos son el 20% y los edificios porticados mayores que 5 pisos son el 9%. Con el fin de determinar los diferentes niveles de daño que puede presentar un edificio se adaptó inicialmente la metodología propuesta en el ATC-13 (Applied Technology Council, 1985) basada en estados de daño. Los valores de probabilidad de daño propuestos por el método ATC-13 para cada valor de intensidad sísmica, son basados en las matrices de probabilidad de daños desarrolladas por Whitman *et al.* (1973), en la aplicación de la técnica estadística del método Delphi y en el criterio y las apreciaciones de un amplio grupo de expertos. Posteriormente se realizaron verificaciones utilizando metodologías más refinadas similares a las planteadas en HAZUS; técnica propuesta por RMS (Bendimerand 1999) para FEMA (1999). Se utilizó el modelo propuesto por Cardona y Hurtado (2000b), basado en la simulación estocástica del comportamiento de edificios de hormigón armado, típicos para Colombia, utilizando el programa PROMENVIR de procesamiento en paralelo (Bonnet *et al.* 2001).

El valor de la amenaza sísmica en cada zona de la ciudad (figura 7.4) está representado por un espectro de aceleración correspondiente a cada sismo postulado (figura 7.5). En consecuencia, para conocer el valor de aceleración espectral al que está sometida cada edificio fue necesario estimar el período fundamental de vibración promedio para cada uno de los tipos de edificios definidos. El coste de reposición se obtuvo para cada tipo estructural con base en el coste por metro cuadrado de construcción dependiendo del estrato socio-económico. Dicho valor varió entre US\$ 240 y US\$ 864 por metro cuadrado para edificios de mampostería en estrato bajo y pórticos de hormigón armado de más de diez pisos en estrato alto, respectivamente.

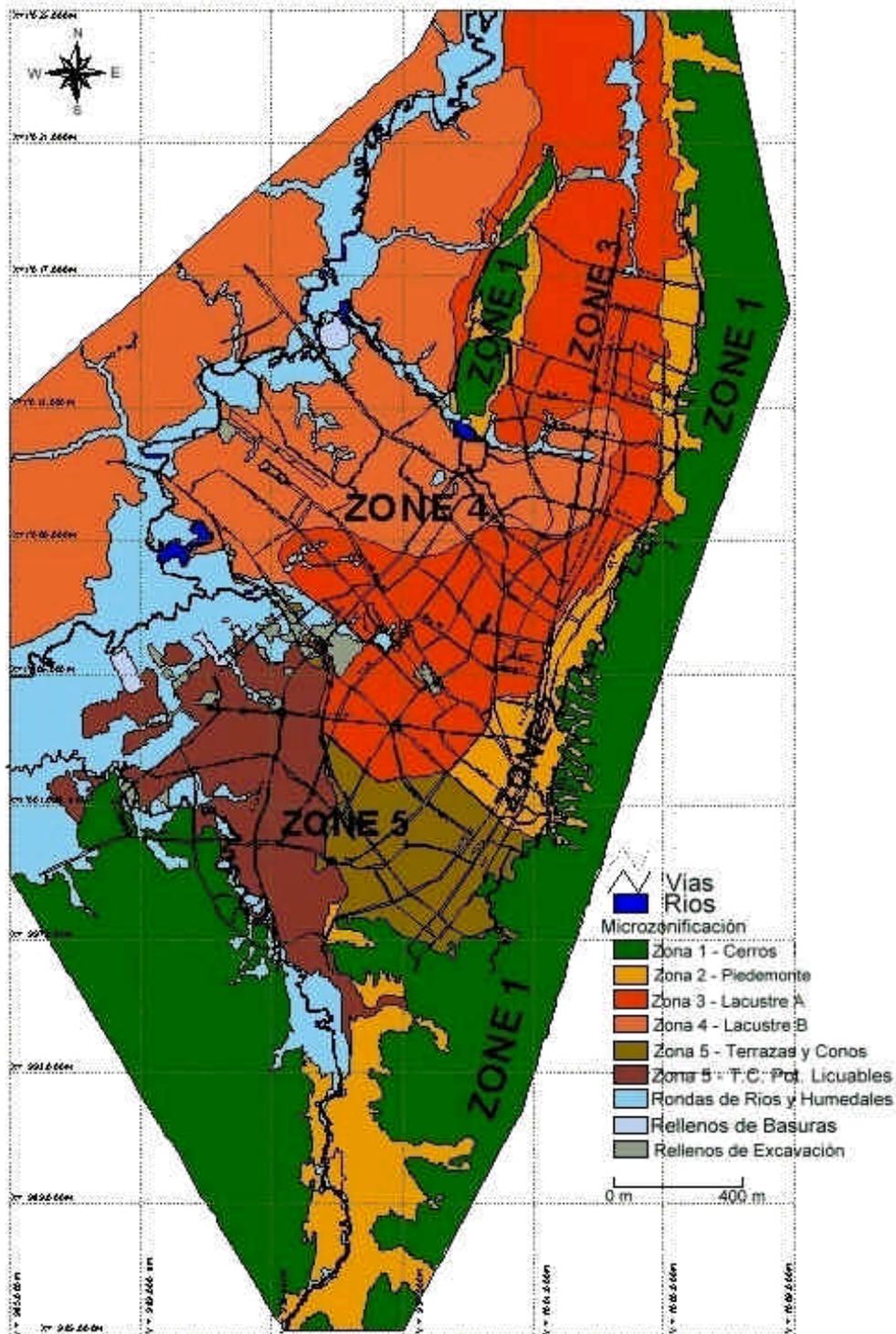


Figura 7.4: Mapa de microzonificación sísmica de Bogotá (Universidad de los Andes, 1996).

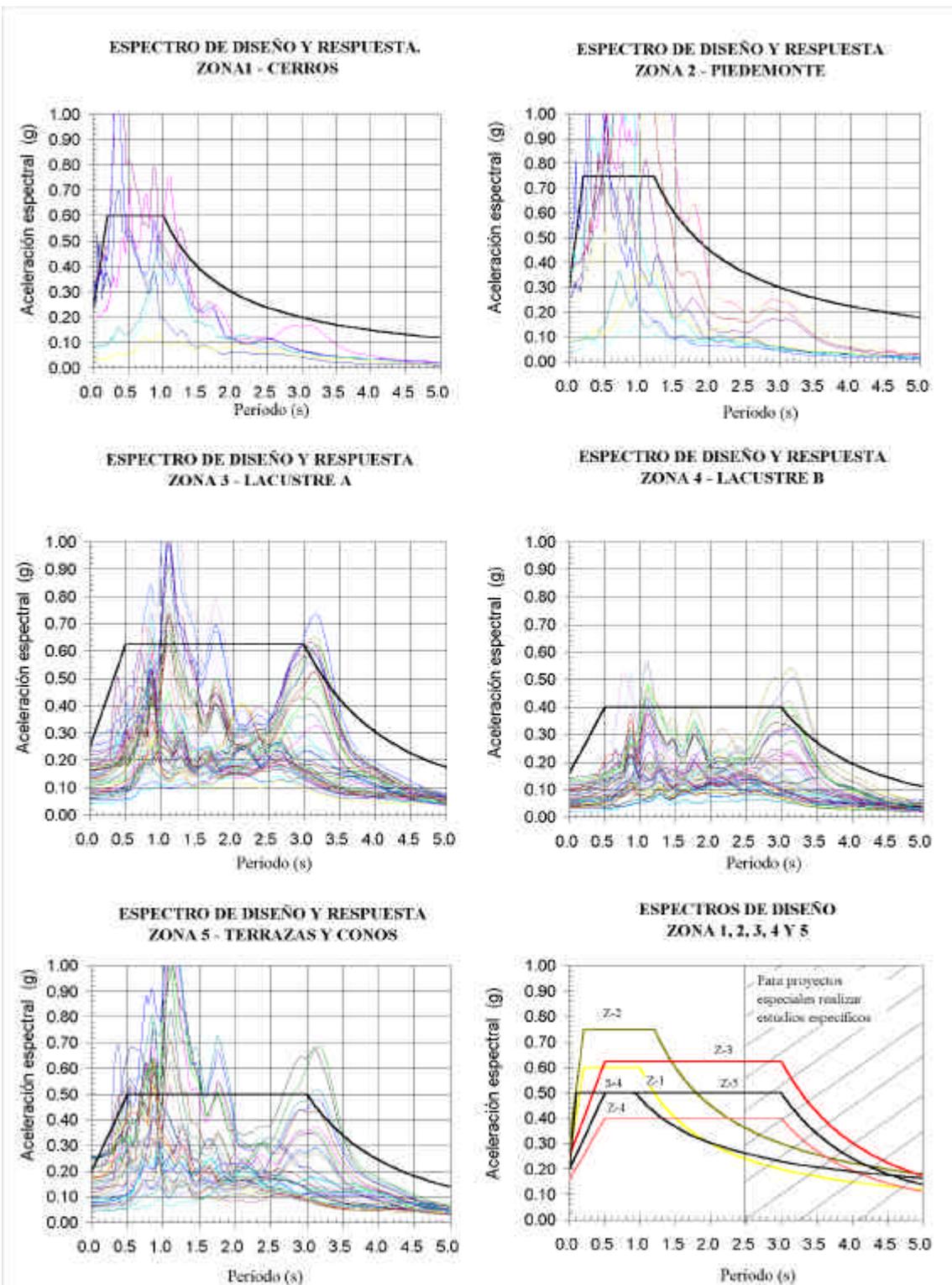
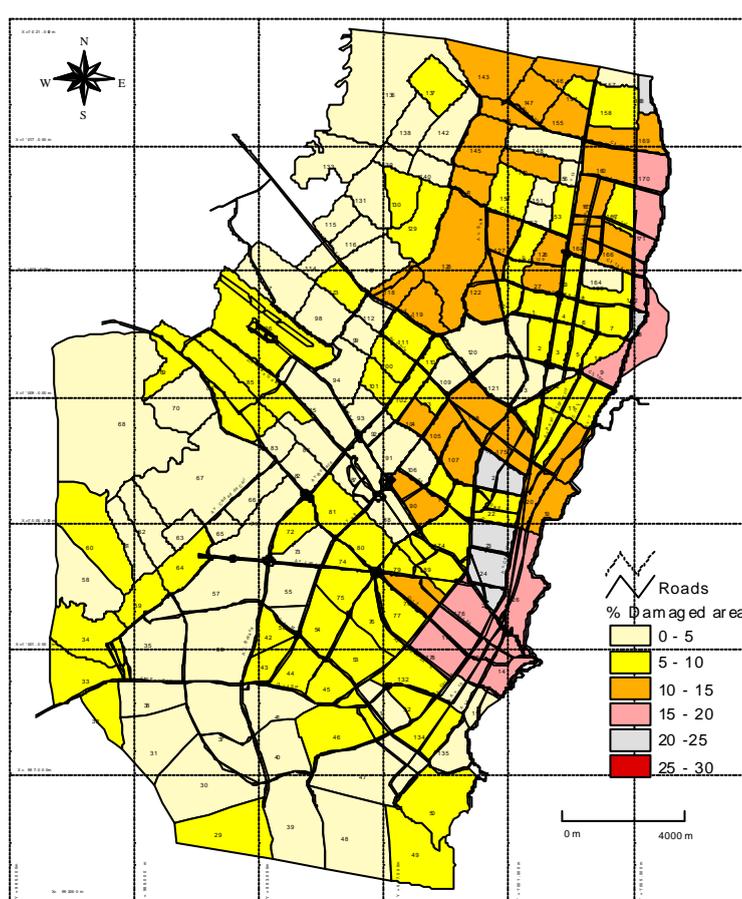


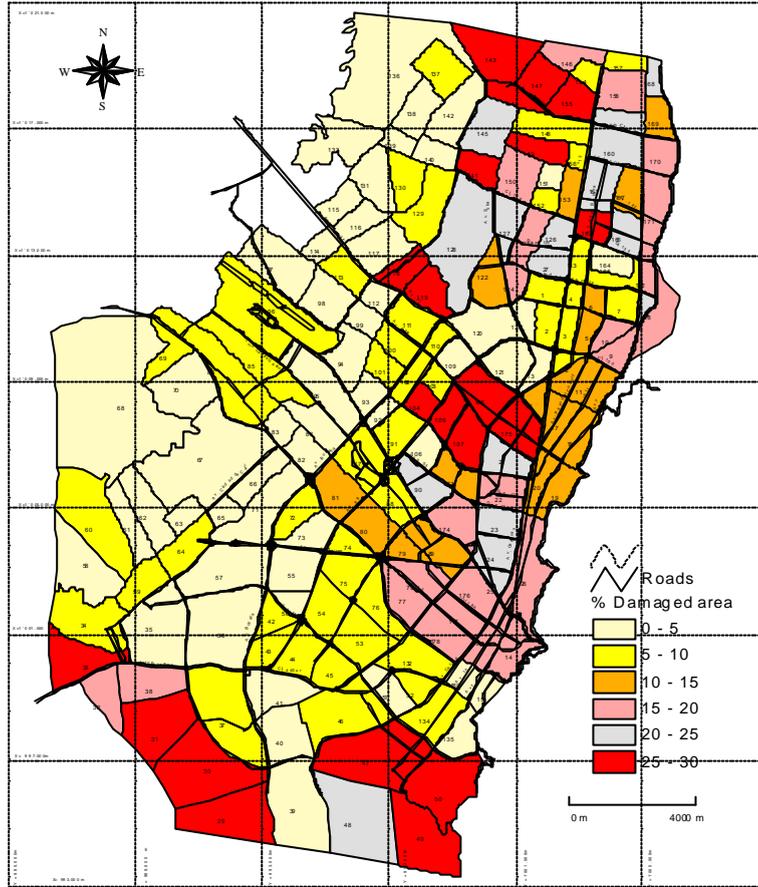
Figura 7.5: Espectros de aceleración,  $S_a$ , para cada zona (Cardona y Yamín 1997)

A partir de esta información se obtuvieron las pérdidas económicas directas como un porcentaje del coste de reposición para cada clase de edificio. Debido a la falta de información local, para evaluar el número de personas que puedan presentar heridas e incluso fallecer se utilizaron estimadores similares a los propuestos por Whitman y Cornell (1976) y ajustados en el ATC-13, que son generalmente aceptados en los países occidentales. Las figuras 7.6 y 7.7 ilustran por celdas el área de construcción dañada considerando los dos escenarios más críticos de amenaza sísmica para la ciudad.

En relación con las líneas vitales, teniendo en cuenta la información disponible aportada por las diferentes empresas de servicios públicos involucradas, se desarrolló un modelo simplificado que permitiera estimar de manera global la probabilidad de fallo o daño de los componentes principales de cada sistema. Para el estudio de las principales redes de distribución se utilizó inicialmente la metodología de estimación de daño propuesta por el ATC-13 (ATC 1985). El daño se evaluó como un porcentaje de la longitud caída de cable en el caso de las líneas de alta tensión y como número de roturas por kilómetro en el caso de las tuberías de abastecimiento de agua y gas. Para el cálculo de la vulnerabilidad de los edificios principales de los sistemas de energía eléctrica (subestaciones eléctricas) y teléfonos (centrales telefónicas) se utilizó la metodología aproximada del ATC-21 (ATC 1988). Posteriormente, se realizaron estudios detallados, dentro de los cuales se incluyó el análisis de las líneas de gas natural (Cardona y Yamín, 1997; Yamín y Caicedo 1999)



**Figura 7.6:** Escenario de daño para un sismo moderado en Bogotá (Cardona y Yamín 1997).



**Figura 7.7:** Escenario de daños para un sismo fuerte en Bogotá (Cardona y Yamín 1997).

Para la determinación del índice de riesgo físico, en el caso de Bogotá se definieron los siguientes descriptores, que fueron normalizados de acuerdo con el área de cada alcaldía local:

1. *Área destruida por sismo*,  $X_{IR1}$ : Definida como el área probable de destrucción, en  $m^2$ , de las zonas construidas, estimada según la metodología del ATC-13 modificada por la Universidad de los Andes y verificada según se indicó anteriormente, en el marco de un escenario sísmico hipotético para la ciudad.
2. *Número de fallecidos*,  $X_{IR2}$ ; *Número de heridos*,  $X_{IR3}$ : Definidos como el número probable de muertos y heridos, utilizando estimadores similares a los propuestos por Whitman y Cornell (1976), ajustados de acuerdo con el ATC-13 y HAZUS, en el marco de un escenario sísmico hipotético para la ciudad.
3. *Roturas de la red de abastecimiento de agua*,  $X_{IR4}$ ; *Roturas de la red de gas*  $X_{IR5}$ ; *Longitud caída de redes eléctricas*  $X_{IR6}$ : Definidos como el número probable de roturas que se presentarían en las redes de abastecimiento de agua y gas y la longitud caída de la red eléctrica, estimados según las metodologías del ATC-13 y HAZUS, en el marco de un escenario sísmico hipotético.
4. *Número de centrales telefónicas afectadas*,  $X_{IR7}$ ; *Número de subestaciones eléctricas afectadas*,  $X_{IR8}$ : Definidos como el número de las centrales telefónicas y subestaciones eléctricas con una alta vulnerabilidad sísmica, de acuerdo con el

procedimiento de evaluación simplificada desarrollado con base en el ATC-21 y otros parámetros adicionales.

Otra variable que podría ser utilizada como descriptor es el número de puentes que se podrían averiar en cada una de las unidades de análisis de presentarse los escenarios sísmicos hipotéticos planteados.

El Apéndice C presenta los valores del índice de riesgo físico sin escalar y la conversión a unidades conmensurables. También presenta gráficos que ilustran los valores relativos del índice de riesgo físico y de sus descriptores para todas las alcaldías de la ciudad.

La figura 7.8 ilustra los resultados del índice de riesgo físico obtenidos para las 19 alcaldías menores de la ciudad.

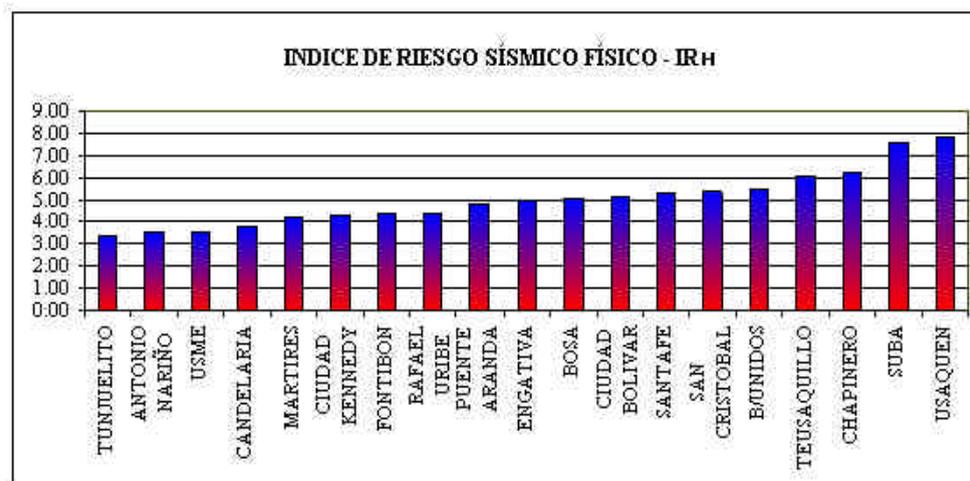


Figura 7.8: Índice de riesgo físico basado en los escenarios de pérdidas.

### 7.1.2. Evaluación del índice de riesgo sísmico del contexto

El índice de riesgo del contexto para un centro urbano como 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. Esta forma de cálculo se debe al hecho de que, para que exista el riesgo, la amenaza y la vulnerabilidad son mutuamente condicionantes y concomitantes, 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,  $H_{S_k}$** : 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,  $X_{H_1}$** : Definida como la media ponderada del valor espectral de la aceleración sísmica para los períodos de vibración (T) comprendidos entre 0.2 s y 0.5 s, en las zonas de microzonificación sísmica

- 1.2 *Área de suelos blandos,  $X_{H2}$* : Definida como el porcentaje del área de la alcaldía menor que es susceptible a la amplificación sísmica por las características dinámicas del suelo.  $T > 0.5$  s.
- 1.3 *Área con potencial de licuefacción,  $X_{H3}$* : Definida como el porcentaje de área de la alcaldía menor que presenta suelos arenosos no consolidados y saturados con alto potencial de licuefacción en caso de sismos moderados o fuertes.
- 1.4 *Área con susceptibilidad al deslizamiento,  $X_{H4}$* : Definida como el porcentaje del área de la alcaldía menor que presenta zonas con potencial inestabilidad de laderas en caso de sismos moderados o fuertes.

De existir la posibilidad de la acción de un tsunami o maremoto, también se podría incluir el área de inundación e impacto de las olas sobre la ciudad. Igualmente, cuando exista la posibilidad de incendios generalizados por que existan áreas de la ciudad que tengan construcciones particularmente propensas a la conflagración, ésta podría ser también una variable a considerar.

En el Apéndice C se encuentran los valores de amenaza sísmica sin escalar y la conversión a unidades conmensurables. También presenta gráficos que ilustran los valores relativos del descriptor de amenaza sísmica del contexto y de sus indicadores para todas las alcaldías de la ciudad.

La figura 7.9 ilustra el descriptor de amenaza sísmica del contexto para las 19 alcaldías menores de la ciudad.

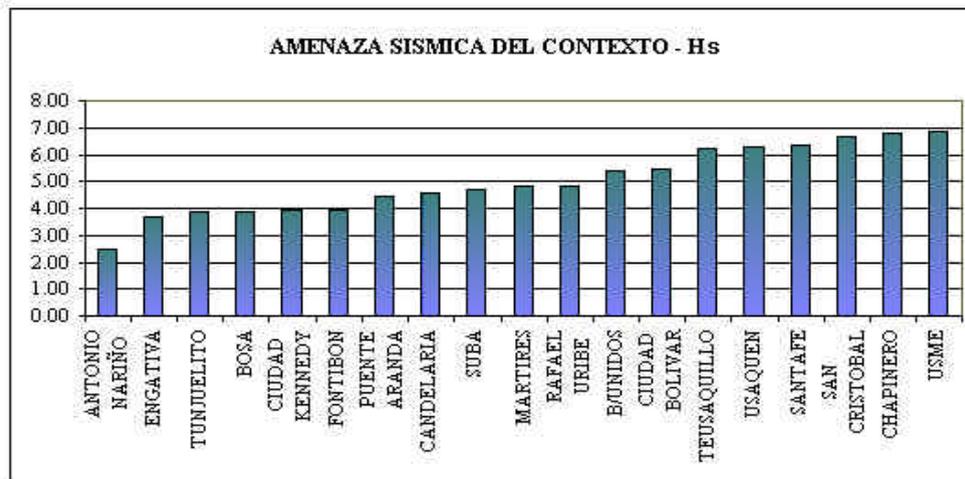


Figura 7.9: Descriptor de la amenaza sísmica del contexto.

2. *Vulnerabilidad sísmica del contexto,  $V_{Sk}$* : Definida como suma de los 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. Para su determinación, se definieron tres indicadores:
- 2.1 *Exposición,  $EV_k$* : Definida como el volumen normalizado de población, edificios 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*,  $\mathbf{X}_{E1}$ : Definida como el número medio de habitantes expuestos, en miles, en el área que cubre la jurisdicción de la alcaldía menor.
- 2.1.2 *Densidad poblacional*,  $\mathbf{X}_{E2}$ : Definida como el número habitantes dividido por el área construida, lo que refleja el grado de concentración y congestión de personas en el área de la alcaldía menor.
- 2.1.3 *Área construida*,  $\mathbf{X}_{E3}$ : Definida como el área normalizada de edificación y desarrollo urbano, en el área que cubre la alcaldía menor.
- 2.1.4 *Área industrial*,  $\mathbf{X}_{E4}$ : Definida como el área normalizada de zonas de industria, fabricas o empresas en el área de la alcaldía menor; refleja la dependencia económica.
- 2.1.5 *Área institucional*,  $\mathbf{X}_{E5}$ : Definida como el área normalizada de zonas de uso institucional o gubernamental en la jurisdicción de la alcaldía menor; refleja valores estratégicos y dependencia política.

La exposición se refiere, en general, al volumen y concentración de elementos por unidad de área. Un número mayor de elementos significa una mayor exposición y, por lo tanto, una mayor vulnerabilidad. Otros componentes también podrían ser incluidos, como el área de edificios históricos de valor patrimonial o monumentos. Este tipo de variables no necesariamente representa valores económicos sino valores estratégicos y culturales.

2.2 *Fragilidad social*,  $\mathbf{FV}_k$ : 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*,  $\mathbf{XF}_1$ : Definida como el área normalizada de asentamientos humanos ilegales con deficiencia de servicios públicos y de baja estratificación socioeconómica en el área que cubre la jurisdicción de la alcaldía menor.
- 2.2.2 *Mortalidad*,  $\mathbf{XF}_2$ : Definida como la tasa o número de personas que mueren anualmente por causa natural por cada mil habitantes en la jurisdicción de la alcaldía menor.
- 2.2.3 *Delincuencia*,  $\mathbf{XF}_3$ : Definida como la tasa o número de delitos anuales por cada mil habitantes en el área de la alcaldía menor; describe el deterioro social en la zona.
- 2.2.4 *Disparidad social*,  $\mathbf{XF}_4$ : Definida como el nivel de necesidades básicas insatisfechas y de desarrollo humano relativo de la alcaldía menor.

Los componentes del indicador de fragilidad social se seleccionaron de acuerdo con la información disponible para las diferentes alcaldías menores. Se ha intentado reflejar de la manera más adecuada posible las condiciones de deterioro social. En términos relativos, un área que experimenta un alto deterioro social es más vulnerable y por lo tanto está en mayor riesgo.

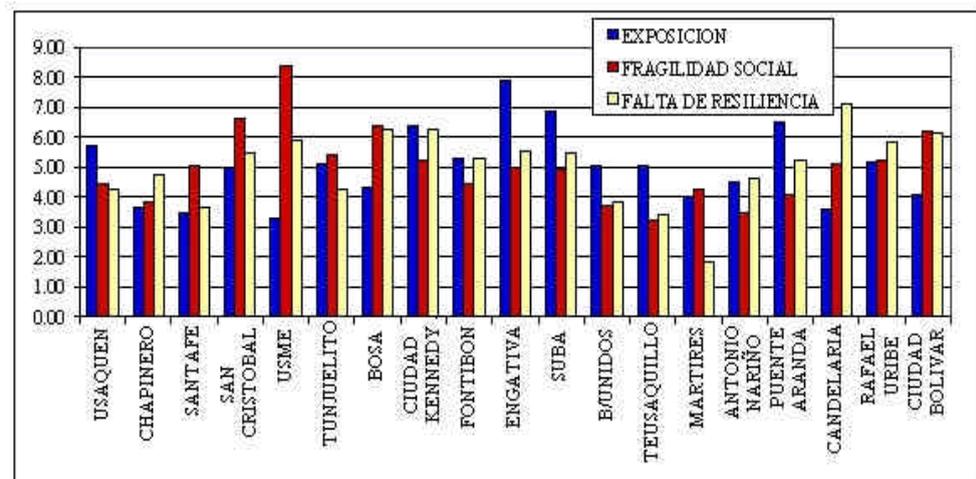
2.3 *Falta de resiliencia*,  $\mathbf{RV}_k$ : Definida como el inverso de la capacidad económica, social e institucional (resiliencia), que representa la debilidad para absorber el impacto de una crisis, la falta de capacidad para responder en caso de emergencia y

las deficiencias en la gestión institucional en la alcaldía menor. Para su determinación se definieron los siguientes componentes:

- 2.3.1 *Camas hospitalarias*,  $\mathbf{XR}_1$ : Definido como el número normalizado de camas del conjunto de hospitales e instituciones de salud en el área que cubre la alcaldía menor.
- 2.3.2 *Recurso humano en salud*,  $\mathbf{XR}_2$ : Definido como el número normalizado de médicos y enfermeras que trabajan en las instituciones de salud localizadas en la jurisdicción de la alcaldía menor.
- 2.3.3 *Espacio público*,  $\mathbf{XR}_3$ : Definido como el área normalizada de espacio disponible para el albergue o alojamiento temporal y la atención masiva de emergencias en el área que cubre la alcaldía menor.
- 2.3.4 *Personal de rescate*,  $\mathbf{XR}_4$ : Definido como el número normalizado de socorristas de Cruz Roja, Defensa Civil y Bomberos disponible en la zona de influencia de la alcaldía menor.
- 2.3.5 *Nivel de desarrollo*,  $\mathbf{XR}_5$ : Definido como la calificación del nivel de calidad de vida, organización y planificación urbano en el área de la alcaldía menor, valorado por la Secretaría de Planeación de la ciudad.
- 2.3.6 *Operatividad en emergencias*,  $\mathbf{XR}_6$ : Definida como la calificación de la preparación y la capacidad de respuesta institucional del comité operativo de emergencias de la alcaldía menor, valorado por la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de la ciudad.

En el Apéndice C se encuentran los valores de los componentes de exposición, fragilidad y falta de resiliencia sin escalar y la conversión a unidades conmensurables. También presenta gráficos que ilustran los valores relativos de estos indicadores y de los descriptores de vulnerabilidad del contexto para todas las alcaldías de la ciudad.

La figura 7.10 muestra los valores de los indicadores de exposición, fragilidad social y falta de resiliencia, que componen el descriptor de vulnerabilidad del contexto. La figura 7.11 ilustra los valores sumados del mismo descriptor.



**Figura 7.10:** Indicadores de exposición, fragilidad social y falta de resiliencia.

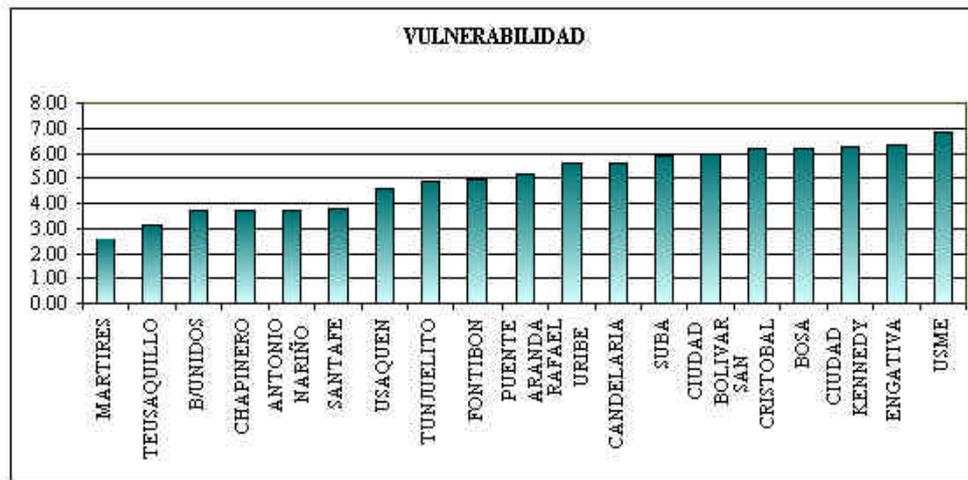


Figura 7.11: Descriptores de vulnerabilidad del contexto para las alcaldías menores.

### 7.1.3. Análisis y categorización del riesgo sísmico urbano

Una vez conocidos los valores de los índices de riesgo sísmico físico (*hard*) y el índice de riesgo sísmico del contexto (*soft*) se puede obtener una visión relativa del riesgo en general, o riesgo total, de cada una de las alcaldías de la ciudad. La figura 7.12 muestra los valores de los descriptores de amenaza y vulnerabilidad del contexto, la figura 7.13 ilustra los valores de los índices de riesgo sísmico físico y del contexto y la figura 7.14 muestra 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. Hay casos en los cuales el riesgo del contexto lo determina más la alta vulnerabilidad que la amenaza, como en las localidades de Engativa y Suba. Hay casos en donde ambas situaciones son muy preocupantes, como en San Cristóbal y Usme, lo que las ubica al final con un alto riesgo sísmico total. Usaquen, una localidad de estrato socio-económico medio-alto, localizada en suelos blandos y con edificios de mediana altura, ofrece el mayor riesgo sísmico total. Teusaquillo y Chapinero, de estrato medio, y San Cristóbal, Usme y Ciudad Bolívar, de estratos bajos, comparten los mayores niveles de riesgo sísmico total de la ciudad.

En el caso de Bogotá esta evaluación ha permitido tener una lectura de los factores que inciden en el nivel de riesgo no sólo desde el punto de vista del daño físico potencial sino desde una perspectiva económica, social e institucional. La posibilidad de desagregar los factores del riesgo en sus componentes ha facilitado la identificación de las influencias que determinan el porqué un valor relativo es mayor o menor en cada caso. De esta manera se ha podido iniciar un plan de gestión de riesgo que indica y orienta las medidas preventivas que deben realizarse en cada localidad, de acuerdo con la capacidad real de intervención y los recursos disponibles. El Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá, aprobado durante el año 2000, tuvo en consideración los resultados de este trabajo y la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de la Alcaldía Mayor de Bogotá utiliza desde 1999 la información obtenida para hacer seguimiento de la efectividad y eficiencia de las acciones de reducción de riesgo.

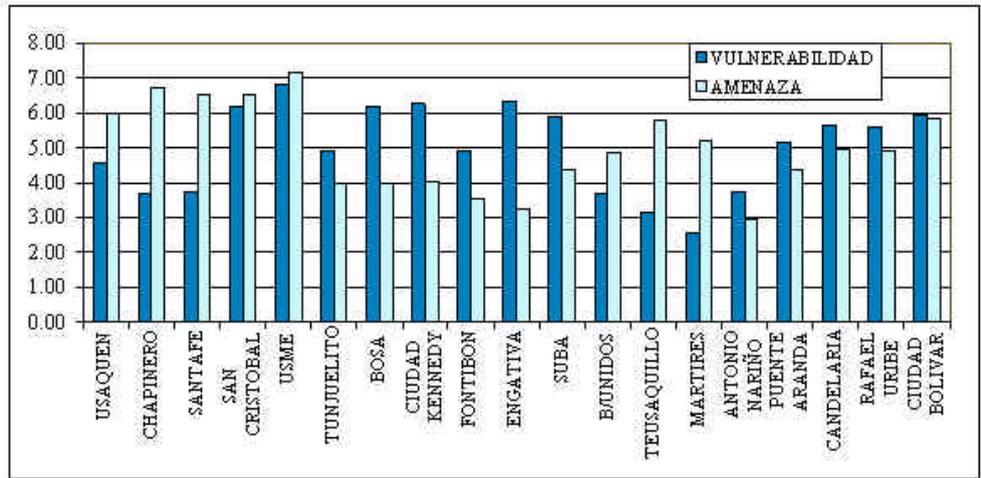


Figura 7.12: Descriptores de amenaza y vulnerabilidad del contexto.

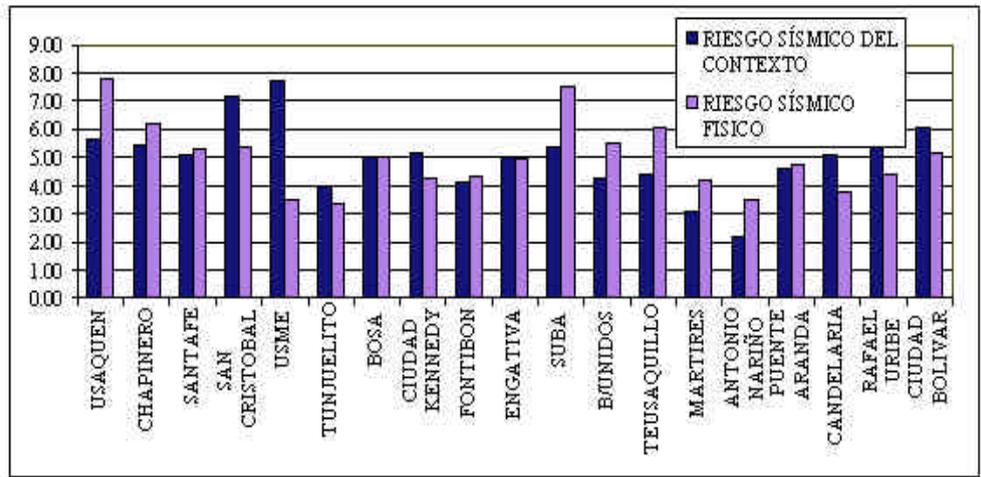


Figura 7.13: Índices de riesgo sísmico físico y riesgo sísmico del contexto.

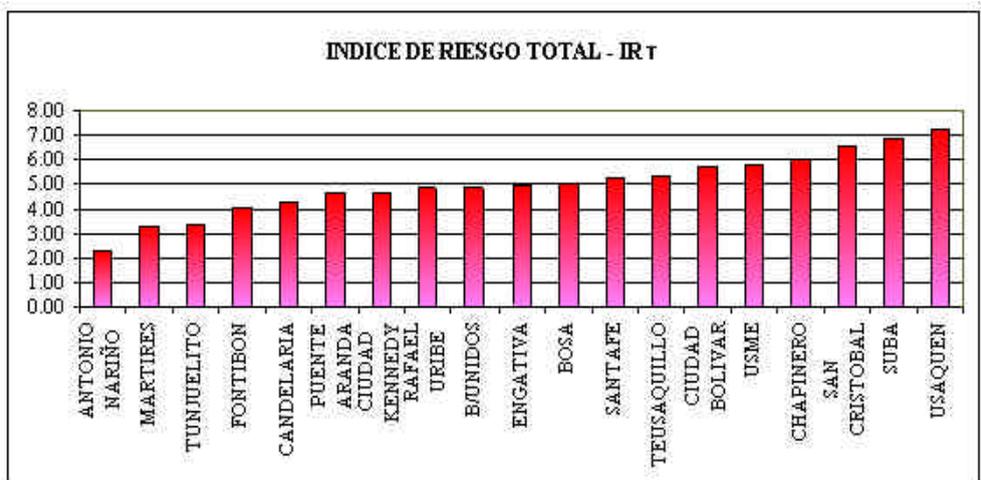


Figura 7.14: Categorización de las alcaldías menores por el índice de riesgo sísmico total.

El conjunto de gráficas de la figura 7.15 muestra la desagregación de los indicadores del riesgo sísmico físico, del descriptor de amenaza sísmica y de los indicadores de exposición, fragilidad social y falta de resiliencia de una de la alcaldía menor de Usaquen. Este tipo de gráficos, entre otros, permite identificar qué indicadores tienen la mayor incidencia comparativa y por lo tanto a cuáles de ellos se deben dirigir las medidas de mitigación y prevención. En el Apéndice C se incluyen todas las desagregaciones de los factores utilizados.

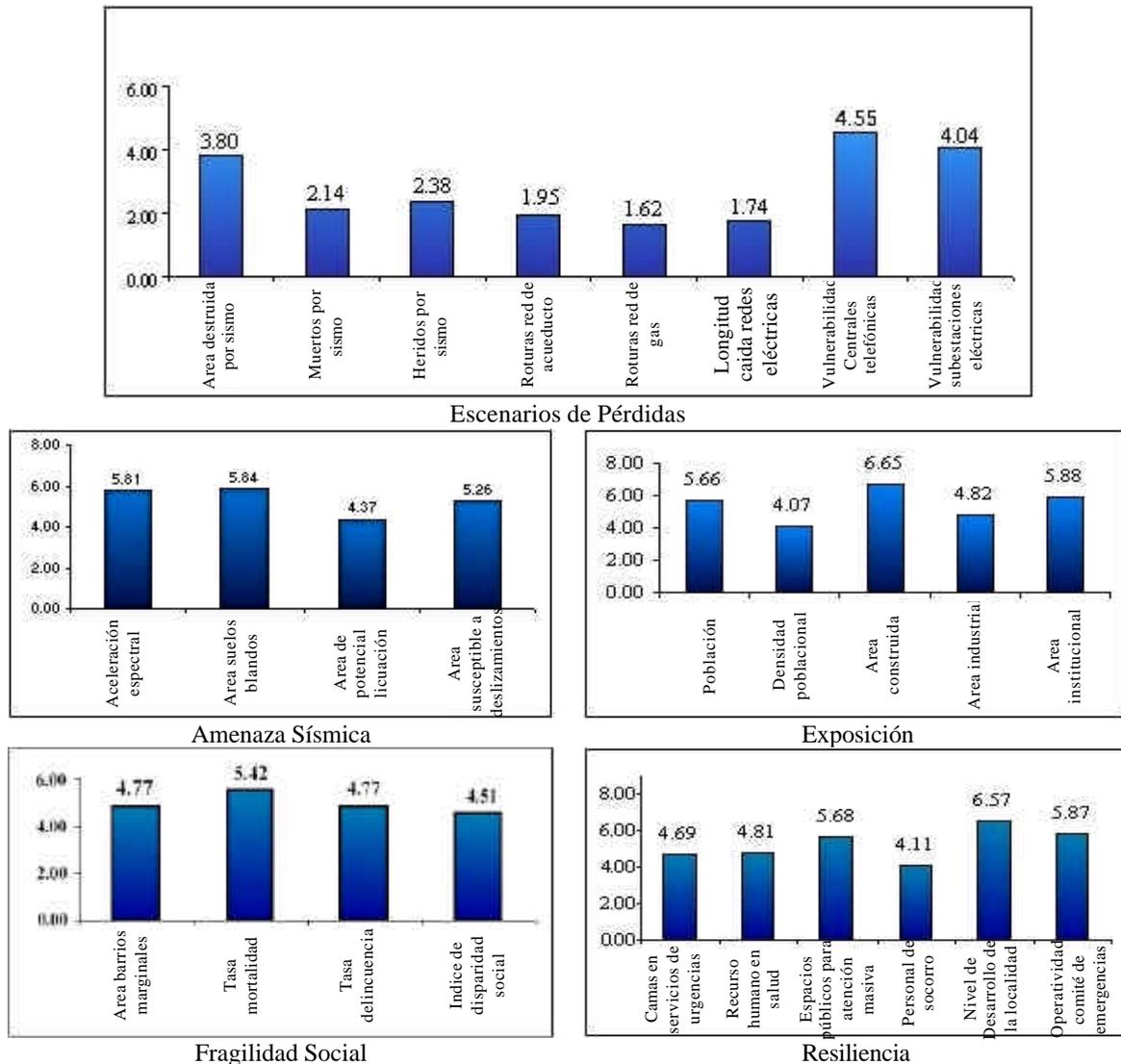


Figura 7.15: Desagregación de indicadores para una alcaldía menor.

En conclusión, la técnica de índices relativos aquí propuesta permite categorizar la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de las diferentes áreas de una ciudad, una región o un país. En particular, para efectos de ilustración, se aplicó esta técnica para estimar el riesgo sísmico de las alcaldías menores de Bogotá, Colombia, desde una perspectiva holística. Esta técnica permite actualizar fácilmente el valor de las variables, lo que favorece la realización de análisis de sensibilidad y calibración. De la misma manera, puede llevarse a cabo 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, es sencillo identificar los aspectos más relevantes del riesgo sísmico relativo, sin la necesidad de realizar mayores esfuerzos de análisis e interpretación de resultados. La principal ventaja de la técnica aquí planteada es la posibilidad de desagregar los índices en descriptores y éstos a su vez en indicadores, para identificar, de esta manera, la razón por la cual una localidad presenta un mayor índice de riesgo que otra. Esta virtud del método permite verificar los resultados y priorizar las acciones de prevención y planificación que se deben implantar para la intervención y modificación de las condiciones que más influyen en el riesgo sísmico de la ciudad.

## **7.2. Modelización mediante un sistema neuronal difuso**

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 (Kosko 1995). Para los fines de este trabajo, la lógica difusa reviste gran interés pues, ajuicio del autor, 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 artificial (Jang *et al.* 1997).

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*.

La relación de las interpretaciones cuantitativa y cualitativa de la información se ilustra en la figura 7.16, 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

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

donde  $A, A', B$  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 *desfusificación*, 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.

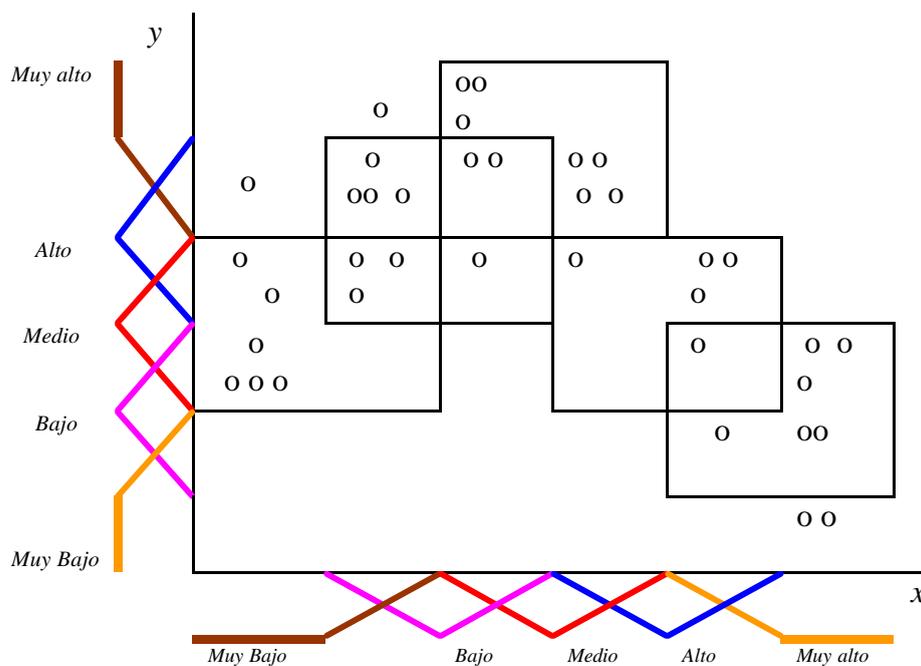
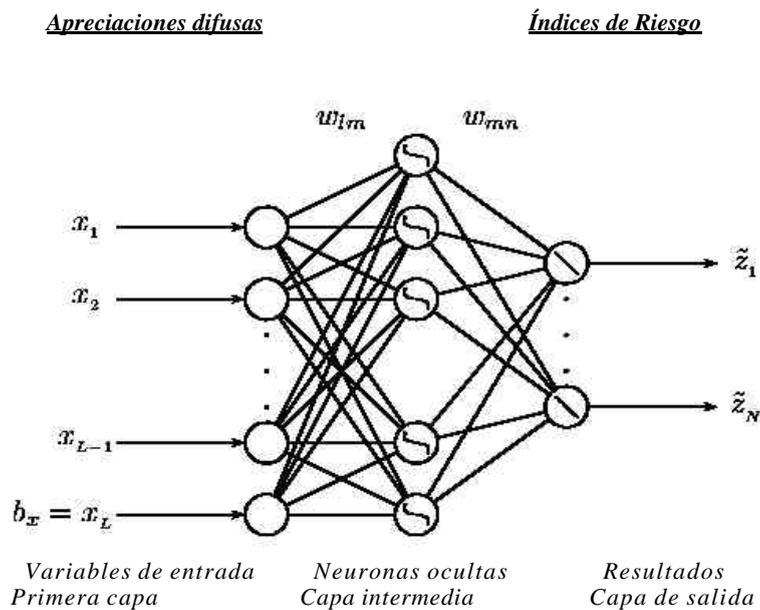


Figura 7.16: Interpretación difusa de datos numéricos.

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. (Leondes 1998). Una neurona real está 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. La figura 7.17 ilustra un esquema general del funcionamiento de una red neuronal.



**Figura 7.17:** Esquema de cálculo de la red neuronal difusa

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. Un resumen de los fundamentos de la teoría de los conjuntos difusos y de las redes neuronales se presenta en el Apéndice D.

Aquí se propone una herramienta para la evaluación del riesgo sísmico en centros urbanos desde un punto de vista multidisciplinario. En el modelo se decidió hacer uso de la lógica difusa debido a que la información que se maneja en muchos casos es incompleta y subjetiva. La técnica de valoración de las diferentes variables utiliza expresiones cualitativas y lingüísticas que son fácilmente utilizadas mediante la teoría de conjuntos difusos. Por otra parte, se utilizan también redes neuronales debido a que se desea contar con un sistema experto que pueda ser calibrado utilizando el criterio de especialistas. La red neuronal desarrollada para el modelo de evaluación del Riesgo Sísmico consta de cinco capas o niveles. En su interior se ha estructurado una subred de tres capas que evalúa la vulnerabilidad sísmica del contexto. Las neuronas de entrada están agrupadas en cuatro grupos, pero no todas se encuentran en la primera capa. En esta red las neuronas de entrada solamente afectan la neurona intermedia del grupo al cual corresponden.

Para cada variable se cuenta con conjuntos difusos básicos predefinidos para los cinco niveles de daño posibles, cuyas calificaciones lingüísticas cambian en cada caso. Las funciones de pertenencia para las cinco valoraciones lingüísticas se muestran en la figura 7.18. Estos están basados en índices de daño escogidos para cada nivel de daño, según se explica más adelante.

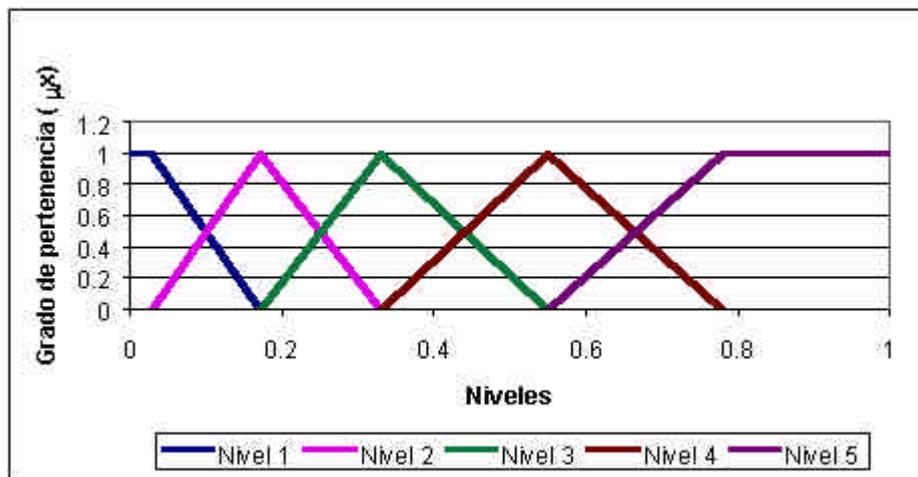


Figura 7.18: Conjuntos difusos utilizados para las diferentes calificaciones

El modelo de la red neuronal para la estimación del riesgo sísmico urbano es el que presenta la figura 7.19. Cada elemento variable contribuye con su función de pertenencia, la cual tiene un peso dentro del componente. De cada componente se calcula un índice numérico como el centroide del área de las funciones de pertenencia ponderadas por sus correspondientes factores de participación. Esto implica que el índice numérico 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 componentes que, aunque no tengan una función de pertenencia equivalente a dichas calificaciones, sí tengan una influencia o peso relativamente alto.

La estimación del riesgo sísmico urbano se realiza valorando para cada unidad de análisis, que bien puede ser una comuna, distrito o cualquier área suburbana, las variables físicas y del contexto que caracterizan la amenaza y la vulnerabilidad.

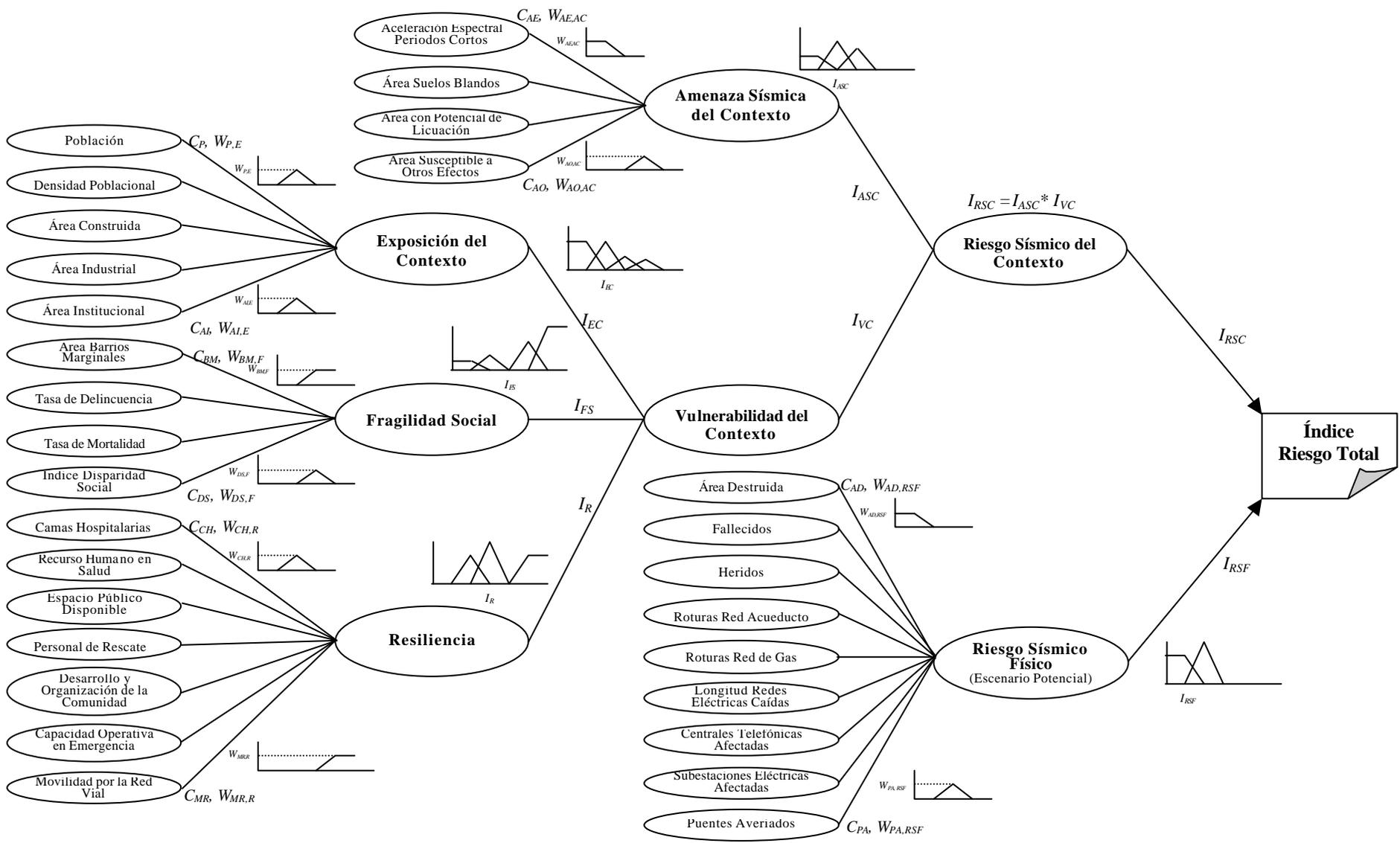


Figura 7.19 Estructura de la red neuronal

### 7.2.1 Nivel de entrada de la red neuronal

En esta capa hay diez y seis neuronas de entrada agrupadas en tres familias según el tipo de datos. Para cada variable de entrada se da una calificación y el peso o importancia con la cual la calificación influirá sobre la neurona intermedia correspondiente. El peso es normalizado y se calibra paulatinamente en la medida en que los pesos son introducidos por el evaluador para cada neurona intermedia. Los pesos se calibran mediante una función de aprendizaje, lo que permite que una vez la red ha sido utilizada suficientemente los pesos de las neuronas de entrada sean controlados por la red.

Los pesos o influencias relativas pueden tener un valor entre 0 y 100 y se normalizan tal como se indica en la ecuación 7.9. Con la unión de los conjuntos difusos escalados según su extensión se halla la calificación para cada grupo de variables.

$$w_{ij} = \frac{P_{ij}}{\sum_i P_{ij}}; \sum_i w_{ij} = 1 \quad [7.9]$$

Las neuronas de entrada que hacen parte de la primera capa de la red neuronal se encuentran agrupadas en variables de Exposición, Fragilidad Social y Resiliencia; es decir, los componentes de la Vulnerabilidad del Contexto. La tabla 7.3 presenta las neuronas de entrada al modelo en la primera capa.

A cada una de las variables se le asigna una calificación dentro de los cinco niveles posibles de valoración, que correspondientes a los conjuntos difusos mencionados anteriormente, y una influencia relativa sobre la neurona intermedia, que en este caso corresponde a la Vulnerabilidad del Contexto de la unidad de análisis.

**Tabla 7.3:** Neuronas de entrada en la subred

Grupo	Neuronas
Exposición	Población
	Densidad Poblacional
	Área Construida
	Área Industrial
	Área Institucional
Fragilidad Social	Área Barrios Marginales
	Tasa de Delincuencia
	Tasa de Mortalidad
	Índice de Disparidad Social
Resiliencia	Camas Hospitalarias
	Recurso Humano en Salud
	Espacio Público Disponible
	Personal de Rescate
	Desarrollo y Organización de la Comunidad
	Capacidad Operativa en Emergencia
	Movilidad por la Red Vial

### 7.2.2. Nivel intermedio de la red neuronal

A las neuronas de este nivel llegan las calificaciones de cada uno de los miembros del grupo de neuronas con su respectivo peso o grado de importancia ( $C, W$ ). En este nivel se encuentran tres neuronas correspondientes a cada uno de los grupos de variables: Exposición del Contexto, Fragilidad Social y Resiliencia, como se indica en el diagrama de la figura 7.19. Es importante aclarar que para este modelo de red las neuronas de entrada no tienen influencia sobre todas las neuronas intermedias, únicamente influyen sobre la neurona intermedia correspondiente al grupo de variables a la que pertenece.

Los pesos o influencias de las neuronas de entrada sobre las de la capa intermedia son proporcionadas por el evaluador, tienen un valor en el rango  $[0, 100]$  y son normalizadas utilizando la expresión 7.9, indicada previamente. Los conjuntos difusos son constituidos a partir de la unión de los conjuntos pertenecientes a cada neurona, los cuales están dados por la calificación hallada y el peso o importancia suministrados por el evaluador en cada caso, como se indica en la ecuación 7.10.

$$m_G(C) = \max(w_{G,N1} * m_{C_{N1}}(C_{N1}), \dots, w_{G,N5} * m_{C_{N5}}(C_{N5})) \quad [7.10]$$

Con la *desfusificación* de los conjuntos difusos utilizando el método del centroide de área (COA) se halla un índice correspondiente a cada neurona intermedia (grupo de variables)  $I_{EC}, I_{FS}, I_R$ , según la ecuación 7.11, donde  $G$  corresponde al grupo de Exposición,  $E$ , Fragilidad Social,  $FS$ , o Resiliencia,  $R$ .

$$I_G = \left[ \max(w_{G,N1} * m_{C_{N1}}(C_{N1}), \dots, w_{G,N5} * m_{C_{N5}}(C_{N5})) \right]_{centroide} \quad [7.11]$$

En la segunda capa se encuentran las tres neuronas intermedias pertenecientes a la subred (Exposición, Fragilidad Social y Resiliencia) y cuatro neuronas de entrada pertenecientes al grupo de variables de Amenaza Sísmica del Contexto, expresada de acuerdo con las variables que señala la tabla 7.4. Estas neuronas de entrada tienen el mismo tratamiento que las pertenecientes a la subred. Cada una es calificada y le es asignado un peso o influencia relativa sobre la neurona intermedia en la siguiente capa de la red, con esto se conforma un conjunto difuso para cada variable.

**Tabla 7.4:** Neuronas de entrada en la segunda capa de la red neuronal

Grupo	Neurona
Amenaza Sísmica del Contexto	Aceleración espectral en períodos cortos
	Área de suelos blandos
	Área con potencial de licuación
	Área susceptible a otros efectos

En esta fase de la evaluación los índices obtenidos de la capa anterior (para cada grupo de variables), corresponden a tres coordenadas en un espacio 3-D. Estas se utilizan para determinar el nivel de Vulnerabilidad del Contexto de acuerdo con su “cercanía” a una función de referencia que se ajusta o calibra cada vez que se realiza una evaluación. La ecuación 7.12, donde  $N$  corresponde a cada uno de los cinco niveles considerados ( $N1, N2, N3, N4, N5$ ), calcula la distancia del punto resultante de la evaluación a la “función respectiva” de cada nivel de vulnerabilidad.

$$S_{1(N)} = \sqrt{(I_{EC(N)} - I_{EC})^2 + (I_{FS(N)} - I_{FS})^2 + (I_{R(N)} - I_R)^2} \quad [7.12]$$

el nivel que se encuentre más cercano es el que corresponde a la vulnerabilidad del contexto evaluado.

Las calificaciones finales son: Vulnerabilidad Muy Baja, Baja, Moderada, Alta y Muy Alta. Una vez asignada la calificación de la vulnerabilidad se realiza un proceso de aprendizaje de la red neuronal, mediante la corrección de las coordenadas (índices) de los puntos que identifican cada nivel de vulnerabilidad del contexto. Para el efecto, se utilizan los índices resultantes de cada evaluación y una tasa de aprendizaje. La tasa de aprendizaje determina en qué cantidad la red aprende de cada evaluación que se realiza. Esta cantidad varía con la utilización de la red y es mayor en las primeras aplicaciones. Por esta razón, el entrenamiento de la red debe hacerse con la participación de expertos, particularmente, en las primeras evaluaciones.

Al igual que como se llevó a cabo el procedimiento para determinar las neuronas de la primera fase, la Amenaza Sísmica del Contexto se obtiene de utilizar los valores asignados y los pesos o influencias de las neuronas que la constituyen, utilizando la expresión 7.9. Los conjuntos difusos se construyen a partir de la unión de los conjuntos pertenecientes a cada neurona, como se indicó en la ecuación 7.10. Así, Con la *desfusificación* de los conjuntos difusos utilizando el método del centroide de área (COA) se determina el índice de  $I_{ASC}$  según la ecuación 7.11, donde  $G$  corresponde al grupo de Amenaza Sísmica ASC..

La tercera fase de la evaluación involucra nueve neuronas de entrada pertenecientes al grupo de las variables de Riesgo Sísmico Físico, las cuales se indican en la tabla 7.5.

**Tabla 7.5:** Neuronas de entrada en la tercera capa de la red neuronal

Grupo	Neurona
Riesgo Sísmico Físico (Escenario potencial)	Área Destruída
	Fallecidos
	Heridos
	Roturas en la Red de Acueducto
	Roturas en la Red de Gas
	Longitud Redes Eléctricas Caídas
	Centrales Telefónicas Afectadas
	Subestaciones Eléctricas Afectadas
	Puentes Averíados

A estas neuronas de entrada se les realiza el mismo procedimiento para determinar las neuronas de la primera fase. El Riesgo Sísmico Físico se obtiene de utilizar los valores asignados y los pesos o influencias de las neuronas que lo constituyen, utilizando la expresión 7.9. Los conjuntos difusos se construyen a partir de la unión de los conjuntos pertenecientes a cada neurona, como se indicó en la ecuación 7.10. Así, Con la *desfusificación* de los conjuntos difusos utilizando, de nuevo, el método del centroide de área (COA) se determina el índice de  $I_{RSF}$  según la ecuación 7.11, donde  $G$  corresponde al grupo de Riesgo Sísmico Físico  $RSF$ . La figura 7.20 ilustra un esquema con los pasos de todo el proceso de evaluación.

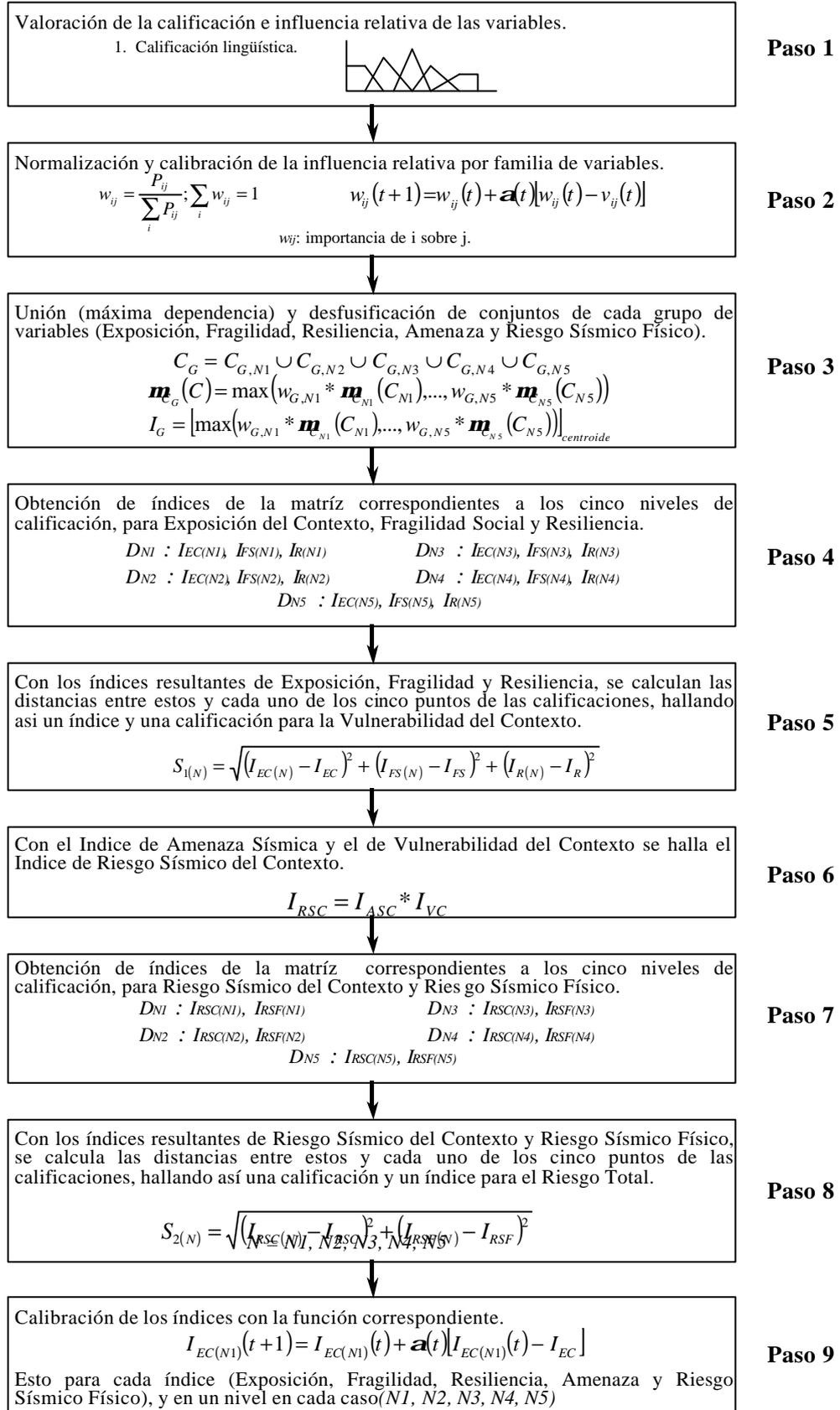


Figura 7.20 Pasos del modelo

La cuarta fase de la evaluación de la red corresponde a la determinación de la neurona intermedia mediante la cual se estima el índice de Riesgo Sísmico del Contexto,  $I_{RSC}$ , como el producto difuso de los índices de Amenaza Sísmica del Contexto y de Vulnerabilidad del Contexto, como se indica en la ecuación 7.13.

$$I_{RSC} = I_{ASC} * I_{VC} \quad [7.13]$$

### 7.2.3. Nivel de salida de la red neuronal

Finalmente, en la capa de salida se encuentran la neurona que corresponde al Riesgo Sísmico Total. En esta fase los índices obtenidos de la capa anterior, que corresponden a dos coordenadas en un espacio 2-D, se utilizan para determinar el nivel de riesgo total de acuerdo con su “cercanía” a una función de referencia que se ajusta o calibra en cada evaluación. La ecuación 7.14, donde  $N$  corresponde a cada uno de los cinco niveles considerados ( $N1, N2, N3, N4, N5$ ), calcula la distancia del punto resultante de la evaluación a la “función respectiva” de cada nivel de riesgo

$$S_{2(N)} = \sqrt{(I_{RSC(N)} - I_{RSC})^2 + (I_{RSF(N)} - I_{RSF})^2} \quad [7.14]$$

el nivel que se encuentre más cercano es el que corresponde al riesgo sísmico total evaluado.

Las calificaciones finales son: Riesgo Total Muy Bajo, Bajo, Moderado, Alto y Muy Alto. Una vez asignada la calificación del riesgo total se lleva a cabo un nuevo proceso de aprendizaje de la red neuronal, ajustando en cada evaluación las coordenadas de los puntos que identifican cada nivel de riesgo total. Para el efecto, se utilizan los índices resultantes de cada evaluación y una tasa de aprendizaje. Como ya se mencionó, la tasa de aprendizaje determina en qué cantidad la red aprende en cada aplicación.

### 7.2.4. Aprendizaje y calibración de la red neuronal

Para el aprendizaje y calibración de la red neuronal es necesario utilizarla inicialmente por expertos o simular evaluaciones con información de casos evaluados por especialistas. Esta información debe ser real en la medida de lo posible. Si esto no es así la red no llevará a cabo un aprendizaje adecuado y puede producir resultados erróneos.

La red neuronal propuesta se calibra en dos puntos que son: al inicio, al ajustar los pesos con los cuales se influye en las neuronas de entrada sobre las de la capa intermedia, y al final, en relación con las matrices de valores que definen las funciones de referencia, tanto al final de la subred, en los valores de vulnerabilidad del contexto, como en los valores de riesgo total.

Para dar inicio a la calibración es necesario definir un punto de partida para la red, por lo cual, para el caso de las funciones de referencia para el riesgo y la vulnerabilidad, se establecieron unos valores iniciales para cada nivel y para cada grupo de variables. Con este fin se tuvieron en cuenta los rangos propuestos por el ATC-13 (1985), los índices de Park, Ang y Wen (1987) y las curvas de fragilidad utilizadas por HAZUS-99 (1999), en las que es evidente la tendencia creciente en forma de S del nivel de consecuencias. En la tabla 7.6 están los valores que se proponen en este trabajo para

iniciar la calibración. Estos valores corresponden a los centroides de área de las funciones de pertenencia propuestas para cada calificación que ilustra la figura 7.18.

**Tabla 7.6:** Índices iniciales

Nivel	Valor definido
Muy Bajo	0.07
Bajo	0.17
Moderado	0.33
Alto	0.55
Muy Alto	0.76

Para la elección de los valores iniciales se tuvo en cuenta básicamente la tendencia que siguen los índices propuestos por Park, Ang y Wen. Estos autores consideran que a partir de un valor de 0.8, en su método, se representa la situación más grave o riesgo máximo, aunque Stone y Taylor (1993) proponen que sea a partir de 0.77. Teniendo en cuenta este planteamiento, se propuso como valor para el nivel de mayor gravedad 0.76. En la elección del valor medio para el nivel alto se intentó ser conservador, ya que los índices correspondientes a daño alto y moderado han sido muy discutidos y se han planteado dudas sobre si deberían ser menores. Para el valor de nivel bajo se conservó el mismo valor propuesto por los autores antes mencionados.

Para el proceso de calibración se tienen en cuenta los valores indicados como la representación de cinco puntos en un espacio 2-D o 3-D (un punto para cada nivel y tres o dos grupos de variables de evaluación para cada nivel).

La calibración se realiza por nivel de valoración y solamente se calibran los valores correspondientes a los grupos de variables que se tienen en cuenta en cada evaluación. En la capa de salida se realiza un aprendizaje de una red tipo Kohonen, como se indica en la ecuación 7.15.

$$I_{EC(N_1)}(t+1) = I_{EC(N_1)}(t) + \mathbf{a}(t) [I_{EC(N_1)}(t) - I_{EC}] \quad [7.15]$$

donde se recalcula el valor del índice de un grupo de variables  $I$  teniendo en cuenta una tasa de aprendizaje  $\mathbf{a}$  y la diferencia entre el índice resultante de la evaluación actual y el índice anterior del grupo de variables, como se indica en la expresión 7.16.. Esto ocurre en cada nivel de daño, según lo obtenido en la evaluación.

$$[I_{EC(N_1)}(t) - I_{EC}] \quad [7.16]$$

Para la calibración de las influencias o pesos de las neuronas de entrada sobre las neuronas intermedias se definen también unos valores iniciales. Estos han sido escogidos a partir de un proceso de jerarquización de las variables en cada uno de los grupos. Los pesos iniciales para los grupos de variables de exposición, fragilidad social, resiliencia, amenaza y riesgo sísmico físico se encuentran en las tablas 7.7, 7.8, 7.9, 7.10 y 7.11 respectivamente. Estos valores corresponden a los obtenidos con la técnica de *pairwise* utilizada para determinar los factores de participación de los indicadores expuestos en la técnica descrita en la primera parte de este capítulo.

**Tabla 7.7:** Pesos iniciales de las neuronas de entrada sobre la neurona intermedia de Exposición

Neurona de Entrada	Peso
Población	20
Densidad Poblacional	20
Área Construida	20
Área Industrial	20
Área Institucional	20

**Tabla 7.8:** Pesos iniciales sobre la neurona intermedia de Fragilidad Social

Neurona de Entrada	Peso
Área Barrios Marginales	40
Tasa de Delincuencia	10
Tasa de Mortalidad	10
Índice de Disparidad Social	40

**Tabla 7.9:** Pesos iniciales sobre la neurona intermedia de Resiliencia

Neurona de Entrada	Peso
Camas Hospitalarias	15
Recurso Humano en Salud	15
Espacio Publico Disponible	10
Personal de Rescate	15
Desarrollo y Organización de la comunidad	15
Capacidad Operativa en Emergencia	20
Movilidad por la Red Vial	10

**Tabla 7.10:** Pesos iniciales sobre la neurona intermedia De Amenaza Sísmica del Contexto

Neurona de Entrada	Peso
Aceleración espectral en períodos cortos	55
Área de suelos blandos	15
Área con potencial de licuación	15
Área con susceptibilidad de otros efectos	15

**Tabla 7.11:** Pesos iniciales sobre la neurona intermedia de Riesgo Sísmico Físico

Neurona de Entrada	Peso
Área Destruida	30
Fallecidos	10
Heridos	10
Roturas Red Acueducto	15
Roturas Red de Gas	10
Longitud Redes Eléctricas Caídas	5
Centrales Telefónicas Afectadas	5
Subestaciones Eléctricas Afectadas	5
Puentes Averiadados	10

La calibración de los pesos se lleva a cabo también mediante el algoritmo de aprendizaje de Kohonen, como se indica en la ecuación 6.18. En cada caso se calibran los pesos correspondientes a las variables que se tuvieron en cuenta durante la evaluación.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \mathbf{a}(t) [w_{ij}(t) - v_{ij}(t)] \quad [7.17]$$

donde  $w_{ij}$  es el peso de la neurona de entrada  $i$  sobre la neurona intermedia  $j$  y,  $\mathbf{a}(t)$  es la tasa de aprendizaje y  $v_{ij}$  es el peso de la neurona de entrada  $i$  sobre la neurona intermedia  $j$  introducido por el evaluador. Tanto para la calibración de los índices como para la asignación de pesos la tasa de aprendizaje está definida por la ecuación 7.18:

$$\mathbf{a}(t) = 0.1 * \text{Exp}(-0.1 * t) \quad [7.18]$$

donde  $t$  es el número de veces que ha sido utilizado el índice o peso que se calibra.

Es usual que para la tasa de aprendizaje se escoja una función exponencial, con el fin de que la red aprenda más en las primeras ocasiones en que es utilizada. De esta manera se asegura el obtener mejores resultados en el futuro. Por el tipo de tarea que realiza esta red es muy importante que aprenda en mayor grado cuando está siendo utilizada por expertos. De esta forma, la red puede ser utilizada por personal de menor experiencia en el futuro.

### 7.2.5. 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.

El modelo ha sido programado en lenguaje Visual Basic 5.0 con ambiente Windows, y se le ha denominado Estimación Holística del Riesgo Sísmico en Centros Urbanos, RSU. El programa hace uso también de bases de datos en Microsoft Access para el manejo de la información que se suministra. El código fuente de este sistema se presenta en el Apéndice E.

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.

La figura 7.21 muestra la pantalla de ingreso de información de datos sobre pérdidas físicas y humanas que usualmente se estiman en estudios de esta naturaleza.

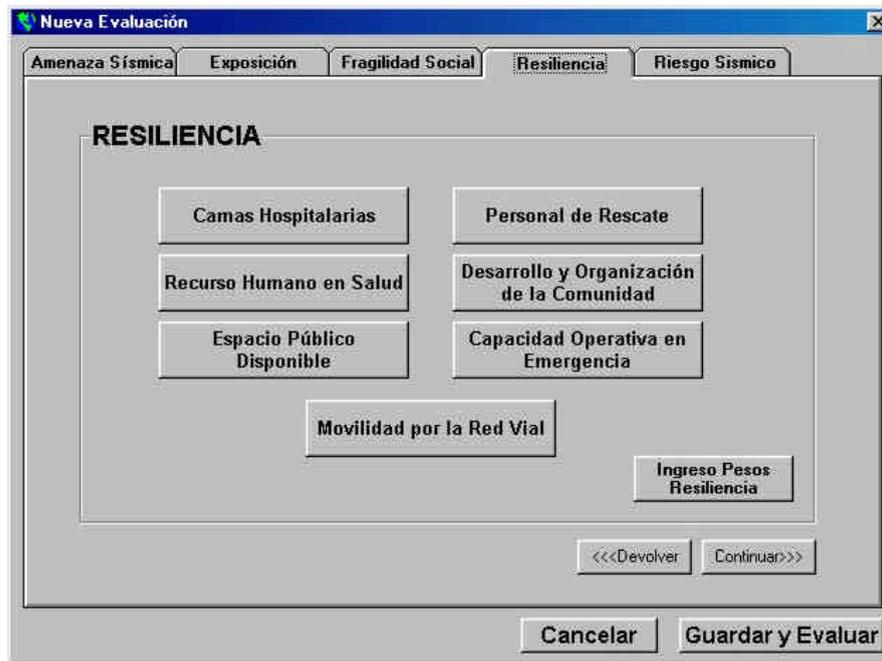
The screenshot shows a software window titled "Nueva Evaluación" with a tabbed interface. The active tab is "Riesgo Sísmico". The main content area is titled "ESCENARIOS DE DAÑOS FÍSICOS POTENCIALES" and contains several input fields for physical damage: "Area Destruida", "Roturas de la Red de Gas", "Fallecidos", "Longitud de Redes Eléctricas Caidas", "Heridos", "Centrales Telefónicas Afectadas", "Roturas Red de Acueducto", "Subestaciones Eléctricas Afectadas", "Puentes Averiadados", and "Ingreso Pesos Riesgo Sísmico". There is also a checkbox for "Información no disponible" and a "<<<Devolver" button. At the bottom are "Cancelar" and "Guardar y Evaluar" buttons.

Figura 7.21: Ingreso de datos de pérdidas y daños físicos

Por su parte, la figura 7.22 muestra lo correspondiente a la factor de resiliencia, el cual, por el contrario es uno de los aspectos socio-organizacionales 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 indicadas en la figura 7.21.

En este caso se han incluido variables que no es factible medir con técnicas convencionales o para las cuales es difícil definir un indicador que refleje

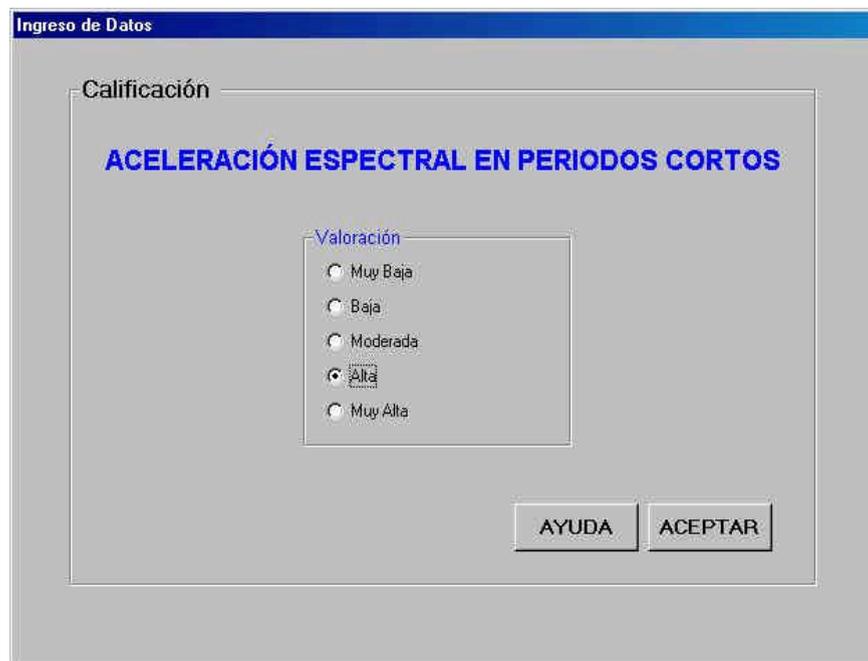
adecuadamente el aspecto que se quiere considerar. Por ejemplo, el nivel de desarrollo y organización de la comunidad o la movilidad por la red vial.



The screenshot shows a software window titled "Nueva Evaluación" with a tabbed interface. The active tab is "Resiliencia". Inside the window, there are several buttons for data entry: "Camas Hospitalarias", "Personal de Rescate", "Recurso Humano en Salud", "Desarrollo y Organización de la Comunidad", "Espacio Público Disponible", "Capacidad Operativa en Emergencia", "Movilidad por la Red Vial", and "Ingreso Pesos Resiliencia". At the bottom, there are navigation buttons: "<<<Devolver", "Continuar>>>", "Cancelar", and "Guardar y Evaluar".

**Figura 7.22:** Ingreso de datos de resiliencia

La figura 7.23 ilustra la entrada 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 manera que reflejen las valoraciones que se hacen corrientemente de cada una de ellas en el lenguaje especializado.



The screenshot shows a software window titled "Ingreso de Datos". The main section is "Calificación" and the variable being evaluated is "ACELERACIÓN ESPECTRAL EN PERIODOS CORTOS". Under the "Valoración" section, there are five radio buttons: "Muy Baja", "Baja", "Moderada", "Alta", and "Muy Alta". The "Alta" option is selected. At the bottom, there are two buttons: "AYUDA" and "ACEPTAR".

**Figura 7.23:** Ingreso de peso y descripción lingüística

La figura 7.24 ilustra un grupo de funciones de pertenencia que conforma uno de los factores, de las cuales se extrae el índice correspondiente, mediante el proceso de defusificación.

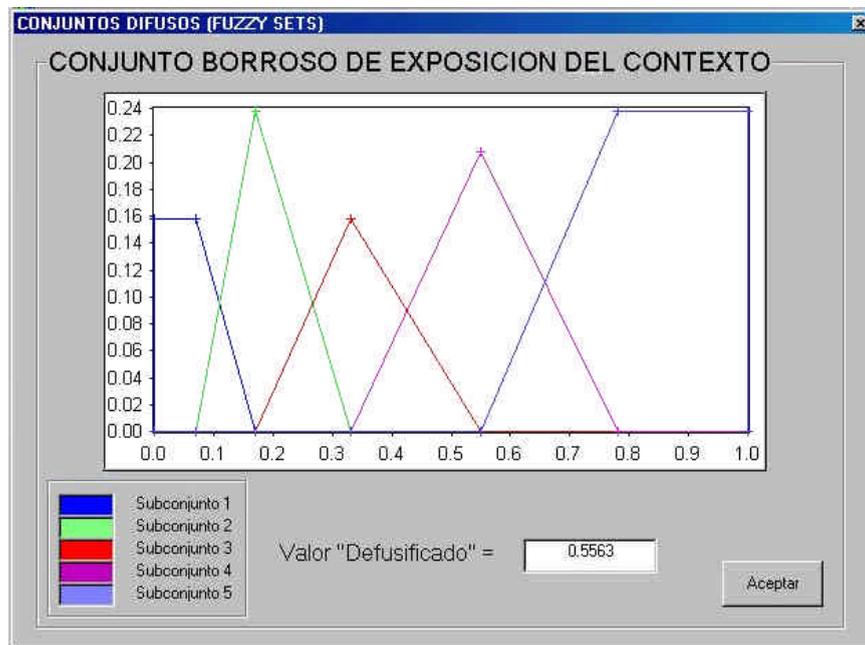


Figura 7.24: Definición de las funciones de pertenencia

La integración de estos índices de la manera explicada anteriormente conduce a la determinación de un índice general de riesgo. La figura 7.25 ilustra la evaluación para la alcaldía menor de Tunjuelito de Bogotá.

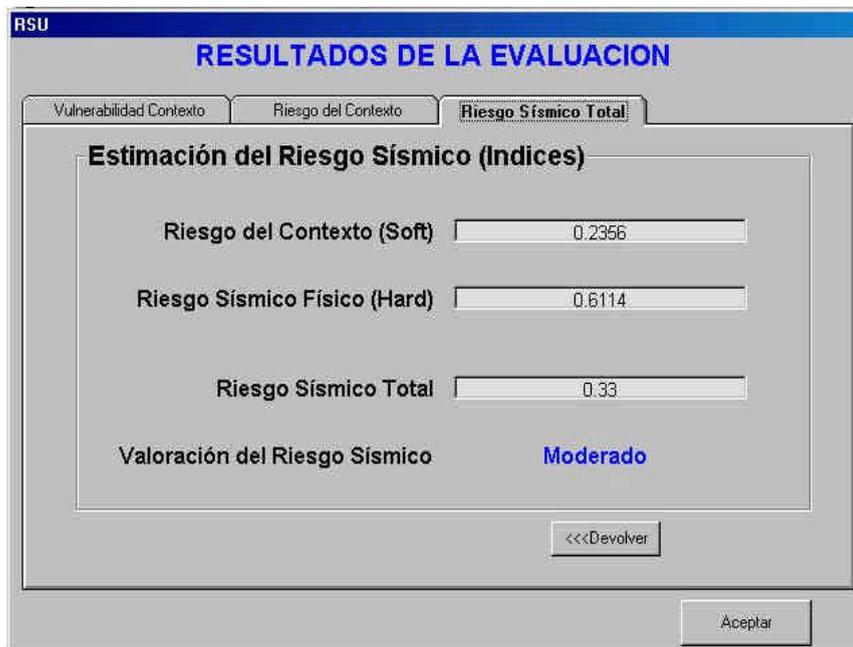


Figura 7.25: Cálculo del valor numérico de un índice parcial o global.

Es importante indicar que para fines de gestión del riesgo 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.

Esta técnica se aplicó experimentalmente a la ciudad de Bogotá y permitió ratificar las estimaciones realizadas con la técnica de índices e indicadores que se explicó previamente; sus resultados fueron similares. Sin embargo, el autor considera necesario que se lleve a cabo un número significativo de evaluaciones con criterios de valoración relativa cuidadosos por parte de especialistas en diferentes ciudades. Esto, con el fin de lograr una calibración y un aprendizaje adecuado de la red neuronal.

En síntesis: se ha presentado aquí otra técnica para la estimación holística del riesgo sísmico urbano mediante un sistema experto neuronal difuso. Esta técnica permite la valoración de las mismas variables propuestas en el modelo de indicadores expuesto con anterioridad, utilizando apreciaciones lingüísticas, lo que facilita la evaluación incluso de casos en que la información numérica no está disponible. La principal ventaja de esta técnica es que el sistema de evaluación puede ser calibrado, dado que tiene capacidad de aprendizaje. Esto facilita que el sistema, una vez haya sido entrenado, pueda ser utilizado por personas inexpertas en evaluación. Otra ventaja es la posibilidad de “devolverse” y analizar las funciones de pertenencia de cada variable o conjunto de variables, e identificar la razón por la cual una localidad de la ciudad presenta un mayor índice de riesgo. Esta virtud, al igual que en la técnica de indicadores expuesta previamente, permite la verificación de los resultados y la priorización de las medidas de reducción del riesgo sísmico de un centro urbano.