



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS  
DE CAMINS, CANALS I PORTS



---

# ESTIMACIÓN HOLÍSTICA DEL RIESGO SÍSMICO UTILIZANDO SISTEMAS DINÁMICOS COMPLEJOS

TESIS DOCTORAL

Presentada por

**OMAR DARÍO CARDONA ARBOLEDA**

Dirigida por

**ALEX H. BARBAT**

---

Barcelona, Septiembre - 2001.





UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS  
DE CAMINS, CANALS I PORTS



---

# ESTIMACIÓN HOLÍSTICA DEL RIESGO SÍSMICO UTILIZANDO SISTEMAS DINÁMICOS COMPLEJOS

TRABAJO REALIZADO COMO PARTE DE LOS REQUISITOS  
EXIGIDOS PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR.

Presentado por

**OMAR DARÍO CARDONA ARBOLEDA**

Dirigida por

**ALEX H. BARBAT**

---

Barcelona, Septiembre - 2001.

## **Reconocimientos**

El autor desea expresar su sincero agradecimiento al Profesor Alex H. Barbat, que estimuló y facilitó con interés y entusiasmo la elaboración de este trabajo. Su consejo y orientación fueron un apoyo fundamental que el autor aprecia con especial gratitud.

También, el autor agradece a los Profesores Luis Enrique García Reyes, Alberto Sarriá Molina y Luis Eduardo Yamín L., de la Universidad de los Andes de Bogotá, por su amistad, confianza y respaldo; a Jorge Eduardo Hurtado G. por su acompañamiento académico; a Juan Pablo Sarmiento P. y Samuel Darío Prieto R. por su interés continuo en el tema; a los miembros de LA RED por su aporte y discusiones. De igual manera, agradece a Carlos Enrique Ruiz por su continuo estímulo; a Jorge Hernán Hoyos y Carlos Javier González por sus inquietudes y cuestionamientos; a José Alberto Tabares, Guillermo Gardner y Alberto Naranjo Arango por su mecenazgo y benevolencia; y a Augusto y Atala por su credibilidad y afecto.



# Contenido

<b>Reconocimientos</b>	<i>i</i>
<b>Contenido</b>	<i>iii</i>
<b>Lista de figuras</b>	<i>vi</i>
<b>Lista de tablas</b>	<i>vii</i>
<b>Lista de fotografías</b>	<i>viii</i>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación de la investigación	1
1.2. Objetivos y alcance	2
1.3. Organización del trabajo	3
<b>2. Conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo</b>	<b>5</b>
2.1. Aspectos históricos	5
2.2. Revisión de definiciones y conceptos	8
2.3. Enfoques y evolución de los conceptos	12
2.3.1. Enfoque de las ciencias naturales	13
2.3.2. Enfoque de las ciencias aplicadas	14
2.3.3. Enfoque de las ciencias sociales	15
2.4. Crítica a los diferentes enfoques	18
<b>3. Valoración del riesgo y toma de decisiones</b>	<b>21</b>
3.1. Diferencia entre riesgo y desastre	21
3.2. Estudio del peligro	23
3.2.1. Amenazas naturales	24
3.2.2. Amenazas antrópicas	26
3.2.3. Combinación de fenómenos	26
3.2.4. Evaluación de la amenaza	28
3.3. Análisis de riesgo	30
3.3.1. Evaluación de la vulnerabilidad	31
3.3.2. Estimación del riesgo	32
3.4. Probabilidad e incertidumbre	33
3.4.1. Relación coste y beneficio	34
3.4.2. Resolución de los estudios	35
3.5. Limitaciones y perspectivas	37

<b>4. Aceptabilidad del riesgo</b>	<b>39</b>
4.1. Percepción psicológica y social	39
4.2. Niveles de seguridad	42
4.3. Objeción al riesgo aceptable	47
4.4. Aspectos jurídicos	48
4.5. ¿Cultura de la prevención?	52
4.6. Un compromiso inmediato	57
<b>5. Paradigma del riesgo en la Ingeniería Sísmica</b>	<b>59</b>
5.1. Amenaza sísmica	59
5.2. Acción de los terremotos en las estructuras	61
5.2.1. Daños estructurales	62
5.2.2. Daños no estructurales	73
5.3. Vulnerabilidad de edificios existentes	74
5.3.1. Edificios esenciales	76
5.3.2. Índices de daño	78
5.3.3. Funciones de daño o pérdida	83
5.4. Escenarios de riesgo sísmico urbano	87
5.4.1. Daños en edificios	90
5.4.2. Daños en líneas vitales	95
<b>6. Vulnerabilidad y riesgo desde una perspectiva holística</b>	<b>99</b>
6.1. Propuesta conceptual	99
6.1.1. Dimensiones y tipos de vulnerabilidad	101
6.1.2. Vulnerabilidad y carencias de desarrollo	104
6.1.3. Riesgo como resultado de la degradación ambiental	106
6.2. Fundamentos del enfoque holístico	109
6.3. Postulado de los sistemas dinámicos	114
6.3.1. Dependencia sensible y dimensión fractal	115
6.3.2. Teoría de la complejidad	119
6.3.3. Sistemas disipativos en el borde del caos	123
6.4. Representación conceptual de riesgo, desastre y gestión	127
6.5. Técnicas para la modelización	134
<b>7. Estimación holística del riesgo sísmico de un centro urbano</b>	<b>137</b>
7.1. Modelización mediante un sistema de índices relativos	137
7.1.1. Evaluación del índice de riesgo físico	144
7.1.2. Evaluación del índice de riesgo del contexto	149
7.1.3. Análisis y categorización del riesgo sísmico urbano	153

7.2.	Modelización mediante un sistema neuronal difuso	156
7.2.1.	Nivel de entrada de la red neuronal	161
7.2.2.	Nivel intermedio de la red neuronal	162
7.2.3.	Nivel de salida de la red neuronal	165
7.2.4.	Aprendizaje y calibración de la red neuronal	165
7.2.5.	Estimación neuronal y difusa del riesgo	168
<b>8.</b>	<b>Gestión del riesgo como concepto de planificación</b>	<b>173</b>
8.1.	Hábitat, desastres y gestión urbana	173
8.2.	Prevención para el desarrollo sostenible	176
8.2.1.	Perspectiva de planificación	177
8.2.2.	Organización interinstitucional para la gestión	179
8.3.	Una estrategia para un mundo más seguro	186
<b>9.</b>	<b>Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>191</b>
9.1.	Conclusiones	194
9.2.	Recomendaciones para futuros trabajos	195
	<b>Referencias</b>	<b>197</b>
	<b>Apéndices</b>	<b>215</b>
A.	Glosario de términos propuesto	215
B.	Influencias globales, consistencia y confiabilidad de los factores de participación	221
C.	Índices de riesgo sísmico físico y del contexto de Bogotá, Colombia	233
D.	Redes neuronales y teoría de los conjuntos difusos	287
E.	Código fuente del sistema RSU	301

## Lista de figuras

- Figura 4.1 : Riesgo tolerable como una función de la severidad (Helm, 1996)
- Figura 4.2 : Pago para aceptar o evitar el riesgo de morir  $p$  (Howard, 1989)
- Figura 4.3 : Valor en dólares de micromuerto por US\$10 000 de consumo anual como una función de la edad y el sexo.
- Figura 4.4 : Valor en dólares de microamenaza por US\$ 10 000 de consumo anual como una función de la edad y el sexo.
- Figura 5.1 : Relación entre índices de amortiguamiento y daño estructural
- Figura 5.2 : Curvas de fragilidad para daño leve, moderado, severo y total.
- Figura 5.3 : Planteamiento conceptual del “*pushover*”
- Figura 5.4 : Intersección entre espectros de demanda y curvas de capacidad.
- Figura 5.5 : Espectros de demanda para diferentes duraciones de sismo.
- Figura 5.6 : Funciones de distribución de probabilidad ajustadas para una estructura de 5 pisos, diseñada antes de la primera normativa Colombiana.
- Figura 5.7 : Curvas de fragilidad simuladas y ajustadas para una estructura de 5 pisos diseñada antes de la primera normativa Colombiana y para una aceleración pico efectiva PGA, en el rango 0.05 - 0.4 g.
- Figura 5.8 : Curvas de fragilidad simuladas y ajustadas para la estructura de 5 pisos diseñada con la normativa Colombiana y con una aceleración pico efectiva PGA, en el rango 0.05 - 0.4 g.
- Figura 6.1 : Estabilidad de un sistema y puntos de transición siguiendo la ecuación logística.
- Figura 6.2 : Regresión logística de la acción de organizaciones privadas en la recuperación y rehabilitación en el desastre sísmico de Ecuador 1987.
- Figura 6.3 : Regresión logística de la acción de instituciones públicas en la evaluación de daños en el
- Figura 7.1 : Índices de riesgo sísmico físico y riesgo sísmico del contexto con los factores de participación obtenidos de la opinión de expertos..
- Figura 7.2 : Descriptores de amenaza y vulnerabilidad del contexto con los factores de participación obtenidos de la opinión de expertos.
- Figura 7.3 : Índices de riesgo relativo para las alcaldías menores de Bogotá con los factores de participación utilizados.
- Figura 7.4 : Mapa de microzonificación sísmica de Bogotá.
- Figura 7.5 : Espectros de aceleración,  $S_a$ , para cada zona.
- Figura 7.6 : Escenario de daño para un sismo moderado en Bogotá.
- Figura 7.7 : Escenario de daños para un sismo fuerte en Bogotá.
- Figura 7.8 : Índice de riesgo físico basado en los escenarios de pérdidas.
- Figura 7.9 : Descriptor de la amenaza sísmica del contexto.
- Figura 7.10 : Indicadores de exposición, fragilidad social y falta de resiliencia.
- Figura 7.11 : Descriptores de vulnerabilidad del contexto para las alcaldías menores.
- 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.
- Figura 7.15 : Desagregación de indicadores para una alcaldía menor.
- Figura 7.16 : Interpretación difusa de datos numéricos.
- Figura 7.17 : Esquema de cálculo de la red neuronal difusa.
- Figura 7.18 : Conjuntos difusos utilizados para las diferentes calificaciones
- Figura 7.19 : Estructura de la red neuronal
- Figura 7.20 : Pasos del modelo
- Figura 7.21 : Ingreso de datos de pérdidas y daños físicos.
- Figura 7.22 : Ingreso de datos de resiliencia.
- Figura 7.23 : Ingreso de peso y descripción lingüística.
- Figura 7.24 : Definición de las funciones de pertenencia.
- Figura 7.25 : Cálculo del valor numérico de un índice parcial o global.

### **Lista de tablas**

- Tabla 5.1 : Objetivos de comportamiento sísmico recomendados en el IBC 2000.
- Tabla 5.2 : Caracterización del daño para el índice de daño de Park, Ang y Wen.
- Tabla 5.3 : Caracterización de daño para diferentes métodos de calificación.
- Tabla 5.4 : Estados de daño según ATC-13
- Tabla 5.5 : Niveles de daño según índice
- Tabla 5.6 : Definición de niveles de daño según deriva
- Tabla 5.7 : Matriz de daños para líneas de distribución (#55 ATC-13)
- 
- Tabla 7.1 : Matriz de Vulnerabilidad del Contexto
- Tabla 7.2 : Matriz normalizada para obtención de pesos
- Tabla 7.3 : Neuronas de entrada en la subred.
- Tabla 7.4 : Neuronas de entrada en la segunda capa de la red neuronal.
- Tabla 7.5 : Neuronas de entrada en la tercera capa de la red neuronal.
- Tabla 7.6 : Índices iniciales.
- Tabla 7.7 : Pesos iniciales de las neuronas de entrada sobre la neurona intermedia de Exposición del Contexto.
- Tabla 7.8 : Pesos iniciales sobre la neurona intermedia de Fragilidad Social.
- Tabla 7.9 : Pesos iniciales sobre la neurona intermedia de Resiliencia.
- Tabla 7.10 : Pesos iniciales sobre la neurona intermedia de Amenaza Sísmica del Contexto.
- Tabla 7.11 : Pesos iniciales sobre la neurona intermedia de Riesgo Sísmico Físico.

## **Lista de fotografías**

- Foto 5.1 : Armenia, capital del Quindío en Colombia después del sismo del 25 de enero de 1999.
- Foto 5.2 : Edificio de mampostería no reforzada gravemente afectada.
- Foto 5.3 : Edificio de hormigón armado construido sin normas sismorresistentes.
- Foto 5.4 : Secuencia: colapso de edificio moderno durante la réplica
- Foto 5.5 : Caída de muros de tabiquería de fachada por flexibilidad de la estructura.
- Foto 5.6 : Fallo de nudos de unión viga-pilar por falta de refuerzo trasversal.
- Foto 5.7 : Debido a la hundimiento varios edificios quedaron sumergidos.
- Foto 5.8 : Estructura en construcción donde se detecta la falta de recubrimiento.
- Foto 5.9 : Estructura donde se aprecia la falta de vibrado del hormigón.
- Foto 5.10: Mala configuración estructural de entramados que forman pórticos.
- Foto 5.11: Deficiente detallado del refuerzo, falta de anclaje y de adherencia.
- Foto 5.12: Redondos de solape en pilar con ganchos y a tope al inicio del entrepiso.
- Foto 5.13: Edificio informal de siete pisos que originalmente fue de tres.
- Foto 5.14: La ausencia de control facilita que se cometan errores en la construcción.
- 
- Foto 6.1 : Edificio nuevo en Colombia, construido por profesionales, que ha colapsado y casa informal sin mayores daños.
- Foto 6.2 : La vulnerabilidad esta altamente asociada con la pobreza.
- Foto 6.3 : La degradación ambiental y el aumento del riesgo son el resultado de la influencia negativa de asentamientos humanos marginales.

*...los hechos son inciertos,  
...los valores son discutibles,  
...la relevancia es alta,  
...las decisiones son urgentes.*



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Motivación de la investigación

En los últimos años, desde la perspectiva de los desastres, el *riesgo* se ha intentado evaluar, para efectos de la gestión, en términos de las posibles consecuencias económicas, sociales y ambientales que pueden ocurrir en un lugar y en un tiempo determinado. Sin embargo, el riesgo no ha sido conceptualizado de forma integral sino de manera 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 multidisciplinar, 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 la susceptibilidad física de los elementos expuestos a ser afectados, sino también con las fragilidades sociales y la falta de resiliencia de la comunidad propensa, que están asociadas con las capacidades de respuesta y recuperación. La deficiente información, comunicación y conocimiento entre los actores sociales, la ausencia de organización institucional y comunitaria, las debilidades en la preparación para la atención de emergencias, la inestabilidad política y la falta de salud económica en 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 en el área geográfica considerada.

Por otra parte, actualmente, existen serias razones por las cuales se puede dudar acerca de la efectividad de la *gestión del riesgo*. El incremento y la acumulación de la vulnerabilidad son alarmantes, como lo es la falta de conciencia y responsabilidad sobre el tema por parte de los tomadores de decisiones, las autoridades políticas y la misma comunidad. Entre otros factores, que contribuyen a esta falta de efectividad de la gestión del riesgo, aparentemente, se encuentra la inadecuada forma como el riesgo ha sido estimado o valorado. Aportes técnicos importantes se han realizado con fines de evaluación, pero de manera reduccionista y fragmentada. La falta de una *concepción holística* del riesgo, es decir, de una valoración integral y multidisciplinar del riesgo que

permita desagregarlo en sus componentes de diferente índole, parece haber contribuido en buena parte a la falta de efectividad de su gestión.

Una concepción holística del riesgo, consistente y coherente, fundamentada en los planteamientos teóricos de la *complejidad*, que tenga en cuenta no sólo variables geológicas y estructurales, sino también variables económicas, sociales, políticas, culturales o de otro tipo, podría facilitar y orientar la toma de decisiones en un área geográfica. Un enfoque de este tipo podría contribuir a mejorar la efectividad de la gestión y a identificar y priorizar medidas factibles y eficientes de *prevención-mitigación* para la *reducción del riesgo*.

Estimaciones obtenidas mediante índices relativos, conjuntos difusos *-fuzzy sets-* 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 ambientales y contribuir a la gestión efectiva del riesgo por parte de las autoridades y las comunidades; actores fundamentales para lograr una actitud preventiva ante los *desastres naturales*.

## **1.2. Objetivos y alcance**

El tema del riesgo colectivo (público o compartido) ha sido ampliamente tratado de manera específica por especialistas de diferentes disciplinas. Existen tratados sobre aspectos relativos al riesgo desde la perspectiva de las Ciencias de la Tierra, la Mecánica Estructural, la Psicología, la Geografía Económica, la Ingeniería Civil, la Sociología, entre otras disciplinas. Sin embargo, enfoques holísticos que integren diferentes perspectivas no se han desarrollado ampliamente. En cada ámbito, no obstante, se han desarrollado importantes trabajos que aportan elementos para una visión integral que hasta ahora no ha sido formalmente planteada. Posiblemente la especialización en aspectos muy específicos no ha facilitado un enfoque holístico, como también el hecho de que hasta hace poco se empezó a cuestionar la efectividad y eficiencia de la gestión del riesgo en el ámbito institucional; circunstancia que hasta ahora no se ha asociado con la cuantificación reduccionista y un tanto crítica, en ocasiones, de las metodologías y técnicas de modelización que han sido usualmente empleadas para estimar el riesgo.

Partiendo de una revisión del concepto de riesgo desde el enfoque de varias disciplinas del conocimiento y desde el punto de vista de la prevención de los desastres, los objetivos específicos de esta tesis son:

1. Realizar un análisis crítico del enfoque de las ciencias naturales, las ciencias aplicadas y las ciencias sociales acerca del concepto de riesgo colectivo;
2. Analizar los criterios y factores de valoración y aceptabilidad del riesgo, que lo asocian explícita y directamente con la toma de decisiones y que impiden o hacen difícil su *prevención-mitigación*;
3. Revisar el enfoque corriente o "clásico" de estimación del riesgo sísmico urbano, fundamentado en la estimación del daño físico o el escenario de pérdidas obtenidas a partir de los efectos físicos esperados en los elementos expuestos;

4. Plantear una concepción holística del riesgo, consistente y coherente, desde una perspectiva multidisciplinar, utilizando la teoría de los sistemas dinámicos complejos o no-lineales;
5. Proponer un modelo para la estimación holística del riesgo sísmico urbano, utilizando sistemas de índices relativos, variables difusas y redes neuronales;
6. Aplicar el modelo propuesto al caso de Bogotá, Colombia; y
7. Plantear la manera como puede afrontarse el problema de la reducción del riesgo colectivo y la prevención de desastres desde un punto de vista multidisciplinar y desde la perspectiva de la planificación del desarrollo.

### 1.3. Organización del trabajo

Este trabajo parte de la revisión de los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, fundamentales para poder hacer los planteamientos teóricos que se desarrollan más adelante. En el segundo capítulo se abordan aspectos históricos del concepto de riesgo y se presenta una revisión de los términos hasta ahora utilizados, con el propósito de identificar vacíos y precisar las definiciones que le pueden dar coherencia a un planteamiento teórico consistente e integral en la materia. Se describen los enfoques de las ciencias naturales, las ciencias aplicadas y las ciencias sociales en relación con el concepto de riesgo y se realiza una crítica a dichos enfoques. Se argumenta que la fragmentación e inconsistencia conceptual han sido dos de las razones por las cuales no se ha logrado resultados exitosos de reducción del riesgo colectivo en la mayoría de los países.

El capítulo tercero describe cómo se ha valorado el riesgo partiendo del entendimiento de la amenaza, que representa la potencial ocurrencia de un fenómeno peligroso, y de la vulnerabilidad que ofrece el contexto expuesto al fenómeno. Se asocia este tipo de análisis con el proceso de toma de decisiones y se hace explícita la dificultad de llevar a cabo políticas públicas de reducción del riesgo debido a las circunstancias de incertidumbre inherente y a los enfoques reduccionistas utilizados hasta ahora.

En adición a las limitaciones de las técnicas empleadas comúnmente para el análisis de riesgo, en el capítulo cuarto se describen otros aspectos que contribuyen hacer más difícil la política pública de la gestión del riesgo. Se consideran aspectos como la percepción de los diferentes actores involucrados en la toma de decisiones, aspectos jurídicos que restringen la acción preventiva y, en general, el problema de la tolerancia y aceptabilidad del riesgo colectivo.

En el capítulo quinto se revisa el enfoque tradicional que se ha utilizado hasta ahora para evaluar el riesgo sísmico urbano, considerando los efectos físicos o daños esperados en los elementos expuestos ante la acción sísmica. Este capítulo resume las técnicas modernas de estimación de la vulnerabilidad sísmica y el desarrollo del conocimiento en materia de daños y pérdidas. Presenta el enfoque que ha criterio del autor es el más adecuado para evaluar el riesgo sísmico físico de un centro urbano.

La propuesta conceptual de la vulnerabilidad y el riesgo desde una perspectiva holística y multidisciplinar se presenta en el capítulo sexto. Se propone un modelo teórico del riesgo que aborda otros aspectos adicionales a los efectos físicos potenciales, que están ligados al desarrollo y sostenibilidad del contexto socio-ambiental urbano considerado. Se postula un modelo consistente y coherente

fundamentado en los enfoques teóricos de los sistemas dinámicos complejos no-lineales, desde los cuales se explican los conceptos de crisis, inestabilidad y adaptabilidad y se relacionan con los conceptos de desastre, vulnerabilidad, riesgo y prevención.

El capítulo séptimo se proponen dos técnicas de modelización holística del riesgo sísmico urbano, postulando el centro urbano como un sistema dinámico complejo. La primera está basada en indicadores relativos y la otra en un sistema neuronal difuso. Las dos técnicas tienen en cuenta tanto los efectos físicos potenciales que implica la posible ocurrencia de terremotos, como aspectos económicos, sociales y organizacionales que influyen en el riesgo sísmico desde una perspectiva multidisciplinar. Su utilización y versatilidad se ilustra mediante la aplicación de ambas técnicas para la estimación del riesgo sísmico de Bogotá, Colombia.

La evaluación del riesgo tiene como objeto orientar su gestión, identificando las medidas de reducción de la vulnerabilidad en todas sus dimensiones o facetas. El capítulo octavo presenta la gestión del riesgo como un concepto de planificación. Se plantean diversos enfoques generales y se hace una propuesta global para enfrentar el riesgo colectivo, entendido como un grave problema técnico-social contemporáneo.

El capítulo noveno presenta las conclusiones del trabajo y propone a manera de recomendación algunas sugerencias para el desarrollo de nuevos estudios e investigaciones futuras relacionados con la temática aquí tratada.

Se incluye como Apéndice A un glosario de términos cuyas definiciones son el resultado de la propuesta conceptual planteada a lo largo de este trabajo. El Apéndice B muestra las matrices mediante las cuales se obtuvieron los factores de participación o pesos para los indicadores y variables utilizadas en las técnicas desarrolladas para estimar el riesgo sísmico urbano de Bogotá, Colombia. El Apéndice C presenta los valores y las gráficas obtenidas de los indicadores relativos que se utilizaron para evaluar el riesgo sísmico de Bogotá desde una perspectiva holística. El Apéndice D incluye una síntesis de los fundamentos del uso y aplicación de las redes neuronales y los conjuntos difusos; técnicas sobre las cuales se desarrolló una de las técnicas propuestas. Finalmente, el Apéndice E contiene el código fuente del programa de cálculo que se desarrolló para la modelización neuronal y difusa del riesgo sísmico urbano desde una perspectiva holística.

## Capítulo 2

# Conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo

### 2.1. Aspectos históricos

El concepto de riesgo, asociado con la idea de porvenir sin certeza, ha estado presente desde siempre en las sociedades humanas. El primer ejemplo de una práctica que involucra un análisis de riesgo de forma simplificada se remonta a las comunidades de la antigua Babilonia, que ocuparon el valle del Eufrates y el Tigris, 3200 A.C., donde existió un grupo llamado el Asipu (Oppenheim 1977). Una de las funciones del Asipu era la de servir como grupo consultor para decisiones difíciles de tomar por lo inseguras o inciertas. Si se deseaba tomar una decisión sobre alguna acción venidera se podía consultar a uno de sus miembros del Asipu, que se encargaba de dimensionar la situación, identificar alternativas de acción y recoger datos sobre los resultados factibles (éxito o fracaso; ganancia o pérdida) de cada alternativa. El sacerdote Asipu, que tenía la capacidad especial de interpretar señales o datos de los dioses, calificaba las diferentes alternativas, colocando signos más si eran favorables y menos si no lo eran, para finalmente recomendar la alternativa más beneficiosa.

También en Mesopotamia, dos siglos después, tuvo origen la figura del seguro como la más antigua estrategia para afrontar riesgos. Allí surgieron las primeras tasas de interés sobre préstamos entre agricultores, inicialmente en especie y luego en metálico, que variaban entre 0 y el 33% dependiendo del grado de riesgo asociado al préstamo. Las tasas reflejaban la percepción de incertidumbre del prestamista y fueron una de las primeras formas de cuantificar y administrar riesgo. Esta práctica posteriormente se amplió al incluir primas de riesgo cuando se trataba de préstamos asociados con el transporte de mercancías que podían perderse en el mar por tormentas, incendios o asaltos. El Código de Hammurabi, 1950 a. C., instituyó las bases del seguro y estableció varias doctrinas de administración de riesgos. Alrededor del comercio marítimo estableció en los contratos de transporte la figura formal del préstamo, la tasa de interés y de la prima de riesgo por la posibilidad de pérdida y consecuente cancelación de la deuda. En Grecia para el año 750 a. C. casi todos los viajes estaban cubiertos por este tipo de contrato y las primas de riesgo variaban entre el 10 y 25% dependiendo del grado de riesgo de la aventura, lo que implicaba alguna noción de su

cuantificación. Aparentemente, la palabra riesgo proviene de la palabra griega *rhiza* que hace alusión a los peligros de navegar alrededor de un arrecife.

Las instituciones de seguros prácticamente desaparecieron con la declinación de la civilización Griega, aunque los Romanos las continuaron por un tiempo. Estos últimos establecieron, también, una forma rudimentaria de seguro de vida y salud mediante una membresía a la cual se contribuía regularmente con el fin de cubrir gastos fúnebres. Con la caída del Imperio Romano prácticamente desapareció el seguro marítimo hasta, quizás, el año 1000 d. C., cuando reapareció en los puertos Italianos, y con certeza en los siglos XII a XIV, de lo cual hay referencia en las Leyes de Wisby (1300) y la Ordenanza de Barcelona (1435). La Lloyd's se estableció en 1688 como núcleo del mercado del seguro marítimo global y posteriormente se extendió a otras áreas (Grier 1980). Por esta época se establecieron los seguros de incendio y emergieron los seguros de vida en Inglaterra, aunque políticas de seguros de vida ya habían existido en España alrededor del año 1100 d. C., evocando las antiguas prácticas que existieron entre los años 1800 a 1200 a. C. Durante los siglos 16 y 17 las sociedades de amigos estimularon el desarrollo de los seguros de vida en Inglaterra, pero fracasaron por la falta de un soporte estadístico y matemático adecuado. Por otra parte, debido a los cuestionamientos morales realizados por la Iglesia, el seguro de vida fue prohibido en Francia hasta 1820.

Sin duda, el análisis de riesgos también tuvo orígenes en las antiguas ideas religiosas relacionadas con la posibilidad de algo después de la vida. Empezando con el *Fedón* de Platón, en el siglo IV a. C. y otros escritos que trataron sobre la inmortalidad del alma y lo que le podría ocurrir después de la vida; según cómo cada persona conduce su aquí y ahora (Covello y Mumpower 1985). En el *Fedón*, Platón narra el diálogo de Sócrates con sus amigos antes de beber el veneno, en el cual plantea la inmortalidad del alma y describe el mito de lo que le puede suceder al alma después de la muerte. Allí Sócrates, haciendo la salvedad de la posible inexactitud de su exposición, señala que dada la inmortalidad del alma él estima que es conveniente creer en el mito y que vale la pena correr el riesgo de creer que es así. Arnobius El Viejo, que vivió en el siglo IV d. C., para demostrar su auténtica conversión al Cristianismo, en su monografía *Contra los Paganos*, argumentó mediante una matriz de 2 x 2 la ventaja de ser Cristiano sobre ser pagano. Planteaba que hay dos alternativas: aceptar el Cristianismo o mantenerse pagano. Decía también que hay dos posibilidades, aunque inciertas: Dios existe o Dios no existe. Si Dios no existe no hay diferencia entre las dos alternativas, pero si Dios existe ser un Cristiano es ampliamente mejor para el alma que ser un pagano. Estos planteamientos se sirven del principio de la dominancia; un soporte heurístico para la toma de decisiones bajo condiciones de riesgo e incertidumbre. El argumento de Arnobius no sólo fue utilizado posteriormente por San Agustín sino por Pascal, cuando introdujo la teoría de la probabilidad en 1657, quien al ampliar su matriz concluyó que: Dada la distribución de probabilidades para la existencia de Dios, el valor esperado de ser Cristiano excede en mucho el valor esperado del ateísmo (Covello y Mumpower 1985).

Después de Pascal y Fermat, a finales del siglo XVII y durante el siglo XVIII, se realizaron importantes aportes a la teoría de las probabilidades. En 1692 Arbuthnot argumentó que podían ser calculadas las probabilidades de las diferentes causas potenciales de un suceso, Halley (conocido por el cometa que lleva su nombre) en 1693 mejoró las tablas de esperanza de vida propuestas por Graunt en 1662 y matemáticos

como Hutchinson, Cramer y Bernoulli realizaron trabajos valiosos a la naciente teoría. Sin embargo, fue Laplace quien en 1792 desarrolló un verdadero modelo de estimación de riesgo en términos modernos, al calcular la probabilidad de morir con y sin la vacuna contra la viruela. Sorprende que sólo después de Pascal varios aplicarán las matemáticas de la probabilidad para estimar las expectativas de vida y que previo a esos trabajos sólo se conociera uno del año 230 d. C, realizado por el Romano Domitius Ulpianus.

A pesar de fascinación del hombre por los juegos desde tiempos inmemoriales, por los Sumerios, Asirios, en el antiguo Egipto y en particular por los Romanos, es curioso que los fundamentos de la teoría de la probabilidad hayan sido tan recientes. Se sabe que el Emperador Romano Claudio escribió sobre el juego, que el Emperador Marco Aurelio tenía obsesión por los dados y que estaba regularmente acompañado por su propio maestro de juegos. Esto hace suponer que el cálculo matemático de frecuencias de sucesos y promedios debería ser tan antiguo como el uso de los dados u otros instrumentos similares que se utilizaban para jugar. Por esta razón, es extraño que las teorías matemáticas de las frecuencias relativas, aleatoriedad y probabilidad sólo surgieran 1500 años después, con los trabajos de Pascal, Fermat y otros.

Todas las antiguas civilizaciones como los Mayas, los Aztecas y los Incas en América, o en la China, Egipto y Mesopotamia, realizaron sistemas de control de inundaciones o de deslizamientos, o tuvieron criterios preventivos para reducir el impacto de sucesos naturales o sociales. El historiador Romano Plinio El Viejo describe, por ejemplo, cómo los Egipcios habían desarrollado un sistema de predicción de hambrunas, haciendo un seguimiento a los niveles del Nilo. Indica Plinio El Viejo, que el incremento del nivel del río se medía sobre una escala, en la cual tenían bien calibradas unas marcas. Un nivel del río, en determinada fecha o época del año, si se encontraba por debajo de una marca definida, indicaba que el año siguiente habría hambruna. Había otras marcas que indicaban escasez, alegría por autosuficiencia, total confianza y, por encima de cierta marca, placer por la abundancia. Los Egipcios, paradójicamente, usaban este sistema para protegerse de un año malo en términos de abastecimiento de alimentos y no para las inundaciones. Tenían estimada la superficie que sería fertilizada, de acuerdo con el nivel que alcanzaba el río. Una gran inundación no era sinónimo de desastre sino de abundancia y cuando se presentaba un pronóstico de hambruna o escasez ajustaban los impuestos de los cultivos cosechados durante la estación que estaba vigente. Este es un ejemplo de gestión de riesgo y de un sistema de alerta, en este caso, para las hambrunas. La técnica de estimación de la superficie que sería inundada y fertilizada, también de alguna manera, se le podría asimilar como la herramienta de análisis de riesgo que aplicaban.

No obstante lo anterior, los fenómenos naturales, las pestes y otras crisis sociales también fueron relacionadas con designios divinos o mala suerte. Durante siglos este tipo de creencias se mantuvo en una u otra forma dentro de las sociedades, particularmente por la influencia de la religión. Las medidas de prevención-mitigación contra inundaciones, incendios y otros sucesos, comúnmente, se empezaron a aplicar recientemente sólo después de la ocurrencia de un desastre que hacía evidente la necesidad de protección. Excepto por los estudios de morbilidad y mortalidad en el campo de la salud, las primeras aplicaciones de la matemática de las probabilidades para la estimación del potencial de desastre por fenómenos naturales sólo se empezaron a tener en cuenta durante el siglo xx.

Durante siglos, las decisiones sobre el riesgo, fundamentalmente, estuvieron basadas en el sentido común, el saber tradicional, el ensayo y error, las creencias o el conocimiento no científico. Kervern y Rubise (1991) distinguen tres períodos: La edad de la sangre, que se caracterizó porque el hombre tranquilizaba su temor con sacrificios ofrecidos a la divinidad; la edad de las lágrimas, en la cual con el desarrollo del Cristianismo el miedo mayor conducía a plegarias y procesiones de diversa índole; y la edad de las neuronas, a partir de 1755, con el terremoto de Lisboa, cuando a raíz de este suceso Rousseau afirmó que el hombre es responsable del peligro e indicó que si los efectos del terremoto fueron tan terribles, la culpa es de los habitantes. Esta opinión marcó el comienzo de lo que en francés se le denomina *cindynique*: la ciencia del peligro (Soutadé 1998).

Hoy, debido a la confianza en los desarrollos de la ciencia y la tecnología, la sociedad cada vez más expresa su preferencia por la planificación, el pronóstico, las alertas y la prevención-mitigación (reducción de riesgos), en contraste con las respuestas *ad hoc* tradicionales a las crisis. Afortunadamente, el uso de análisis cuantitativos, altamente técnicos, de evaluación de riesgos que benefician la gestión de riesgos ha estado en aumento. Sin embargo, muchos de estos análisis, por su enfoque, no facilitan la toma de decisiones o no consideran aspectos multidisciplinares, lo que podría significar un fútil avance, en algunos casos, o incluso un retroceso, en otros.

## **2.2. Revisión de definiciones y conceptos**

El proceso de desarrollo mismo del hombre lo ha llevado a conceptualizar de manera apropiada elementos vinculados a su hábitat, medio ambiente y las posibilidades de interacción entre ellos. A pesar de que en principio se haya tenido una percepción confusa acerca del término *vulnerabilidad*, esta acepción ha contribuido a dar claridad a los conceptos de *riesgo* y *desastre*. Durante mucho tiempo estos dos conceptos se asimilaron a una posibilidad y a un hecho, asociados a una sola causa: el fenómeno, ante el cual no había mucho que hacer. Sin embargo, el marco conceptual de la vulnerabilidad surgió de la experiencia humana en situaciones en que la propia vida diaria normal era difícil de distinguir de un desastre. La gran mayoría de las veces existían condiciones extremas que hacían realmente frágil el desempeño de ciertos grupos sociales, las cuales dependían del nivel de desarrollo alcanzado, así como también de la planificación de ese desarrollo. Para ese entonces el proceso de desarrollo ya se había empezado a considerar como la armonía entre el hombre y el medio ambiente. Se empezó a identificar en los grupos sociales la vulnerabilidad, entendida como la reducida capacidad para ajustarse o adaptarse a determinadas circunstancias. Dicha vulnerabilidad ha sido definida de diferentes maneras, entre las que se citan las siguientes:

“Poder ser herido o recibir lesión, física o moralmente”. (Diccionario de la Real Academia Española, 1992).

“Características de una persona o grupo desde el punto de vista de su capacidad para anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza natural”.

“Grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos en riesgo resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total”.

“Condición en la cual los asentamientos humanos o los edificios se encuentran en peligro en virtud de su proximidad a una amenaza, la calidad de la construcción o ambos factores”.

“Incapacidad de una comunidad para absorber, mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente. Inflexibilidad ante el cambio. Incapacidad de adaptarse al cambio, que para la comunidad constituye, por las razones expuestas, un riesgo”.

“Estar propenso a o ser susceptible de sufrir daño o perjuicio”.

Después del aporte conceptual de la escuela de la ecología humana y particularmente de White (1945/64/73), Kates (1962/71/78) y Burton (1962/68/78), la UNDRO y la UNESCO promovieron una reunión de expertos con el fin de proponer una unificación de definiciones. El informe de dicha reunión, *Natural Disasters and Vulnerability Analysis* (UNDRO 1979) incluyó las siguientes definiciones:

- a) Amenaza, peligro o peligrosidad (*Hazard - H*). Es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.
- b) Vulnerabilidad (*Vulnerability - V*). Es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total.
- c) Riesgo específico (*Specific Risk - Rs*). Es el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un suceso particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.
- d) Elementos en riesgo (*Elements at Risk - E*). Son la población, los edificios y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta en un área determinada.
- e) Riesgo total (*Total Risk - Rt*). Se define como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un desastre, es decir el producto del riesgo específico *Rs*, y los elementos en riesgo *E*.

De esta manera, desde este punto de vista, la evaluación del riesgo (Ecuación 2.1) puede llevarse a cabo mediante la siguiente formulación general:

$$R_t = E \cdot R_s = E \cdot H \cdot V \quad [2.1]$$

Conservando este marco conceptual propuesto por el grupo de expertos reunidos en 1979, el autor propuso en el Instituto de Ingeniería Sísmica y Sismología (IZIIS) de Skoplie, antigua Yugoslavia, en 1985, eliminar la variable exposición *E*, por considerarla implícita en la vulnerabilidad *V*, sin que esto modificara sensiblemente la concepción original (Cardona 1985). En otras palabras: no se “es vulnerable” si no se “está expuesto”. El original de dicha formulación fue divulgada por Fournier d’Albe (1985), Milutinović y Petrovsky (1985b) y, posteriormente, por Coburn y Spence (1992). Esta manera de conceptualizar la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo, ampliamente aceptada desde entonces en el campo técnico y científico, y con mayor

frecuencia utilizada en las ciencias sociales, fue planteada por el autor (Ecuación 2.2) de la siguiente manera:

$$R_{ie} |_t = (A_i, V_e) |_t \quad [2.2]$$

dicho de otra forma, esto significa que una vez conocida la *amenaza o peligro*  $A_i$ , entendida como la probabilidad de que se presente un suceso 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 un elemento expuesto  $e$  a ser afectado o de ser susceptible a sufrir un daño ante la ocurrencia de un suceso con una intensidad  $i$ , el *riesgo*  $R_{ie}$  se expresa como la probabilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento  $e$ , como resultado de la ocurrencia de un suceso con una intensidad mayor o igual a  $i$ . Es decir, el riesgo en general puede entenderse como la probabilidad de pérdida durante un período de tiempo  $t$  dado (Cardona 1985/86a).

Teniendo en cuenta lo anterior, el autor en 1986 propuso un glosario de términos relativos a la temática de la gestión del riesgo. Aunque existían términos y conceptos desarrollados para cada disciplina, en parte basados en los acordados en la reunión de expertos promovida por UNDRO en 1979 –como por ejemplo los términos propuestos por el EERI (1984/90)– para ese momento las definiciones no se habían generalizado. El Apéndice A contiene algunos de los términos originalmente propuestos por el autor (Cardona 1986b/90) y posteriormente depurados por él mismo en forma paulatina. Estos términos son consistentes a luz del marco conceptual de este trabajo.

Aunque *hazard* se refiere en inglés a peligro, a estar propenso de sufrir la acción de algo, a azar, el autor escogió el término *amenaza* como equivalente a *hazard*, por el concepto de presagio, advertencia o potencial ocurrencia que significa la palabra en castellano. El término *amenaza* en inglés se expresa más directamente mediante la palabra *threat*, la que también utilizan algunos autores de habla inglesa con el mismo significado de *hazard*. Aquí, por tanto, se utilizará el término *amenaza* para referirse a lo que otros autores denominan peligro o peligrosidad. Estas palabras pueden considerarse como sinónimos para efectos de este enfoque conceptual.

En general, hoy se acepta que el concepto de amenaza se refiere a un peligro latente o factor de riesgo externo de un sistema o de un sujeto expuesto, que se puede expresar en forma matemática como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un suceso con una cierta intensidad, en un sitio específico y durante un tiempo de exposición determinado. Por otra parte, la vulnerabilidad se entiende, en general, como un factor de riesgo interno que matemáticamente está expresado como la factibilidad de que el sujeto o sistema expuesto sea afectado por el fenómeno que caracteriza la amenaza. De esta manera, el riesgo corresponde al potencial de pérdidas que pueden ocurrirle al sujeto o sistema expuesto, resultado de la “convolución” de la amenaza y la vulnerabilidad. Así, el riesgo puede expresarse en forma matemática como la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un cierto sitio y durante un cierto período de tiempo.

Es importante mencionar que la convolución es un concepto que se refiere a la concomitancia y mutuo condicionamiento, en este caso, de la amenaza y la vulnerabilidad. Dicho de otra forma, no se puede ser vulnerable si no se está amenazado y no existe una condición de amenaza para un elemento, sujeto o sistema si no está expuesto y es vulnerable a la acción potencial que representa dicha amenaza. En otras palabras, no existe amenaza o vulnerabilidad independientemente, pues son

situaciones mutuamente condicionantes que se definen en forma conceptual de manera independiente para efectos metodológicos y para una mejor comprensión del riesgo. Así, al intervenir uno o los dos componentes del riesgo se está interviniendo el riesgo mismo. Sin embargo, dado que en muchos casos no es posible intervenir la amenaza, para reducir el riesgo no queda otra alternativa que modificar las condiciones de vulnerabilidad de los elementos expuestos. Esta es la razón por la cual con mucha frecuencia en la literatura técnica se hace énfasis en el estudio de la vulnerabilidad y en la necesidad de reducirla mediante medidas de prevención-mitigación, sin embargo lo que realmente se intenta de esta manera es la reducción del riesgo.

De acuerdo con lo anterior, la vulnerabilidad se puede definir como un factor de riesgo interno de un sujeto o sistema expuesto a una amenaza, correspondiente a su predisposición intrínseca a ser afectado o de ser susceptible a sufrir un daño. La vulnerabilidad, en otras palabras, es la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir daños en caso que un fenómeno desestabilizador de origen natural o antropogénico se manifieste. La diferencia de vulnerabilidad del contexto social y material expuesto ante un fenómeno peligroso determina el carácter selectivo de la severidad de los efectos de dicho fenómeno.

Ahora bien, el término vulnerabilidad ha sido utilizado por varios autores para referirse a riesgo e incluso ha sido usado para referirse a condiciones de desventaja, particularmente en disciplinas de las ciencias sociales. Por ejemplo, se habla de grupos vulnerables para referirse a personas de edad avanzada, niños o mujeres. Sin embargo, de acuerdo con lo anteriormente expuesto, en rigor es necesario preguntarse: ¿vulnerable ante qué?. Es decir, debe existir la amenaza para efectos de que se presente una situación condicional, mutuamente concomitante, que representa el estar en riesgo. Si no hay amenaza no es factible ser vulnerable, en términos del potencial daño o pérdida que significa la ocurrencia de un desastre. De la misma manera, no hay una situación de amenaza para un elemento o sistema si dicho elemento no está *expuesto* a la misma y si no es vulnerable a la acción del fenómeno que representa el peligro o la amenaza considerada. Aunque esta puede parecer una sutileza innecesaria, el autor considera importante hacer esta distinción, pues en un momento dado se puede llegar a usar la calificación de vulnerable desde una perspectiva diferente al tema de los desastres (Salud Pública, Psicología, etc.). Una población puede ser vulnerable a los huracanes, por ejemplo, y no serlo a los terremotos o a las inundaciones. En relación con la utilización del término vulnerabilidad, ya Timmerman en 1981 indicaba que: “es un término de tan amplio uso que es casi inútil para efectos de una descripción cuidadosa, excepto cuando se usa como un indicador retórico de áreas de máxima preocupación”. En su trabajo relativo a la vulnerabilidad y la resiliencia concluye, indicando con un toque de ironía, que la vulnerabilidad real está en el inadecuado uso de los conceptos y en los modelos que se tiene de los sistemas sociales (Liverman 1990).

Al igual que, durante muchos años, se utilizó el término riesgo para referirse a lo que hoy se le denomina amenaza, actualmente se hace referencia también, en muchas ocasiones, a la palabra vulnerabilidad con el mismo significado de riesgo. El autor considera importante recordar que se trata de conceptos diferentes y su definición obedece a un enfoque metodológico que facilita el entendimiento del riesgo y su posibilidad de reducirlo o mitigarlo. En muchas ocasiones no es posible actuar sobre la amenaza o es muy difícil hacerlo; bajo este enfoque es factible comprender que para

reducir el riesgo no habría otra alternativa que disminuir la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

### **2.3. Enfoques y evolución de los conceptos**

A pesar de los primeros esfuerzos de la geografía y las ciencias sociales a partir de mediados del siglo xx (Kates 1971; White 1973; Quarantelli 1988; Mileti 1999), el tema de la evaluación del riesgo desde la perspectiva de la prevención de desastres ha sido tratado relativamente desde hace poco tiempo. Su concepción y análisis sistemático prácticamente lo asumieron los especialistas de las ciencias naturales con estudios acerca de fenómenos geodinámicos, hidrometeorológicos y tecnológicos tales como terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos, huracanes, inundaciones, accidentes industriales, etc. En otras palabras, inicialmente el énfasis se dirigió hacia el conocimiento de las amenazas por el sesgo investigativo y académico de quienes generaron las primeras reflexiones sobre el tema (Cutter 1994). Es importante mencionar que aún se conserva este énfasis, en particular en los países más avanzados, donde el desarrollo tecnológico hace factible conocer con mayor detalle los fenómenos generadores de las amenazas. Esta tendencia fue evidente durante los primeros años del "Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, DIRDN" declarado por las Naciones Unidas para los últimos años del siglo xx. (UNDRO 1990).

Si lo que se pretende es la estimación del riesgo, indudablemente el estudio y la evaluación de la amenaza es un paso de fundamental importancia; sin embargo, para lograr dicho propósito es igualmente importante el estudio y el análisis de la vulnerabilidad. Por esta razón, varios especialistas, posteriormente, promovieron el estudio la vulnerabilidad física, la cual básicamente fue relacionada con el grado de exposición y la fragilidad o capacidad de los elementos expuestos para soportar la acción de los fenómenos. Este último aspecto permitió ampliar el trabajo a un ámbito multidisciplinario debido a la necesidad de involucrar a otros profesionales tales como ingenieros, arquitectos, economistas y planificadores, quienes paulatinamente han encontrado de especial importancia la consideración de la amenaza y la vulnerabilidad como variables fundamentales para la planificación física y las normas de construcción de edificaciones e infraestructura (Starr 1969).

No obstante lo anterior, este enfoque ha sido bastante tecnocrático porque sigue dirigido hacia el detonante del desastre: la amenaza, y no hacia a las condiciones que favorecen la ocurrencia del desastre, que son las condiciones de vulnerabilidad global; concepto más amplio incluso que el de vulnerabilidad física. En los países en desarrollo la vulnerabilidad social es, en la mayoría de los casos, la causa de las condiciones de vulnerabilidad física. A diferencia de la amenaza que actúa como agente detonante, la vulnerabilidad social es una condición que se gesta, acumula y permanece en forma continua en el tiempo y está íntimamente ligada a los aspectos culturales y al nivel de desarrollo de las comunidades.

Sólo en los últimos años un mayor número de especialistas de las ciencias sociales se ha interesado de nuevo por el tema, razón por la cual aún existen grandes vacíos que impiden un entendimiento completo de los problemas de riesgo y sus verdaderas posibilidades de mitigación. La lectura acerca de la vulnerabilidad y el riesgo de los geofísicos, hidrólogos, ingenieros, planificadores, etc. puede llegar a ser muy diferente de la lectura o la representación que tienen las personas y las comunidades expuestas así como las autoridades gubernamentales encargadas de la gestión y de la toma

decisiones para la reducción o mitigación del riesgo. Por esta razón hoy se acepta que es necesario profundizar, también, el conocimiento acerca de la percepción individual y colectiva del riesgo e investigar las características culturales, de desarrollo y de organización de las sociedades que favorecen o impiden la prevención y la mitigación; aspectos de fundamental importancia para poder encontrar medios eficientes y efectivos que logren reducir el impacto de los fenómenos peligrosos en el mundo (Maskrey 1989/94).

### 2.3.1. Enfoque de las ciencias naturales

La denominación *desastres naturales* es muy común en la literatura y frecuentemente se ha utilizado para referirse a la ocurrencia de fenómenos severos de la naturaleza. Sucesos tales como terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, huracanes, inundaciones, movimientos de masa, entre otros, han sido considerados directamente como sinónimos de desastre. Desafortunadamente, durante siglos, esta lectura ha favorecido la creencia de que no hay casi nada por hacer ante los desastres; debido al carácter avasallador, recurrente y la dificultad para predecir estos fenómenos se les ha considerado como inevitables. Esta lectura de los desastres también ha inducido a considerar que son hechos del destino o de la mala suerte e incluso se les ha atribuido causas sobrenaturales o divinas. Esto podría explicar porqué ciertas comunidades desde un punto de vista religioso consideran que estos sucesos no pueden ser intervenidos y que ante su ocurrencia no queda más que resignarse. No es de extrañar, entonces, que hubieran recibido el calificativo de “actos de Dios”, el cual subsiste en la legislación de estirpe anglosajona. Vestigios de este tipo de interpretación se encuentran en las legislaciones de algunos países europeos y latinoamericanos, donde el desastre sea de origen natural o antrópico es incluido en la categoría doble de “fuerza mayor y caso fortuito”, que da cuenta de aquel hecho que es a la vez imprevisible e irresistible.

Ahora bien, el interés de geofísicos, sismólogos, meteorólogos, geólogos, entre otros, por el entendimiento de los fenómenos de la naturaleza ha favorecido que el tema de los desastres siga siendo abordado por muchos como un asunto exclusivamente asociado con los mecanismos físicos que generan estos sucesos naturales. En muchas situaciones, desafortunadamente, se sigue manteniendo que los desastres son los fenómenos mismos. A pesar del avance tecnológico, la instrumentación geofísica, hidrológica y meteorológica, en la mayoría de los casos no es posible predecir con certeza y precisión la ocurrencia de un suceso futuro. Amparados en esta circunstancia hay quienes han justificado, ante comunidades afectadas, la ocurrencia de daños y pérdidas tratándolas como consecuencias inevitables. Incluso, algunas autoridades políticas han apelado a la lectura fatalista del fanatismo religioso de ciertas comunidades para eludir eventuales responsabilidades por negligencia u omisión.

El avance tecnológico ha facilitado la instrumentación de fenómenos naturales mediante sensores, incluso en tiempo real, que permiten dar alertas o avisos anticipados de sucesos intensos. Estos, sistemas de alerta, permiten que al menos se salven vidas, si una comunidad esta debidamente preparada para responder en forma adecuada en caso de que se presenten síntomas precursores antes de un evento mayor o que haya el tiempo suficiente para escapar del área de influencia de un suceso severo ya ocurrido. El estudio de los fenómenos geodinámicos e hidrometeorológicos, sin duda, ha contribuido, además, al conocimiento de la *amenaza* o peligro que representa la posible ocurrencia de fenómenos intensos y nocivos. En este sentido el aporte de las ciencias

naturales a la estimación del riesgo es notable y sin duda necesaria, sin embargo no es suficiente si el riesgo se entiende como el potencial de consecuencias o pérdidas en caso de que se presenten fenómenos naturales futuros.

Durante la segunda mitad del siglo XX, época en la cual el desarrollo tecnológico contribuyó notablemente al conocimiento de los fenómenos naturales, fue muy común que se le denominara riesgo a la estimación de la posibilidad de que un fenómeno se manifestara y por esta razón es común aún encontrar esta apreciación en los especialistas que estudian fenómenos como los terremotos, los deslizamientos, tormentas, etc. En los años 70 e incluso 80, por ejemplo, no había equívoco alguno si alguien al querer referirse a la probabilidad de ocurrencia de un terremoto hiciera mención que estaba estimando el riesgo sísmico; a finales de los 80 y particularmente en los 90 se empezó a utilizar de manera más amplia el concepto de amenaza sísmica para referirse a lo mismo. Una circunstancia que contribuyó a esta situación fue la valoración, por parte de los sismólogos, de la acción de la energía sísmica mediante la apreciación de sus efectos; en las construcciones por ejemplo. Aun cuando las denominadas escalas de intensidad siguen siendo una herramienta ineludible para calificación de los terremotos que no han sido instrumentados o medidos, su uso también ha contribuido en parte a la confusión que algunos han tenido entre amenaza y riesgo sísmico.

La declaración de los años 90 como el “Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales”, DIRDN, por parte de la Asamblea General de la Naciones Unidas, sin duda tuvo la influencia directa de los científicos de las ciencias naturales. De hecho esta iniciativa fue aprobada previamente en los Estados Unidos para el estudio específicamente de las *amenazas naturales* y fue promovida por Frank Press, un reconocido especialista de la Ciencias de la Tierra.

### **2.3.2. Enfoque de las ciencias aplicadas**

Los trabajos de Robert Withman en Boston y de Michel Fournier d’Albe en Europa en los años 70 aportaron nuevos elementos a la estimación de daños o pérdidas en el caso de sismos, en forma complementaria a los modelos de estimación de la amenaza que se depuraban en ese momento. El énfasis en que el daño no sólo se debía a la severidad del fenómeno natural sino también a la fragilidad o vulnerabilidad de los elementos expuestos favoreció una concepción del riesgo y de desastre más adecuada.

Por otra parte, el enfoque de las compañías de seguros de “comprar riesgo”, que desde entonces fue entendido como pérdida factible y el análisis de la probabilidad de fallo o de “accidente” en sistemas mecánicos e industriales consolidó un nuevo paradigma en lo que atañe al análisis de riesgo, seguridad y confiabilidad de sistemas. A partir de este momento se le dio especial atención a las propiedades físicas del sistema que podía sufrir el daño por la acción de un fenómeno externo o de que pudiera ocurrir un fallo o siniestro en el sistema debido a la tecnología inherente del mismo. Las propiedades físicas como la elasticidad, la fragilidad e incluso la ductilidad o tenacidad de un material que se traducen en resistencia y capacidad de disipación de energía y, por otra parte, la rigidez, la masa y la forma tendrían un rol especialmente importante en la respuesta o capacidad de una estructura ante la acción de una o varias solicitaciones o cargas externas aleatorias. Este podría considerarse como el aporte de la ingeniería y de las ciencias duras (Wiggins 1972; Hasofer 1974; Blockley 1992; Elms 1992; Stewart *et al.* 1997; Modarres *et al.* 1999; Melchers 1999; Sánchez-Silva

2000). Surgió de manera explícita el concepto de vulnerabilidad, el cual desde la perspectiva de los desastres y la modelación utilizando métodos probabilistas quedó claramente establecido en el reporte *Natural Disasters and Vulnerability Analysis* de UNDRO de 1979 al que se hizo referencia previamente.

A partir de los años 80 y en especial en los años 90 este enfoque conceptual de los desastres fue ampliamente aceptado y difundido en Europa y luego en Japón y los Estados Unidos, donde el uso de la palabra vulnerabilidad se generalizó posteriormente. Sin dejar de reconocer la importancia en la valoración del riesgo de los fenómenos naturales, es decir de la amenaza, en este enfoque otros aspectos entraron a jugar un papel igualmente importante: los elementos expuestos y su vulnerabilidad, es decir los sujetos o sistemas que podrían ser afectados y sus características. Un sismo en un desierto o un huracán en el centro del océano, desde esta perspectiva, no pueden considerarse como un peligro al no haber nadie expuesto o que pueda ser afectado, es decir no significan riesgo para nadie en términos pragmáticos.

Por otra parte, disciplinas como la geografía, la planificación física, urbana o territorial, la economía y la gestión del medio ambiente, entre otras, también fortalecieron este enfoque de los desastres, que aquí se denomina enfoque de las ciencias aplicadas. Se empezaron a producir de manera más frecuente “mapas” con la participación de geólogos, ingenieros geotecnistas, hidrólogos, etc. quienes aportaron insumos para la identificación de zonas de peligro o amenaza, según el área de influencia de los fenómenos naturales (Hermelín 1991). Herramientas informáticas como los sistemas de información geográfica SIG han facilitado este tipo de identificación y análisis (Burby 1998; Maskrey 1998).

El uso de matrices daño, funciones o curvas de pérdidas, de fragilidad o vulnerabilidad, que relacionan la intensidad de un fenómeno con el grado de daño para tipos de edificios, por ejemplo, permitió la estimación de escenarios de pérdidas potenciales en caso de futuros terremotos en centros urbanos. Este tipo de estudios o análisis de riesgo se han planteado de manera más frecuente con la intención de aportar información de amenazas o riesgos a la planificación física y el ordenamiento territorial, como un insumo para la toma de decisiones (Smith 1992; Alexander 1993).

En este enfoque el riesgo se obtiene como el resultado de la modelación probabilista de la amenaza y de la estimación del daño que puede sufrir un sistema, el cual se puede obtener también en forma analítica o basado en información empírica. Esta posibilidad favorece que los resultados obtenidos puedan traducirse en pérdidas potenciales y puedan aplicarse, bajo el concepto de la relación beneficio/costo en la elaboración de códigos de construcción, normas de seguridad, planeamiento urbano proyectos de inversión (Elms 1998). La posibilidad de cuantificar y obtener resultados en términos de probabilidad han facilitado que este enfoque se consolide bajo el postulado que hace del riesgo una variable objetiva susceptible de cuantificación (Wiggins y Morán 1970; Vanmarcke 76; García, 1984; Galambos 1986/92; Liu *et al.* 1995).

### **2.3.3. Enfoque de las ciencias sociales**

Desde la perspectiva de las ciencias sociales el tema de los desastres tuvo especial atención en los Estados Unidos a mediados del siglo XX, como resultado del interés del gobierno en el comportamiento de la población en caso de guerra (Quarantelli 1988/95/98). A partir de esa época podría decirse que se desarrolló una teoría social de

los desastres. Este enfoque involucra estudios principalmente sobre las reacciones y el comportamiento individual y colectivo (Drabek 1986; Dynes y Drabek 1994; Mileti 1996). En general, en los Estados Unidos, los estudios e investigaciones de los científicos sociales se ha dirigido hacia la reacción o respuesta de la población ante las emergencias y no hacia el estudio del riesgo propiamente dicho. Sin embargo, los aportes desde el ámbito de la geografía y de la llamada “escuela ecologista” que surgió en la Universidad de Chicago desde los años 30 (Dewey 1929; White 1945; Burton *et al.* 1978), podrían también considerarse concepciones desde una perspectiva socio-ambiental (Mitchell 1992; Mileti, 1999), que inspiraron el enfoque de las ciencias aplicadas posteriormente. Su énfasis en que desastre no es sinónimo de evento natural y sus aportes en relación con la necesidad de considerar la capacidad de “ajuste” o de adaptación de una comunidad ante la acción de eventos naturales o tecnológicos fue, sin duda, la base conceptual a partir de la cual se desarrollo el concepto de vulnerabilidad (incapacidad de ajustarse).

Por otra parte, en Europa y en algunos países en desarrollo, tanto en América Latina como en Asia, investigadores de las ciencias sociales han debatido en forma crítica, desde los años 80 y particularmente en los 90, los enfoques de las ciencias naturales y aplicadas (Maskrey 1984/93a; Maskrey y Romero 1986; Cardona y Sarmiento 1988; Jordán y Sabatini 1988). En general, su enfoque plantea que la vulnerabilidad tiene un carácter social y que no solamente está referida al daño físico potencial o a determinantes demográficas. Se postula que un desastre en realidad ocurre sólo cuando las pérdidas producidas por un suceso superan la capacidad de la población de soportarlas o cuando los efectos impiden que pueda recuperarse fácilmente. Es decir, que la vulnerabilidad no se puede definir o medir sin hacer referencia a la capacidad de la población de absorber, responder y recuperarse del impacto del suceso (Westgate y O’Keefe 1976). Así, para los expertos en ciencias políticas, pérdidas o efectos físicos similares en dos países con diferente salud económica e institucional pueden tener implicaciones muy distintas. Un suceso que puede pasar desapercibido en un país grande podría significar una catástrofe en un país pequeño, debido a la capacidad de cada uno de los sistemas sociales involucrados (Hewitt 1983/97). Daños similares en países ricos y pobres, por ejemplo, tienen implicaciones sociales más graves en los países pobres, donde usualmente los grupos sociales marginados son los más afectados (Wijkman y Timberlake 1984). De acuerdo con Susman *et al.* (1984) la vulnerabilidad “es el grado en que las diferentes clases sociales están diferencialmente en riesgo”. Desde este punto de vista la vulnerabilidad esta establecida de acuerdo con las condiciones políticas, sociales y económicas de la población. Se propone, desde esta perspectiva, que las condiciones que caracterizan el subdesarrollo (marginalidad social, expropiación, explotación, opresión política y otros procesos asociados con el colonialismo y el capitalismo) han hecho, particularmente que las comunidades pobres sean más vulnerables a los desastres y hayan sido forzadas a degradar su ambiente.

Ahora bien, otros investigadores, como los que constituyeron la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, La RED, han planteado que la vulnerabilidad se configura socialmente y es el resultado de procesos económicos, sociales y políticos (La RED 1992). Por lo tanto, para modelar la vulnerabilidad es necesario tener en cuenta, aparte de los aspectos físicos, factores sociales como la fragilidad de las economías familiares y colectivas; la ausencia de servicios sociales básicos; la falta de acceso a la propiedad y al crédito; la presencia de discriminación

étnica, política o de otro tipo; la convivencia con recursos de aire y agua contaminados; altos índices de analfabetismo y la ausencia de oportunidades de educación, entre otros (Maskrey 1989; Wilches 1989; Lavell 1992; Cardona 1993b; Maskrey 1994; Lavell 1996; Mansilla 1996; Cardona 1996c/96d). En este sentido, se han propuesto modelos conceptuales del riesgo desde el ámbito de la economía política o neo-Marxismo, como el modelo de “presión-liberación” en el cual se postula que el riesgo es el resultado de la concurrencia de unas condiciones de vulnerabilidad y de unas posibles amenazas. La vulnerabilidad se obtiene de identificar las presiones y relaciones sociales desde lo global hacia lo local. En el nivel global se les denomina: “causas de fondo”, como las estructuras sociales, políticas y económicas; en un nivel intermedio se les llama: “presiones dinámicas”, como el crecimiento de la población, la urbanización y densificación, la degradación ambiental, la falta de ética, etc.; y el nivel local se les denomina: “condiciones de inseguridad”, como la fragilidad social, el daño potencial, la pobreza, entre otras. En este enfoque la prevención-mitigación debe ser concebida para “relajar” la presión de lo global a lo local de estos factores sociales y por lo tanto la reducción del riesgo deben dirigirse a intervenir en cada nivel las condiciones de inseguridad, las presiones dinámicas y las causas de fondo (Davis 1992; Wisner 1993; Cannon 1994; Blaikie *et al.* 1994/96).

Existen otros modelos conceptuales, como el “modelo de acceso” en el que, a diferencia del anterior, se propone que el riesgo se genera, desde lo local hacia lo global, como resultado de las dificultades que algunos grupos sociales o familias tienen para acceder a ciertos recursos a lo largo del tiempo. Se intenta identificar las limitaciones y las facilidades a través de los cuales se logra la acumulación o la disminución de capacidades importantes ante el potencial de un desastre (Wisner *et al.* 1976; Pelanda 1981; Sen 1981; Chambers 1989; Parker 91; Winchester 1992; Saavedra 1996). Su argumento se fundamenta en el hecho de que ante una igual amenaza o ante el mismo potencial de daño físico, el riesgo de las familias puede ser diferente dependiendo de la capacidad de cada una de absorber el impacto. Aunque algunos consideran que la vulnerabilidad, vista así, es un sinónimo de pobreza, quienes postulan el modelo indican que la pobreza se refiere a necesidades básicas insatisfechas y restricciones de acceso a los recursos, mientras que esta manera de ver la vulnerabilidad se refiere más bien a una falta de capacidad de defenderse y de superar una calamidad (Chambers 1989). Como derivación de estos planteamientos se ha llegado a argumentar que los conceptos de tropicalidad, desarrollo y vulnerabilidad –respectivamente desde el siglo XVII y hasta principios del XX, durante la posguerra y a finales del siglo XX– forman parte de un mismo discurso cultural de occidente, que se ha referido a amplias regiones del mundo de una misma forma generalizante y denigrante, como regiones dominadas por las enfermedades, golpeadas por la pobreza y propensas a desastres respectivamente (Bankoff 2001). Por otra parte, desde el punto de vista de la comunicación, considerando los procesos a través de los cuales se construye individual o colectivamente el significado de los conceptos, otros autores han asumido una posición crítica frente a los diferentes enfoques anteriores. Señalan que, en general, existe un carácter positivista y conductista en las diferentes propuestas conceptuales, debido a que en cualquier caso los conceptos formulados son descripciones estructuralistas o constructivistas de expertos con fines de intervención o manipulación. La mayoría de estos planteamientos hacen énfasis en el rol activo que las personas tienen en la construcción del significado del riesgo y en el papel de la comunicación

como poder de transformación, indicando que al ser el riesgo una apreciación, lectura o “imaginario” y no algo externo a las personas, es fundamental considerar las percepciones, actitudes y motivaciones individuales y colectivas, las cuales pueden variar de manera notable de un contexto a otro, si se desea comprender mejor el tema (Johnson y Covello (1987); Slovic 1992; Luhmann 1993; Maskrey 1993b/94; Adams 1995; Muñoz-Carmona 1997).

#### **2.4. Crítica a los diferentes enfoques**

La concepción del riesgo y la terminología asociada a su definición no sólo ha variado con el tiempo. También ha variado desde la perspectiva disciplinar desde la cual se ha abordado su noción. Esto significa, que a pesar del refinamiento con que se le trata desde los diferentes ámbitos del conocimiento, no existe en realidad una concepción que unifique las diferentes aproximaciones o que recoja de manera consistente y coherente los distintos enfoques. Aun cuando al referirse a riesgo la mayoría de quienes están relacionados con el tema de los desastres cree que se está hablando del mismo concepto, en realidad existen serias diferencias que no facilitan identificar con claridad de qué manera se puede reducir con éxito; es decir, de qué forma se debe llevar a cabo su gestión con eficacia y efectividad.

El aquí llamado enfoque de las ciencias naturales es una visión parcial o reduccionista, que sin duda ha contribuido al conocimiento paulatino de una parte fundamental del riesgo: la amenaza. Sin embargo, el que todavía se confunda el concepto de riesgo con el concepto de amenaza puede tener implicaciones insospechadas. Un evento natural intenso no es sinónimo de desastre y por lo tanto el riesgo no debe entenderse exclusivamente como la posibilidad que se presente un fenómeno natural, como un terremoto, una erupción volcánica, un huracán, etc. Este tipo de concepción ha contribuido a desorientar la lectura o el “imaginario” de la población expuesta. De esta circunstancia, incluso, se han aprovechado autoridades políticas inescrupulosas, argumentando que las consecuencias no se pueden evitar por tratarse de hechos de la naturaleza. Aún más, esta concepción ha favorecido virtualmente a mantener en algunas legislaciones figuras jurídicas que liberan de culpabilidad a quienes han obrado negligentemente en su deber de proteger la comunidad y sus bienes.

El enfoque aquí llamado de las ciencias aplicadas difiere del enfoque de las ciencias naturales en que su interés está dirigido hacia los efectos del suceso sobre un elemento expuesto y no hacia el suceso mismo. Sin duda, el aporte de la ingeniería desde la perspectiva de la confiabilidad, la seguridad y el análisis de riesgo, al estudiar la capacidad de un sistema de mantener su función o aptitud, significa un salto o un cambio de paradigma en lo que atañe al entendimiento del problema. Sin embargo, aunque mediante esta concepción se propone un concepto de riesgo más adecuado, de todas maneras este enfoque sigue siendo parcial y reduccionista. El análisis de riesgo cambia notablemente si el sistema en vez de ser una estructura (una planta nuclear o una industria química, etc.) es una comunidad o la sociedad misma. La extrapolación metodológica y el uso de conceptos como “probabilidad”, “consecuencias” y “contexto” debe realizarse con extremo cuidado. La aceptabilidad o el análisis beneficio/costo son aspectos notablemente diferentes cuando el sistema expuesto es la sociedad o un subconjunto de ella o cuando en el proceso de análisis se deben tener en cuenta variables sociales, culturales, institucionales y/o políticas. En general, las

metodologías desarrolladas bajo este enfoque, cuando se trata de desastres, no son suficientes para ofrecer estimaciones del riesgo completas. En la práctica, tienden a ser, más bien, evaluaciones de vulnerabilidad física que suplantando la evaluación del riesgo, el cual se deja a la postre como un resultado secundario. Mediante estas técnicas es usual que el riesgo se valore en términos económicos, como el producto de estimar el costo de reposición de la fracción deteriorada del sistema vulnerable afectado y, en el mejor de los casos, otros costos asociados como el lucro cesante. Incluso, es común encontrar, en el caso de escenarios futuros de pérdidas, que se le denomine “impacto social” a la estimación global de posibles víctimas, en términos de muertos y heridos. Aunque esta información es un dato importante, por ejemplo para la atención de emergencias, confirma la visión restringida y el desconocimiento que tiene el enfoque de las ciencias aplicadas de los aspectos sociales, culturales, económicos y políticos que deben reflejarse en la estimación de la vulnerabilidad y el riesgo desde la perspectiva de los desastres. No sobra mencionar que, excepto en el caso sísmico, la vulnerabilidad planteada por este enfoque, en relación con la planificación territorial, ha tenido la tendencia a ser considerada como una constante por el hecho de que el elemento esté expuesto o ubicado en el área de influencia del fenómeno peligroso. Muchos mapas de amenaza se han convertido por esta vía, sin mayor dificultad, en mapas de riesgo, donde la vulnerabilidad es invariante por estar los elementos físicamente expuestos. Por lo tanto, este enfoque le sigue dando una especial importancia a la amenaza y la sigue considerando tácitamente como el origen o la causa única del desastre. El uso de sistemas de información geográfica SIG a favorecido esta circunstancia y la visión un tanto “fotográfica” o “congelada” del riesgo. En el mejor de los casos, el iluminante concepto de vulnerabilidad, propuesto a la luz de este enfoque, se utiliza al final de cuentas sólo para explicar el daño físico y otros efectos colaterales directos. Riesgo, desde esta perspectiva, en general se ha interpretado como un potencial de pérdidas según los daños factibles. El desastre —es decir, la materialización del riesgo— se ha visualizado, de manera restringida, a las pérdidas que representan los daños ocurridos y no, de manera amplia y por derivación, a las consecuencias o al impacto que se causa sobre la sociedad que sufre dichos daños o pérdidas. Sin duda, a esta interpretación ha contribuido el percibir la vulnerabilidad sólo como “exposición” o, en el mejor de los casos, como susceptibilidad a sufrir daños, sin hacer prácticamente ninguna referencia a la resiliencia; que está relacionada con las implicaciones que pueden tener los daños o pérdidas.

En cuanto al aquí llamado enfoque de las ciencias sociales, se puede afirmar que, desde la perspectiva de los desastres, su aporte a la concepción del riesgo fue inicialmente tímido, debido a la marcada tendencia que se tuvo a estudiar el comportamiento y la respuesta de la población en situaciones de emergencia o en caso de su inminencia. En los países desarrollados, los científicos sociales, le han dado un notable énfasis al estudio del riesgo desde el punto de vista de lo cotidiano y de seguridad de las personas ante hechos tecnológicos que puedan afectar su salud. En pocos casos se ha demostrado un interés especial en la percepción de individuos o colectividades sobre posibles desastres, con excepción de eventos bélicos, y aún menos a las implicaciones o a los procesos que contribuyen a la incubación social de los mismos. Algunos trabajos, no obstante, han hecho algún énfasis en la capacidad de las comunidades de absorber el impacto o de recuperarse después de un suceso. Estos trabajos han tenido el mérito de cuestionar la visión restringida de las ciencias

aplicadas, al indicar que la vulnerabilidad no debe ser considerada exclusivamente como la posibilidad de un daño físico. Sólo en los últimos años del siglo xx han surgido con mayor frecuencia planteamientos que abordan el tema del riesgo considerando que la vulnerabilidad e incluso que la amenaza, en ocasiones, puede ser el resultado de procesos sociales, económicos y políticos. Si bien este tipo de enfoque parece ser el más completo, en muchos casos le ha dado un énfasis tal a la lectura y modelización social de la vulnerabilidad que ha llegado a omitir o inadvertir que el impacto ambiental y los daños físicos potenciales son fundamentales a la hora de tener una concepción y una estimación del riesgo. La vulnerabilidad, desde esta perspectiva, ha tenido la tendencia a interpretarse como una “característica” y no como una condición o predisposición, resultado de una susceptibilidad, unas fragilidades y una falta de capacidad para recuperarse. Incluso, algunos autores llegan a perder de vista la amenaza, que de todas maneras se requiere para establecer la noción de riesgo. No sobra mencionar, que el concepto riesgo esta asociado a decisión, lo que implica dimensionarlo en función del tiempo; esto es lo que determina si hay algo por hacer o no. Pero sin amenaza, sin fenómeno detonante factible, y con una vulnerabilidad interpretada como si ella fuese una característica, aunque la vulnerabilidad permaneciera “eternamente”, no habría riesgo ni desastre. No es extraño que algunos autores del enfoque de las ciencias sociales tengan la tendencia o el sesgo a considerar la pobreza como la vulnerabilidad misma y no como un factor de vulnerabilidad. Algunos, que intentan alejarse de esta concepción, precisan que la pobreza la determinan procesos históricos que restringen el acceso de las personas a los recursos y que la vulnerabilidad está determinada por procesos históricos que restringen que las personas tengan medios para enfrentar las amenazas o el acceso a la protección o a la seguridad. Sin embargo, en general, pocos trabajos se refieren al riesgo o se limitan a tratar la vulnerabilidad como su sinónimo, pero quizás su mayor carencia está en que, con el argumento de que el riesgo es algo más bien subjetivo, no se intenta estimarlo o se utilizan técnicas poco consistentes para hacerlo.

De lo anterior se deduce que no obstante los notables avances en la concepción del riesgo, debido a los enfoques de las diferentes disciplinas relacionadas, existe una alta fragmentación que no ha permitido concluir una teoría consistente y coherente del riesgo desde la perspectiva de los desastres. Es de esperarse que siempre existirán diferentes enfoques y aunque se podría argumentar que dicha circunstancia puede ser irrelevante, el autor considera que parte de las dificultades para lograr una gestión efectiva del riesgo ha sido la falta de una concepción integral del riesgo que facilite su estimación e intervención desde una perspectiva multidisciplinar. En otras palabras, la ausencia de una teoría holística del riesgo, desde el punto de vista de los desastres, ha favorecido o contribuido en parte a que el problema crezca a una velocidad mayor que la velocidad de sus soluciones.

## *Capítulo 3.*

# **Valoración del riesgo y toma de decisiones**

### **3.1. Diferencia entre riesgo y desastre**

Un desastre es una situación o proceso social que se desencadena como resultado de la manifestación de un fenómeno de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre que, al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en una población, causa alteraciones intensas en las condiciones normales de funcionamiento de la comunidad. Estas alteraciones están representadas por la pérdida de vida y salud de la población; la destrucción o pérdida de bienes de la colectividad y daños severos en el ambiente, razón por la cual se requiere de una respuesta inmediata de las autoridades y de la población para atender los afectados y restablecer la normalidad y el bienestar.

El desastre es para la sociedad un impacto o unas pérdidas cuyos niveles significan una condición de incapacidad de la misma para enfrentarlas, absorberlas y recuperarse de ellas empleando sus propios recursos y reservas. Un desastre significa un “determinado nivel” de daños y pérdidas que se establece socialmente. Esto significa que pueden haber daños y pérdidas sin que exista desastre para la sociedad. El desastre es una situación dada, un producto, tangible y dimensionable.

La existencia de desastre o de pérdidas, en general, supone la existencia previa de determinadas condiciones de riesgo; es decir, representa la materialización de esas condiciones de riesgo pre-existentes. Por su parte el riesgo, definido como la probabilidad de pérdidas futuras, es el resultado de existencia de un peligro latente asociado con la posibilidad de que se presenten fenómenos peligrosos y de unas características propias o intrínsecas de la sociedad que la predisponen a sufrir daños en diversos grados.

El riesgo del que aquí se habla es el riesgo colectivo o riesgo público. Es el riesgo que significa peligro en algún grado para todos los miembros de una comunidad propensa. Una vez el riesgo es reconocido por la comunidad implica que se debe hacer algo para reducirlo, lo que debe comprometer a instituciones no sólo del sector público, sino también del sector privado y a la comunidad misma. Pero el riesgo colectivo, o “compartido” como le denomina Louise K. Comfort (1999), involucra una serie de problemas que son interdependientes, dinámicos e inciertos, que requieren una acción colectiva para poder resolverlos. Desafortunadamente, no es extraño que comunidades

expuestas a la acción de sucesos peligrosos bien reconocidos no enfrenten el problema por restricciones de recursos o porque su percepción del peligro no estimula su interés para asumir este problema colectivo. Algunos miembros de la comunidad en ocasiones son conscientes del peligro y llevan a cabo acciones individuales para reducirlo, sin embargo la comunidad en general, como un todo, permanece vulnerable. El nivel de riesgo de una sociedad está relacionado con sus niveles de desarrollo y su capacidad de modificar los factores de riesgo que potencialmente la afectan. En este sentido, los desastres son riesgos mal manejados. El riesgo se construye socialmente, aun cuando el evento físico con el cual se asocia sea natural.

Hasta principios del decenio de los 90 la práctica en el ámbito de los desastres fue dominada por las actividades relacionadas con la preparación y la respuesta humanitaria. La prevención-mitigación no fue la prioridad en la política pública y ni en la acción social. Sin embargo, ante evidencia del notable aumento de las pérdidas asociadas a los desastres y el inevitable incremento de la movilización de recursos para la respuesta y la reconstrucción, se ha reconocido paulatinamente la importancia de promover actividades de prevención-mitigación, entendidas éstas, en general, como la reducción de riesgos. Desafortunadamente, en muchas ocasiones se ha tergiversado este concepto promovido con mayor fuerza a partir de los principios de los años 90, debido a la resistencia y al sesgo asistencial de algunas organizaciones. No es extraño, que aún ahora, para referirse a la preparación y respuesta en caso de emergencia se emplee la denominación *mitigación o prevención de desastres*. Esta ambigüedad se debe, aparentemente, a la preponderancia que siguió teniendo el concepto de desastre y no el de prevención en el sentido de reducir el riesgo. Hoy, no obstante, ya existe una controversia y para algunos la reducción o mitigación de un desastre exige de la existencia del desastre, al igual que cuando se habla de la reducción de peso! En efecto, con razón podría aceptarse que prevenir un hecho, como lo es un desastre, podría ser contradictorio e incluso podría interpretarse como algo pretencioso; a parte que puede seguir perpetuando la connotación de fenómeno natural con la que muchos se confunden. Por esta razón, cada vez más se acepta como más conveniente el referirse a riesgo que a desastre, dado que una vez entendido el concepto es más claro y efectivo para efectos del objetivo de lo que se ha querido promover como prevención y mitigación: la reducción del riesgo.

Paulatinamente se ha llegado a la conclusión de que es el riesgo mismo el problema fundamental y que el desastre es un problema derivado. El riesgo y los factores de riesgo se han convertido en conceptos y nociones fundamentales en el estudio y la práctica en torno a la problemática de los desastres. Dicha transformación en las bases paradigmáticas del problema ha sido acompañada por un creciente énfasis en la relación que los riesgos y los desastres guardan con los procesos y la planificación del desarrollo y, en consecuencia, con la problemática ambiental y la sostenibilidad del desarrollo (Cuny 1994). Riesgos y desastres ya se visualizan como componentes de la problemática del desarrollo y no como condiciones autónomas generadas por fuerzas exteriores a la sociedad (Lavell 2000).

A raíz del cambio en el énfasis conceptual y la creciente importancia concedida al riesgo a diferencia del desastre (a proceso y no a producto), el tema de la intervención se ha visto sujeto a cambios de énfasis y terminología. Así, mientras durante el decenio de los 90 comenzó promoviendo ideas como la Administración de Desastres o la Reducción y Prevención de los Desastres, durante los primeros años del siglo que se

inicia esta terminología ha sido paulatinamente reemplazada de tal manera que ya no es extraño escuchar denominaciones como Gestión de Riesgos y Reducción de Riesgos o Vulnerabilidades. Este nuevo enfoque y terminología no excluye la respuesta a los desastres, sino más bien la ubica de forma integrada en la gestión o manejo del riesgo.

Sin que exista una condición que se llame desastre, el riesgo y los factores de riesgo sí existen en forma continua y pueden ser objeto de modificación, reducción o control por la vía de la intervención humana. Esto corresponde a lo que tradicionalmente se le ha llamado prevención y mitigación. Pero aún más, cuando se reconocen las condiciones estructurales del riesgo y la imposibilidad de realizar una intervención para reducirlas, la magnitud de futuros desastres puede ser reducida a través de la adecuada preparación de la sociedad para responder frente a un suceso, o sea a través de los llamados preparativos para desastres y la organización de la respuesta humanitaria. Esto constituye una forma de gestión de riesgos que se diferencia de la prevención y mitigación propiamente dichas.

En el caso de un desastre asociado con un evento físico súbito, este desastre revela las condiciones de riesgo pre-existentes y a la vez significa una transformación acelerada de los mismos. La respuesta humanitaria o de emergencia constituye en estos casos una nueva dimensión de la gestión de riesgos donde el objetivo debe ser el controlar la incidencia de los nuevos factores de riesgo presentes que atentan contra la vida y el bienestar de la población afectada. Finalmente, con la reconstrucción, la gestión de riesgo toma la forma de la búsqueda de control sobre futuros riesgos y un aumento en la seguridad que ofrecen las nuevas estructuras económicas e infraestructuras promovidas. En este caso la reconstrucción se asemeja al proceso de planificación de nuevos proyectos de desarrollo donde la importancia del control de riesgo, de la limitación de los impactos ambientales negativos, etc. debe asumir un papel importante (Lavell 2000).

### **3.2. Estudio del peligro**

En la actualidad, en el ámbito de los desastres y riesgos, es ampliamente utilizado el concepto de amenaza, no obstante que durante años se ha presentado una falta de unanimidad en su significado por parte de los diferentes autores. A continuación se presentan varias definiciones que expresan alguna similitud pero no necesariamente significan lo mismo si se les revisa cuidadosamente:

“Dar indicios de estar inminente alguna cosa mala o desagradable: anunciarla, presagiarla”. (Diccionario de la Real Academia Española 1992)..

“Una evaluación de una situación severa, la probabilidad de ocurrencia de un evento arriesgado en un periodo de tiempo dado”.

“Condiciones o procesos que tienden a iniciar episodios de daños excepcionales”.

“Factor externo a una comunidad expuesta (o a un sistema expuesto), representado por la potencial ocurrencia de un fenómeno (o accidente) desencadenante, el cual puede producir un desastre al manifestarse”.

“Probabilidad de ocurrencia de la magnitud de un fenómeno que pueda causar daño”.

“Eventos naturales extremos que pueden afectar diferentes sitios singularmente o en combinación (líneas costaneras, laderas, fallas sísmicas, sabanas, bosques tropicales, etc.), en diferentes épocas (estación del año, hora del día, sobre diferentes periodos de regreso, de diferente duración). La amenaza tiene diferentes grados de intensidad y severidad”.

“Un evento (...) de la naturaleza, tal como un terremoto. Existen amenazas de dos tipos, primaria y secundaria. La primaria afecta asentamientos humanos. La secundaria surge con posterioridad a la primaria y contribuye a aumentar las pérdidas y el sufrimiento”.

“Probabilidad de que ocurra un riesgo frente al cual una comunidad es vulnerable”.

“Es la condición física, química o natural con el potencial de causar consecuencias no deseables o daños sobre la población, la propiedad o el medio ambiente en general. Se expresa en términos de la frecuencia de ocurrencia del evento peligroso dentro de un lapso específico de tiempo en un lugar determinado”.

Esta diversidad de definiciones, en su mayoría de la literatura de los desastres, ilustra falta de rigor y en particular de coherencia en la definición del concepto. En ocasiones la amenaza se confunde con el episodio que puede generar o con el suceso que la caracteriza y en otras se le trata como equivalente a riesgo. Por esta razón, el autor se refiere a la amenaza como un sinónimo de peligro latente que representa la posible manifestación dentro de un período de tiempo de un fenómeno peligroso de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre, que puede producir efectos adversos en las personas, los bienes y servicios y el ambiente.

Así, desde el punto de vista conceptual, la amenaza se entiende como un factor de riesgo externo de un elemento o grupo de elementos expuestos, que se expresa como la probabilidad de que un suceso se presente con una cierta intensidad, en un sitio específico y en dentro de un periodo de tiempo definido. De la misma manera como la vulnerabilidad, se puede entender como un factor de riesgo interno que se puede expresar como la probabilidad de que el sistema o el sujeto expuesto sea afectado por el suceso o fenómeno que caracteriza la amenaza.

De forma general las amenazas se pueden diferenciar en dos grandes grupos de acuerdo con su origen: amenazas naturales y amenazas antrópicas.

### **3.2.1. Amenazas naturales**

Algunas amenazas se les clasifica como de origen natural porque están asociadas con la posible ocurrencia de fenómenos de la naturaleza como expresión de su dinámica o funcionamiento. En muchos casos no pueden ser neutralizadas debido a que su mecanismo de origen difícilmente puede ser intervenido, aun cuando en algunas ocasiones puede existir algún tipo de control. Como ejemplos de fenómenos naturales que pueden convertirse en amenaza para una comunidad expuesta a su influencia se pueden mencionar la actividad volcánica, los terremotos, los tsunamis, los huracanes, el fenómeno de El Niño, entre otros. La mayoría de estos sucesos que caracterizan las amenazas naturales se producen de manera súbita o repentina, aunque en algunos casos su ocurrencia también puede ser lenta. Las amenazas de origen natural en muchas ocasiones se encuentran interrelacionadas unas con otras, es decir, que la ocurrencia de un fenómeno natural puede generar o desencadenar la ocurrencia de otros. Es así como

la ocurrencia de sismos puede generar deslizamientos, los huracanes pueden generar inundaciones y las sequías pueden provocar el agotamiento de acuíferos.

Una amenaza corresponde a la posible ocurrencia de un suceso o fenómeno con una severidad suficiente para afectar a un sistema o unos elementos expuestos. Existen especialidades de las ciencias naturales, como la Meteorología, la Hidrología, la Oceanografía, la Sismología, la Geología, la Geotécnica, entre otras ciencias de la tierra, que estudian fenómenos que, en general, se reconocen como de origen natural (National Geographic 1997). Incluso algunos sucesos muy poco frecuentes son también objeto del estudio de especialistas; uno de ellos es la posible colisión de cuerpos celestes contra el planeta, que sin duda también representa una amenaza de origen natural. Por esta razón, se podría decir que existen muchos fenómenos potencialmente peligrosos, sin embargo los más comunes y frecuentes son los que se tienen en cuenta para su descripción y clasificación normalmente. Desde la perspectiva de las ciencias naturales estos eventos se pueden clasificar de diversas formas y existe mucha literatura dedicada a su descripción (Smith 1992; Alexander 1993). Una de las diferentes maneras de clasificar los fenómenos o eventos naturales generadores de amenaza puede ser la siguiente de acuerdo con su origen o causa principal:

- a) Fenómenos geodinámicos: Son sucesos que pueden ser endógenos o exógenos dependiendo si son eventos generados por la geodinámica interna o externa de la tierra. A este tipo de fenómenos corresponden los sucesos de origen tectónico como los sismos, las erupciones volcánicas, los tsunamis o maremotos y las grandes deformaciones del suelo causadas por licuefacción o el movimiento de fallas geológicas. También se clasifican dentro de esta tipología los fenómenos de remoción en masa, donde se pueden mencionar la caída o volcamiento de rocas, los deslizamientos, reptaciones, flujos de escombros o deslaves y avalanchas, y la subsidencia o hundimientos.
- b) Fenómenos hidrológicos: Son eventos relacionados con la dinámica del agua en la superficie y al interior de la corteza terrestre. Pertenecen a este tipo de fenómenos, las inundaciones lentas en planicie y las inundaciones súbitas de alta pendiente o de régimen torrencial; los desbordamientos de ríos y lagos y el anegamiento de zonas bajas por el aumento inusitado de volúmenes de agua o caudal; también se pueden clasificar sucesos tales como la erosión terrestre y costera, la sedimentación, la salinización, el agotamiento de acuíferos, la desertificación y las sequías.
- c) Fenómenos atmosféricos: Pertenecen a este tipo sucesos de origen meteorológico como los tornados y vendavales; las lluvias torrenciales y tormentas; fenómenos climáticos tales como las heladas, las granizadas, cambios fuertes de temperatura e incendios forestales; y eventos de interacción oceánico-atmosférica como los huracanes (ciclones o tifones) y el fenómeno de El Niño. Estos últimos son a su vez generadores de eventos hidrológicos y geodinámicos extremos, exacerbados por la intensidad de sus efectos o por cambios climáticos globales.
- d) Fenómenos biológicos: Básicamente se refiere a epidemias y plagas que pueden afectar al ser humano, a animales productivos o cultivos. Entre los primeros se pueden mencionar enfermedades causadas por virus, como el cólera, el sarampión, la gripe y el SIDA, entre otras. Algunos casos representativos de los segundos son las nubes de langostas, las abejas africanas y la reproducción excesiva de roedores.

Por otra parte, las amenazas antrópicas son en su origen causadas por el ser humano o están relacionadas con la tecnología. Las caracteriza la factibilidad de ocurrencia de sucesos provocados intencionalmente o accidentalmente por el hombre o por el fallo en la operación de un sistema que puede desencadenar en serie efectos considerables. Como ejemplo de acciones que pueden generar este tipo de amenazas se encuentra el terrorismo, las guerras, los accidentes industriales y nucleares, la falla de represas, las explosiones, los incendios, la contaminación química y radiactiva, entre otros. Los lugares de gran concentración de población e infraestructura en la actualidad presentan una alta susceptibilidad a que se presenten este tipo de eventos, los cuales pueden causar consecuencias desastrosas a todo nivel.

### **3.2.2. Amenazas antrópicas**

Al igual que los fenómenos generadores de las amenazas naturales los eventos que caracterizan las amenazas antrópicas se pueden clasificar de diversas formas. Existe también mucha literatura dedicada a la descripción de este tipo de sucesos. Una de las muchas formas de clasificar los fenómenos o sucesos de origen antrópico que pueden significar o generar amenaza puede ser la siguiente según su clase:

- a) *Sucesos tecnológicos:* Pertenecen a este tipo los eventos relacionados con fallos de sistemas por descuido, falta de mantenimiento, errores de operación, fatiga de materiales o mal funcionamiento mecánico. Algunos ejemplos son los accidentes aéreos y de embarcaciones, accidentes ferroviarios, rompimiento de represas, sobrepresión de tuberías, explosiones, incendios industriales, entre otros.
- b) *Sucesos contaminantes:* A este tipo de sucesos pertenecen los relacionados con la acción de agentes tóxicos o peligrosos en términos bióticos para el ser humano y el medio ambiente. Ejemplos de eventos de este tipo son los escapes de sustancias químicas peligrosas tales como líquidas o gases; los derrames de petróleo o de otros hidrocarburos, las emisiones o escapes de radiación nuclear, los desechos líquidos y sólidos de acción biótica, etc.
- c) *Sucesos antropogénicos y conflictos:* También se pueden clasificar sucesos que pueden ser provocados accidental o intencionalmente por el ser humano. Accidentes en zonas de afluencia masiva de personas o situaciones de pánico son ejemplos de sucesos antropogénicos. Eventos tales como guerras, acciones terroristas, vandalismo y en general conflictos civiles y militares violentos son también sucesos que significan una amenaza o peligro para la población expuesta.

### **3.2.3. Combinación de fenómenos**

Entre los dos grupos de sucesos, de origen natural y antrópico que caracterizan las amenazas, hay un amplio espectro de fenómenos tales como las hambrunas, las inundaciones, los incendios forestales, los fenómenos de remoción en masa (deslizamientos), entre otros, los cuales pueden ser causados por la combinación de factores naturales y humanos o por la exacerbación o influencia negativa del hombre sobre la naturaleza. A este tipo de amenazas se les puede clasificar como de origen “socio-natural”. De igual forma, se pueden tener situaciones en las cuales los sucesos generadores de amenaza se pueden presentar en forma encadenada; un sismo o un huracán, por ejemplo, pueden causar escapes de gases tóxicos, contaminaciones, e

incendios, o disparar múltiples deslizamientos en una cuenca deforestada, que a su vez pueden dar origen a represamientos y posteriores flujos de escombros e inundaciones. A este tipo de amenazas se les puede clasificar como de origen “complejo” o concatenado. Un fenómeno ilustrativo de un suceso combinado o asociado es el tsunami o maremoto, el cual se genera casi siempre por un sismo, por la actividad severa de un volcán o la ocurrencia de un deslizamiento de grandes proporciones en el lecho marino.

Dada la relevancia de este tipo de amenazas, causadas por múltiples factores, que por su complejidad son más difíciles de estimar, sin que esto signifique que sean menos comunes, es importante referirse más ampliamente a ellas. En el caso de las amenazas socio-naturales existen verdaderos ejemplos de procesos, más que de posibles sucesos, que caracterizan la amenaza. Es el caso de la inestabilidad de suelos de ladera que se origina por la pérdida de la cobertura vegetal, incendios forestales, sobrepastoreo, explotación minera, etc., lo que puede generar erosión, deslizamientos, flujos o avalanchas y avenidas torrenciales. Situación que no siempre significa que el espacio correspondiente al origen de la amenaza corresponda al área de mayor potencial de afectación. La degradación de las cuencas altas de ríos o quebradas, por ejemplo, por deforestación o extracción de minerales, puede provocar un incremento en los niveles de escorrentía, sedimentos y capacidad de transporte de material que favorecen las inundaciones en las partes bajas de la cuenca. También en áreas urbanas, la ocupación inadecuada del territorio por asentamientos marginales ubicados en los cauces de los ríos, o que cambian las condiciones del entorno natural y desestabilizan el suelo, son la causa de procesos de exacerbación de fenómenos o sucesos peligrosos. Este tipo de amenazas, en general, son el resultado de acumulación de factores como la búsqueda de ganancia (urbanismo no planificado), sobrevivencia (corte de manglares o de leña), la densificación urbana, la ausencia de servicios públicos, etc. lo que significa, por ejemplo, la descarga de basura en los cauces de ríos con todos los problemas que esto conlleva. (Lavell 1996).

Por otra parte, globalmente se vienen presentando cambios importantes como resultado del aumento en los niveles de contaminación. A nivel del cambio global se reconocen situaciones tales como el aumento de la temperatura, el crecimiento del hueco en la capa de ozono, el incremento del efecto invernadero, la lluvia ácida, etc.; fenómenos que acentuarán las amenazas socio-naturales, incrementarán posiblemente la severidad y recurrencia de huracanes, el fenómeno de El Niño, y causarán probablemente cambios en el nivel del mar y las condiciones de severidad del invierno y el verano. Este tipo de amenazas representa un problema particular por las diversas interpretaciones que pueden darse en cuanto a sus orígenes, la responsabilidad por su ocurrencia y las opciones de control que existen. Los sucesos que las caracterizan son interpretados, generalmente, como actos de la naturaleza o actos de Dios, reduciendo así las posibilidades de incentivar una gestión adecuada o preventiva (Lavell 1996).

No obstante lo anterior, desde una perspectiva integral, en un contexto urbano, la distinción entre amenazas naturales y antrópicas puede carecer de importancia. Los terremotos, por ejemplo, pueden desatar incendios y los huracanes pueden romper tanques de almacenamiento de químicos tóxicos, tal como se mencionó previamente. La mayor parte de las víctimas y de los daños se deben a la falta de prevención y mitigación, desde deficiencias en la planificación urbana, la falta de control en la construcción, la carencia de sistemas de alerta temprana, etc. Las consecuencias de las

inundaciones, de los deslizamientos, los incendios y las pérdidas causadas por ciclones tropicales o terremotos, podrían y deberían ser evitadas, al igual que los efectos causados por accidentes industriales. La diferencia entre amenazas naturales y antrópicas y otros peligros ambientales se hace menos clara en la medida que estos últimos se vuelven particularmente severos. Por ejemplo, se puede considerar como una amenaza el gradual aumento de la contaminación atmosférica hasta ciertos niveles, lo que conduce a la necesaria aplicación de medidas especiales de urgencia. La integración y comprensión de las amenazas en el marco de otros peligros ambientales, pone de presente la relación hombre-naturaleza, enfatiza la vulnerabilidad e ilustra en qué medida la intervención humana puede reducir los riesgos. Muchas de las enfermedades y las muertes prematuras en las ciudades de los países en desarrollo son causadas por enfermedades infecciosas o por parásitos, fácilmente previsibles o curables. También hay importantes traslapes entre la acción preventiva para enfrentar los peligros cotidianos y la prevención de desastres. Una ciudad con un buen sistema de drenaje, alcantarillas y recolección de basura también está mejor capacitada para enfrentar inundaciones. En otras palabras, aunque es importante el tipo de amenaza ante la cual una comunidad está sometida, su relevancia puede ser menor si se tiene en cuenta que fundamentalmente el riesgo siempre dependerá del grado de vulnerabilidad que tenga dicha comunidad. La vulnerabilidad, desde un punto de vista amplio, usualmente es la misma ante las diferentes amenazas y está íntimamente ligada al nivel de desarrollo y calidad de vida de la comunidad expuesta.

#### **3.2.4. Evaluación de la amenaza**

Como se definió con anterioridad, la amenaza está relacionada con la posibilidad de que se desencadene un fenómeno o suceso que pueda afectar a un sujeto o sistema en un sitio y durante un tiempo determinado. El concepto de amenaza implícitamente significa la estimación del potencial de ocurrencia del fenómeno que caracteriza la amenaza, lo que diferencia el fenómeno mismo de la amenaza que implica. Aun cuando es común que en la literatura de los desastres se haga mención al fenómeno como si fuera la amenaza misma, en rigor existe una diferencia fundamental que está relacionada con la factibilidad de que ocurra el evento y su grado de severidad. De hecho, el grado de amenaza está vinculado tanto con la intensidad del evento como con el lapso de tiempo en que se espera pueda ocurrir o manifestarse el fenómeno que caracteriza la amenaza. La inminencia de un evento severo es relativa a la ventana de tiempo que se utilice como referencia y por lo tanto de ello depende el nivel de amenaza que ofrece el fenómeno considerado a una comunidad o población expuesta. Infortunadamente, debido a la complejidad de los sistemas físicos, en los cuales un gran número de variables puede condicionar el proceso de ocurrencia de un fenómeno, la ciencia aún no cuenta con técnicas que le permitan modelar con alta precisión dichos sistemas y por lo tanto tampoco los mecanismos generadores de las amenazas que estos fenómenos representan. Por esta razón, la evaluación de las amenazas, en la mayoría de los casos, se realiza combinando el análisis probabilista con el análisis del comportamiento físico de la fuente generadora, utilizando información de eventos que han ocurrido en el pasado y modelando con algún grado de aproximación los sistemas físicos involucrados.

En síntesis, para poder cuantificar la probabilidad de que se presente un evento de una u otra intensidad durante un período de exposición, es necesario contar con información, la más completa posible, acerca del número de eventos que han ocurrido en

el pasado y acerca de la intensidad que tuvieron los mismos. La amenaza sísmica, por ejemplo, para un sector de una ciudad podría expresarse en términos del valor de la probabilidad que durante un lapso, digamos de 100 años, se pueda presentar un terremoto que genere una aceleración pico del suelo igual o superior, supongamos, al 30% de la aceleración de la gravedad (g). Un valor de probabilidad cercano a uno (1.0) significaría que existe casi la certeza o una alta posibilidad de que durante el tiempo de exposición definido, 100 años en este caso, se presente un evento que genere una aceleración en ese sector de la ciudad igual o superior a la aceleración de referencia, 30% g. Por el contrario, si el valor se llegara a acercarse a cero (0.0), su interpretación sería que es muy poco probable que se presente un terremoto que genere en ese sector de la ciudad una aceleración de esa intensidad durante el período de exposición antes mencionado. El valor de la amenaza obtenido de esta manera permite tomar decisiones en términos, por ejemplo, de los requisitos sismorresistentes que deben cumplir las edificaciones en los diferentes sectores de la ciudad, las cuales deben construirse de acuerdo con las aceleraciones potenciales que probablemente tendrán que soportar durante su vida útil.

Ahora bien, es importante diferenciar la amenaza del suceso que la caracteriza, puesto que la amenaza significa la potencialidad de la ocurrencia de un suceso con cierto grado de severidad, mientras que el suceso en sí mismo representa al fenómeno en términos de sus características, su dimensión y ubicación geográfica. Igualmente, es importante diferenciar entre un “evento posible” y un “evento probable”, puesto que el primero se refiere a un fenómeno que puede suceder o que es factible, mientras que el segundo se refiere a un fenómeno esperado debido a que existen razones o argumentos técnico-científicos para creer que ocurrirá o se verificará en un tiempo determinado. Estos conceptos están íntimamente relacionados con calificativos como “máximo posible” y “máximo probable” cuya diferenciación es básicamente la misma. Estas distinciones son importantes para comprender planteamientos que han sido muy comunes en literatura técnica, en particular cuando se hace referencia al “evento de diseño” en ingeniería, sin embargo por su falta de relevancia multidisciplinar, paulatinamente, están entrando en desuso. Por otra parte, es común en la literatura técnica utilizar el concepto de “período de retorno” o intervalo de recurrencia de un suceso, que corresponde al tiempo “promedio” entre eventos con características similares en una región. Este es un concepto estadístico importante a tener en cuenta, dado que en ocasiones se tiene la idea equivocada que este intervalo es fijo.

En resumen, evaluar la amenaza es “pronosticar” la ocurrencia de un fenómeno con base en: el estudio de su mecanismo generador, el monitoreo del sistema perturbador o el registro de eventos en el tiempo. Un pronóstico puede ser a corto plazo, generalmente basado en la búsqueda e interpretación de señales o eventos premonitorios; a mediano plazo, basado en la información probabilista de parámetros indicadores de ocurrencia, y a largo plazo, basado en la determinación del suceso máximo probable en un período de tiempo que pueda relacionarse con la planificación del área potencialmente afectable. Este tipo de evaluación la realizan usualmente instituciones técnicas y científicas relacionadas con campos afines a la geofísica, la meteorología, la hidrología y los procesos tecnológicos. De acuerdo con estos estudios, que varían desde estimaciones generales hasta análisis detallados, usualmente se plasma en mapas la cuantificación de la amenaza. De esta manera, se realizan “zonificaciones” en las cuales, mediante un proceso de determinación del peligro potencial en varios sitios se delimitan áreas homogéneas o zonas de amenaza constante. Este tipo de cartografía se le conoce como mapas de

amenaza, los cuales son un insumo de fundamental importancia para la planificación física u ordenamiento territorial. Por otra parte, cuando los pronósticos se pueden realizar en el corto plazo, es común darle a este proceso el nombre de "predicción". Esta técnica, mediante la cual se pretende determinar con certidumbre cuándo, dónde y de qué magnitud será un suceso, es fundamental para el desarrollo de sistemas de alerta temprana, cuyo objetivo es informar en forma anticipada a la población amenazada acerca de la ocurrencia o inminente manifestación de un fenómeno peligroso. Su aplicación permite, en general, caracterizar un evento como previsible o imprevisible a nivel del estado del conocimiento.

### **3.3. Análisis de riesgo**

El análisis de riesgo y los conceptos de seguridad y confiabilidad, sin duda, han sido aportes notables de la ingeniería para el estudio de la probabilidad de fallo de un sistema. Las técnicas de convolución probabilista, los árboles de fallo y la modelización estocástica han sido utilizados para estudiar problemas complejos donde existe la interacción de múltiples componentes. Este tipo de enfoques sumados a los conceptos de fuentes, parámetros y modelos de incertidumbre, han contribuido al entendimiento del riesgo desde una perspectiva cuantitativa. A este enfoque algunos le han llamado análisis de riesgo objetivo. Muchos estudios de amenaza se han podido realizar utilizando el análisis probabilista, lo que ha permitido respaldar estimaciones que de otra forma podrían calificarse como simples especulaciones o apreciaciones.

Antes de revisar aspectos como la evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo mismo, es necesario hacer claridad acerca del uso de la palabra "riesgo", la cual en muchos casos se ha utilizado como sinónimo de "probabilidad". Para ingenieros y expertos en estadística la palabra riesgo no es más que otra forma de referirse a la probabilidad de ocurrencia de un suceso. Por ejemplo, cuando se utiliza como "el riesgo (*i.e.* la probabilidad de ocurrencia) de tormenta es del 20%". Pero para la mayoría de la gente el suceso tiene otro significado que causa preocupación: la posibilidad de daño o efectos adversos (Stewart y Melchers 1997). Es decir, tiene más bien la connotación de "estar en riesgo" o sea de: consecuencias, que es la manera como se interpreta desde el punto de vista de la industria del seguro. Es importante indicar que desde la perspectiva de los desastres es aún más amplio su significado, pues se le asocia además con las "implicaciones" de los daños, lo que hace que la lectura sea definitivamente más amplia que la que se tiene desde el punto de vista de la ingeniería. Podría decirse que existen niveles de análisis de riesgo: Primero, cuando se le asocia con la probabilidad de que sean alcanzados ciertos estados críticos (o límites); segundo, cuando en adición se estiman las consecuencias de que varios de los estados críticos sean alcanzados, con sus probabilidades asociadas; y tercero, cuando se analizan, también, los efectos o implicaciones dentro de un contexto aún más amplio, como la sociedad o un segmento de la misma. En conclusión el análisis de riesgo puede entenderse de manera general como el postulado de que el riesgo es el resultado de relacionar la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos y consecuencias sociales, económicas y ambientales asociadas a uno o varios fenómenos peligrosos. Cambios en uno o más de estos parámetros modifican el riesgo en sí mismo, es decir, el total de pérdidas esperadas y consecuencias en un área determinada.

### **3.3.1. Evaluación de la vulnerabilidad**

La evaluación de la vulnerabilidad, en rigor, es un estudio de la capacidad de un elemento o sistema de resistir o absorber el impacto de un suceso que caracteriza una amenaza. Por lo tanto, se puede diferenciar del análisis de riesgo, desde el punto de vista de los desastres, en que este último se refiere a la estimación de pérdidas o consecuencias factibles de acuerdo con el grado de amenaza considerado y con el nivel de vulnerabilidad existente en los elementos expuestos. La evaluación de vulnerabilidad desde el punto de vista físico se ha desarrollado notablemente. Su estudio se ha beneficiado directamente de los aportes conceptuales y del avance tecnológico de la ingeniería en diversos campos. El estudio analítico y experimental y la investigación de nuevos modelos y metodologías para la estimación de la posibilidad de fallo, por una parte, y la confiabilidad y seguridad de sistemas, por otra, ha contribuido significativamente al estudio de la vulnerabilidad, al menos, desde el punto de vista físico. Un ejemplo de este avance ha sido el desarrollo de técnicas, hoy ampliamente conocidas, para la estimación del daño que puede presentarse en un edificio, o en un conjunto de edificios, o en una infraestructura, si ocurre un terremoto de una cierta severidad. Esta valoración se realiza con base en la capacidad sismorresistente de los sistemas en consideración, con diferentes niveles de aproximación y detalle. Estos enfoques permiten estimar una vulnerabilidad diferencial según sea la severidad el evento o las características físicas de resistencia del sistema o del elemento sobre el cual incide.

Ahora bien, en otros casos, la vulnerabilidad no es diferencial o el suceso peligroso tiene una severidad tal que no es posible una gradación del daño. Es el caso de avalanchas, o grandes deslizamientos, en los cuales la sola exposición del elemento o sujeto susceptible ante el fenómeno significa en la práctica una vulnerabilidad física total. Un análisis de exposición que indique si el elemento puede estar o no dentro del área de influencia del fenómeno podría ser suficiente para determinar el riesgo, partiendo de la hipótesis de que el elemento será gravemente dañado si es alcanzado por la acción del fenómeno.

En consecuencia, la evaluación de la vulnerabilidad es un proceso mediante el cual se determina el grado de susceptibilidad y predisposición al daño de un elemento o grupo de elementos expuestos ante una amenaza particular, contribuyendo al conocimiento del riesgo a través de interacciones de dichos elementos con el ambiente peligroso. Los elementos expuestos, o en riesgo, son el contexto social y material representado por las personas y por los recursos y servicios que pueden ser afectados por la manifestación de un suceso, es decir, las actividades humanas, los sistemas realizados por el hombre, tales como edificios, líneas vitales o infraestructura, centros de producción, utilidades, servicios y la gente que los utiliza.

En resumen, la evaluación de la capacidad sismorresistente de edificios o de obras civiles existentes es un caso ilustrativo de análisis de vulnerabilidad física (Aktan y Ho 1990). Lo es también la determinación del nivel de exposición de viviendas y de infraestructura y su capacidad para soportar una inundación. Por otra parte, la evaluación de las habilidades y de la capacidad de una comunidad para actuar correctamente ante la ocurrencia de una erupción volcánica, por ejemplo, corresponde por analogía a un análisis de vulnerabilidad desde el punto de vista educativo (Cardona 1996b/97). Igualmente, el análisis de la capacidad de reacción de personal de socorro y de la

capacidad hospitalaria ante una demanda masiva de servicios médicos correspondería a un análisis de vulnerabilidad institucional y funcional para atender un desastre (OPS 1993). Así, la vulnerabilidad, en términos generales, se ha clasificado desde el punto de vista de su evaluación como de carácter técnico y de carácter social. La primera es factible de cuantificar en términos físicos y funcionales como, por ejemplo, en daños físicos potenciales o en posibles perjuicios por la interrupción de la operación de un servicio. La segunda, usualmente se puede valorar en términos de la falta de resiliencia, o capacidad de absorber el impacto. Su estimación puede ser cualitativa o relativa, debido a que está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales, etc., que a menudo se pueden evaluar mediante índices o indicadores.

Es importante mencionar que las evaluaciones de carácter técnico suelen ser vistas como ingenuas desde la perspectiva social, debido al enfoque científico reduccionista que le ha dado la ingeniería a este tipo de estimaciones. Sin embargo, dichas metodologías en muchos casos han demostrado su utilidad práctica, al menos en casos particulares. Por otra parte, los ingenieros suelen hacer críticas a los enfoques y análisis de los investigadores sociales, debido a que sus planteamientos son básicamente cuestionamientos críticos, en muchos casos tan amplios, que no se concretan en soluciones o medidas prácticas que orienten la gestión preventiva.

### **3.3.2. Estimación del riesgo**

El riesgo, como ya se mencionó, se obtiene a partir de relacionar la amenaza, o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de una intensidad específica, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Desde el punto de vista físico, el “riesgo específico” es la pérdida esperada en un período de tiempo y puede ser expresada como una proporción del valor o coste de reemplazo de los elementos en riesgo. Usualmente, el riesgo específico se representa en términos de pérdida de vidas, afectados y pérdidas económicas. Ahora bien, debido a la dificultad que significa estimar el “riesgo total”, o sea la cuantificación acumulativa del riesgo específico de cada uno de los elementos expuestos y para cada una de las amenazas, es común que se acepte la evaluación de un riesgo específico como el representativo para una región. Por ejemplo: el riesgo por inundación para una cosecha, el riesgo sísmico de un grupo de edificios, el riesgo de las líneas vitales por deslizamientos, etc.

Tal como se indicó, ha sido común que el riesgo sea valorado solamente en términos físicos, dado que la vulnerabilidad social es difícil de evaluar en términos cuantitativos. Esto no significa que no sea factible analizar la vulnerabilidad en forma relativa o mediante indicadores, lo que permite proponer “riesgos relativos”, que igualmente permiten la toma de decisiones y la definición de prioridades de prevención y mitigación. En síntesis, para realizar un análisis de riesgo se deben seguir tres pasos: estimar la amenaza o peligro, evaluar la vulnerabilidad y llevar a cabo la estimación del riesgo como resultado de relacionar los dos parámetros anteriores (Taylor *et al.* 1998). Cambios en uno o los dos parámetros modifican el riesgo en sí mismo.

Ahora bien, una vez valorado el riesgo y teniendo en cuenta que no es posible reducirlo en su totalidad, para efectos de planificación, protección y diseño de obras de infraestructura ha sido común que se defina un nivel de “riesgo aceptable”. El riesgo aceptable, en general, son las posibles consecuencias sociales, económicas y ambientales que, implícita o explícitamente, una sociedad o un segmento de la misma

asume o tolera, por considerar que son poco factibles y, usualmente, a cambio de un beneficio inmediato. Desde el punto de vista técnico, corresponde a un valor de probabilidad de unas consecuencias dentro de un período de tiempo, que se considera admisible para determinar las mínimas exigencias o requisitos seguridad, con fines de protección y planificación ante posibles fenómenos peligrosos.

Algunos autores distinguen entre riesgo “aceptable” y “tolerable”, indicando que un riesgo que es tolerable podría no ser aceptable. Un riesgo puede ser tolerable cuando el beneficio de convivir con él parece que excede el perjuicio que representa o porque existe la confianza de que puede ser controlado apropiadamente. Tolerar un riesgo no significa que este sea despreciable o que se pueda ignorar, sino más bien que es algo que se debe estar revisando y se debe reducir en la medida de las posibilidades. Para evitar confusiones en la terminología, en general, se asume que la definición de riesgo aceptable incluye la definición de riesgo tolerable, es decir que un riesgo aceptable también es tolerable. Es importante subrayar que una “evaluación” o estimación del riesgo tiene implícito que el análisis del mismo se realiza teniendo como referente un criterio de aceptabilidad, es decir tiene implícito que el análisis se realiza cotejando sus resultados con respecto a un valor definido. En definitiva, una análisis de riesgo se realiza solamente si se percibe que existe la necesidad de hacerlo.

Al igual que la amenaza, el riesgo también puede plasmarse en mapas. Estos mapas pueden ser, dependiendo de la naturaleza de la amenaza, probabilistas o deterministas. En este último caso, los mapas de riesgo representan un “escenario”, o sea la distribución espacial de los efectos potenciales que puede causar un suceso de una intensidad definida sobre un área geográfica, de acuerdo con el grado de vulnerabilidad de los elementos que componen el medio expuesto. Estos mapas, no sólo son de fundamental importancia para la planificación de la intervención de la amenaza o la vulnerabilidad, sino también para la elaboración de los planes de contingencia que los organismos operativos de respuesta deben realizar durante la etapa de preparativos para emergencias. Es importante observar que un plan operativo elaborado con base en un mapa de riesgo puede ser mucho más eficiente que si se realiza sin conocer dicho escenario, dado que un mapa de riesgo permite definir procedimientos de respuesta más precisos para atender a la población en caso de desastre.

### **3.4. Probabilidad e incertidumbre**

Evaluar pérdidas futuras es algo incierto, razón por la cual ha sido usual que se recurra a alguna técnica probabilista para la realización de un estudio de esta naturaleza. Los riesgos usualmente se expresan en pérdidas medias de dinero o de vidas por año, sin embargo debido a que sucesos de gran intensidad son hechos muy raros, las pérdidas medias para este tipo de sucesos, tan poco frecuentes, pueden no dar una imagen representativa de las grandes pérdidas que podrían estar asociadas a los mismos. Algunos argumentan que este tipo de situación pone en entredicho el análisis de riesgo, porque en esos casos el riesgo es el producto de un número muy grande –las consecuencias– por un número muy pequeño –la probabilidad–. Sin embargo, no hay que dejar de tener presente que lo que realmente importa es cómo utilizar la información obtenida para la toma de decisiones. De ahí la importancia de pensar en el impacto potencial de las consecuencias. Esta dificultad algunos la resuelven determinando para un límite de pérdida la probabilidad de que éste sea igualado o sobrepasado. Un ejemplo puede ser la

probabilidad de que el coste de los daños y reparaciones en un sitio sobrepase una cifra, digamos de un millón de dólares, como consecuencia de por lo menos un suceso en los próximos cincuenta años. Este límite podría también expresarse en términos de víctimas humanas o de fallos en los edificios o de impacto social en general.

De lo anterior se desprende que el concepto de riesgo “objetivo” propuesto por muchos autores relacionados con enfoques basados en técnicas de probabilidad y confiabilidad, para diferenciarlo del riesgo “percibido” o subjetivo, debe dársele su debido valor sin dejar de reconocer sus limitaciones. Para algunos la distinción entre riesgo objetivo y subjetivo no es afortunada. Incluso, consideran que algunas de estas técnicas que se consideran como objetivas pueden no ser realistas y significativas, aunque por su elegancia pueden dar la impresión de autoridad y precisión. La estimación probabilista, en cualquier caso, es incompleta y la naturaleza del riesgo es muy compleja, lo que hace que dependa de factores que no son fáciles de cuantificar. El argumento de que los resultados del análisis de riesgo objetivo son “racionales” es simplista e irreal. La mayoría de los parámetros que se consideran objetivos son en realidad subjetivos en algún grado. El presumir de objetividad denigrando de alguna manera de la subjetividad es innecesario, más cuando la subjetividad *per se* no debe ser motivo de objeción. Además, desconocer la subjetividad en el análisis de riesgo desde el punto de vista técnico es potencialmente peligroso. La crítica principal a este tipo de visión del riesgo es que debido a que el esfuerzo se concentra en valorar aspectos cuantificables, en muchas ocasiones se pierde la atención sobre consideraciones igualmente importantes como la posible intervención de los procesos generadores del riesgo –y sus cambios sociales asociados– o la distribución de costos, perjuicios y beneficios de manera equitativa, entre otras (Reid 1992).

### **3.4.1. Relación coste y beneficio**

Una metodología ampliamente utilizada en los países desarrollados para la determinación indirecta del nivel de riesgo y reiterativamente planteada en muchos artículos técnicos, es el análisis de coste y beneficio, en el cual se relaciona la inversión en seguridad con el potencial daño de las infraestructuras y el peligro para la vida. En áreas altamente propensas, en donde ocurren con frecuencia sucesos de dimensiones moderadas, cualquier aumento en los costes de prevención-mitigación se verá compensado por la reducción en los costes de los daños que se presentan. Sin embargo, en áreas menos propensas o que no involucran grandes inversiones económicas amenazadas, los requisitos de reducción de riesgos se pueden justificar sólo en términos de seguridad para la vida, pues los ahorros esperados en daños por sucesos que ocurren con muy poca frecuencia no son lo suficientemente cuantiosos para justificar un aumento en los costes de la prevención-mitigación. Esta circunstancia ocurre particularmente en los países pobres, donde el análisis de coste y beneficio en términos económicos no es una buena metodología para argumentar las bondades de la prevención-mitigación. En estos casos el costo social debe ser el que orienta la toma de decisiones.

Aunque parezca ilógico, pero tal vez entendible, la sociedad parece que le causa más preocupación un evento “desastroso” que afecte muchas personas que una serie de sucesos menores que acumulativamente causen daños a un número similar de personas. A esto se le conoce como la “aversión al riesgo” (Stewart y Melchers 1997). En otras palabras, riesgos que resultan de la frecuente ocurrencia de un número menor de

fatalidades tienden a generar menos aversión que hechos poco frecuentes pero con grandes impactos; aunque la suma de las fatalidades de ambas causas sea comparable. De lo anterior se ha podido concluir que la percepción del riesgo no es lineal o simplemente existen otros valores que son muy importantes para la sociedad, tales como los costes ecológicos y los costes económicos directos e indirectos relacionados con el suceso. Para el público en general no es desconocido que el número de muertes causadas por accidentes de tránsito supera ampliamente al causado por terremotos, erupciones volcánicas u otros fenómenos similares. En países desarrollados, donde existe una alta resiliencia, o capacidad de recuperación y de respuesta de las comunidades, los sucesos menores o moderados frecuentes no causan el mismo efecto que en los países en desarrollo, donde la resiliencia es muy baja. La continua manifestación de sucesos menores o moderados en estos países debilita paulatinamente las comunidades y agrava sus condiciones de desarrollo y seguridad; esto implica un necesario cambio en el enfoque del problema dependiendo del contexto.

Se sabe que la aplicación de medidas preventivas no garantiza una seguridad del 100% de que no se produzcan consecuencias, razón por la cual el riesgo no puede eliminarse totalmente. Su valor, por pequeño que éste sea, nunca será nulo, por lo que siempre existe un límite hasta el cual se considera que el riesgo es controlable y a partir del cual no se justifica económica o socialmente aplicar medidas preventivas. A todo valor que supere dicho límite se le cataloga como riesgo incontrolable. Por ejemplo, las obras de ingeniería que se realizan para impedir o controlar ciertos fenómenos, siempre han sido diseñadas para soportar como máximo un suceso cuya probabilidad de ocurrencia se considera lo suficientemente baja, para que la obra pueda ser efectiva en la gran mayoría de los casos, es decir, para los sucesos más frecuentes. Lo que significa que se admite que pueden ocurrir sucesos poco probables que podrían no ser controlados y para los que resultaría injustificado realizar inversiones mayores.

A partir de estos enfoques, las decisiones se adoptan mediante procesos administrativos y judiciales. Al proponer y sancionar leyes, los cuerpos legislativos han demostrado cada vez mayor interés en los estudios técnicos, como es el caso de los códigos de construcción que tienen implícito o explícito un nivel de seguridad. Sin embargo, en general estos cuerpos legislativos ponen de manifiesto que no desean verse obligados a tomar decisiones a partir de los resultados de dichos estudios; esto es comprensible, puesto que cualquier administrador o legislador duda en respaldar explícitamente como aceptable cualquier riesgo que no sea cero. En última instancia, los legisladores y los administradores se guían por sus propias perspectivas y, en el mejor de los casos, por los deseos de la sociedad.

### **3.4.2. Resolución de los estudios**

De los apartes anteriores se puede concluir que la evaluación de la amenaza, en particular, puede ser un insumo fundamental para el ordenamiento territorial o la planeación física, especialmente cuando se trata de determinar la aptitud ambiental de posibles zonas de expansión urbana o de localización de nueva infraestructura. Sin embargo, dicha evaluación es sólo una etapa para la determinación del riesgo; estimación que se requiere necesariamente para la definición y aplicación de medidas de prevención-mitigación, debidamente justificadas en términos sociales y económicos dentro de la planeación física y sectorial.

Debido a que no existen criterios unificados para este tipo de evaluaciones, no es raro encontrar metodologías diversas, muchas de ellas altamente cualitativas o de alcance parcial. Por esta razón, por ejemplo, es más común encontrar estudios acerca de amenazas que estudios acerca de riesgos, o estudios de amenaza que no son consistentes con el nivel de resolución posible de aplicar en los análisis de vulnerabilidad. Situación que se presenta por la definición unilateral del alcance de los estudios por parte de profesionales de una sola disciplina como la geología, la sismología, la hidrología, etc.; sin tener en cuenta la participación de otros profesionales tales como ingenieros, sociólogos, economistas, planificadores, etc., que deben contribuir en la definición de los objetivos para los cuales se llevan a cabo los estudios. Muchos estudios de amenaza no contribuyen en forma significativa al análisis de riesgo, debido a que no permiten cuantificar realmente la factibilidad de ocurrencia del fenómeno. Un ejemplo de lo anterior son algunos mapas de amenaza volcánica o por deslizamientos, que más bien son mapas de zonificación de depósitos o de susceptibilidad relativa, debido a que no cuantifican la probabilidad de que un suceso específico se manifieste durante un período de determinado o debido a que la valoración de las variables del fenómeno es muy subjetiva. En general, el alcance de los estudios y el tipo de metodología para la evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo dependen de:

- a) La escala del espacio geográfico involucrado;
- b) El tipo de decisiones de mitigación que se esperan tomar;
- c) La información disponible, factible y justificable de conseguir;
- d) La importancia económica y social de los elementos expuestos; y
- e) La consistencia entre los niveles de resolución posibles de obtener en cada etapa de la evaluación.

Es importante mencionar que herramientas como los sistemas de información geográfica SIG pueden facilitar la elaboración de mapas. Sin embargo, estas herramientas no son la panacea, puesto que previamente es necesario haber concebido adecuadamente la metodología para la evaluación. Por otra parte, no siempre es necesario utilizar mapas; métodos como los empleados para la evaluación de impactos ambientales, tales como listas de comprobación, matrices, redes, análisis de coste/efectividad/beneficio y modelizaciones multidimensionales podrían adaptarse para la estimación de la amenaza, vulnerabilidad y el riesgo.

De lo aquí tratado se puede concluir que la naturaleza de los riesgos es muy compleja y su percepción (y aceptabilidad) depende de muchos factores. El análisis de riesgo no es una disciplina y es un campo de interés de múltiples especialistas relacionados con la física, la ingeniería, la estadística, la economía, los aspectos sociales y la planificación, entre otros. No obstante, una teoría unificada del análisis del riesgo no ha sido desarrollada; por el contrario, se caracteriza por la falta de acuerdo en principios fundamentales y muchas de sus orientaciones se basan en supuestos no verificados. Para muchos autores es una ciencia inmadura. La literatura sobre el tema es extensa y se amplía rápidamente, reflejando un trabajo diverso y fragmentado, principalmente dirigido al estudio de aplicaciones particulares y detalles cuyas conclusiones reflejan sesgos particularmente tecnológicos (Reid 1992). En síntesis, a pesar del avance aquí descrito de las técnicas de evaluación, existen serios interrogantes acerca de la efectividad de las metodologías para la cuantificación del riesgo tal como se ha venido haciendo hasta ahora. Salvo algunas excepciones y esfuerzos dispersos o puntuales, no se han dado pasos decididos para lograr una formulación y modelización integral o completa del

riesgo que además facilite la toma de decisiones y contribuya a la gestión efectiva del riesgo por parte de las autoridades y las comunidades, que son los actores fundamentales para lograr una actitud preventiva ante los fenómenos peligrosos.

### 3.5. Limitaciones y perspectivas

Los desastres son un problema en aumento; el impacto de los fenómenos naturales o socio-naturales es cada vez mayor debido a los estilos o modelos de desarrollo imperantes en muchos países. El crecimiento demográfico y los procesos de urbanización, las tendencias en la ocupación del territorio, el proceso de empobrecimiento de importantes segmentos de la población, la utilización de sistemas organizacionales inadecuados y la presión sobre los recursos naturales, han hecho aumentar en forma continua la vulnerabilidad de los asentamientos frente a una amplia diversidad de peligros naturales. En general, los esfuerzos de los países al respecto se han dirigido principalmente a fortalecer el estudio de las amenazas naturales y a proponer soluciones técnicas, sin que hasta el momento se hayan logrado avances significativos en el sentido de que estas soluciones sean social, cultural o económicamente aplicables o apropiadas. Aunque se han logrado avances importantes desde el punto de vista técnico, muchas de las soluciones propuestas bajo este enfoque a menudo no han podido ser aplicadas en la realidad, debido a la restricción en los recursos disponibles y a la ignorancia de las racionalidades locales que permiten un manejo tecnológico alternativo de los mismos. En ocasiones, las soluciones son rechazadas por las poblaciones debido a que no corresponden a su propia lectura del riesgo o a su imaginario acerca de los desastres.

Los llamados desastres naturales deberían ser entendidos como problemas aún no resueltos del desarrollo, en el sentido de que no son sucesos de la naturaleza *per se* sino más bien situaciones que resultan de la relación entre lo natural y la organización y estructura de la sociedad. Las políticas de desarrollo urbano y regional, además de las políticas económicas y sociales sectoriales en general no tienen en cuenta la problemática del riesgo y en ocasiones están agudizando la vulnerabilidad. En pocos casos los conceptos de prevención y mitigación han sido debidamente considerados en la planificación del desarrollo de los países pobres.

Numerosos países han establecido organismos o sistemas gubernamentales para la reducción de riesgos y preparativos para desastres que no han logrado resultados efectivos, debido a la falta de voluntad política y a que su enfoque se ha dirigido fundamentalmente hacia la respuesta y socorro en caso de emergencia y no hacia ejecución en forma sistemática y orgánica de acciones de prevención y mitigación. Estos organismos, en su mayoría, obedecen a modelos centralizados que no incorporan en forma adecuada los niveles locales del poder, como son los gobiernos municipales, ni las organizaciones comunitarias u otras manifestaciones de la sociedad civil.

Dentro del contexto del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres DIRDN, durante los años 90, se promovió de manera explícita, que la prevención de desastres debe ser una estrategia fundamental para el desarrollo sostenible (Kreimer y Munasinghe 1991/92; Fundación Alemana para el Desarrollo Internacional 94). Sin embargo, a pesar de los esfuerzos, subsisten notables vacíos en la gestión preventiva y en la debida articulación entre las actividades de prevención y mitigación de riesgos con las de la gestión y protección del medio ambiente; aunque sea evidente que para

compatibilizar el ecosistema natural y la sociedad que lo ocupa y explota, es necesario dosificar y orientar la acción del hombre sobre el medio ambiente y viceversa.

La iniciativa del DIRDN tuvo la virtud, no obstante, de despertar la atención y el interés de un amplio número de países, organismos internacionales y agencias donantes en la temática de los desastres. Como producto de esta iniciativa, diversos gobiernos, organizaciones e instituciones en el mundo impulsaron proyectos y programas que han empezado a dar algunos resultados positivos en campos como el de la salud y la educación y en la reducción de la vulnerabilidad de la infraestructura productiva; así como en la formación de instituciones de carácter nacional y subregional y en la producción y difusión de información técnico-científica. Queda la preocupación de lo que está por venir, pues estos avances son tímidos y exiguos frente al empeoramiento de las condiciones y factores que favorecen la ocurrencia cada vez más frecuente y más severa de posibles desastres.

## Capítulo 4

# Aceptabilidad del riesgo

### 4.1. Percepción psicológica y social

A pesar de los esfuerzos de los especialistas de diferentes disciplinas para estimar o valorar el riesgo, cualquiera que sea el enfoque de concepción del riesgo que se tenga, es necesario tener un referente para efectos de estimar cuándo unas consecuencias ambientales, económicas o sociales pueden considerarse graves, importantes o insignificantes y si son o no aceptables por quien tiene la posibilidad de sufrirlas o afrontarlas (Douglas 1986). Al respecto, la percepción del riesgo ha sido uno de los aspectos de mayor relevancia, razón por la cual éste ha sido un campo de estudio de especial interés desde los años 50 y en particularmente de la psicología aplicada en los últimos 30 años.

Uno de los temas centrales de la percepción del riesgo ha sido el concepto de “probabilidad psicológica” o subjetiva, que se diferencia de otros dos tipos de probabilidad, a las que se les ha denominado como clásica y de frecuencia relativa, y que los matemáticos denominan como “probabilidad objetiva”. La probabilidad subjetiva o personal ha sido, no obstante, íntimamente identificada con la escuela de estadística Bayesiana, que enfatiza la probabilidad como el *grado de confianza o grado de creencia* que tiene una persona en la ocurrencia de un suceso. Esta visión se refiere más a una actitud o comportamiento que a un concepto empírico y es más el resultado de un estado del conocimiento individual *acerca* del mundo que de una propiedad objetiva *de* el mundo. Por lo tanto, la probabilidad subjetiva de cualquier suceso puede variar legítimamente a través de los individuos como una función de su propio conocimiento de dicho suceso (Pidgeon 1992).

El intento de medir la probabilidad subjetiva ha llevado a interesantes controversias. La posibilidad de que las personas intenten maximizar o actualizar sus probabilidades personales en línea con el teorema de Bayes, con fines de toma de decisiones, ha conducido a diversidad de experimentos. Sus resultados indican que las personas han sido coherentes, desde este enfoque, cuando enfrentan situaciones simples de probabilidad y de toma de decisiones. Sin embargo, en los años 70 se encontraron muchos casos que indican que la visión de los individuos más que ser una imperfecta maximización o intuitividad Bayesiana, podría en efecto no ser Bayesiana en forma

alguna. Otras propuestas indican que las personas para enfrentar decisiones en ambientes complejos construyen una representación cognitiva simplificada del mundo que les facilita a través de reglas de escogencia simples, o heurística, decisiones funcionales en el contexto de dicha representación. Reglas como el “principio de satisfacción” o el “principio de la dominancia”, en los cuales una decisión puede resultar de la *primera* opción que satisfaga una serie básica de criterios, pueden ser más factibles que llevar a cabo una maximización a través de la totalidad de opciones disponibles. Desafortunadamente, aunque el uso de tales estrategias simplificadas a menudo pueden conducir a respuestas óptimas y eficientes, en ciertas circunstancias, como en el caso del riesgo, pueden dar como resultado severos y sistemáticos errores o sesgos (Tversky y Kahneman 1974).

En el caso de la percepción del riesgo ante ciertos fenómenos naturales o de origen antrópico, usualmente las personas tienen una noción bastante incompleta o fragmentada del mismo, razón por la cual desde la perspectiva técnica algunos investigadores consideran inadecuado definir el referente o nivel de riesgo aceptable de una sociedad sólo con base en la valoración o percepción de los individuos o de la comunidad en general. Eventos poco probables pero sensacionales tienden a ser percibidos como más peligrosos que eventos más frecuentes y poco reconocidos. Sin embargo, en general, como resultado de la aversión “natural” al riesgo, las personas tienden más a subestimar el riesgo que a sobredimensionarlo, con excepción de casos en los que el perfil psicológico favorece una actitud fatalista. Afirmaciones o creencias de que el riesgo es “para los demás” son muy comunes, sin discernir que al hacer tal afirmación o tener tal creencia también se es parte de “los demás de los demás...”. Estudios socio-psicológicos indican que el contagio de SIDA no sólo ocurre por ignorancia total acerca de esta pandemia sino por la creencia incauta de que el riesgo no existe o es muy bajo. No obstante, algunos especialistas de las ciencias sociales consideran un atropello o, al menos, inadecuado que las autoridades gubernamentales definan el nivel de riesgo aceptable, formalmente o no, de una comunidad sin consultarla debidamente. Lo cierto es que las normativas de seguridad, los códigos de construcción, las regulaciones del suelo, entre otros, con base en recomendaciones de expertos de las ciencias naturales y aplicadas, involucran o determinan “un riesgo aceptable” al definir unos parámetros mínimos de exigencia para los cuales se debe, por ejemplo, llevar a cabo el diseño de los edificios. Así, durante la vida útil de los mismos éstos deben cumplir con seguridad y de manera confiable con la función para la cual se les ha construido. Se incluyen en este caso: eventualidades o fuerzas extraordinarias, como las causadas por terremotos, lo que implica estimar ante qué severidad sísmica y con qué características estructurales debe diseñarse. Lo común, es que la población en estos casos desconoce los niveles de severidad sísmica exigidos en los códigos de construcción, los cuales están asociados con un nivel de riesgo aceptable. Igualmente, la comunidad desconoce que estos parámetros están definidos por normas de seguridad que están, en algunas ocasiones, respaldadas formalmente por leyes definidas por cuerpos legislativos. Esto significa, en sistemas democráticos, que han sido aprobadas por personas elegidas por la población para asumir en nombre de la comunidad decisiones de toda la colectividad. De esta manera, el nivel de riesgo aceptable se supone que es una decisión de la sociedad y básicamente se establece para prescribir un nivel mínimo de protección de la comunidad y para establecer un umbral a partir del

cual se libera de la responsabilidad de los profesionales que realizan el diseño para los ciudadanos comunes y corrientes.

Se han realizado estudios acerca del proceso de toma de decisiones y se sabe que la decisión de implantar medidas de reducción de riesgos puede ocurrir a nivel personal, organizacional o gubernamental; decisión, que es diferente en cada caso debido a que el contexto es distinto. La evidencia científica, además preocupante, indica que las personas típicamente no son conscientes de los riesgos a los que están sometidas; subestiman los que reconocen y sobreestiman la capacidad que tienen para enfrentarlos. A menudo, la gente culpa a otros por sus pérdidas, no utiliza las estrategias preventivas disponibles y confía demasiado en la ayuda humanitaria cuando las necesidades la exigen (Mileti 1999). Ahora bien, la no adopción de medidas preventivas puede ser totalmente racional, en particular cuando existen limitaciones económicas, pero es muy común que la gente y las organizaciones con recursos suficientes escoja, igualmente, no protegerse a sí misma contra sucesos de alta probabilidad de ocurrencia. Se sabe que las decisiones de adoptar o no una actitud preventiva están relacionadas con muchos otros procesos de decisión. En el caso de las personas, es muy frecuente que las situaciones de riesgo se estimen de manera imperfecta, parece que existe una falta de visión y coherencia en relación con las preferencias presentes y futuras. Es común que se planifique sólo para el futuro inmediato y que se pronostique o se prevea el futuro, principalmente, con base en el pasado reciente. Varios modelos desde diferentes disciplinas han tratado de explicar la toma de decisiones a nivel individual y colectivo. Se han formulado propuestas que se fundamentan en la subvaloración de los beneficios sociales, o que se basan en la teoría clásica de la utilidad; también, hay estudios desde el punto de vista heurístico o basados en las expectativas sociales y el hábito. A nivel gubernamental, se ha encontrado que el temor de responsabilidades posteriores, en lo local, ha influenciado la decisión, pero se conoce poco acerca de la credibilidad que tienen los tomadores de decisiones en los especialistas y sus modelos de análisis y estimación del riesgo. En el nivel regional o nacional se ha podido identificar con claridad que el tema no se percibe como un tema realmente importante.

Excepto valores cuantitativos proporcionados por algunos cuerpos legislativos del oeste de los Estados Unidos, se puede decir que en la práctica no existen leyes que establezcan un valor de riesgo aceptable en forma directa. El saber cuanta seguridad es una seguridad suficiente es un tema que suscita controversia, pero este “valor” de alguna manera se encuentra implícito en decretos reglamentarios o normativas técnicas derivadas de una ley marco. No obstante, este valor se entiende como el que la comunidad esta dispuesta asumir a cambio de determinada tasa o nivel de beneficios, que en la mayoría de los casos corresponde al ahorro o valor económico que se deja de pagar en caso de tener un nivel de seguridad por encima del normado y que podría interpretarse como una “exageración”. Este concepto también viene ilustrado, por ejemplo, por la decisión de algunas comunidades de países desarrollados de aceptar la posible pérdida de una cosecha al utilizar, para la agricultura, una zona alledaña al cauce de un río, una vez conocido el mapa de tránsito de crecientes o de inundaciones. Esta decisión puede tomarse debido a que dicha pérdida puede resultar menos perjudicial que desaprovechar la capacidad productiva del área potencialmente afectable por la inundación. En este caso la decisión depende de la recurrencia y de la severidad de las inundaciones esperadas en la zona y de la capacidad de recuperación del suelo productivo. Desafortunadamente, este tipo de decisión no se puede tomar de la misma

manera en los países en desarrollo. Usualmente se desconoce el nivel de amenaza y, aunque en muchos casos puede intuirse, por problemas de tenencia de la tierra no existe la posibilidad de que las comunidades involucradas tomen adecuadamente este tipo de decisiones. La realidad indica que por falta de alternativas las comunidades más pobres asumen consciente o inconscientemente en forma total el peligro y se ubican en las zonas de mayor amenaza no sólo para explotar el suelo sino incluso para vivir allí. Por esta razón, desde la perspectiva social se cuestiona el concepto de riesgo aceptable y se plantea que más bien debería existir un nivel de “riesgo inaceptable”, que oriente las prioridades de intervención y reducción del mismo por parte del Estado.

#### **4.2. Niveles de seguridad**

En general, de manera implícita, en la planificación y en el diseño de proyectos de ingeniería, ha sido común utilizar un nivel de riesgo aceptable, herencia de los estudios técnicos de análisis de riesgo basados en la teoría de probabilidades, con el fin de lograr un grado de protección y seguridad que justifique una inversión teniendo en cuenta como referencia la vida útil de la obra. Para ello se utilizan factores de seguridad que en términos probabilistas cubren “razonablemente” la incertidumbre de la posible severidad de las acciones externas (amenazas), la imprecisión de los modelos analíticos y la aproximación de las hipótesis de análisis y diseño.

Se han llevado a cabo muchas investigaciones para evaluar cual es el riesgo que puede considerarse como “razonable”, “factible” o “aceptable”. Estadísticas de mortalidad realizadas por Kletz (1982) indican que una persona corre el mismo riesgo de morir en las siguientes situaciones: recorriendo 6500 km en automóvil, fumando 100 cigarrillos diarios, haciendo alpinismo durante dos horas, trabajando en la industria química durante un año, o siendo simplemente una persona de sesenta años durante treinta y seis horas. Otro análisis realizado por el mismo profesor inglés indica que si fuera posible eliminar todas las otras causas de muerte, la esperanza media de vida sería de 6000 años para un trabajador en una siderúrgica, 300 años para el conductor de una moto y 10 000 millones de años si se considerara como única causa posible de muerte el ser alcanzado por un rayo. Teniendo en cuenta la causa, Starr (1969) propuso diferenciar el riesgo a morir por actividades voluntarias del asociado con actividades involuntarias. El primero se refiere a situaciones a las cuales un individuo se expone más o menos conscientemente, como, por ejemplo, conducir un automóvil, fumar, viajar en un avión comercial, practicar un deporte, etc. Este riesgo se calcula que puede ser del orden de 100 muertes por millón de personas anualmente. En el segundo, los individuos están sujetos a él sin tener un control razonable sobre el mismo, razón por la que los criterios y las opciones de protección no son definidos por los individuos afectados sino por una autoridad competente o un cuerpo controlador según las presiones de la sociedad. Según el estudio de Starr (1969), en los países desarrollados la comunidad desea que los riesgos involuntarios, tales como los desastres, sean alrededor de 100 a 10 000 veces menores que los voluntarios. Es decir, que para una catástrofe el número de muertes podría estar entre 1 y 0.01 por millón de personas expuestas anualmente. Algunos países desarrollados han utilizado este tipo de estudios para definir el nivel de seguridad que deben ofrecer ciertas infraestructuras, como las presas, ante las amenazas a las que están expuestas.

Diversos investigadores han mejorado los métodos estadísticos usados con el fin de determinar el nivel de seguridad y confiabilidad en los códigos de construcción (Cornell 1969; Hasofer y Lind 1974; Galambos *et al.* 1986; Galambos 1992). Estos autores han definido el margen de seguridad,  $Y$ , como la diferencia entre la resistencia (capacidad) de un elemento y la carga aplicada sobre el (demanda). A la relación del valor medio de  $Y$  y su desviación estándar le han denominado el índice de confiabilidad,  $b$  (o el inverso del coeficiente de variación de  $Y$ ). De esta manera, la probabilidad de que cualquier elemento particular de una estructura sea sobreesforzado durante su vida útil es una función de  $b$  y de la distribución de  $Y$ . La forma de esa distribución es típicamente difícil de determinar, sin embargo, si al menos se conoce  $b$  ya se tiene una medida relativa de seguridad. Galambos *et al.* encontraron que  $b$  en edificios existentes para cargas en condiciones no sísmicas varía entre 3.0 y 4.0. Si  $Y$  obedeciera a una distribución normal, estos valores podrían corresponder a las probabilidades de fallo entre  $1.3 \cdot 10^{-3}$  y  $3.2 \cdot 10^{-5}$  por elemento estructural durante una vida de diseño de 50 años. Ellos recomiendan para cargas sísmicas un  $b$  de 1.75, equivalente (asumiendo una distribución normal) a una probabilidad del orden de 0.04 de que el elemento sea sobreesforzado por el sismo de diseño. Este índice de confiabilidad  $b$  se refiere al fallo típicamente definido en el contexto de las cargas sísmicas como una fractura, más que una plastificación o cedencia. El sobreesfuerzo de un componente individual es considerado como un daño peligroso para la vida, pero no es equivalente a la probabilidad de víctimas *per se*. Hay otras formas de estimar el riesgo de muerte, el cual después de todo es el punto de interés. El bajo valor de  $b$  para cargas sísmicas se debe al alto costo relativo que, en relación con otras cargas, significa llevar a cabo el diseño de un edificio para resistir terremotos sin daño y a que es posible conseguir un mayor factor seguridad contra el colapso usando un detallado dúctil (Porter *et al.* 1998).

Las normas NEHRP de los Estados Unidos (BSSC, 1991) toleran los siguientes niveles de riesgo en un edificio, dado el sismo de diseño: 1% de probabilidad de daño peligroso para la vida, 0.1% de probabilidad de colapso y 0.01% de probabilidad que cualquier ocupante pierda la vida por el daño estructural ocurrido. El riesgo anual para una persona de morir por un terremoto equivale aproximadamente a una probabilidad de  $1.0 \cdot 10^{-6}$ . Para un ocupante de un edificio de oficinas, es decir expuesto 45 horas a la semana, o sea el 27% del tiempo, el riesgo es  $0.28 \cdot 10^{-6}$  por año. Este riesgo es asociado sólo al colapso estructural y no tiene en cuenta otras causas de peligro que se puede presentar por un sismo; como incendios por ejemplo.

Es importante destacar que en regiones de baja sismicidad algunos códigos han empezado a considerar intervalos de retorno más largos que 475 años para el sismo de diseño. Este período es muy corto para capturar el alto potencial de víctimas en regiones de baja o moderada sismicidad, pero donde existe un potencial importante de que se presenten terremotos catastróficos. Como resultado, el criterio de diseño basado en un sismo de 475 años de período de retorno puede ser inapropiado en muchas regiones de baja sismicidad.

No hay un consenso general en una medida para evaluar el riesgo sísmico aceptable. Wiggins (1978) propuso un enfoque en términos de costo óptimo para su utilización en códigos sísmicos. Encontró que dos criterios, que son esencialmente paralelos, se pueden proponer para reducir daños y víctimas por terremoto. Evaluó el costo (construcción más daño por sismo y víctimas) como una función del nivel de

riesgo deseable. Estándares de construcción menos rigurosos producen costos bajos de construcción y más alto daño sísmico; estándares más exigentes reducen los costos de eventuales terremotos y de víctimas, pero a un mayor costo de construcción. El nivel de riesgo óptimo por costos es aquel que conduce a los costos totales más bajos. Encontró que para las normas del Oeste norteamericano el nivel de riesgo anual óptimo es de US\$ 1 por cada US\$ 10,000 expuestos (es decir una tasa de pérdida anual de 0.00001) y de 1 persona por cada 1 000 000 de personas expuestas.

Usualmente en estos enfoques se ignora la severidad del evento en términos del número de personas que mueren. La figura 4.1 presenta la perspectiva de Helm (1996) desarrollada para Nueva Zelanda. Este método compara la frecuencia y el número de muertes por accidentes industriales y de otra índole. Se utiliza la expresión *riesgo tolerable* porque literalmente hablando las muertes no son aceptables. Helm encontró una relación lineal inversa entre severidad y la “tolerancia”: 100 fatalidades con una probabilidad anual de  $10^{-5}$  son igualmente tolerables como 1000 fatalidades con una probabilidad de  $10^{-6}$ .

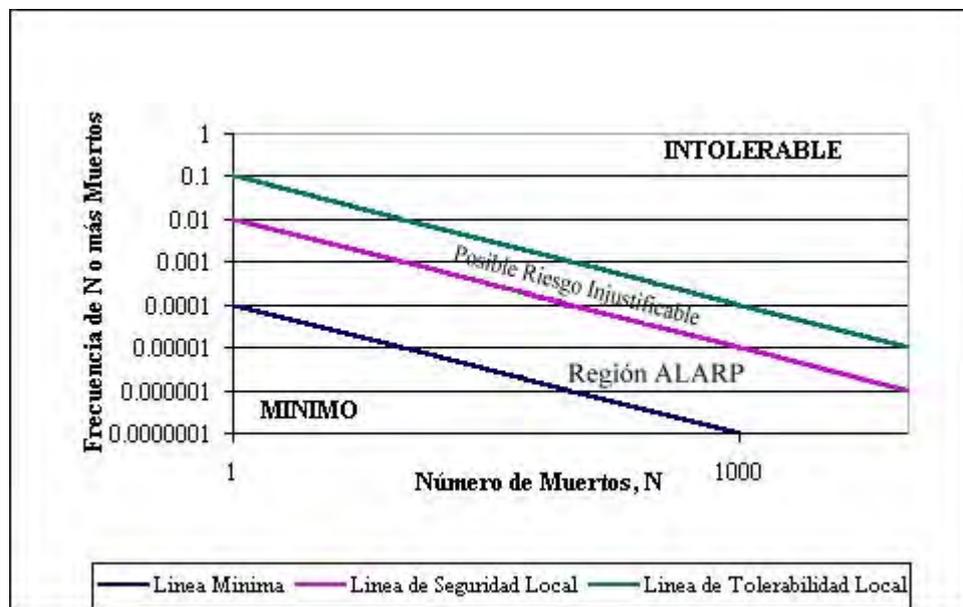


Figura 4.1 : Riesgo tolerable como una función de la severidad (Helm, 1996)

Con base en esta observación se propone que el riesgo se divida en cuatro regiones:

- Intolerable.** Corresponde a la región donde la alta frecuencia de sucesos y severidad de sus consecuencias exceden la aceptabilidad local del número de muertos por accidentes industriales u eventos similares. En esta región, “el riesgo no puede ser justificado excepto en circunstancias extraordinarias”
- Posiblemente injustificable.** El riesgo es “tolerable sólo si su reducción no es práctica o si su costo es desproporcionado en relación con el mejoramiento logrado”. Esta región es la parte alta de una franja a la cual se le denomina ALARP (*as low as reasonably possible*), que significa que el riesgo es tolerado en la medida que se toman medidas prácticas razonables para reducirlo.

- c) Región baja de ALARP. En esta región el riesgo no es despreciable, pero es “tolerable si el costo de su reducción puede exceder en mucho el mejoramiento obtenido mediante medidas de mitigación”.
- d) Ampliamente aceptable. En esta región por debajo de la línea de “despreciable”, los valores de frecuencia y severidad son lo suficientemente bajos para ser considerados despreciables.

Gráficos similares ya habían sido propuestos previamente por Starr (1969, 1972) en sus discusiones del método de “preferencia revelada” para determinar el riesgo aceptable. Starr postuló que el riesgo aceptable decrece con el incremento del número de personas expuestas; aspecto que algunos códigos de construcción lo tienen en cuenta definiendo restricciones adicionales o complementarias en el caso de edificios que alojan un amplio número de personas pero, usualmente, sin cambiar los niveles de demanda sísmica.

El enfoque del costo óptimo para riesgo mínimo requiere de la valoración económica explícita de la vida. Al respecto no hay un acuerdo general y por el contrario ha existido una amplia discusión por la subjetividad de dicha valoración e inclusive se han hecho acuerdos institucionales para abstenerse de realizar este tipo de valoraciones. Otros enfoques se han orientado, más bien, a utilizar un valor construido en términos del costo que significa evitar la pérdida de una vida. Howard (1980) presentó una elegante alternativa para intentar valorar la vida. Propuso, en vez de valorar las pequeñas probabilidades de morir, usar un método que, según este investigador, todas las personas comparten. En su trabajo sobre “microriesgos”, en análisis de decisión médica, Howard propone dos unidades de medida del riesgo de morir: el “micromuerto” ( $\mu\text{mt}$ ), o una probabilidad de  $10^{-6}$  de morir; y la “microamenaza” ( $\mu\text{hz}$ ), como una probabilidad anual de  $10^{-6}$  de morir a causa de un peligro continuo. Argumenta, que para el riesgo de morir por un incidente individual hasta de 0.1%, las personas ubican un valor más o menos constante. La figura 4.2 ilustra este punto e indica el pago que una persona hipotética podría requerir para aceptar el riesgo de morir  $p$ , como también el pago que estaría dispuesta a realizar para evitar el riesgo de morir  $p$ .

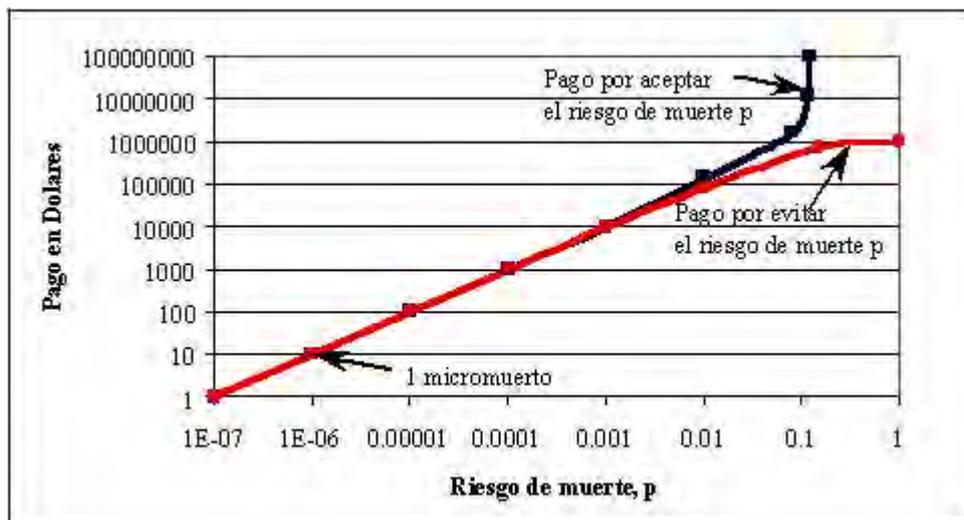


Figura 4.2 : Pago para aceptar o evitar el riesgo de morir  $p$  (Howard, 1989)

La primera se refiere al pago que un individuo requeriría para aceptar un riesgo adicional por encima del que comúnmente enfrenta, por ejemplo, para aceptar un trabajo inusualmente peligroso. La segunda, se refiere al dinero que un individuo voluntariamente pagaría para eliminar el riesgo que ya está integrado a su vida. Un ejemplo, podría ser el pago que se realiza por un *airbag* opcional en un nuevo coche. Las curvas divergen cerca de 1 000 a 10 000  $\mu\text{mt}$ . Por encima de este nivel, se pierde la habilidad de pagar más para evitar riesgo adicional y ninguna cantidad de dinero puede inducir a las personas a aceptar un mayor riesgo de morir. Sin embargo, por debajo de aproximadamente 10 000  $\mu\text{mt}$ , como es el caso de la seguridad sísmica, las curvas coinciden y son lineales.

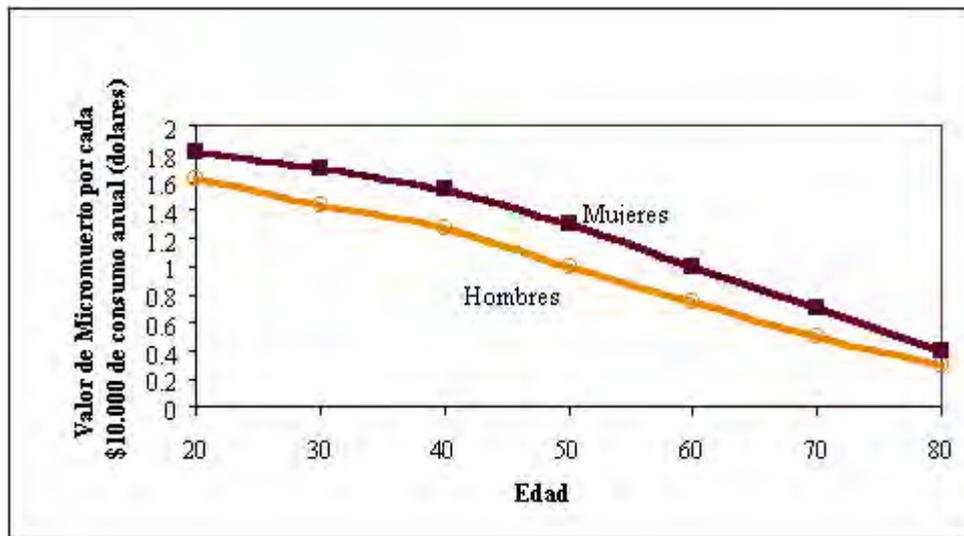


Figura 4.3 : Valor en dólares de Micromuerto por U\$10,000 de consumo anual como una función de la edad y el sexo.

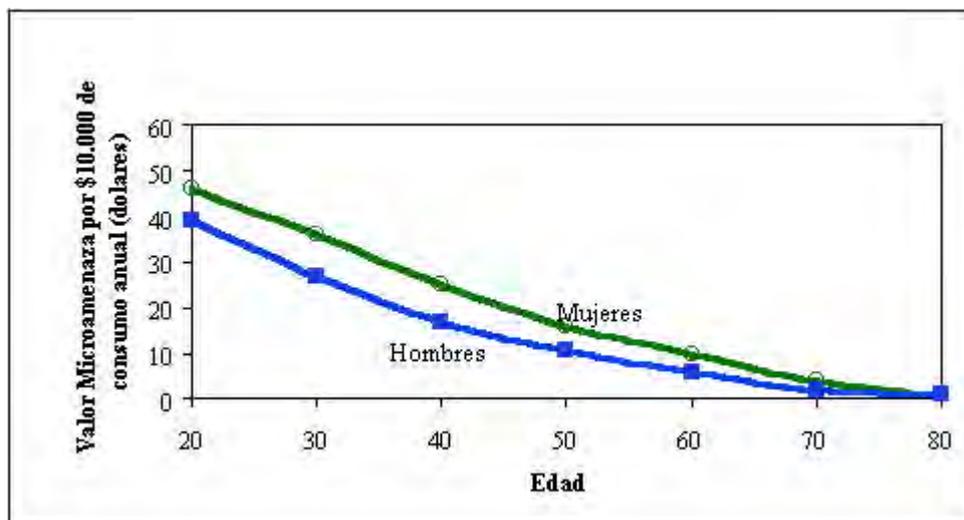


Figura 4.4 : Valor en dólares de Microamenaza por US\$ 10,000 de consumo anual como una función de la edad y el sexo.

Howard indica que el estado de salud de un individuo, su actitud con respecto al riesgo, su estilo de vida, como su expectativa de vida median en la decisión del valor

(en dólares) por  $\mu\text{mt}$ , pero que en promedio este valor puede ser estimado en función de la edad, el sexo y el consumo anual en dólares. Howard (1989) propone unas tasas de intercambio personal por  $\mu\text{mt}$  y por  $\mu\text{hz}$  que se ilustran en las figuras 4.3 y 4.4, respectivamente.

El atractivo de esta metodología, de evaluación de microriesgos, es que evita formular la pregunta de cuánto vale una vida humana. En realidad, más bien se orienta a identificar el valor que las personas disponen para su propia seguridad en forma cotidiana.

La sociedad debe decidir como asignar los recursos disponibles entre las diferentes formas de dar seguridad a la vida y proteger el medio ambiente. De una u otra forma los beneficios anticipados de diferentes programas de protección de los países desarrollados deben compararse con el coste económico que significa la implementación de dichos programas. Según este planteamiento debe existir un punto de equilibrio a partir del cual no se justifica una mayor protección o prevención, que bien puede ser utilizado como límite ideal a partir del cual se puede transferir la pérdida a los sistemas de seguros. Hall y Wiggins (2000) proponen que el nivel de riesgo aceptable debe ser revisado en forma periódica. Sin embargo, estas decisiones no se toman de la misma manera en los países pobres. Lo cierto es que en muchas ocasiones las amenazas son conocidas por la población expuesta y se reconoce el riesgo al que están sometidas tanto por las mismas comunidades como por sus autoridades. A pesar de que técnicamente e incluso institucionalmente existen maneras de definir con un adecuado criterio un nivel de riesgo “aceptable” o “inaceptable” –que a criterio del autor más bien podrían plantearse simplemente como “niveles de seguridad”– muchas comunidades no tienen otra alternativa que tolerar el peligro por la falta de posibilidades de acceso a los recursos o por su imposibilidad de participar en el proceso de toma de decisiones.

Las presiones económicas y sociales estimulan en muchas ocasiones el uso de zonas propensas, excediendo las preocupaciones de las personas en relación con la posibilidad de ocurrencia de sucesos peligrosos. Existen incluso casos de “damnificados profesionales” que en su lucha por acceder a beneficios del Estado se exponen a las amenazas. Por supuesto, en un amplio número de situaciones este tipo de decisión individual o colectiva se debe a la negación o la no-aceptación consciente o inconsciente del peligro o nivel de amenaza al que se está expuesto, tema que debe seguir siendo estudiado cuidadosamente desde el punto de vista psicológico y social. Independientemente de la existencia de estudios y mapas de amenaza y riesgo, de estudios de vulnerabilidad y de criterios de aceptabilidad del peligro, muchas comunidades de los países en desarrollo asumen o aceptan sin alternativa el riesgo al que están sometidas, lo que cuestiona los modelos de crecimiento y desarrollo aplicados hasta ahora y sugiere la necesidad de una profunda revisión, que puede significar un cambio de paradigma o al menos un replanteamiento de lo que hasta ahora se le ha denominado desarrollo.

### **4.3 Objeción al riesgo aceptable**

La aceptabilidad del riesgo ha sido un tema controvertido. Aparte de su objeción como concepto (Pate 1983), también, debido a la posible imprecisión de las probabilidades el tema ha suscitado discusiones e, incluso, objeciones. Usualmente, se le da mínima atención a la incertidumbre en las estimaciones básicas de probabilidad y

este aspecto puede conducir a profundos desacuerdos entre los expertos en el tema. De esta situación surgen dos conceptos que han sido interés en los últimos años: El primero, conocido como la *aversión a la ambigüedad*, o tendencia de los tomadores de decisiones a preferir certeza que incertidumbre en el modelo de probabilidades epistemológicas o matemáticas. El segundo, relacionado con la *aversión al conflicto*, que es el fenómeno por el cual se explica el porqué se prefieren evaluaciones en consenso, aunque ambiguas, que evaluaciones precisas pero que generen desacuerdo (Smithson 1996).

La aversión a la ambigüedad y al conflicto por parte de los tomadores de decisiones permite formular algunas preguntas interesantes. ¿Hay alguna diferencia entre las políticas de mitigación si las estadísticas de víctimas son muy confiables o si no lo son? ¿Hay diferencia en dichas estrategias si hay un desacuerdo en las probabilidades por parte de los expertos? Desde la perspectiva de la gestión del riesgo se podría decir que las respuestas dependen, obviamente, si el tomador de decisiones se las arregla con ambigüedad y conflicto como resultado de lo que se *conoce* o de lo que se *quiere* (preferencia). Algunos enfoques de gestión indican que las personas ajustan sus nociones de probabilidad subjetiva en presencia de ambigüedad o conflicto. De ser así, se podría argumentar que la ambigüedad o el conflicto proveen alguna información a las probabilidades básicas o epistemológicas y resultaría racional aceptar estas circunstancias, dado que contribuirían en los análisis para la decisión. En ese caso, quedaría la duda si llevar a cabo estimaciones de probabilidad sin ambigüedad o totalmente consistentes tendría algún valor para efectos de la gestión del riesgo.

En resumen, las técnicas de análisis de riesgo basadas en modelos probabilistas han contribuido notablemente a realizar valoraciones consistentes y están implícitamente en innumerables normativas y leyes. Sin embargo, estas técnicas no son suficientes por sí solas para definir la aceptabilidad del riesgo. Aunque se argumente su supuesta objetividad, muchos de sus fundamentos e hipótesis son igualmente subjetivas, razón por la cual es cuestionable que el “riesgo aceptable” se determine exclusivamente mediante este tipo de enfoque. Al respecto aun queda mucho camino que recorrer, pues parece ser que es necesario combinar los resultados de los análisis probabilistas con apreciaciones u otras valoraciones cualitativas que dependen en la mayoría de los casos de la percepción del riesgo, teniendo el cuidado de identificar la heurística y los sesgos que puedan estar asociados a las apreciaciones individuales y colectivas de la población. En realidad el nivel de riesgo aceptable no es constante; depende de muchos factores. Incluido, qué tan controlable es el riesgo y la distribución de los costos y beneficios asociados a dicho control.

#### **4.4. Aspectos jurídicos**

La sociedad, la gran masa de gente, toma sus propias decisiones con base en información fragmentada y proveniente de muchos puntos de vista diferentes. La gente, tanto de manera individual como colectiva, simplemente no percibe la amenaza o el riesgo de una manera cuantitativa: la sociedad esta fuertemente influenciada por dirigentes a quienes se les puede creer. Si los dirigentes pueden ser influenciados por estudios técnicos, la sociedad también se verá influenciada por ellos indirectamente (ATC 1978). Este es el fundamento sobre el cual descansan la mayoría de las normas de construcción sismorresistente y el argumento de las ciencias aplicadas, en cuento a que el

nivel riesgo aceptable debe ser definido por expertos en el estudio de las amenazas y el comportamiento de los sistemas sometidos a la acción de los fenómenos que las caracteriza. Sin embargo, con frecuencia los tribunales se convierten en los jueces finales de sí una acción propuesta para reducir el riesgo es aceptable o no. La lección que se ha aprendido es que hay que equiparar la severidad de los reglamentos con la severidad del riesgo. Los tribunales se ciñen al principio de la persona que intenta racionalmente lograr este equilibrio y utiliza información para respaldar el hallazgo del equilibrio apropiado.

La definición de *fuerza mayor* o *caso fortuito* se ha utilizado en las legislaciones para exonerar responsabilidades o eximir de culpabilidad. En términos legales, un *acto fortuito* o de *fuerza mayor* es un suceso sobre el cual no se tiene control. Se supone que es una causa ajena que obligatoriamente rompe el nexo causal y por lo tanto puede aceptarse como un factor de exoneración de responsabilidad. Se da cuando el daño no es imputable físicamente al presunto responsable, tampoco lo es a un tercero y menos a la propia víctima. Ocurre por un hecho de nadie, por azar, por un hecho de la naturaleza. Se plantea como un imprevisto que no es posible resistir y por lo tanto es un suceso liberatorio de responsabilidad.

Sin embargo, aunque en cierto sentido algunos fenómenos no puedan ser controlados, el estado del conocimiento actualmente permite que muchos de ellos puedan ser pronosticados y que sus efectos, bajo ciertas circunstancias, puedan ser mitigados o prevenidos parcialmente. Por esta razón, dentro de la legislación de algunos países, este argumento ya no es aceptado para la defensa en casos de desastres, incluidos los terremotos (AIS 1998). De hecho, para que exista la figura jurídica de fuerza mayor o caso fortuito, son necesarios comúnmente dos requisitos:

- a) Que el suceso sea irresistible, lo que no significa que pueda admitirse como tal la circunstancia de que sea difícil superar esa irresistibilidad o que sea muy oneroso lograrlo.
- b) Que el suceso sea imprevisible, lo que implica total imposibilidad de pronóstico. Indicios o previsiones imprecisas ya significan cierto grado de previsibilidad.

En muchas legislaciones se dan como ejemplos de este tipo de hechos a *sucesos de la naturaleza*, por lo cual no es extraño que la definición de desastre natural haya sido acomodada a la definición de fuerza mayor. Se reconoce, bajo esta figura, que obran circunstancias no atribuibles al actuar humano y por lo tanto que no existe posibilidad de culpa. Se argumenta que sin voluntad no hay culpa, la cual es y sigue siendo la piedra angular del sistema de responsabilidad. Dicha responsabilidad se inicia con la constatación de la existencia de un daño y de un nexo causal entre ese daño y un hecho generador del mismo, que prosigue con la atribución de ese hecho generador a un agente (encontrando culpa). Se cierra este circuito de la responsabilidad con el reconocimiento de la responsabilidad en cabeza del culpable, cuya responsabilidad conducirá a un resarcimiento. Este planteamiento se funda en el principio rector de que no existe responsabilidad sin culpa, que fue aceptado hasta el siglo XIX (Wiesner 1991). Sin embargo, en el último siglo, la ocurrencia de “accidentes mayores” aceptados como estadísticamente inevitables, derivados de la concurrencia de nuevos factores, como la tecnología y por la exacerbación de factores existentes, como la urbanización acelerada, y la acción del hombre han conducido a las figuras de:

- a) Negligencia o culpa negativa, que implica que existe la posibilidad de daño tanto por omisión como por acción.

- b) Presunción de culpa, que se establece por daños inferidos, por acción de personas a cargo o por cosas inanimadas o energías.

Estos planteamientos de manera implícita involucran la vulnerabilidad, que muchas veces ha sido creada, acumulada o estimulada, incluso, por agentes que deben garantizar la seguridad o protección. Visto de esta forma, habría circunstancias atribuibles al actuar humano o nexos de culpabilidad y responsabilidad. En ese sentido ¿qué tan responsable es el Estado por los desastres? La respuesta depende de la previsibilidad de tales situaciones y sobre todo de la posibilidad del Estado de evitarle daños a sus súbditos. La posición durante años ha sido y sigue siendo en muchos lugares –por conveniencia de muchos gobernantes– que la prevención de desastres está más allá de las funciones y responsabilidades del Estado. Es la razón por la cual se sigue relacionando también intencionalmente el concepto de desastre con la figura jurídica de la fuerza mayor o el caso fortuito.

Tradicionalmente, las instituciones del Estado han sido protegidas por una inmunidad derivada del principio inglés de que “El rey hace, no se equivoca” y de que el hacedor de las leyes no puede ser procesado por las leyes creadas por él. Sin embargo, dicha inmunidad en la mayoría de los países se ha disminuido en forma significativa. En Estados Unidos, la ley explícitamente acepta inmunidad para las entidades del Estado y sus funcionarios sólo durante situaciones de emergencia declaradas. Los actos fortuitos o de fuerza mayor, denominados “Actos de Dios” sólo pueden ser utilizados para la defensa en dos situaciones muy limitadas:

- a) Si el suceso fue de tal tipo o magnitud que pueda demostrarse que no era posible preverlo o pronosticarlo y que no se obró en forma negligente en relación con la manera como se debe actuar en caso de un suceso previsible; o
- b) Si siendo el suceso previsible se demuestra que se tomaron todas las medidas consideradas como “razonables” para prevenir sus efectos, a pesar de que se hayan producido daños.

Un proceso judicial de responsabilidades por negligencia u omisión de esta naturaleza usualmente involucra tres pasos:

- a) El análisis de decisiones previas o juicios que hayan tratado casos similares, o jurisprudencia, con el fin de conocer como la sociedad expresó su actitud en el pasado;
- b) La evaluación de varios puntos de vista acerca de las pruebas que soportan la evidencia, que puede ser doctrina, lo cual pretende encontrar posibles argumentos que desacrediten o fortalezcan la demanda; y
- c) El juicio de los valores comparativos mediante el peso de las evidencias presentadas por las partes, lo que debe permitir, de acuerdo con la preponderancia de la evidencia o con la versión más probable de los hechos, la decisión final del proceso.

Ahora bien, la paulatina migración de la visión “atencionista” o de respuesta a los desastres hacia el enfoque de la prevención-mitigación o gestión del riesgo, que no sólo involucra la preparación para emergencias sino la reducción de la vulnerabilidad, ha respaldado la necesidad de hacer ajustes a la legislación para armonizarla con las nuevas concepciones. La “responsabilidad por riesgo”, sin duda, favorece la discusión de nuevas teorías como las del “riesgo creado” que se alejan de la culpa. Desde la perspectiva del

riesgo tecnológico, por ejemplo, es fácil visualizar que se corre con la responsabilidad por daños causados en ejercicio de un riesgo. Se trata de la responsabilidad sobre alguien que no ha cometido falta. Se responde por lo que sucedió, no por lo que se hizo o se dejó de hacer. A este tipo de enfoque se le ha denominado recientemente: responsabilidad objetiva.

Las experiencias en varios países y la responsabilidad que usualmente establece la ley deben ser motivo de reflexión acerca del tipo de estudios que se realizan para estimar la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. Afirmaciones de orden técnico como “evento máximo probable” o “sismo de diseño”, por ejemplo, y el papel de los evaluadores del riesgo, los funcionarios y por lo tanto de las instituciones encargadas de la prevención y mitigación deben revisarse. Algunos interrogantes, por ejemplo, para la discusión podrían ser los siguientes:

¿Qué significa alto, medio y bajo en términos de amenaza y riesgo y quién debe decidir dichos calificativos y su respectiva asignación a una zona?

¿Qué responsabilidades se asumen cuando se traza una línea divisoria entre dos zonas de amenaza o riesgo consideradas como diferentes para efectos de reglamentación?

¿Cómo se debe pesar la posibilidad de una falsa alarma con la posibilidad de exponer a una comunidad cuando existen elementos de predicción?

¿Qué implica no informar a la población acerca del grado de amenaza o riesgo al cual ella está sometida o simplemente informarle y no proporcionarle las medidas de prevención?

¿Qué implica desestimar o sobreestimar una amenaza no por deficiencia en la información sino como consecuencia de la falta de conocimiento o actualización académica?

Acciones u omisiones en relación con estos y otros interrogantes tienen implicaciones jurídicas. Podrían significar responsabilidades contractuales y extracontractuales, de resultado o de medio, directa o indirectamente, que según lo establezca un juez civil podrían tener implicaciones tales como la reducción del patrimonio. En varios países, si el Estado llega a ser declarado culpable por acción u omisión de un servidor público, éste le repite al empleado que cometió la falta. También, podrían configurar un delito culposo, por negligencia o imprudencia; caso en el cual la responsabilidad es penal y puede significar prisión, arresto o multa.

Aparte de responsabilidades desde el punto de vista jurídico, estas circunstancias también podrían tener implicaciones éticas y morales, si existen códigos de ética profesional y según sean los principios y valores de las personas involucradas. En el primer caso, se pueden llegar a establecer amonestaciones, suspensiones, la pérdida de la licencia profesional o sanciones disciplinarias. En el segundo, no existen consecuencias externas, por tratarse de una responsabilidad subjetiva o de conciencia. Sin embargo, en ambos casos es necesario destacar que la mejor forma de promover la prevención-mitigación es lograr que se actúe con rigor profesional, convicción y convencimiento a la hora de aplicar los criterios técnicos o administrativos con fines de protección de la sociedad. Desafortunadamente, en muchos lugares, esta actuación no ha sido la regla sino la excepción, en lo que se refiere a la reducción de riesgos. La no aplicación de los requisitos y exigencias mínimas de sismorresistencia y de la falta de supervisión y control de calidad, por ejemplo, han sido claramente la causa de innumerables desastres en muchos países donde existen normas y códigos de construcción adecuados y modernos.

Las implicaciones jurídicas de las acciones u omisiones de los funcionarios o empleados de las instituciones involucradas en la evaluación y reducción de las amenazas y riesgos son aspectos de especial relevancia. Sin embargo, se han dado casos en que la responsabilidad se diluye socialmente en situaciones en que incluso existen serios indicios de negligencia u omisión de los evaluadores y los funcionarios. No es extraño que entidades del Estado encargadas de evaluar la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo no lo hagan o se limiten a utilizar estimaciones poco rigurosas. De igual forma, y más grave aún, no es tampoco extraño que entidades competentes, que tienen a cargo la reducción de la vulnerabilidad y el riesgo, no formulen ni ejecuten debidamente las mínimas medidas de prevención-mitigación para proteger a la comunidad. Se han dado casos incluso de excusas extravagantes, como por ejemplo la “Ira Divina” o el fatalismo, mediante las cuales funcionarios y autoridades gubernamentales mezquinas han evadido la culpabilidad de errores crasos o han justificado la falta de prevención de desastres.

El evadir no sólo la responsabilidad jurídica sino también la responsabilidad política ha sido una práctica común en países pobres, en los cuales la vulnerabilidad está íntimamente ligada a problemas de desarrollo aun no resueltos. Se han dado casos en los cuales ciertas autoridades gubernamentales, sin escrúpulos, han diluido su responsabilidad, no sólo ante la población afectada sino también ante la comunidad internacional. En ocasiones se ha argumentado, por ejemplo, que el desastre ocurrido no era factible “prevenirlo”, cuando las consecuencias, se sabe, no sólo dependen de la ocurrencia del fenómeno que lo origina sino de la vulnerabilidad de los elementos afectados. En estas y otras situaciones la vulnerabilidad posiblemente existe por la ausencia de medidas mínimas de protección, secuela muchas veces de prácticas corruptas. También, aferrados a estos argumentos, presidentes de algunos países le ha solicitado a la comunidad internacional la condonación de su deuda externa o han ejercido presiones políticas para obtener recursos no reembolsables que no favorecen en realidad a los afectados directos. No sobra decir, que esta circunstancia se presenta en parte por la falta de conciencia de la comunidad acerca del riesgo y por el desconocimiento de las medidas de mitigación y prevención que se le pueden exigir a las autoridades. Desafortunadamente, las condiciones de vida de muchas comunidades, en los países en desarrollo, se asemejan a una situación de desastre y por eso cuando un desastre ocurre tales comunidades no les es fácil discernir los niveles de protección a los cuales tenían derecho de acuerdo con su propia legislación.

#### **4.5. ¿Cultura de la prevención?**

En algunos lugares, ha sido común el proponer bajo la denominación de “cultura” la adopción e interiorización, dentro de las actividades de la sociedad, de una actitud o disposición hacia algo, cuyo producto es útil o deseable para la comunidad en general. Por esta razón, se ha utilizado como eslogan por ejemplo la “cultura del agua”, para referirse a la necesidad de que la sociedad adopte una serie hábitos de buen uso y manejo, en este caso del agua; o la “cultura del ambiente”, para referirse a conductas o comportamientos individuales o colectivos que favorezcan la protección del medio ambiente.

De la misma manera, desde tiempo atrás, se han planteado programas y campañas de información pública que hacen referencia a la “cultura de la seguridad” o la “cultura de la prevención”, con el propósito de hacer explícita la necesidad de adoptar una

actitud proactiva de las personas en relación con la prevención-mitigación de desastres y la preparación para afrontar emergencias. En realidad, en el caso del riesgo y los desastres, aunque parezca un simple asunto de semántica quizás podría ser más adecuado, al referirse a la adopción colectiva de este tipo de actitud referirse a la “incorporación de la prevención en la cultura”, dado que lo que se intenta no es cambiar la cultura sino que la actitud preventiva sea parte, desde todo punto de vista, de las costumbres y hábitos de la sociedad.

Cualquiera que sea la manera de referirse a este planteamiento es importante preguntarse no solamente porqué se hace este énfasis, pues es obvio que se está admitiendo que no ha existido una adecuada gestión del riesgo en la sociedad, sino también porqué es y ha sido tan difícil hacer prevención de desastres; es decir, cuáles son los obstáculos que la limitan o que impiden que la comunidad tenga una actitud proactiva hacia ese objetivo. A manera de reflexión se pueden plantear, entre otras causas de fondo, las siguientes:

*Subestimación del riesgo:* Aun cuando se han realizado estudios cuidadosos acerca de la percepción del riesgo (Dabrek 1986; Mileti 1996), no hay aun una teoría que pueda hacer afirmaciones concluyentes acerca de cómo la población en forma individual o colectiva tiene una lectura del riesgo. Se puede afirmar que en general los “imaginarios” varían notablemente de un sitio a otro o de una comunidad a otra. Sin embargo, excepto en el caso de personas fatalistas, que leen adversidad incluso en aspectos que no la reflejan, en general se puede decir que existe una aversión instintiva al riesgo, que se traduce en una subestimación o negación implícita de las personas a verse involucradas en situaciones de peligro. Tal como se mencionó previamente, el riesgo, se percibe para los demás y en muchas ocasiones, curiosamente, se rechaza o se minimiza sin fundamento hacia sí mismo; particularmente en relación con las amenazas de la naturaleza.

Esta situación, a pesar del interés implícito de la sociedad en su seguridad, hace que sea necesario realizar esfuerzos más que notables para hacer tomar conciencia sobre los diferentes peligros e interiorizar una disposición preventiva que se manifieste explícitamente en las actividades de la sociedad. Los programas de información pública en relación con la gestión de riesgos exigen cuidadosas estrategias de divulgación y manejo de mensajes, debido a la no linealidad de la percepción de la comunidad. No es extraño que en el caso de campañas intensas o ambiciosas de información el público reaccione negativamente por considerar innecesarias, alarmistas o exageradas las apreciaciones y recomendaciones de las instituciones.

Hacer evidente el riesgo y lograr un cambio de actitud de la población es una tarea difícil y exige un cuidado especial. Es muy común que las entidades relacionadas con la prevención de desastres y atención de emergencias tengan innumerables instrumentos de divulgación, que comúnmente se utilizan a la hora de evaluar su desempeño, pero que no llegan a cumplir su objetivo. A parte que en la mayoría de los casos se centran en el hecho, es decir en el desastre, y no en la causa, es decir el riesgo, pocas veces se hacen sondeos para averiguar acerca de su cobertura, su recepción y entendimiento. En general, la mayoría de la información pública que se realiza se dirige a dar recomendaciones sobre el comportamiento que debe asumir la población en caso de emergencia, sin hacer en forma previa una debida interiorización del riesgo en el público.

Por otra parte, aun cuando la descripción de los fenómenos que pueden causar desastres es un tema ineludible a la hora de comprender el riesgo, es muy común que no se hable de la vulnerabilidad y sólo se mencione como causa de los desastres a las amenazas. Esta situación favorece que se entienda como riesgo la posibilidad de que ocurra un fenómeno intenso, que usualmente se interpreta como algo contra lo cual no es posible de hacer nada para evitarlo. Este tipo de situación es más contraproducente que lo que aparentemente parece, si lo que se desea es lograr hacer tomar conciencia acerca del riesgo. Pues ante lo que no es posible intervenir o es inevitable, el público asume usualmente una actitud pasiva y de resignación.

Nuevos enfoques de educación formal, capacitación e información pública son necesarios que expliquen y permitan identificar la vulnerabilidad como causa del riesgo y por lo tanto del desastre. Es necesario que las personas tomen conciencia que el riesgo es posible intervenirlo o modificarlo al reducir las condiciones de vulnerabilidad y comprender que los fenómenos de la naturaleza son amenazas en la medida en que los asentamientos humanos son vulnerables.

Ineficiencia de la burocracia : Las crisis y los desastres son tiempos de prueba no sólo para las personas sino para el Estado, ya que en esas circunstancias salen a relucir todas las debilidades de su estructura. Sin ánimo de darle un tratamiento peyorativo, se puede definir a la burocracia como el conjunto de los cuadros administrativos del Estado. Burocracia es sinónimo de rutina, de solución de problemas mediante la aplicación de procedimientos. El patrón de los sistemas burocráticos es la rutinización: la experiencia y la memoria de la administración se construyen a través de la reiteración de sus procedimientos. La burocracia en todos los casos trata de crear precedentes. Esta línea de conducta funciona bien en los casos de la vida cotidiana, no así en los casos únicos. Se puede decir que la burocracia está preparada para funcionar dentro de la normalidad y no en situaciones en las que se espera una respuesta intensiva y especial (Rabin,1978). Al respecto, Wiesner (1991) propone que el desastre es la “antítesis” del Derecho (las leyes), pues representa la anormalidad, el desajuste y ruptura del funcionamiento rutinario de la sociedad y la acción de la burocracia. Plantea que el desastre al implicar, en muchos casos, un régimen de “excepción” ratifica la dificultad que tiene la burocracia para enfrentar la crisis.

Lo primero que hace cualquier administración frente a brotes de anormalidad es tratar de integrarlos dentro de algún procedimiento administrativo, coercitivo o un procedimiento de respuesta (planes de emergencia o contingencia, cuando existen). Es decir, en un procedimiento –que usualmente es desconocido– dentro del cual se pueda enmarcar la situación y a los participantes de la misma. Se tiene, entonces, que el tratamiento rutinizado que caracteriza a la burocracia es a menudo inadecuado en relación con las situaciones de desastre o de emergencia.

El tema de la burocracia lleva a un punto fundamental: el precedente. Para cada situación de desastre existen precedentes. Sucesos múltiples en el pasado, bien registrados y analizados. La historia puede ser vista como un registro de calamidades. Si bien existen siempre precedentes de estas situaciones en un contexto histórico, es decir *ex post facto* , para los participantes inmediatos del desastre o para quienes lo padecen no existe usualmente ningún antecedente de lo que está sucediendo. En el caso del desastre de Armero por la erupción del Volcán Nevado del Ruiz en Colombia, por ejemplo, se conocía de dos erupciones previas, la segunda de ellas en 1845, esto es, 140 años antes de la tercera y fatídica de 1985 que causó la muerte de cerca de 20 000

personas. Sin embargo, para los pobladores del Armero moderno tales erupciones no existían, como no existieron para los burócratas, aferrados a sus procedimientos rutinizados de manejo de emergencias y de informes periódicos. Ambos grupos dejaron de ver el peligro creciente e incluso no sintieron la emergencia del momento: no existió gestión del riesgo. Se actuó como si la población y el volcán acabaran de nacer, sin historia, sin los ejemplos del pasado. Algo se interpuso entre la población inerme, desprotegida, y su salvación. Aparte de que se puede argüir negligencia gubernamental, pues se entendía el peligro y se lo calibraba, el pueblo hizo caso omiso de las señales que les estaba ofreciendo el fenómeno. El pueblo desoyó los avisos de la naturaleza para atender los consejos tranquilizadores de las autoridades y los medios de comunicación. A Armero la condenó su credibilidad en la ciencia y en la autoridad; su confianza en el Estado, en ese derecho que aquí se confronta con el desastre. Esta hipótesis esta en línea con el planteamiento de que es posible que los desastres sean previsibles de una manera teórica pero para las víctimas se presentarán sin aviso, como si nunca hubieran ocurrido hechos similares. Para ellas la historia empieza ahí, en su infortunio. La psique individual y colectiva se niega a creer en el riesgo para asirse a un remedo de normalidad (Wiesner 1991).

Es importante poner de relieve ese valor que en el desastre resulta vulnerado en mayor o menor extensión: la seguridad. La seguridad que tiene todo individuo de pertenecer a una comunidad organizada, a un sistema en el que todo o casi todo esta previsto; donde el riesgo a que esta expuesto debería ser mínimo. En efecto, el ciudadano no espera que el piso se abra bajo sus pies, el campesino asume que la montaña en que se encuentra jamás se moverá. En general, el ciudadano promedio milita en las filas de los confiados, y lo hace así bien sea por la instintiva aversión al riesgo o bien porque considera al medio artificial creado alrededor de él como un cascarón seguro. La idea de que siempre habrá una autoridad en la cual apoyarse para encontrar algo de tranquilidad. La función de sistema legal es la de preservar un sentido de comunidad contra la amenaza de desorden y desintegración. El Estado debe mantener su existencia y además mantener el tejido social. Sucede, sin embargo, que el desastre constituye un desafío a la acción integradora y defensiva del Estado, pues deja temporalmente sin vigencia ese resultado de la acción del mismo cual es la seguridad ciudadana.

Esto podría explicar, por una parte, por qué los esquemas burocráticos (irónicamente para responder ante emergencias) o modelos convencionales de protección o defensa civil –a pesar de sus esfuerzos de preparar planes de emergencia, simulacros y activar procedimientos de respuesta institucional– en muchos casos sean desbordados en su eficiencia y actúen lentamente ante las exigencias de un desastre. Y por otra parte, por qué se generan típicamente fuertes críticas del público contra las instancias competentes del Estado en atender emergencias y llevar a cabo la recuperación de la comunidad. No es extraño que después de un desastre, como si fuera la solución, sean destituidos los directivos o funcionarios públicos encargados de estas instituciones, por conveniencia política.

Por todo lo anterior, es necesario revisar a fondo los modelos de organización institucional en materia de desastres y emergencias y la legislación en que se sustentan. Los esquemas burocráticos tradicionales tienden a ser ineficientes y poco efectivos. Sus funcionarios casi siempre serán superados y no sabrán actuar debidamente, por lo cual a pesar de sus buenas intenciones sufrirán críticas por la insatisfacción del público. El

común de la gente y los medios de comunicación usualmente no comprenden la complejidad de una emergencia y juzgan la acción de la burocracia por no actuar precisamente como lo que no es. Por lo tanto, un nuevo paradigma basado en la gestión del riesgo es necesario, que aparte de considerar la respuesta del Estado en caso de desastre incorpore aspectos preventivos y de mitigación en todas las actividades de la sociedad. Sin duda podría ayudar, una organización y estructura que no sólo involucre a las instituciones gubernamentales sino a la población en forma participativa, al sector privado y a los diferentes actores de la sociedad en todos los niveles. Un sistema técnico-social con una base de conocimiento o información que favorezca la sinergia, la autoorganización flexible y la eficiencia.

*Falta de voluntad política*: En general, la prevención es un tema del desarrollo que requiere continuidad y sostenibilidad y que no es posible lograr en un mediano plazo. Esta situación hace que este tema no sea atractivo para autoridades políticas cortoplacistas, que desean mostrar sus realizaciones a la comunidad tan pronto como les sea posible. Además, la prevención no es fácil de visualizar o no es evidente, dado que cuando no ocurre un desastre pocos se preocupan por explicar qué lo evitó o qué disminuyó las consecuencias. Por el contrario, lo que es evidente es la falta de prevención –cuando se presenta el desastre– lo que fácilmente opaca las realizaciones y aciertos anteriores de quienes promueven la gestión de riesgos. No es extraño, por lo tanto, que las autoridades políticas no tengan en su agenda de prioridades la prevención-mitigación, y se preocupen en la mayoría de los casos sólo por tener esquemas operativos de atención de emergencias que hagan presencia con ayuda humanitaria en representación del gobierno en caso de un desastre. Esto, desafortunadamente, se conjuga con el hecho de que no existe aun, en varios países, una presión de la comunidad hacia sus autoridades políticas para que se realice una debida gestión del riesgo, o por desconocimiento o a causa de la baja percepción o subestimación del mismo.

Este limitante es tal vez el más serio y el más difícil de superar en los países en desarrollo. Incluso, se han presentado casos en que se ha logrado un avance importante y una significativa voluntad política para promover la gestión de riesgos, pero un cambio electoral ordinario ha causado serios retrocesos o cambios de orientación que no se esperaban. Esta “vulnerabilidad política” se presenta debido a la falta de sostenibilidad de la prevención-mitigación como un tema del desarrollo y se ha presentado incluso en casos en que se ha creído que los procesos ya empezaban a consolidarse (Ramírez y Cardona 1996).

En muchos lugares preocupa el desencuentro notable entre los imaginarios o las lecturas de la población y las autoridades políticas. Las necesidades de seguridad en materia de desastres no se expresan explícitamente por las comunidades y las autoridades no las interpretan en toda su dimensión. El público presiona para que sean atendidas sus necesidades inmediatas, las cuales de lejos incluyen su protección contra sucesos que no están entre sus mayores preocupaciones y las autoridades se limitan a tratar de resolver lo cotidiano sin prospectiva, dejando de considerar el desastre como un riesgo mal manejado desde la perspectiva del desarrollo. En otras palabras, ligado inevitablemente a las condiciones del día a día de la comunidad.

Sin embargo, existe una luz en el túnel. Aunque en algunos sitios el público conoce que se ha logrado aumentar la esperanza de vida y se tienen avances en el control de las enfermedades, ante el desarrollo tecnológico y sus peligros “misteriosos”, la aparición

de nuevos virus, el aumento de la vulnerabilidad y el “cambio de naturaleza” de los riesgos, el público ya ha empezado a preocuparse por los riesgos. El cambio más profundo es el entendimiento de que los muertos y los heridos y, en general, que los desastres no son causados por actos divinos, sino por causas factibles de evitar y para las cuales existe algún grado de control por parte del ser humano. Este cambio en perspectiva implica que algo se puede hacer en relación con la mayoría de los riesgos. En forma paralela este cambio implica que algo se debería hacer, derivado en parte de las ideas acerca de los derechos de los individuos de vivir sus vidas libres de riesgos, impuestos a ellos por otros, y acerca del rol del Estado en proteger los individuos de esos riesgos. Si bien es deseable, pero ha sido muy difícil lograr avances en la incorporación de la prevención en la cultura, lo que sí se puede afirmar es que el futuro estará regido tanto en los países más desarrollados como aquellos en proceso de desarrollo por lo que ya algunos empiezan a llamar la *sociedad del riesgo*.

#### 4.6. Un compromiso inmediato

El decir que el problema de los desastres ha venido en aumento, no es una verdad nueva ni discutible. Los hechos en todo el mundo así lo demuestran. Tampoco es necesario hacer énfasis en que la incidencia de este tipo de eventos en los menos desarrollados es mucho mayor y más difícil de manejar que en los países de mayor desarrollo tecnológico. Aun más, la cuantificación y análisis de las pérdidas económicas son apenas estudios que reiteran la necesidad de mirar el problema con mayor detenimiento y con mayor preocupación. Estos, en el fondo, tampoco dicen algo que no sea ya conocido. En síntesis, se puede decir que la mayor incidencia de los desastres en los países en desarrollo no se debe solamente a la existencia de una serie de amenazas naturales o tecnológicas, sino que se debe, de manera fundamental, al estado de subdesarrollo de los mismos.

No con el ánimo de debatir sobre lo que es o debe ser el desarrollo, y aceptando para efectos de la discusión los paradigmas ampliamente difundidos para medir el nivel de desarrollo mediante indicadores tales como el Producto Interno Bruto -PIB- *per capita*, vivienda digna, calidad y acceso a servicios públicos, tasas de alfabetismo y niveles de educación alcanzados, oferta calórica, incidencia de problemas de salud, esperanza de vida al nacer, seguridad ciudadana y en el sitio donde se vive, participación política, autonomía, entre otros. Se puede afirmar que el intento por alcanzar niveles altos en los mencionados indicadores siempre tiene un costo; y ese costo siempre implica, en muchas circunstancias, que hay quienes ganan y quienes pierden. En el plano mundial, hay países que lo hacen a costa de otros; en el plano interno, hay segmentos de la población que lo logran a costa de otros. Cuando se juntan ambas, es decir, la población que pierde, en los países que pierden, se encuentran los mayores problemas, y por su complejidad mayor dificultad para resolverlos. En América Latina y el Caribe, cuando menos, son ya 500 años de una continua lucha por mejorar la calidad de vida de sus habitantes, desigual tanto en el plano nacional como en el internacional. Han sido siglos de dominación, de incapacidad, de ineficiencia, de dificultades, unas propias, otras impuestas por los sistemas económicos y políticos imperantes. También se han logrado avances, lo cual no puede despreciarse por ningún motivo, pero igualmente y de alguna manera dichos avances han significado muchos costos, y los problemas han traído nuevas situaciones cada vez más complejas. Algunos de esos costos han sido el rápido e irracional

crecimiento de muchos centros urbanos; la industrialización no controlada; la sobreutilización de los recursos naturales renovables y no renovables; la falta de control sobre las técnicas de cultivo; la cultura del corto plazo; la creciente brecha entre pobres y ricos; el atraso cuando no la anomia política y la ausencia de participación ciudadana. Aunque las repercusiones de estos costos se perciben en muchos otros campos, en el ámbito de los desastres, se ven reflejados directamente en la mayor vulnerabilidad de las personas para defenderse de las amenazas naturales y tecnológicas. Vulnerabilidad en términos físicos, económicos, sociales y culturales, entre otros. Daños irreversibles sobre el medio ambiente y otros daños que sólo pueden repararse con acciones de largo plazo, que también tienen su precio. Paradojas del progreso y el desarrollo.

De acuerdo con las proyecciones de organismos globales y regionales de financiamiento, muchos de los países en desarrollo duplicarán su población urbana en el próximo cuarto de siglo, lo que significará un aumento dramático de la vulnerabilidad como resultado del desorden urbano, la dificultad de proveer servicios públicos y debido al proceso de industrialización. Solamente incorporando criterios de prevención en la planificación física (urbana o territorial), la planificación sectorial y socio-económica y formulando modelos prospectivos de indicadores que permitan detectar mediante alertas tempranas posibles crisis, será posible un proceso equilibrado que pueda interpretarse como desarrollo sostenible.

La disminución del impacto de los desastres debe enfrentarse primordialmente bajo la acción concertada y decidida de mejorar o cambiar el estilo o modelo de desarrollo, modelo que debe continuar dirigiéndose a mejorar la calidad de vida de todos, pero al mismo tiempo, encontrando la manera de disminuir vulnerabilidades y de buscar el equilibrio entre las necesidades de progreso y la preservación del medio ambiente. Es necesario una acción concertada, donde a los aspectos técnico-científicos se les valide como necesarios, pero no como suficientes. Es necesario enfatizar que existe una estrecha relación entre el mal manejo del medio ambiente y el incremento de desastres y que existe una relación directa entre pobreza e impacto negativo (pérdida de vidas y pérdida de bienes) de los fenómenos naturales. Igualmente es importante reconocer que existe relación directa entre los imaginarios culturales y la vulnerabilidad frente a las fuerzas de la naturaleza. Un dilema filosófico se ha generado sobre el papel de los seres humanos en la tierra: ¿somos sus amos o somos simplemente parte de ella?.

Finalmente, a manera de reflexión es importante mencionar que no obstante que muchos segmentos de las sociedades, en los diferentes países, obedecen a condiciones premodernas, el modernismo e incluso las condiciones de postmodernidad en muchos aspectos, están incidiendo en forma significativa en su dinámica de crecimiento (Harvey 1992); inclusive en los países en desarrollo. Ante estas características de cambio, fragmentación e imágenes efímeras es necesario plantear modelos menos rígidos y más integrales de gestión que permitan incorporar de manera más adecuada las incertidumbres, inestabilidades y sorpresas. Esto significa una planificación dinámica, por ejemplo, con técnicas de alerta temprana de las condiciones del entorno social y no sólo de los agentes perturbadores; es decir: una visión preventiva y prospectiva para lograr un desarrollo sostenible.

## Capítulo 5

# Paradigma del riesgo en la Ingeniería Sísmica

### 5.1. Amenaza sísmica

Uno de los avances más importantes de la Ingeniería Sísmica durante la segunda mitad del siglo XX fue el desarrollo de metodologías para la estimación de la intensidad máxima que, en un período de tiempo, un movimiento sísmico podría llegar a registrar en una región sísmicamente activa. Estas metodologías se han refinado en los últimos años dada su importancia para la recomendación de adecuados criterios de diseño sismorresistente en la construcción de las nuevas edificaciones.

Debido a que no puede predecirse con certeza la manifestación de futuros terremotos, no puede modelarse el fenómeno sísmico en una forma simple y determinista. Sin embargo, con base en análisis estadísticos de terremotos en el pasado y su aceleración estimada para diferentes sitios, se puede obtener la probabilidad de ocurrencia de ciertas aceleraciones en el futuro. Reconociendo que muchos aspectos de los terremotos y su ocurrencia son desconocidos, se puede considerar este fenómeno como un proceso discreto estocástico en el tiempo. Igualmente, la aceleración del suelo causada por los terremotos se puede entender como un proceso similar y por lo tanto se puede concluir que es posible aplicar un análisis estadístico. Para este análisis es necesario contar con un catálogo de eventos en el pasado que permita definir la distribución de las aceleraciones. Sin embargo, usualmente no se cuenta con un amplio inventario de registros de dichas aceleraciones en cada sitio. Por esta razón, ha sido necesario desarrollar modelos que permitan determinar el valor de aceleración probable en cada lugar de interés. Usualmente, las etapas para evaluar la amenaza sísmica de acuerdo con este enfoque son las siguientes:

Definición de zonas sísmicas. Dado que no todos los sitios están caracterizados por tener una alta sismicidad. El primer paso en el proceso de análisis es definir las zonas potenciales donde se pueden generar fuertes terremotos. En la actualidad, es aceptado ampliamente que la ocurrencia de los terremotos y la localización de sus epicentros está relacionada con las propiedades tectónicas y el sistema de fallas geológicas de una región. Para la definición de las zonas sísmicas, por lo tanto, es necesario llevar a cabo la recolección de los datos existentes a cerca de las características sísmicas y tectónicas del sitio considerado.

Modelización geométrica de las fuentes sísmicas . La fuente de origen de los sismos puede considerarse como un volumen dentro de la tierra, sin embargo en muchos casos una de sus tres dimensiones puede ser bastante mayor. Los modelos de las fuentes de origen que se utilizan para el análisis normalmente son el punto, la línea, el círculo y el área (Cornell 1967). Esta modelización se justifica como una primera aproximación puesto que el error en sus resultados es comparable con el causado por la insuficiente cantidad de información y por la limitada definición de los parámetros de origen de los sucesos.

Modelización de la ocurrencia sísmica. El fenómeno sísmico, tal como se mencionó, es un proceso discreto estocástico no estacionario en el tiempo que resulta muy complejo. Normalmente este fenómeno se modela como un proceso discreto estocástico simple, tal como las pruebas de Bernoulli, los procesos de Poisson o los procesos de Markov en dos estados. No obstante, el modelo más utilizado es el proceso estacionario estocástico de Poisson, por su simpleza y porque sus incertidumbres guardan consistencia con la falta de información y otras imprecisiones de la información.

Determinación de la distribución de magnitudes . Puesto que el nivel de amenaza no sólo depende del número de veces que ocurre el fenómeno sino también de la magnitud del mismo, es necesario conocer la recurrencia de eventos con diferentes magnitudes. Para el efecto se utilizan expresiones empíricas de la relación entre frecuencia y magnitud obtenidas para cada sitio.

Determinación de las funciones de atenuación . Terremotos con diferentes magnitudes producen diferentes aceleraciones en un mismo sitio, así también terremotos con magnitudes iguales pueden producir diferentes aceleraciones del suelo a diferentes distancias. Sin embargo, el problema no es muy simple porque las aceleraciones no sólo dependen de la magnitud y la distancia sino también por otros factores como las propiedades del medio por donde se propagan las ondas sísmicas, las propiedades locales del suelo en el sitio y la topografía. En la actualidad se aplican curvas promedio obtenidas del análisis estadístico de los catálogos de eventos que sólo son definidas en términos de la magnitud y la distancia hipocentral.

Evaluación de la amenaza sísmica . Los parámetros que definen la amenaza sísmica son la función de distribución acumulada de probabilidad de los valores máximos del parámetro que expresa el movimiento del suelo, el período de retorno de los terremotos con diferentes intensidades y el nivel de probabilidad del máximo movimiento del suelo relacionado con el período de retorno. Las técnicas más utilizadas proveen un método para la integración de las influencias individuales de las fuentes potenciales de terremotos, lejos y cerca, más activas o menos, dentro de la distribución de probabilidad de valores máximos anuales. Una vez desarrollada una red de puntos de análisis en una región puede construirse un mapa que exprese la amenaza como contornos de igual aceleración pico con cierta probabilidad de no excedencia durante un tiempo determinado o como contornos de igual período de retorno para ciertos niveles máximos de aceleración pico del suelo.

En general la amenaza sísmica se podría expresar en términos de la aceleración pico del suelo, la velocidad pico, el espectro de respuesta, la duración de la excitación, el contenido frecuencial y todos aquellos parámetros que pueden afectar las estructuras después de cierto umbral. Uno de los parámetros más utilizados ha sido la intensidad en la Escala Modificada de Mercalli debido a que con ésta es posible asignar una intensidad a eventos históricos bien documentados e incluirlos en el catálogo de eventos ocurridos.

Los métodos utilizados más frecuentemente para evaluar la amenaza han sido los desarrollados por Esteva (1964) y Cornell (1967/69), los cuales permiten obtener las relaciones entre el parámetro representativo del movimiento del suelo y su período de retorno promedio para el sitio, considerando relaciones geográficas arbitrarias entre el sitio de análisis y la fuente potencial del movimiento. En la mayoría de los códigos de construcción sismorresistente el terremoto para el nivel de diseño es un evento hipotético mayor que causa la sacudida del suelo estimado a tener un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años, lo que equivale a 0.21% de probabilidad anual y 475 años de período de retorno.

Desafortunadamente, debido a la descripción limitada del fenómeno, la insuficiente cantidad de registros a cerca de los eventos y a las incertidumbres inherentes a las hipótesis utilizadas para la modelización se ha llegado a concluir (Vere-Jones, 1983) que en algunos casos podrían llegar presentarse errores en la estimación de las probabilidades en un factor de 4 a 5 para sismos moderados y dos veces, quizá, estas cantidades para movimientos más fuertes. Por esta razón, en la actualidad se han propuesto modelos con "memoria en el tiempo" basados en las cadenas de Markov para resolver el problema que representa la modelización clásica del fenómeno considerando independencia de los eventos en el tiempo y el espacio. También, se han propuesto modelos basados en probabilidad Bayesiana que permiten combinar de una manera más adecuada la información histórica, los registros actuales y la información geológica. Otras dificultades como la imprecisión en la determinación de la intensidad, estimada de la información obtenida del daño en las edificaciones sin tener en cuenta el tipo de edificación (Lapajne 1985) y la utilización de la aceleración del suelo como un único parámetro representativo del movimiento ha conducido al refinamiento de técnicas para obtener parámetros más representativos como la Aceleración Equivalente EQA y el Espectro de Respuesta Efectivo ERS que incluye factores tales como la duración del evento, al contenido frecuencial y al comportamiento inelástico (Milutinoviç y Kameda 1983). Estos y otros desarrollos más recientes están contribuyendo a determinar con mayor precisión la amenaza sísmica a nivel global y local en regiones y asentamientos urbanos a través de estudios generales y de microzonificación sísmica.

La instrumentación y el desarrollo de técnicas de modelación del comportamiento dinámico del suelo, son sin duda, avances notables que permitirán adicionalmente un mejor conocimiento de los efectos de amplificación sísmica debido a las propiedades geotécnicas del suelo en cada sitio y las formas topográficas características. Es importante enfatizar que en la medida en que la amenaza sísmica sea evaluada de una forma más confiable igualmente confiable será la evaluación del riesgo sísmico, el cual esta relacionado directamente con los parámetros descriptivos de la amenaza.

## **5.2. Acción de los terremotos en las estructuras**

Un terremoto es una transformación brusca de energía: la energía de deformación acumulada en la litosfera se convierte súbitamente en energía cinética; ésta se manifiesta por medio de movimientos ondulatorios que se transmiten en el interior y en la superficie de la tierra. Esta energía, atenuada por la distancia, debe ser absorbida por los edificios y, en caso de sismos severos, disipada. El conocimiento obtenido hasta ahora ha permitido desarrollar bases que facilitan efectuar un diseño de estructuras con razonable seguridad para la vida. Más aun, ha sido posible aplicar criterios económicos en el diseño

sismorresistente optando por estructuras menos fuertes que lo necesario y, como consecuencia, de menor coste inicial; al ser éstas sometidas a un movimiento sísmico severo, deben sufrir daños controlados, sin colapsar, y disipar así una parte importante de la energía absorbida. Paradoja que significa que al degradarse la estructura existe la posibilidad de que se salve del colapso y por lo tanto las vidas que se encuentran en su interior.

De lo anterior se desprende que el comportamiento sísmico adecuado de una estructura depende, además de su resistencia, de su habilidad de disipar energía vibratoria a partir del instante en que sus deformaciones exceden el límite elástico, es decir, de su ductilidad. La vibración de la estructura en el rango plástico durante sismos fuertes significa, por lo tanto, la ocurrencia de daños estructurales y no estructurales. Esto no debe confundirse con el comportamiento deficiente que una estructura puede tener frente a un sismo incluso moderado, debido a un déficit de resistencia o a una ductilidad escasa, es decir, con su vulnerabilidad.

Se acepta, en general, y así se recoge en algunas normativas, que los edificios se diseñen para resistir sismos fuertes sin colapso, aun cuando se produzcan daños estructurales severos; sismos moderados sin daño estructural, pero con algún daño en elementos no estructurales; y sismos leves sin daño. En otras palabras, el nivel de riesgo aceptable o admisible, implícito legalmente en las normas, considera que la capacidad máxima de los elementos del sistema sismorresistente puede ser excedida y que éstos pueden experimentar un comportamiento inelástico durante sismos muy fuertes, al producirse un incremento de las deformaciones por encima de las de fluencia. Además, se espera que en caso de sismos moderados se produzcan daños en los elementos no estructurales como tabiques, particiones, etc., y que, en general, sean fácilmente reparables. Sin embargo, este tipo de daños constituye una pobre imagen del estado de una estructura para el público no enterado, que desconoce que los mencionados daños son aceptables y por lo tanto legales ¡ante los jueces! Las expectativas que tienen los propietarios distan en mucho de los objetivos convencionales de las normativas, pues en general el propietario espera que el edificio no tenga ningún daño. Los códigos de construcción fundamentalmente protegen la vida y, a partir de éste principio, protegen en forma indirecta la propiedad. Sin embargo, el hecho de que se admita que los elementos no estructurales se puedan dañar no deja de ser objeto de reflexión, puesto que fallos de muros divisorios y de fachadas también pueden, en algunos casos, comprometer la vida directamente; o también indirectamente, al no poder cumplir su función los edificios indispensables o esenciales, tales como los hospitales, en el momento en que más se les necesita.

### **5.2.1. Daños estructurales**

En general, las enseñanzas que han dejado los terremotos en el mundo indican que en los sitios donde se diseña de acuerdo con una buena normativa sismorresistente, donde la construcción es sometida a una supervisión estricta y donde el sismo de diseño es representativo de la amenaza sísmica real de la zona, el daño es marginal en comparación con el observado en sitios donde no se han dado estas circunstancias. Sin embargo, es importante resaltar que diseñar de acuerdo con una normativa no siempre salvaguarda contra el daño excesivo producido por terremotos severos. Desde una perspectiva histórica, los códigos por sí solos no pueden garantizar la seguridad contra el daño

excesivo, puesto que son reglamentos que experimentan actualizaciones continuas, de acuerdo con los avances tecnológicos y las enseñanzas que dejan las investigaciones y estudios de los efectos causados por terremotos, que deben utilizarse como pruebas de laboratorio a escala completa. La ductilidad y redundancia estructural han probado ser, una y otra vez, los medios más efectivos para proporcionar seguridad contra el colapso, especialmente si los movimientos reales resultan más severos que los anticipados en la fase de diseño (García 1998). La capacidad de una estructura de soportar daños significativos permaneciendo estable se puede atribuir por lo general a su resistencia, ductilidad y redundancia (Sarriá 1990). El daño severo o colapso de muchas estructuras durante terremotos importantes es, por lo general, consecuencia directa del fallo de un sólo elemento o serie de elementos con ductilidad o resistencia insuficiente.

A causa de sismos muy fuertes es común que se produzcan daños estructurales en pilares, tales como grietas diagonales, causadas por cortante o torsión, o grietas verticales, desprendimiento del recubrimiento, aplastamiento del hormigón y pandeo de las barras longitudinales por exceso de esfuerzos de flexocompresión. En vigas se producen grietas diagonales y rotura de estribos por cortante o torsión y grietas verticales, rotura del refuerzo longitudinal y aplastamiento del hormigón por la flexión por cargas alternadas. Las conexiones entre elementos estructurales son, por lo general, los puntos más críticos (Priestley y Calvi 1991). En las uniones viga-pilar (nudos) el cortante produce grietas diagonales y es común ver fallos por adherencia y anclaje del refuerzo longitudinal de las vigas a causa del poco desarrollo del mismo o a consecuencia de esfuerzos excesivos de flexión. En las losas se pueden producir grietas por punzonamiento alrededor de los pilares y grietas longitudinales a lo largo de la losa de piso debido a la excesiva demanda de flexión que puede imponer el sismo (Cardona y Hurtado 1992).

Observaciones realizadas en los últimos años en todo el mundo, indican que las construcciones rígidas se comportan, en general, mejor que las flexibles, particularmente en lo relativo a la protección de los componentes no estructurales que sufren menor daño al limitarse la deflexión excesiva entre pisos (AIS 1998). Irregularidades en altura, traducidas en cambios repentinos de rigidez entre pisos adyacentes, hacen que la absorción y disipación de energía durante el sismo se concentren en los pisos flexibles, donde los elementos estructurales se ven sometidos a sollicitaciones excesivas. Las irregularidades en planta, de masa, rigidez y resistencia, pueden originar vibraciones torsionales que generan concentraciones de esfuerzos difíciles de evaluar, razón por la que se debe ser más exigente en estos aspectos a la hora de diseñar arquitectónicamente los edificios.

#### ***Daños en edificios durante el terremoto del Quindío, Colombia 1999***

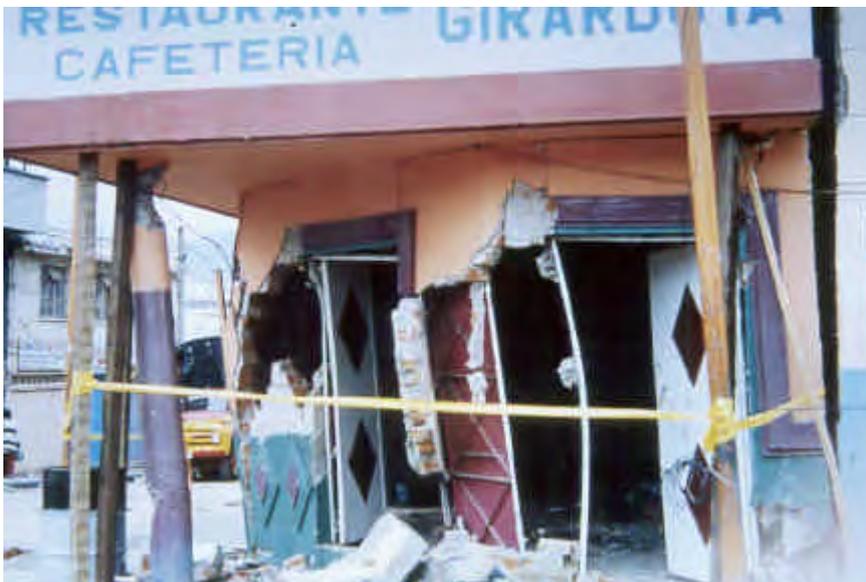
*Los daños en este sismo se concentraron en edificios antiguos, en edificios de mampostería no reforzada ni confinada con elementos de hormigón armado y en edificios diseñados y construidos antes de la expedición del primer código nacional de construcciones sismorresistentes (Ítems 5.1 y 5.2). Este primer reglamento se expidió en 1984 con fuerza de ley en todo el territorio nacional, como herencia positiva del terremoto que afectó a la ciudad de Popayán en 1983.*

*La mayoría de los edificios modernos, construidos con normas sismorresistentes, presentaron sólo daños en elementos no estructurales, tales como muros, tabiques divisorios, falsos techos, acabados arquitectónicos, etc. Sin embargo, éste tipo de daño se esperaba en caso de un sismo fuerte, razón por la cual en 1997 la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica logró que el Congreso de la República aprobara una nueva ley para actualizar el reglamento de 1984. La nueva norma de diseño y*

construcción sismorresistente, NSR -98, tuvo en cuenta la necesidad de restringir aún más los desplazamientos horizontales de las estructuras para proteger los acabados, el diseño de los elementos no estructurales y la obligatoriedad de evaluar la vulnerabilidad sísmica y la rehabilitación y refuerzo sismorresistente de los edificios indispensables. En consecuencia, la norma vigente no ha tenido que ajustarse en o dispuesto en su reglamento, aunque si se desarrollaron disposiciones complementarias relativas a la manera cómo deben expedirse los permisos de reparación y los requisitos técnicos y legales que se deben cumplir para la rehabilitación y refuerzo de estructuras afectadas por terremoto.



**Foto 5.1:** Armenia, capital del Quindío en Colombia después del sismo del 25 de enero de 1999, ilustra un escenario de riesgo sísmico materializado en desastre debido a la vulnerabilidad de sus edificios que no se construyeron con normas sísmicas.



**Foto 5.2:** Edificio de mampostería no reforzada gravemente afectada.

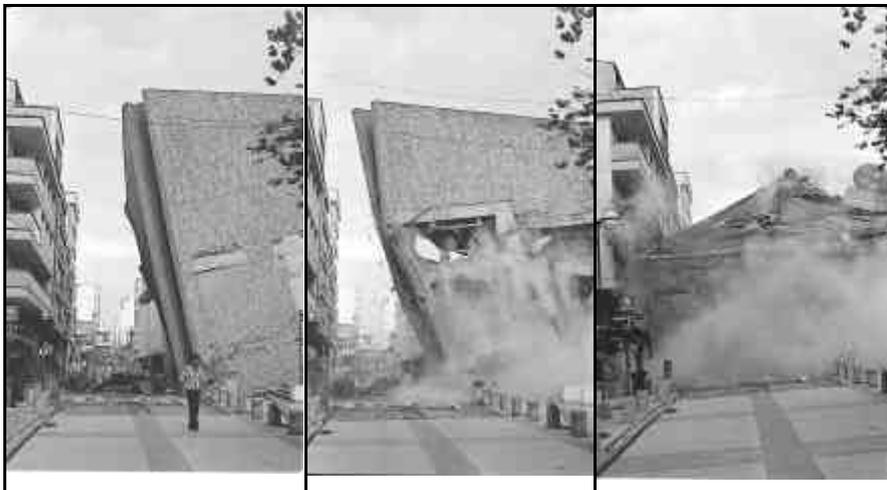
Muchos edificios del centro de la ciudad de Armenia y un número importante de la ciudad de Pereira tuvieron daños estructurales severos debido a la mala calidad de los materiales y debido al mal diseño y a la mala construcción, típica antes de la vigencia de las normas sismorresistentes (Fotos 5.3 y 5.4).

Las dimensiones insuficientes de los elementos estructurales y la falta de confinamiento mediante acero transversal tanto en pilares como en vigas facilitó la ocurrencia de fallos por esfuerzo cortante y en algunos casos fue la causa del colapso total o parcial de los edificios.



**Foto 5.3:** Edificio de hormigón armado construido sin normas sismorresistentes.

A los anteriores factores negativos, se debe sumar una frecuente reconstrucción, ampliación o modificación arquitectónica en muchos locales comerciales. Estas modificaciones se hicieron en diferentes etapas de la vida útil de la construcción, sin las más mínimas consideraciones técnicas para garantizar la vida y el patrimonio de usuarios o propietarios.



**Fotos 5.4:** Secuencia: colapso de edificio moderno durante la réplica

La gran flexibilidad de las construcciones de Armenia se deduce al observar la generalización de daños estructurales y en muros divisorios y fachadas, en edificios de hormigón armado en su mayoría con alturas inferiores a siete u ocho pisos y con gran preponderancia de alturas de cinco o seis pisos (Foto 5.5). En los edificios de la ciudad de Armenia abundan los pilares con sección transversal insuficiente, con área inferior a  $900 \text{ cm}^2$ , refuerzo longitudinal con bajas cuantías que en algunos casos posiblemente no llegan al 1%. Lo más grave es la escasez de refuerzo transversal, no sólo por estar colocado a distancias mucho mayores que las admitidas por el diseño estructural moderno, sino porque a veces se

observaron estribos con diámetro de un cuarto de pulgada. Esta situación resultó muy generalizada, naturalmente con muchas variantes, y permitió la proliferación de pilares con pésimo confinamiento del núcleo resistente. En el diseño de pilares se prestó poca atención a la importante recomendación de que los estribos no sujetaran más de tres barras longitudinales en cada uno de sus lados. La violación de tan importante concepto, condujo irremediablemente a pilares con un confinamiento inadecuado del núcleo resistente.



**Foto 5.5:** Caida de muros de tabiquería de fachada por flexibilidad de la estructura.



**Foto 5.6:** Fallo de nudos de unión viga-pilar por falta de refuerzo transversal.

En Armenia existen muchos edificios con pilares cuyo refuerzo no confina el núcleo. Estos pilares dan soporte a vigas de poca altura sobre cuyo refuerzo hay poca información porque a menudo resulta difícil de establecer. La combinación de pilares y vigas de deficiente sección transversal produce de manera natural estructuras inconvenientes por su elevada flexibilidad que se deforman transversalmente

mucho más allá de los límites en los cuales el efecto P-Delta comienza a ser un fenómeno determinante en el colapso del edificio. También se pudieron observar rótulas plásticas en los nudos (Foto 5.6). La inspección visual de los daños en Armenia, permite pensar que las deficiencias anteriormente descritas se combinaron con asimetrías en planta y construcción de insuficiente calidad para llevar al colapso a un número tan notable de construcciones de hormigón armado, principalmente con alturas entre tres y seis pisos. Existen edificios de mayor altura en Armenia pero no muchos de más de ocho pisos. En estructuras que parecen ser recientes se observaron fallos en pilares cortos derivados del confinamiento dado por muros que no llegaban a la altura total del pilar con el fin de suministrar iluminación y ventilación a las áreas ocupadas

#### Daños en edificios durante el terremoto del Mar de Mármara, Turquía 1999

Los daños en este caso se concentraron en su mayoría en edificios relativamente modernos, construidos en los últimos veinte años en el área correspondiente a siete provincias, en una distancia de 250 km entre Estambul y Bolu. Las víctimas de este terremoto, como las del sismo del 12 de noviembre en la zona de Düzce, prácticamente en su totalidad fueron causadas por el colapso de los edificios. La fuerte vibración del suelo, la deformación excesiva del terreno debido a la licuefacción o el hundimiento y la ruptura en superficie de la falla, fueron la causa de cientos de colapsos en la zona. Numerosos edificios ubicados directamente encima de la traza de la falla sufrieron desplazamientos laterales de hasta 3 m y verticales del orden de 2 m. Varios edificios y áreas de espacio público se sumergieron en el Mar de Mármara como resultado del hundimiento del terreno (Foto 5.7). Cerca del 70% de los edificios en poblaciones tales como Gölcük, Adapazarı, Topcular y Kular, fueron gravemente dañados o colapsaron. Los edificios en su mayoría se construyeron con materiales de muy mala calidad. El acero de refuerzo utilizado prácticamente en la totalidad de las estructuras era acero liso no dúctil de baja resistencia ( $2,100 \text{ kg/cm}^2$ ), con una capacidad de elongación que posiblemente no alcanza a superar el 5%. Este es un valor muy por debajo del exigido como mínimo para el acero en zonas sísmicas por las normativas existentes en la actualidad en diferentes partes del mundo. Este aspecto de especial importancia para garantizar el comportamiento dúctil y de alta capacidad de disipación de energía inelástica, fue el gran ausente en este terremoto, posiblemente debido a que la introducción del acero corrugado de alto porcentaje de elongación ha sido reciente. El fallo frágil del acero fue posible identificarla en un amplio número de casos, donde se podía ver sin dificultad el refuerzo expuesto de los elementos estructurales.



**Foto 5.7:** Debido a la hundimiento varios edificios quedaron sumergidos.

Por otra parte, la corrosión del acero ha sido generalizada en la zona por la falta de recubrimiento debido a las dimensiones insuficientes de las vigas y pilares. Se pudo detectar no sólo en los edificios dañados sino

también en estructuras en proceso de construcción, que el acero en ocasiones queda expuesto, sin recubrimiento de hormigón alguno, en una zona que ambientalmente por su contenido de salinidad no podría esperarse otra cosa que una acción corrosiva acelerada. También, es importante indicar que sólo se observaron redondos de diámetros menores, lo que es típico con aceros lisos y de baja resistencia. A primera vista también fue posible detectar que la calidad del hormigón es bastante pobre. Sólo a principios de los años 80 se inició el uso del hormigón premezclado, que se usa en la actualidad en un 40% de las construcciones. Es decir, en la mayoría de los casos el hormigón se realiza en obra y su control de resistencia es muy deficiente. No sólo los valores de resistencia han sido bajos sino que su dispersión es muy alta. En muchos edificios en proceso de construcción se pudo comprobar que los elementos estructurales quedan mal vibrados y que el hormigón no alcanzaba a llegar a todos los sitios del encofrado, quedando así con zonas de mayor concentración de agregado y poco cemento. Posiblemente esto se debe a que las dimensiones de los pilares y las vigas han sido insuficientes y a que no se han utilizado técnicas adecuadas para la vibración del hormigón una vez colocado (Foto 5.8 y 5.9).



**Foto 5.8:** Estructura en construcción donde se detecta la falta de recubrimiento.



**Foto 5.9:** Estructura donde se aprecia la falta de vibrado del hormigón.

Los edificios afectados por el terremoto no cumplían en su mayoría los requisitos de la normativa de construcción sismorresistente. Resultado del gran terremoto de Erzincan, en 1939, de magnitud 7.9, Turquía ha tenido un código de construcción sismorresistente desde 1940, cuando adoptó unos requisitos temporales y su primera normativa en 1942. Dicha normativa se ha actualizado técnicamente en muchas ocasiones a lo largo de los años y sus últimas modificaciones se han hecho en 1975 y 1997. La última actualización se realizó oficialmente en julio de 1998 por el Ministerio de Obras Públicas y Asentamientos Humanos, por lo tanto no ha existido un descuido institucional en cuanto mantenerse al día en materia de diseño sismorresistente. Sin embargo, es totalmente evidente que dicha normativa no se ha aplicado debidamente. Las disposiciones actuales como las anteriores indican, por ejemplo, que la dimensión mínima de un pilar no puede ser menor de 25 cm y que el área mínima de la sección no debe ser inferior a 750 cm<sup>2</sup>, situación que no se cumple en ningún caso en los edificios construidos en la zona, que esta situada en el área de mayor actividad sísmica del país. Es común encontrar pilares en los que el ancho de la sección rectangular tiene 15 cm o, en el mejor de los casos, 20 cm, posiblemente con el fin de que los pilares tengan un espesor similar al de las paredes o tabiques divisorios. Esta circunstancia indica que los pilares son excesivamente esbeltos, más si es habitual encontrar que la primera planta de los edificios es de mayor altura que las demás, posiblemente con el fin de promover su uso para comercio, lo que facilita que se produzca un mecanismo de fallo por el efecto de piso débil o blando y fallos por esfuerzo axil o debidos al momento de vuelco.

Debido a una muy alta relación de aspecto de la sección de los pilares, en el sentido del eje débil del elemento existe una muy alta esbeltez que facilita la formación de rótulas plásticas, que se expresan en fallos por cortante y pandeo de los redondos de refuerzo longitudinal. Por la misma razón, se observa una alta demanda de esfuerzos de flexión en el sentido del eje fuerte, que se traduce en fallos por flexión y pandeo del refuerzo en el extremo del pilar y eventuales fallos por cortante en el espacio medio de su altura.

Ahora bien, el otro lado de la sección en los pilares es de 40 cm o 50 cm de manera usual, lo que da una falsa apariencia de notable rigidez, en particular en edificios de dos y tres pisos. Sin embargo, la debilidad y esbeltez del pilar en la otra dirección contribuye de manera notable a que muchos edificios fallen por insuficiencia de rigidez. Este hecho lo agravó, en muchos casos, que los entrepisos hayan sido losas planas o placas aligeradas muy delgadas, lo que significó que las losas contribuyeron a dar una mayor flexibilidad al sistema estructural en su conjunto y, por lo tanto, mayor deformación o deriva ante cargas laterales, dado que no hubo una acción de pórtico resistente a momento. Se puede firmar que hubo innumerables casos de inestabilidad local o global por efecto PDelta.



**Foto 5.10:** Mala configuración estructural de entramados que forman pórticos.

También ha sido generalizado el uso de losas de hormigón armado vaciadas en el sitio, de máximo 10 cm entre vigas y de 5 cm en los voladizos de balcones, con vigas en algunos casos relativamente altas de

40 cm, propensas al pandeo lateral debido a que el ancho de la sección no superaba en ningún caso los 15 cm. El pandeo lateral se registró debido a la debilidad de la unión en los nudos con los pilares a las cuales a menudo las vigas se conectaban en forma excéntrica (Foto 5.10). Por otra parte, es importante destacar que, en la mayoría de los casos, los pilares no conformaban con las vigas pórticos bien definidos en un plano, es decir, en ocasiones las vigas se apoyaban sobre otras vigas y que los pilares no se encontraban alineados.

Estos aspectos parecen ser una práctica común que se ha replicado en la construcción informal a pesar de que la normativa de construcción desestima este tipo de prácticas, castigándolas como irregularidades de configuración para el análisis y diseño. Es importante mencionar que a un número significativo de edificios les falló el primer piso por la ausencia de muros que evitaran la acción del efecto de piso débil o blando y en muchos casos por la pérdida de muros construidos de manera usual sin conexión alguna a la estructura y con ladrillo de perforación horizontal que es altamente frágil. Aunque se podría decir que algunos edificios parecen porticados con tabiques de ladrillo, o incluso de mampostería de ladrillo confinada, la realidad es que debido a la disposición arquitectónica de los pilares, en muchos casos los muros en la periferia del edificio no quedan confinados por los pórticos, lo que significa que las paredes o tabiques no sólo pueden caerse fácilmente sino que no contribuyen a aportar rigidez a la estructura.

El desconocimiento o la no aplicación del código de construcciones es aun más evidente debido a la falta de un adecuado detallado del refuerzo. La insuficiencia del acero y su colocación descuidada en los pilares, vigas y nudos de las estructuras son sin duda la causa del fallo frágil y súbito generalizado en los edificios afectados. La mayoría de los colapsos parciales o totales se debieron a un pésimo comportamiento, no dúctil, de las estructuras, que no les permitió disipar energía inelástica. La insuficiencia de acero transversal en vigas y pilares ha sido la constante en este tipo de edificios donde, por falta de confinamiento en la zona de los nudos, no fue posible que se desarrollara una adecuada capacidad de resistencia y disipación de energía frente a las sollicitaciones sísmicas.

Los estribos eran insuficientes y usualmente se encontraban separados 20 o 25 cm. El gancho no doblaba a 135° sino a 90°, lo que facilitó que los aros se abrieran y el acero longitudinal pandeara. De igual forma puede afirmarse que el acero longitudinal en su mayoría fue insuficiente si se tiene en cuenta que en muchos edificios es acero liso de baja resistencia. Errores de despiece se encontraron en muchas estructuras, en las que no se logró un adecuado desarrollo del refuerzo por falta de anclaje y adherencia (Foto 5.11) y se encontró que los solapes en los pilares usualmente se localizaban inmediatamente por encima de las placas de piso y en algunos casos formando desde arriba un gancho que terminaba en la losa de cada entrepiso (Foto 5.12).



**Foto 5.11:** Deficiente detallado del refuerzo, falta de anclaje y de adherencia.

Uno de los aspectos de mayor incidencia en el fallo frágil y súbito de los edificios ha sido la colocación precaria del acero en los nudos y la deficiencia de los mismos por su debilidad inherente, debido a la excentricidad de las vigas en su conexión con los pilares y por la falta de dimensiones adecuadas de los elementos estructurales.



**Foto 5.12:** Redondos de solape en pilar con ganchos y a tope al inicio del entrepiso.

En general, puede afirmarse que no hubo capacidad de deformación sin daño y que las estructuras fallaron súbitamente sin disipar energía inelástica. Por esta razón, se presentó una situación poco usual después de la ocurrencia de un sismo: los edificios presentaron en su mayoría daños severos, que se traducen en muchos casos en colapso, o no presentaron daños estructurales. Sólo en muy pocos casos se encontraron daños graves, moderados o leves, típicos de una respuesta estructural con alguna capacidad de disipación de energía. La mayoría de los edificios que sobrevivieron probablemente no excedieron el límite elástico de los materiales, lo que permite inferir que en muchos lugares las aceleraciones no fueron muy fuertes, tal como lo confirman los registros.

Es importante mencionar, no obstante, que en lugares cercanos a la zona epicentral, donde el terremoto en términos de ingeniería podría considerarse de campo cercano, la directividad y el carácter impulsivo del sismo también contribuyeron a que no se alcanzara a desarrollar un mecanismo de disipación de energía, incluso en edificios competentes. El diagrama de radiación del sismo indica que las dos componentes de aceleración horizontal registradas coinciden en ser las más fuertes aproximadamente en el mismo instante, lo que significa un fuerte impacto sobre los edificios que impide desarrollar ciclos de histéresis, resultado de la acción alternada de esfuerzos a consecuencia de la vibración de la estructura.

A pesar de contar con una norma sismorresistente idónea, su desconocimiento, la falta de control y en algunos casos de ética profesional han contribuido en forma significativa a que los edificios sean altamente vulnerables. Tal como se mencionó antes, por emulación se ha construido en la zona un número muy amplio de edificios sin la participación de ingenieros y arquitectos conocedores de la normativa y, en general, de los requisitos del diseño sismorresistente. Estos edificios, que a primera vista se les ve con una adecuada rigidez, a menudo sólo la tienen en una dirección, siendo muy insuficiente en la otra, dado que los pilares son muy delgados y esbeltos. Sin duda, la práctica de la construcción informal de edificios de hormigón armado no ha sido buena. Desafortunadamente, la informalidad en la construcción en esta zona se ha fomentado incluso por políticas que han promovido la construcción de varios pisos adicionales sobre los edificios existentes (Foto 5.13). Este aspecto seguramente contribuyó al mal comportamiento de muchos edificios.

No deja de ser asombroso, sin embargo, que edificios antiguos de mampostería no reforzada de ladrillo, adobe y madera, incluso mezquitas y sus esbeltos minaretes no presentaron daños severos. Algunas de ellas se le ve en muy buen estado. Es posible que el contenido frecuencial del sismo las haya favorecido.

Los espectros de respuesta indican que la aeleración en edificios con periodos entre 0.3 y 0.5 segundos pudo llegar a ser del orden de 0.7g, lo que podría explicar la concentración de daños en los edificios de hormigón armado de varios pisos afectados por el terremoto.



**Foto 5.13.** Edificio informal de siete pisos que originalmente fue de tres.

Los edificios afectados, en su mayoría, se han proyectado y construido sin un control de calidad adecuado y un debido seguimiento o supervisión de la obra. Existe un consenso en los especialistas locales que el control no se ha realizado o ha sido insuficiente y que incluso los edificios se han construido con mano de obra deficiente en términos técnicos. La posibilidad de poder cubrir con acabados arquitectónicos las estructuras que claramente dejan ver en las obras que están en ejecución que su construcción ha sido muy deficiente, se ha convertido en una alternativa poco ética de algunos profesionales para evitar demoliciones o reparaciones de elementos estructurales que en la construcción no han quedado en forma adecuada (Foto 5.14). Habitualmente no se realiza ningún tipo de prueba de la resistencia del hormigón ni del acero, ni se hacen otras pruebas clásicas o ensayos que exigen las normativas de construcción para la supervisión técnica.

Quizás la falta de control y de supervisión idóneas han contribuido hasta tal punto al daño generalizado en la zona afectada que se podría decir que éstos son los factores más graves desde la perspectiva de la responsabilidad técnica, profesional y administrativa. Muchos edificios que sufrieron daños severos eran iguales en su configuración y características a otros que, estando cercanos, no tuvieron daño alguno. Si bien la aleatoriedad del daño puede ser el resultado de innumerables factores que escapan a las posibilidades de explicación con total certeza, no es difícil afirmar que la inadecuada configuración estructural, la deficiente resistencia de los materiales, las dimensiones insuficientes de los elementos estructurales y la ausencia de un correcto detallado del refuerzo indican no sólo un desconocimiento de las disposiciones de construcción sismorresistente existentes sino también una alarmante ausencia de supervisión técnica. Esto compromete de manera ineludible a los profesionales de la construcción, desde el diseño hasta la ejecución de los proyectos. Una vez ocurrido el terremoto, la población llegó a sentenciar rápidamente que los daños se debían en buena parte no sólo a la severidad del sismo sino a la mala calidad de la construcción. El apelativo de “asesinos” fue expresado con mucha frecuencia por los sobrevivientes, para referirse a los profesionales de la construcción responsables de los proyectos y

construcción de cientos de edificios que colapsaron o tuvieron daños tan graves que su demolición posterior era inevitable.



**Foto 5.14:** La ausencia de control facilita que se cometan errores en la construcción.

Por otra parte, la falta de control por parte de las autoridades, de la aplicación de los requisitos sismorresistentes en el diseño y en la construcción de las obras, también establece una responsabilidad administrativa o institucional por parte del Estado, quien debe proteger al ciudadano de eventuales errores e incluso de la eventual mala fe de constructores que falten a la honestidad. Infortunadamente, en este caso, el gobierno central se eximió de cualquier responsabilidad al indicar que este tipo de control debe ser ejercido por los niveles locales debido al proceso de descentralización administrativa que desde hace algunos años se realiza en Turquía. Algunos políticos, aprovechando la situación, incluso han argumentado en contra de la autonomía local y la descentralización, a comparación de la incapacidad de los gobiernos locales para ejercer dicho control. Sin embargo, esta circunstancia está ligada al nivel de desarrollo institucional en los niveles locales, que es apenas incipiente, y a la deficiente asesoría que en el proceso de descentralización le ha dado la nación y las provincias a las municipalidades. Sin duda, las administraciones locales e incluso parte de la comunidad misma también tienen responsabilidad en la vulnerabilidad sísmica existente por negligencia y omisión en el control, pues la falta de organización y desarrollo institucional o el desconocimiento de la ley no exime de responsabilidad. Pero de esta manera la responsabilidad finalmente se diluye en inculpaciones mutuas y demuestra la influencia de factores políticos, sociales y económicos en la vulnerabilidad sísmica de la región.

### 5.2.2. Daños no estructurales

Generalmente, los daños no estructurales se deben a la unión inadecuada entre los muros de relleno o divisorios, las instalaciones y la estructura, o a la falta de rigidez de la misma, lo que se traduce en excesivas deformaciones que no pueden ser absorbidas por este tipo de componentes. Los daños no estructurales más comunes son el agrietamiento de elementos divisorios de mampostería, el aplastamiento de las uniones entre estructuras y los elementos no estructurales, el desprendimiento de acabados y la rotura de vidrios y de instalaciones de diferente tipo. En los muros divisorios de mampostería, el cortante produce grietas diagonales usualmente en forma de equis. La

tendencia de vuelco de los mismos y la flexión pueden producir grietas verticales en sus esquinas y en su zona central. Efectos perjudiciales de este tipo se producen durante casi todos los terremotos, particularmente cuando se trata de sistemas estructurales flexibles que contienen tabiques o muros que llenan parcial o totalmente con mampostería rígida de ladrillo el entramado de vigas y pilares. Los pórticos con tabiques de relleno se vuelven más rígidos una vez que la estructura hace contacto con el tabique de relleno, incrementando la rigidez y cambiando las propiedades dinámicas de la estructura. Cuando los tabiques están distribuidos en forma asimétrica, pueden excitar además modos de vibración torsionales, dando lugar a un comportamiento muy desfavorable de la estructura. Estos tabiques se agrietan severamente si no han sido diseñados para soportar las fuerzas de interacción con el pórtico durante el terremoto e incluso pueden causar un efecto muy nocivo, pues dichas fuerzas pueden también producir graves daños en el propio pórtico. Un incremento inadvertido de resistencia y rigidez en los pisos superiores de un edificio por la mencionada interacción puede crear en los pisos inferiores el efecto de piso blando o flexible al cual ya se hizo referencia en el apartado anterior. Debido a la presencia de tabiques de relleno parcial entre los pilares, que cubren verticalmente el espacio desde el piso hasta el umbral de una ventana, se han producido en muchos casos daños severos e incluso colapsos por el conocido efecto de pilar corto o cautivo. Dicho pilar tiende a fallar en forma frágil al ser sometido a esfuerzos cortantes excesivos que se generan al ser impedida su deformación hasta la altura de los tabiques.

### **5.3. Vulnerabilidad de edificios existentes**

Cuando se lleva a cabo un proyecto estructural, en realidad se está proponiendo una estructura con una configuración, unas dimensiones y unos materiales, que al evaluarle su vulnerabilidad, ante la demanda de los sismos factibles que la pueden afectar durante su vida útil, demuestra que tendrá un comportamiento adecuado. Teniendo como referencia los requisitos mínimos establecidos en las normas sísmicas, se considera como aceptable un proyecto estructural cuando el modelo propuesto cumple o excede dichos requisitos. Así, la vulnerabilidad de una estructura nueva, en consecuencia, es baja si se tiene como referente la normativa utilizada y la severidad de los sismos considerados como factibles. Si se utilizarán otros requisitos más exigentes o se tuviese como referente un sismo más severo, la misma estructura podría considerarse en algún grado más vulnerable, en forma comparativa, dado que ofrecería algunas deficiencias relativas. Por esta razón, el análisis de vulnerabilidad de un edificio existente, usualmente se entiende como la estimación de sus deficiencias a la luz de unos requisitos establecidos. Sin embargo, la evaluación de la vulnerabilidad estructural también puede entenderse como el cálculo de la capacidad que dicha estructura tiene para soportar las sollicitaciones sísmicas reales. Esta evaluación difiere sustancialmente del proceso inverso de análisis que se realiza en la fase de diseño, pues en este caso las cargas deben ser las reales, al igual que la resistencia y la ductilidad de la estructura, sin considerar los tradicionales factores de seguridad.

Métodos convencionales de análisis y cálculo estructural que obedecen a técnicas de modelización de comportamiento elástico sirven para la realización de algunas verificaciones, pero no pueden considerarse por sus hipótesis, sus algoritmos utilizados e incertidumbres involucradas, como óptimos para hacer un análisis de vulnerabilidad. En la mayoría de las ocasiones, estos modelos se consideran tan aproximados como los

llamados métodos cualitativos o de revisión rápida. Algunos especialistas consideran en estos casos como métodos analíticos más apropiados aquellos que realizan un análisis dinámico inelástico o no lineal, que permiten conocer, paso a paso, el proceso de plastificación y colapso de la estructura, conocidos los ciclos de histéresis de sus componentes. Otros métodos, también considerados como analíticos, son versiones simplificadas de los anteriores que pretenden calcular la demanda de ductilidad exigida por las solicitaciones, la disponibilidad de la misma y la capacidad de disipación de energía que tiene la estructura. Finalmente, los cada vez más utilizados métodos de confiabilidad, en los que se basan las técnicas del diseño al límite, también vienen siendo utilizados para efectuar análisis probabilistas de fallos estructurales, lo que permite realizar estudios de vulnerabilidad de edificios existentes.

Sin embargo, la vulnerabilidad estructural no en todos los casos se puede modelizar acertadamente con las técnicas modernas de análisis estructural. La mayoría de estos métodos tienen limitaciones que los hacen tan aproximados como otros menos refinados cuando se trata de estudiar, por ejemplo, edificios históricos. Estos casos deben tratarse de manera especial e incluso pueden sorprender porque edificios que a primera vista podrían considerarse muy vulnerables no lo son (Ferrigni 1990).

En general se acepta que la vulnerabilidad de un edificio puede ser estructural y no-estructural. La vulnerabilidad estructural está relacionada fundamentalmente con la capacidad que tiene la estructura para soportar los desplazamientos y los esfuerzos que uno o varios movimientos sísmicos pueden causarle durante su vida útil (Atkan y Ho 1990). La vulnerabilidad no-estructural, por otra parte, está relacionada con la operación o funcionamiento del edificio, lo que depende del comportamiento de elementos tales como acabados, divisiones, instalaciones, equipos, etc. De su desempeño en el caso de un sismo depende que el edificio mantenga su operación y pueda seguir ofreciendo sus servicios. Este aspecto es de máxima importancia en el caso de aquellos edificios cuya función es vital, como es el caso de los edificios esenciales. Infortunadamente, los últimos terremotos han demostrado graves “colapsos” funcionales, en particular en hospitales, aún cuando sus estructuras han tenido daños leves. Esta circunstancia ha motivado la revisión de normas, y en particular del coeficiente de importancia asignado a estos edificios, que ha demostrado que no es una garantía suficiente para lograr un buen comportamiento. Esta situación ha sido desafortunada en el caso de hospitales, que deben cumplir ineludiblemente su función después de un sismo y en donde el coste de la estructura es apenas un porcentaje que varía entre el 12% y el 18% del coste total del hospital (Cardona 1993b). Por esta razón, se han realizado importantes cambios o ajustes en las técnicas de diseño y evaluación de estructuras de edificios. Nuevos enfoques en relación con el nivel de riesgo sísmico aceptable se han promovido al introducir en las normas o códigos el que ha sido llamado el *Diseño por Comportamiento* (FEMA, 1997).

En este enfoque se define un objetivo de seguridad o desempeño de la estructura, que va desde un estado previo al colapso con un daño severo hasta un estado sin daño estructural y no-estructural y un funcionamiento sin interrupciones del edificio, según varios niveles de sollicitación sísmica. Dichas sollicitaciones corresponden a sismos de diferente intensidad que varían en su período de retorno, y por lo tanto implican una estimación de la amenaza sísmica para varios sucesos con diferente probabilidad. De esta forma se diseña o se evalúa una estructura no sólo para una demanda sísmica, como ha sido tradicional, sino a varias demandas con probabilidades de excedencia

diferentes (ATC 1999). La tabla 5.1 presenta las recomendaciones del nuevo código unificado IBC 2000 de los Estados Unidos (ICBO 2000).

**Tabla 5.1:** Objetivos de comportamiento sísmico recomendados en el IBC 2000

Nivel de Diseño Sísmico	Comportamiento Requerido			
	Operación Permanente	Ocupación Inmediata	Protección de la Vida	Prevención del Colapso
Frecuente (50%/30 años)			<b>Comportamiento Inaceptable</b> (para edificios nuevos)	
Ocasional (50%/50 años)				
Raro (10%/50 años)	○			
Muy raro (10%/100 años)		○		

○ = Seguridad crítica, como hospitales, departamentos de bomberos

= Instalación esencial o peligrosa, como centrales telefónicas, edificio con químicos tóxicos

= Instalación básica o convencional, como edificios de oficinas y de residencias

De acuerdo con lo anterior, la evaluación del estado de una construcción existente puede hacer surgir serias dudas sobre la capacidad de la misma para soportar terremotos futuros. En algunos países se han desarrollado campañas de reforzamiento de edificios existentes para efectos de reducir la vulnerabilidad de los mismos. En principio, puede pensarse que el reforzamiento debería ser obligatorio para edificios esenciales para la atención de emergencias derivadas de desastres, y que resulten inadecuados luego de las evaluaciones de vulnerabilidad estructural.

### 5.3.1 Edificios esenciales

En muchos países, las normas de construcción sismorresistente no han sido efectivamente aplicadas y, en otros, dichas normas no han considerado especificaciones especiales para las estructuras de edificios esenciales tales como los hospitales. Por esta razón, no es extraño que, cada vez que ocurre un terremoto, los edificios más afectados son precisamente las instalaciones de la salud, que deberían ser los últimos en dañarse. En otras palabras, la vulnerabilidad en general de los hospitales es alta, situación que debe ser corregida total o parcialmente con el fin de evitar enormes pérdidas económicas y sociales, en particular en los países en desarrollo. En América Latina y el Caribe, en los últimos 15 años, un total de 93 hospitales y 538 unidades de salud han sido dañados sensiblemente a consecuencia de desastres, ya sea por haberse colapsado o haber quedado en condiciones de peligro que exigieron su desalojo. Si se considera una media de 200 camas de capacidad instalada por hospital y 10 camas por unidades de salud, resulta que 24 000 camas han quedado inhabilitadas durante dicho lapso. Estimando un costo promedio regional de 130 000 dólares por cama de hospital, las pérdidas directas acumuladas por este concepto en la región habrían ascendido a 3120 millones de dólares. Lo anterior revela la necesidad de revisar la estrategia de diseño y los criterios para la construcción de instalaciones hospitalarias en zonas propensas.

Los hospitales requieren consideraciones especiales en relación con la mitigación de riesgos debido a sus características de ocupación y a su papel durante situaciones de desastre, en relación con la preservación de la vida y la buena salud, especialmente en el

diagnóstico y tratamiento de heridas y enfermedades. Los hospitales pueden tener en cualquier momento una alta población de pacientes residentes, pacientes transitorios, funcionarios, empleados y visitantes. En caso de desastre, un hospital debe continuar con el tratamiento de los pacientes alojados en sus instalaciones y debe atender las personas lesionadas por el mismo. Para realizar esto, el personal debe estar en el sitio y conocer como responder ante la situación. También, el edificio y su dotación deben permanecer en condiciones de servicio.

Un edificio puede quedar en pie después de un desastre pero quedar inhabilitado debido a daños no estructurales. El coste de las partes no estructurales en la mayoría de los edificios es considerablemente mayor que el de las estructurales. Esto se cumple especialmente en hospitales donde el 85 a 90% del valor de la instalación no está en los pilares, pisos y vigas, sino en los acabados arquitectónicos, sistemas mecánicos y eléctricos y en el equipo allí contenido. Un movimiento sísmico de menor intensidad causará daños no estructurales mayores que los de los componentes estructurales. Por lo tanto, los aspectos más vitales de un hospital, aquellos que se relacionan directamente con su propósito y función, son los que más fácilmente se ven afectados o destruidos por los terremotos. La función que cumple un hospital debe mantenerse después de la ocurrencia de un sismo intenso, con el fin de que sea posible satisfacer las necesidades de atención médica que impone la emergencia. Si el hospital sufre graves daños no podrá cumplir su función cuando más se necesita y se convertirá así en objeto de la atención del desastre (Cardona 1999b).

En el diseño de toda estructura sometida a movimientos sísmicos debe considerarse que los elementos no estructurales de la construcción, tales como falsos techos, paneles, ventanas, puertas, etc., así como equipos, instalaciones mecánicas y sanitarias, etc., deben soportar los movimientos de la estructura. Por otra parte, debe tenerse presente que la excitación de los elementos no estructurales inducida por los propios movimientos de la estructura es, en general, mayor que la excitación en la base, por lo que puede decirse que la seguridad de los elementos no estructurales se encuentra más comprometida en muchos casos que la de la estructura misma. A pesar de esto, en el diseño sísmico de estructuras se concede generalmente poca importancia a estos elementos, al punto de que muchas normativas sísmicas no han incluido hasta ahora requisitos de diseño al respecto. Quizás debido a ello, en muchos casos, la experiencia ha demostrado un excelente comportamiento de la estructura, debido a que ha sido diseñada de acuerdo con criterios sismorresistentes, pero por desgracia acompañado de una deficiente respuesta de los elementos no estructurales. Si se tiene en cuenta la seguridad de los ocupantes de un edificio y de los transeúntes expuestos al riesgo de colapso de tales elementos, así como el coste de reposición de los mismos y las pérdidas involucradas en la suspensión de funciones del edificio mismo, puede comprenderse la importancia de considerar adecuadamente el diseño sísmico de los elementos no estructurales dentro del proyecto general del edificio.

Un análisis de vulnerabilidad podría comenzar con una inspección visual de las instalaciones y con la preparación de un reporte preliminar de evaluación. Esta inspección permite identificar áreas que requieran atención. El reporte puede ser discutido con los consultores y las autoridades de la instalación con miras a definir las prioridades y los cronogramas para llevar a cabo el trabajo. Una vez que el programa de reforzamiento ha sido diseñado, otras revisiones y análisis deben desarrollarse en áreas específicas identificadas para ser intervenidas.

La mitigación de los efectos producidos por desastres mediante la adopción de medidas preventivas es una actividad altamente rentable en zonas donde se experimentan eventos recurrentemente. Por cada peso que se gaste adecuadamente en mitigación antes que ocurra un desastre, se ahorrarán enormes costos representados en pérdidas que no se sucedieron. La mitigación no tiene costo. A largo plazo, se paga en dinero real, y en vidas salvadas.

En todos los casos se ha demostrado la alta rentabilidad económica y social de mejorar el comportamiento no-estructural y estructural de las edificaciones hospitalarias vulnerables. El costo de una reestructuración, aunque puede considerarse alto en algunas ocasiones, siempre será un valor poco significativo en relación con el presupuesto del servicio o en relación con el costo de su reparación o reposición física. Unas buenas preguntas figurativas que podrían formularse en cada caso podrían ser, por ejemplo: el costo de llevar a cabo la reestructuración sería equivalente a ¿cuántos escanógrafos? y ¿cuántos escanógrafos tiene el hospital? Las respuestas podrían dar resultados sorprendentes, sin tener en cuenta todos los demás elementos, equipos y bienes que en general aloja la edificación; esto por supuesto sin tener en cuenta las vidas humanas involucradas directa o indirectamente y en general el costo social que significa la pérdida del servicio (Cardona y Hurtado 1996).

El diseño hospitalario teniendo en cuenta el riesgo es una responsabilidad compartida de la arquitectura y la ingeniería. Muy particularmente, es necesario enfatizar lo que se comparte en cuanto a las relaciones físicas entre las formas arquitectónicas y los sistemas estructurales resistentes, y sería ideal que la comprensión de estas relaciones estuviera presente en cada diseñador que trabaja en zonas de riesgo. Infortunadamente, a nivel internacional, los métodos educativos y de la práctica han tendido a reducir la oportunidad de fomentar este entendimiento en la manera de pensar del diseñador, ya que se separa la instrucción de los nuevos arquitectos de la de los nuevos ingenieros y, también en muchos casos, quedan separados en la práctica. De hecho, algunos arquitectos, por intuición o por un patrón conceptual tienen un excelente sentido de la estructura, pero son muy pocos, y esta comprensión afortunada tiende a ocurrir a pesar de su educación y práctica, y no a causa de éstas.

La pérdida de vidas y de propiedades causadas por sismos se puede evitar con la aplicación de tecnologías existentes y sin realizar enormes esfuerzos financieros. Lo único que se requiere es la voluntad de hacerlo. Debido a que se necesitan no menos de dos generaciones para reemplazar el actual inventario de edificaciones en la mayoría de comunidades, se debe prestar bastante atención a la intervención estructural de las edificaciones existentes tanto como la atención que se le otorga al diseño y construcción de nuevas edificaciones.

### **5.3.2. Índices de daño**

Para estimar el daño estructural también se ha hecho uso de índices, que se han propuesto a nivel global y local (Williams *et al.* 1995; Aguiar y Barbat 1997). Los modelos de daño local son usados para precisar el nivel de daño en elementos estructurales individuales. Ha sido común, en estos casos, utilizar criterios tales como la capacidad estructural en términos de deformación y resistencia, la degradación, el daño acumulado en deformación, el daño acumulado en energía, como también indicadores tales como la ductilidad, la deformación, la energía inelástica, la curvatura y el daño basado en la fatiga. Algunos métodos hacen una aproximación del daño global a partir

del daño local utilizando criterios como la energía, la carga axial, y la ubicación del piso. Dentro de los parámetros utilizados para el cálculo directo del daño global es posible considerar la capacidad resistente en términos de deformación y corte basal, y parámetros vibratoriales como la frecuencia y el período.

Existen metodologías que utilizan índices de daño local no acumulativos como la ductilidad, o índices en los que se correlaciona la degradación de la rigidez con el daño en la estructura. Otras utilizan la modelación de histéresis en la que se asocia el índice de daño con el ciclo histerético del elemento que se estudia. También se utilizan índices de deformación acumulada en la base o de energía, así como también índices combinados de deformación y energía absorbida (Bertero *et al.* 1991; Akiyama y Kitamura 1992; Faifar y Gaspersic 1992; Bertero y Bertero 1993; Cardona y Hurtado 1995). Existen programas de análisis no lineal capaces de modelar el comportamiento histerético de un elemento de hormigón armado como el SARCF-II, DRAIN-2DX, y el IDARC entre otros. Este último evalúa índices de daño por elemento, piso y en forma global de toda la estructura, como se describe más adelante.

Otros métodos de evaluación utilizan índices de daño global en los que la calificación de daño depende de la distribución, severidad y localización del daño. En algunos casos se utiliza índices promedio, otros usan parámetros modales tales como la frecuencia y período. Los índices basados en el amortiguamiento relacionan los cambios en el período natural de la estructura con el nivel de daño que se presenta. El período se incrementa debido a la degradación de la rigidez y el aumento del amortiguamiento. Utilizando el método con índices de amortiguamiento se han obtenido gráficas como las que ilustra la figura 5.1 en la que se observa cómo se relaciona el daño que ocurre en la estructura con el amortiguamiento máximo de la misma obtenido a partir de la variación del período antes y después de producido el daño.

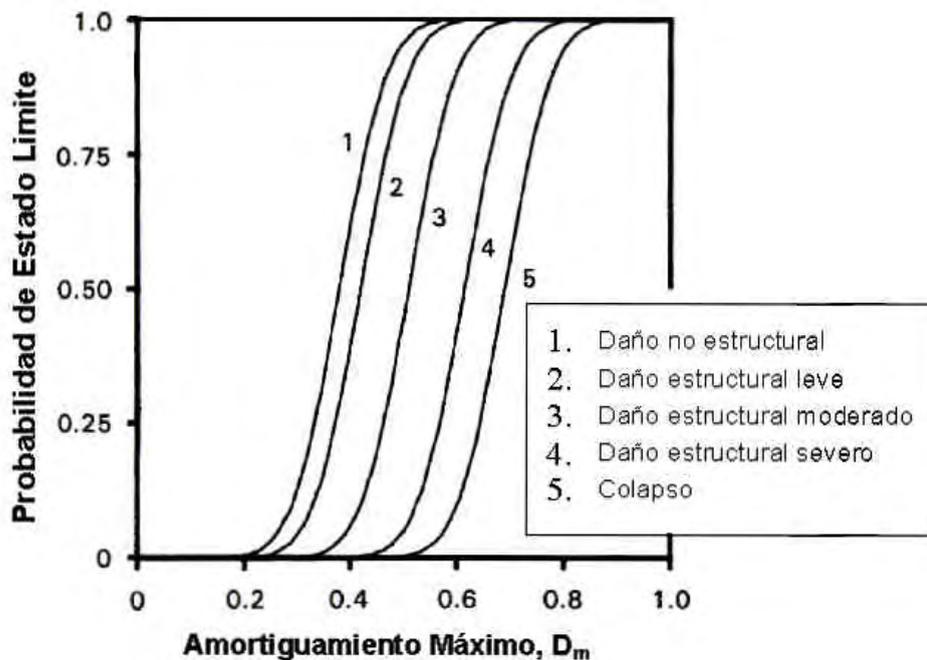


Figura 5.1: Relación entre Índices de Amortiguamiento y Daño Estructural

Uno de los métodos para el cálculo del índice de daño global es el propuesto por Aguiar y Barbat (1997) aplicable a estructuras de hormigón armado, en el cual se construye la curva de capacidad resistente de la estructura a partir de la geometría de la misma y del refuerzo de cada uno de sus miembros. Esta curva relaciona el corte basal  $V_0$  con el desplazamiento en la parte superior del edificio  $D_t$ . Se define cuál es el estado de colapso, y el punto en el cual se forma la primera rótula plástica. A partir de este último punto se determina la rigidez equivalente del sistema  $K$ , el período fundamental de la estructura  $T_0$  y la masa equivalente del sistema  $M$ . Utilizando el valor de  $T_0$  en el espectro de diseño o de respuesta, con que se realiza el análisis, se obtiene el valor de la aceleración espectral elástica  $A_d$  asociada al período y a un amortiguamiento  $\zeta$ . Se halla el valor de la frecuencia  $W_l$  con  $K$  y  $M$ . Finalmente, utilizando  $W_l$  y  $A_d$  es posible encontrar el desplazamiento en el borde superior del edificio  $D_t$  (la forma de hallar  $D_t$  varía según el tipo de estructura que se estudie). Con el valor obtenido se entra en la curva de capacidad resistente del pórtico y es posible determinar el estado de la estructura después de ocurrido un sismo de diseño (con  $A_d$ ). Para el estado límite de colapso se determina el período límite  $T_u$ . Con las coordenadas asociadas al estado límite ( $V_{ou}$  y  $D_{lu}$ ) se halla la rigidez asociada al colapso. Finalmente, el índice de daño se puede hallar mediante el método propuesto por Ayala y Xianguo (1995) expresado mediante la siguiente ecuación:

$$I_D = \frac{T_{final} - T_0}{T_u - T_0} \quad [5.1]$$

Uno de los métodos actualmente más aceptados es el propuesto por Park y Ang (1985) que utiliza índices de daño locales. Este método es una combinación lineal del daño causado debido a deformaciones excesivas y el efecto de cargas cíclicas repetidas (Singhal y Kiremidjian, 1997). El índice utilizado se presenta en las ecuaciones 5.2 y 5.3.

$$D = \frac{\mathbf{d}_m}{\mathbf{d}_u} + \frac{\mathbf{b}}{P_y \mathbf{d}_u} \int dE \quad [5.2]$$

$$D = \frac{\mathbf{d}_m}{\mathbf{d}_u} + \mathbf{b} \int \left( \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d}_u} \right)^a \frac{dE}{E_c(\mathbf{d})} \quad [5.3]$$

donde

$\mathbf{d}_m$  = Deformación máxima bajo un sismo,

$\mathbf{d}_u$  = Capacidad de deformación última bajo cargas monotónicas,

$P_y$  = Esfuerzo de fluencia calculado,

$E_c(\mathbf{d})$  = Energía histerética por ciclo a la deformación  $\mathbf{d}$

$\mathbf{a}, \mathbf{b}$  = Parámetros no negativos

$\mathbf{d}$  = Amplitud de deformación en cada ciclo de oscilación

$dE$  = Energía histerética incremental de disipación

El primer término de las expresiones para el índice de daño representa el daño debido a la deformación máxima experimentada durante la carga sísmica, y el segundo término representa el daño debido a la disipación de energía histerética acumulada. El valor del índice de daño,  $D$ , es 0 cuando no hay evidencia de daño, y es 1 para colapso. El modelo de Park y Ang ha sido ampliamente utilizado debido a que es sencillo y ha sido calibrado

usando información de estructuras dañadas durante sismos. Un método equivalente a este es el de Bertero (1991), que se plantea con la localización de rótulas plásticas en los extremos de los miembros. Este índice se expresa mediante la ecuación 5.4.

$$D = \frac{\mathbf{q}_m}{\mathbf{q}_u} + \frac{\mathbf{b}}{M_y \mathbf{q}_u} \int dE \quad [5.4]$$

donde:

- $\mathbf{q}_m$  = Rotación plástica máxima positiva o negativa
- $\mathbf{q}_u$  = Capacidad de rotación plástica bajo carga monotónica
- $\mathbf{b}$  = Parámetro del modelo
- $M_y$  = Momento de fluencia calculado
- $dE$  = Incremento de energía histerética disipada

En este caso, el índice de daño del elemento estructural se calcula como el promedio ponderado de los índices de daño en los extremos.

Por otra parte, el índice de daño global de Park y Ang está definido como el promedio ponderado de los índices de daño locales de cada uno de los elementos. La función de ponderación para cada elemento es proporcional a la energía disipada en cada uno. La ecuación 55 corresponde a la expresión mediante la cual se calcula el índice de daño global

$$D_T = \sum_{i=1}^N \mathbf{I}_i D_i \quad [5.5]$$

donde:

$$\mathbf{I}_i = \frac{E_i}{\sum_{i=1}^N E_i}$$

$N$  = Número de elementos

$E_i$  = Energía disipada en el elemento  $i$

De la misma manera es posible calcular índices de daño por piso, teniendo en cuenta solamente los elementos que pertenecen a un nivel en la edificación.

El programa Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete, IDARC, (Park, Reinhorn y Kunnath 1987) fue desarrollado para la evaluación de estructuras de hormigón armado utilizando siguiendo e método para la estimación de índices de daño de Park, Ang y Wen (1985). Mediante este programa se puede realizar un análisis inelástico no-lineal y determinar la capacidad de ductilidad y disipación de energía de las estructuras, teniendo en cuenta el acero de refuerzo y el detallado del diseño original. El programa calcula el índice de daño tal como lo expresa la ecuación 5.6.

$$D = \frac{\mathbf{m} + \mathbf{b}(\mathbf{m}_t - 1)}{\mathbf{m}_t} \quad [5.6]$$

donde  $\mathbf{m}$  es la ductilidad máxima alcanzada por el elemento,  $\mathbf{m}_t$  es una medida de la energía disipada por el mismo y  $\mathbf{m}_t$  es la capacidad de ductilidad de la sección. El factor  $\mathbf{b}$

tiene en cuenta el grado de detallamiento dúctil de la sección y es calculado internamente por el programa, el cual adicionalmente calcula el índice de daño global por piso y de la estructura completa, ponderando con base en la energía disipada.

Este índice fue modificado posteriormente por Park, Ang y Wen (1987), por lo cual el planteamiento original de caracterización del daño sufrió algunos ajustes. Dicha caracterización se describe en la tabla 5.2

**Tabla 5.2:** Caracterización del daño para el Índice de Daño de Park, Ang y Wen

Estado de Daño	Índice de Park , Ang y Wen	Descripción del estado de daño
<b>MENOR</b>	$D < 0.1$	Agrietamiento localizado en algunos elementos estructurales.
	$0.1 \leq D < 0.25$	Agrietamiento ligero generalizado en toda la estructura.
<b>MODERADO</b>	$0.25 \leq D < 0.4$	Agrietamiento fuerte y pérdida del recubrimiento localizado en varios elementos estructurales.
<b>SEVERO</b>	$0.4 \leq D < 1.0$	Aplastamiento del concreto y exposición del refuerzo.
<b>COLAPSO</b>	$D \geq 1.0$	Colapso parcial o destrucción total del edificio.

Park, Ang y Wen sugirieron  $D = 0.4$  como el umbral entre daño reparable e irreparable. Ang en 1993 recomendó usar un valor de  $D = 0.8$  para representar el colapso. Este criterio ha sido usado en un amplio número de estudios de vulnerabilidad sísmica y modelos probabilistas. En versiones más recientes de IDARC, se utiliza una versión ligeramente modificada del índice de Park y Ang, similar a la propuesta por Bertero (1993), en la cual la deformación recuperable es removida del primer término y se utiliza el momento y la curvatura en vez de la fuerza y el desplazamiento, tal como lo expresa la ecuación 5.7.

$$D = \frac{\mathbf{f}_m - \mathbf{f}_y}{\mathbf{f}_u - \mathbf{f}_y} + \mathbf{b}_e \frac{\int dE}{M_y \mathbf{d}_u} \quad [5.7]$$

Después de un amplio estudio realizado sobre pilas de puentes, Stone y Taylor (1993), han sugerido para este índice considerar el colapso cuando  $D > 0.77$ .

Al igual que para los edificios, los índices de daño han sido un tema también ampliamente tratado en el campo de los puentes. Para el efecto se han desarrollado metodologías que involucran evaluaciones tanto cuantitativas como cualitativas, con el fin de priorizar o intervenir este tipo de estructuras que se reconoce como línea vital muy importante (Gómez-Seberón *et al.* 1999; Maldonado *et al.* 1999, 2000)

### 5.3.3. Funciones de daño o pérdida

Después de ocurrido un terremoto, en varios lugares del mundo, mediante la evaluación y registro del daño en los edificios ha sido posible proponer funciones que relacionan la severidad del sismo en cada lugar y el daño ocurrido en estructuras de un mismo tipo. Estas relaciones conocidas como funciones de vulnerabilidad empírica u observada expresan los daños o las pérdidas específicas para diferentes valores de amenaza sísmica. Uno de los objetivos de llevar a cabo la evaluación de los daños pos-terremoto mediante un procedimiento unificado ha sido -aparte de contribuir a la decisión de la posible ocupación o uso de los edificios afectados y al registro de los daños- aportar información consistente que contribuya a la obtención de las funciones de vulnerabilidad empírica (Petrovski *et al.* 1984; Milutinoviç y Petrovski 1985a; Coburn y Spence 1992; Spence 1993). La caracterización de los efectos, es decir el daño sísmico, usualmente se ha descrito en términos del costo de reparación, del porcentaje del daño o de un valor que califique el nivel de la pérdida específica. Los tipos de estructuras en general son clases de edificios, por ejemplo edificios de mampostería simple, de mampostería reforzada, pórticos en hormigón armado, etc. con otras posibles subdivisiones tales como: con diafragmas flexibles, con diafragmas rígidos, con muros de cortante, entre otros. También, con el fin de incluir los efectos locales, se han desarrollado funciones de vulnerabilidad para diferentes tipos de suelo, por ejemplo: sobre roca, sobre arcillas volcánicas, sobre suelos aluviales, etc.

Sin embargo, contar con una amplia y confiable base de información estadística no es una tarea fácil, pues se requiere de una cantidad muy notable de datos tanto de la intensidad sísmica y del nivel de daño causado para cada tipo de edificación. Aparte de ello, las tecnologías constructivas no son las mismas en cada país y hacen difícil poder usar información obtenida en terremotos ocurridos en diversos lugares. Por esta razón, también se han desarrollado con diferentes métodos funciones de vulnerabilidad teórica, las cuales han sido obtenidas de la modelación del comportamiento estructural de acuerdo con el estado actual del conocimiento en el tema (Sauter y Shah 1978; Esteva 1982; Steinbrugge 1982; Algermissen 1984; Corsanego 1985; Milutinoviç *et al.* 1985b; Cardona 1986a; Petrovski *et al.* 1990; Spence 1990; Cardona y Meyer 1991; Ordaz *et al.* 1994). Estas funciones, llamadas curvas de pérdidas o de fragilidad han sido, también, el resultado del desarrollo de matrices de daños (Whitman 1973) que proponen valores de probabilidad para cada nivel de daño en cada intensidad y para cada tipo o clase de edificio. Estas matrices se han desarrollado mediante la opinión de expertos utilizando técnicas como el método Delphi (Listone y Turoff 1975; ATC, 1985). Más recientemente, se han propuesto funciones basadas en índices de daños (Barbat 1998), distorsión de piso o deriva (Miranda 1996), u obtenidas mediante técnicas de simulación estocástica que relacionan el daño con la aceleración o el desplazamiento espectral (Singhal y Kiremidjian 1997; FEMA[HAZUS] 1999; Hurtado 1998; Bonett *et al.* 2001).

En evaluaciones pos-terremoto de edificios se han utilizado recientemente diferentes calificaciones de daño. La caracterización utilizada en algunos métodos se presenta en la tabla 5.3. Algunos métodos proponen una calificación del daño basada en los signos visibles del daño en la estructura, como el propuesto por Park, Ang y Wen (1987). Sin embargo, en algunos casos no es claro a qué se refieren con palabras tales como severo o moderado, situaciones que pueden tener diferentes interpretaciones.

**Tabla 5.3:** Caracterización de daño para diferentes métodos de calificación.

<b>Método</b>	<b>Calificación del Daño</b>	<b>Descripción</b>
Park, Ang y Wen (1987)	<b>NINGUNO</b>	Fisuras menores localizadas
	<b>MENOR</b>	Fisuras menores generalizadas
	<b>MODERADO</b>	Agrietamientos localizados en el concreto.
	<b>SEVERO</b>	Aplastamiento del concreto y exposición de las barras de refuerzo
	<b>FUERTE</b>	Colapso total o parcial
Stone y Taylor (1993)	<b>SIN DAÑO O DAÑO MENOR</b>	
	<b>REPARABLE</b>	
	<b>IRREPARABLE</b>	
	<b>COLAPSO</b>	
EERI (1994)	<b>NINGUNO</b>	Sin daño
	<b>LEVE</b>	Daño menor no estructural, el edificio puede abrirse en menos de una semana
	<b>MODERADO</b>	En su mayoría daño no estructural y pocos daños estructurales. El edificio puede ser reabierto en tres meses, se presenta riesgo menor de pérdida de vida para los ocupantes.
	<b>FUERTE</b>	Daño estructural generalizado. El edificio puede estar cerrado por largo tiempo, es posible que sea necesaria su demolición, se presenta un alto riesgo de pérdida de vida para los ocupantes.
	<b>TOTAL</b>	Colapso parcial o total, daño irreparable. Se presenta un riesgo muy alto de pérdida de la vida de los ocupantes.
EERI (1996)	<b>NINGUNO</b>	Sin daño
	<b>LEVE</b>	Solamente daño no estructural, el costo de las reparaciones es menor al 5% del valor de venta del edificio.
	<b>MODERADO</b>	Daño no estructural considerable y daño estructural leve. Los costos de reparación son menores al 25% del valor de venta del edificio.
	<b>FUERTE</b>	Daño estructural considerable, daño no estructural fuerte. Los costos de reparación son menores al 50% del valor de venta del edificio.
	<b>SEVERO</b>	Es más económico demoler que reparar.
	<b>TOTAL</b>	Colapso estructural.

Para mejorar la clasificación, algunos consideran que se podría tener en cuenta el origen del tipo de grieta que se presenta (flexión, cortante, adherencia) y el tamaño de la misma, sin embargo esto puede hacer más compleja la evaluación. Otro tipo de caracterización del daño tiene en cuenta el nivel de reparabilidad de las estructuras (Bracci 1989), (Stone y Taylor 1993). En este tipo clasificación se involucran no solamente factores estructurales o de seguridad, sino también factores de orden económico, relacionados con el costo de reparación. Otras clasificaciones tienen en cuenta el daño sufrido por los elementos no estructurales, la pérdida de funcionalidad y el riesgo para los ocupantes.

La caracterización del daño, obtenido mediante técnicas analíticas o como resultado de la observación de los efectos de los terremotos sobre las estructuras ha contribuido a la calibración de funciones de pérdidas o de vulnerabilidad. Sin embargo, en los últimos años se han diferenciado dos tipos de curvas: de fragilidad y de capacidad.

Las primeras se usan para estimar la probabilidad de alcanzar o exceder estados de daño específicos para un determinado nivel de respuesta sísmica. La probabilidad de alcanzar un estado de daño, mediante esta técnica, se calcula con la diferencia entre las curvas de fragilidad (Kircher *et al.* 1997). Para el desarrollo de estas funciones, normalmente, se ha hecho primero una clasificación de los edificios según su sistema estructural, su uso, altura, etc. En algunos casos, estas funciones predicen el daño en forma separada sobre el sistema estructural, los elementos no estructurales sensibles a inclinaciones (como muros divisorios) y sensibles a la aceleración (como techos suspendidos). En general, para estas funciones se definen cuatro niveles de daño: Leve, Moderado, Fuerte y Total. Por lo tanto, las curvas de fragilidad son, en síntesis, funciones que describen la probabilidad de alcanzar o exceder un nivel de daño estructural o no estructural, dado un valor determinístico de respuesta, como de desplazamiento espectral. Un ejemplo de este tipo de curva se ilustra en la figura 5.2.

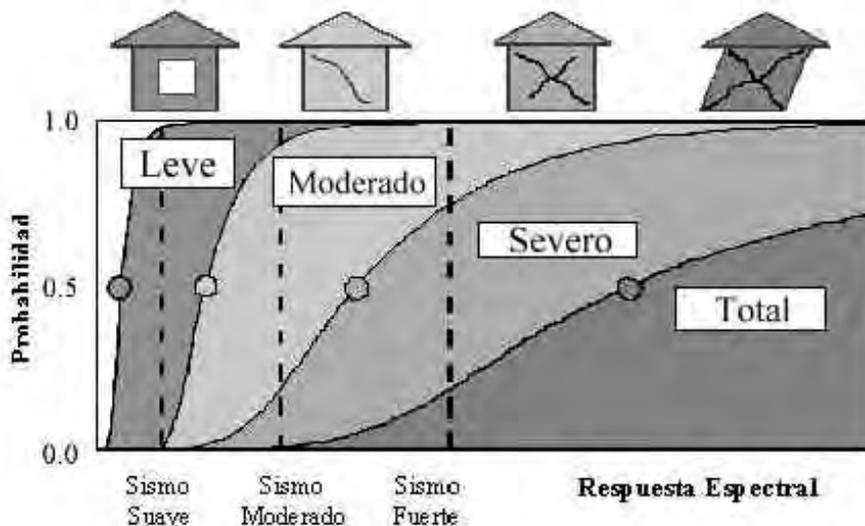


Figura 5.2: Curvas de fragilidad para daño leve, moderado, severo y total (Kircher *et al.*, 1997).

Las segundas se usan para estimar la respuesta de un edificio ante un nivel dado de aceleración espectral o demanda sísmica. Las curvas de capacidad son gráficas de la resistencia a carga lateral del edificio vs. desplazamiento lateral. Mediante este tipo de curvas es posible identificar la capacidad a la fluencia y la capacidad última de una estructura. Existen varias formas de hallar las curvas de capacidad. Una de ellas es el análisis *pushover* o “paso a paso”, en el cual se aplica una carga lateral a la estructura mediante incrementos en forma paulatina. Para cada incremento de carga se determina el desplazamiento, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal, obteniéndose así la curva de capacidad o la relación fuerza-deformación para una estructura. Es decir, la gráfica de la fuerza cortante total y del desplazamiento lateral asociado con cada incremento, hasta que la estructura alcanza el estado límite o condición de colapso. La figura 5.3 ilustra el concepto del “pushover”.

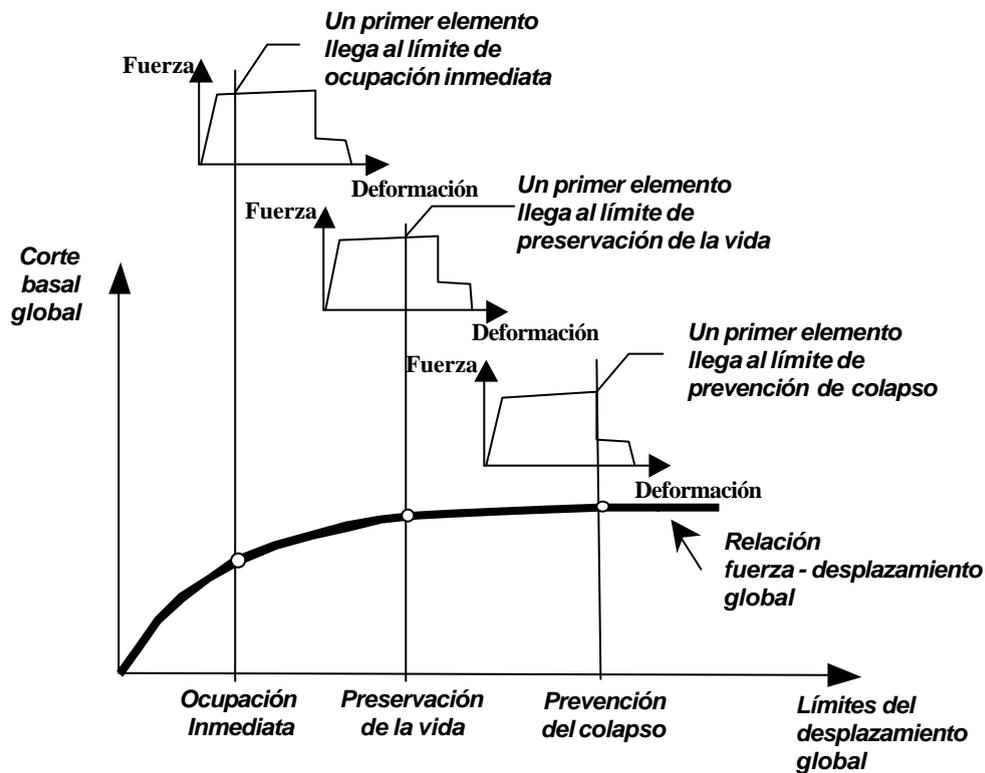


Figura 5.3: Planteamiento conceptual del “pushover” (FEMA, 1997)

De esta manera se pueden identificar las fuerzas o desplazamientos en que se inicia la fluencia e incluso el colapso de la estructura. La respuesta del edificio es determinada por la intersección del espectro de demanda con la curva de capacidad, como se ilustra en la figura 5.4. Un análisis de este tipo permite estimar la respuesta o el daño probable en estructuras existentes o revisar el diseño de edificios nuevos que estarán sometidos a sismos fuertes.

El espectro de demanda se utiliza reducido dado que se espera un aumento del amortiguamiento en la estructura estudiada. En la figura 5.5 se ilustra un ejemplo de los espectros de demanda para diferentes niveles de amortiguamiento de acuerdo con la duración del sismo.

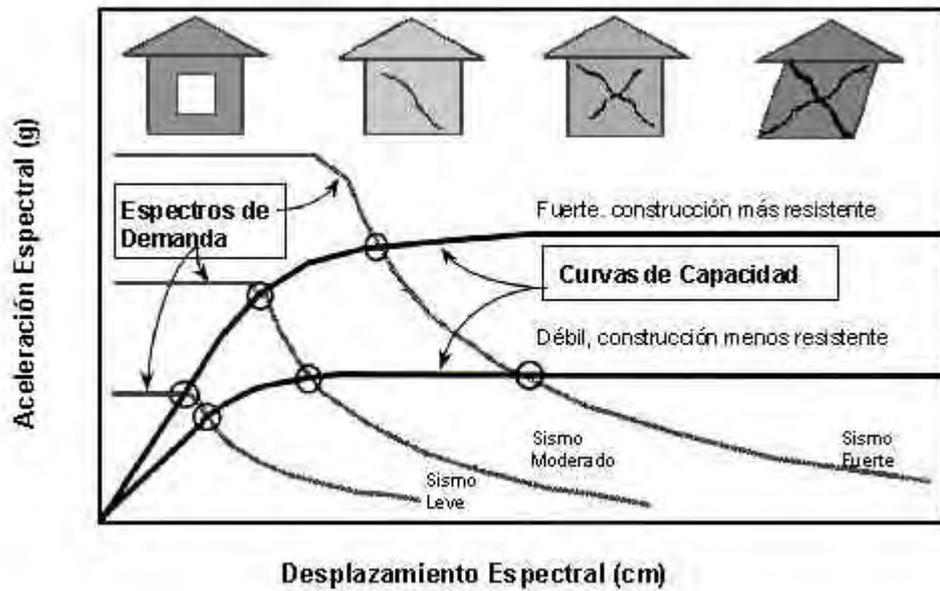


Figura 5.4.: Intersección entre espectros de demanda y curvas de capacidad (Kircher *at al.*, 1997).

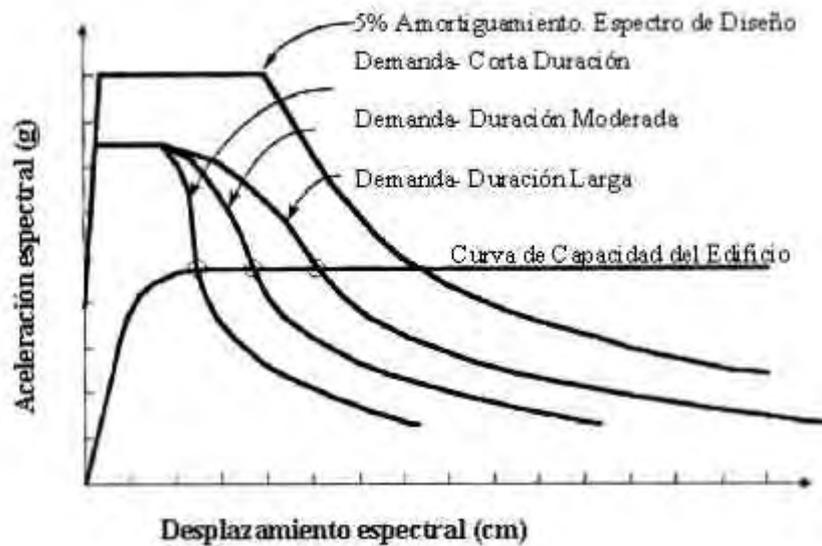


Figura 5.5: Espectros de demanda para diferentes duraciones de sismo (Kircher *at al.* 1997).

#### 5.4. Escenarios riesgo sísmico urbano

Uno de los campos que recientemente ha tomado mayor interés dentro de la ingeniería sísmica mundial ha sido la evaluación anticipada de pérdidas y daños que pueden esperarse de sismos en el futuro, dada la importancia que un análisis de esta naturaleza tiene para una ciudad, una región o un país. Estimar las pérdidas potenciales que puede producir un terremoto es una tarea difícil pero fundamental para estimular y

generar medidas de prevención y mitigación. Un amplio número de métodos ha sido propuesto para estimar pérdidas de futuros terremotos entre los cuales pueden encontrarse inconsistencias significativas. Sin embargo, aunque no es posible predecir actualmente con "precisión" cuándo y dónde va a ocurrir un terremoto, cuántas víctimas causará y qué daños causará en la amplia variedad de edificios de diferentes edades y características, si es posible realizar aproximaciones y estimativos que indiquen la naturaleza y la magnitud del problema que tendrá que afrontar una ciudad o una región, razón por la cual este tipo de estudios se han convertido en ineludibles y necesarios para la planificación en zonas propensas (FEMA, 1989). Estos estudios, conocidos corrientemente como métodos para la evaluación del riesgo sísmico de centros urbanos, consideran diferentes maneras para evaluar la amenaza sísmica y utilizan matrices o funciones de vulnerabilidad empírica o teórica para diversos tipos de edificios y componentes de la infraestructura de una ciudad. En general, las técnicas propuestas para la evaluación de escenarios de riesgo se pueden clasificar en probabilistas y deterministas, dependiendo del enfoque y propósito del estudio.

Para evaluar un escenario de riesgo sísmico urbano por técnicas probabilistas o deterministas, en su orden deben seguirse las siguientes etapas:

- a) Evaluación de la amenaza sísmica a escala global y local.
- b) Identificación de los elementos expuestos o amenazados.
- c) Definición de funciones de vulnerabilidad que relacionen las pérdidas específicas con la amenaza sísmica para los elementos expuestos.
- d) Evaluación de las pérdidas específicas de cada elemento expuesto y determinar su factor de participación en el efecto total de los bienes existentes.
- e) Evaluación de la totalidad del riesgo sísmico para la región considerada.

Los elementos expuestos son el contexto social, material y ambiental representado por las personas y por los recursos y servicios que pueden verse afectados con la ocurrencia de un evento. Corresponden a las actividades humanas, todos los sistemas realizados por el hombre tales como edificios, líneas vitales o infraestructura, centros de producción, servicios, la gente que los utiliza y el medio ambiente. En general, dada la participación de los edificios y de la infraestructura de servicios públicos o líneas vitales en la conformación de los escenarios urbanos, ha sido común que las metodologías solamente consideren para la estimación del riesgo sísmico físico el inventario de edificios y las redes de líneas vitales (Cardona 1986a).

Usualmente, los estudios probabilistas se utilizan para la estimación de pérdidas económicas acumuladas o para el cálculo de la pérdida máxima probable desde la perspectiva de la industria de los seguros. Estos métodos parten de un manejo probabilista de la amenaza sísmica, al igual como se estiman los sismos de diseño para la aplicación de códigos o normas sismorresistentes, e incluso en algunos casos la vulnerabilidad de los edificios también se trata como una variable probabilista, debido a la dispersión que esta variable también puede presentar.

En general, en el enfoque utilizado en los métodos probabilistas la amenaza sísmica  $H$  está definida como una probabilidad de que la intensidad sísmica  $I$  sea excedida en un período de  $T$  años. Bajo el término de intensidad se puede definir, como una medida del fenómeno, cualquier parámetro cualitativo o cuantitativo relacionado con la magnitud  $M$  de los sucesos, tales como la intensidad de la escala modificada de Mercalli, la aceleración pico del suelo, la respuesta espectral, etc. Para un sitio determinado la amenaza es una

función de la sismicidad o probabilidad de ocurrencia  $p(M)$  y de la atenuación o pérdida de la energía sísmica con la distancia  $p(I/M)$

$$H = p(I) = \int p(I/M)p(M)dM \quad [5.8]$$

y el riesgo sísmico específico  $S$  es función de la amenaza sísmica  $H$  y de la vulnerabilidad específica  $p(D/I)$ , que es el nivel de daño  $D$  esperado que puede presentarse sobre una clase de construcción como consecuencia de la manifestación de un evento dado

$$S = p(D) = \int p(D/I)p(I)dI \quad [5.9]$$

Por lo tanto, el riesgo sísmico total  $R$  es la cuantificación de las pérdidas, conocida la vulnerabilidad de todos los tipos de edificios  $p(P/D)$  y el riesgo sísmico específico de cada uno de los tipos individualmente

$$R = p(P) = \int p(P/D)p(D)dD \quad [5.10]$$

$p(P)$ , debe entenderse ampliamente como la cuantificación de las pérdidas o como la cuantificación de la inversión realizada con anterioridad al evento con el fin de mitigar la pérdida total que causaría el desastre (Whitman *et al.* 1973).

En general, se puede adoptar el uso de un índice de vulnerabilidad como un valor simple derivado de un procedimiento eficiente de inspección de los elementos expuestos. En este caso, considerando solamente la intensidad, el daño y el índice de vulnerabilidad, las cuales son variables aleatorias puesto que se pueden considerar continuas en su rango de definición, la probabilidad del daño o pérdida puede expresarse como

$$p(P) = \iiint p(P/V, I)p(V)p(I)dIdVdP \quad [5.11]$$

donde  $p(P)$  es el valor de la distribución acumulada de la pérdida para  $P=P$ ;  $p(P;V,I)$  es la función de densidad condicional del daño bajo el índice de vulnerabilidad y la intensidad; y  $p(V)$  y  $p(I)$  son respectivamente las funciones de densidad para el índice de vulnerabilidad y la intensidad. Estas dos variables son estadísticamente independientes.

Para el desarrollo de mapas que ilustren las probabilidades de daño esperado la ecuación anterior podría discretizarse en diferentes rangos de nivel de daño. La ecuación tendría que ser evaluada para los dos extremos de cada rango utilizando una expresión en forma discretizada mediante el uso de sumatorias

$$p(P_i < P < P_{i+1}) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m p(P_j < P < P_{j+1} / V_j < V < V_{j+1}, I_k < I < I_{k+1}) p(V_j < V < V_{j+1}) p(I_k < I < I_{k+1}) \quad [5.12]$$

Los métodos deterministas se caracterizan, a diferencia de lo anterior, porque el análisis se lleva a cabo para uno o más terremotos específicos, postulados sin considerar en forma explícita la probabilidad con que dichos eventos puedan ocurrir. Comúnmente se utiliza el terremoto más fuerte conocido que haya ocurrido en la región, también llamado máximo terremoto histórico. Esta modalidad se basa en la premisa geológica e intuitiva, bastante convincente, de que si un terremoto ha ocurrido una vez no hay razón para pensar que éste no se presentará de nuevo. Estas técnicas se utilizan de manera

común para evaluar las pérdidas que puede causar un terremoto de una fuente sísmogénica específica, con fines de reducción anticipada de los daños y para la preparación y planificación de la respuesta en caso de emergencia.

#### 5.4.1. Daños en edificios

Una vez estimado el comportamiento de varios tipos de estructuras expuestas a diferentes intensidades de excitación del suelo puede realizarse un pronóstico de los daños esperados que pueden ocurrir en tales estructuras en futuros eventos. Por esta razón las funciones de vulnerabilidad derivadas para la estimación de las pérdidas específicas de los elementos expuestos pueden utilizarse como información básica para la evaluación del riesgo desde una perspectiva del daño físico potencial, pues conocida la amenaza sísmica y la vulnerabilidad de las estructuras por convolución de estas dos variables se puede estimar el riesgo sísmico en términos físicos.

Una de las metodologías más ampliamente conocidas y sencillas ha sido el ATC-13 (ATC 1985), la cual se basó en el enfoque originalmente propuesto por Whitman (1973). Esta metodología consiste en una serie de matrices de probabilidad de daño obtenidas mediante el método Delphi. Cada especialista, con base en sus observaciones empíricas o de sus apreciaciones obtenidas de relacionar la demanda contra la capacidad en términos de rigidez, resistencia y disipación de energía, participó aportando su experiencia y conocimientos. Los estados de daño usados por esta metodología se presentan en la tabla 5.3.

**Tabla 5.4:** Estados de daño según ATC-13

<b>Caracterización de Daño</b>	<b>Rango de Daño %</b>	<b>Índice de Daño</b>	<b>Descripción</b>
<b>NINGUNO</b>	0	0	Sin daño
<b>LEVE</b>	(0-1)	0.5	Daño mínimo que no requiere reparación.
<b>LIGERO</b>	(1-10)	5	Daño menor localizado en algunos elementos que no requiere siempre reparación.
<b>MODERADO</b>	(10-30)	20	Daño menor localizado en muchos elementos que debe ser reparado.
<b>FUERTE</b>	(30-60)	45	Daño extensivo que requiere reparaciones mayores.
<b>SEVERO</b>	(60-100)	80	Daño grave generalizado que puede significar demolición de la estructura.
<b>DESTRUCCIÓN</b>	100	100	Destrucción total o colapso.

Ahora bien, 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 (Whitman 1976). 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. Por otra parte, la información histórica no siempre es muy confiable debido a la falta de buenos inventarios de daños. La baja frecuencia de sucesos en un área hace que la información de daños en las construcciones sea escasa y que sea difícil hacer estimaciones adecuadas de la intensidad de eventos pasados.

En lo posible la determinación de las matrices de vulnerabilidad debería realizarse en términos probabilistas, debido a las incertidumbres y la aleatoriedad inherente de factores como la energía y el contenido frecuencial del movimiento del suelo, la duración de la fase fuerte, la evolución no estacionaria de las señales, entre otros. También hay que tener en cuenta la diversidad de los tipos de estructuras y de los parámetros mecánicos de los modelos estructurales (resistencia, rigidez, ductilidad, etc.). 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 son más que otra aplicación del denominado método de Monte Carlo. Por este camino han seguido algunos investigadores recientemente (Barbat *et al.* 1996; Singhal y Kiremidjian 1996; Abrams y Shinozuka 1998) 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 urbanas. Una técnica de este tipo propuesta por Cardona y Hurtado (2000b), que utiliza la simulación de Monte Carlo, sigue los siguientes pasos con el fin de generar funciones de vulnerabilidad para edificios:

- a) Selección de los modelos representativos de construcciones de los diferentes períodos de urbanización en área considerada y determinación de su ubicación geográfica.
- b) Definición estocástica del modelo estructural mediante la selección de variables aleatorias que afectan su comportamiento estructural en caso de sismo y por lo tanto la asignación de sus funciones de densidad de probabilidad. Esta tarea se facilita por la disponibilidad de información estadística acerca de los materiales de construcción como el hormigón, el acero, la madera, entre otros (Sundararajan, 1995).
- c) Generación de muestras aleatorias de cada variable (Rubinstein 1981) y combinación de las mismas usando técnicas eficientes, como el Latin Hypercubo, el Muestreo Descriptivo, etc. (Hurtado y Barbat 1998).
- d) Definición estocástica del movimiento del suelo, el cual idealmente debe ser modelado como un proceso aleatorio evolutivo a partir de un espectro estacionario de potencia o un espectro de respuesta objetivo (Vanmarcke 1976). Esta última alternativa puede ser seguida con el fin de preservar la coherencia con estudios de microzonificación sísmica ya elaborados. El cálculo de los acelerogramas asociados a cada fila de la matriz de variaciones aleatorias (Latin Hypercubo) puede realizarse con técnicas actualmente bien conocidas (Shinozuka 1987). Por ejemplo, el espectro evolutivo propuesto por Yeh y Wen (1989), dado por la ecuación 5.13

$$G(\mathbf{w}, t) = \frac{a^2(t)}{f'(t)} H\left(\frac{\mathbf{w}}{f'(t)}\right) \quad [5.13]$$

donde  $H(\cdot)$  es una densidad espectral de potencia del proceso estacionario subyacente,  $a(t)$  es una función de modulación de amplitudes y  $f(t)$  es una función de modulación de frecuencias en unidades de tiempo, que se obtiene de acelerogramas registrados en el área de interés. Finalmente,  $\omega$  es la frecuencia angular y la prima denota la derivada con respecto al tiempo.

- e) Análisis no lineal estructural de varios modelos aleatorios, con el fin de determinar el daño estructural. Por ejemplo, utilizando el índice propuesto por Park and Ang (1985) para el caso de edificios de hormigón armado. En el caso de un elemento  $i$  de hormigón el índice está definido por la ecuación 5.14

$$d_i = \frac{e}{m} + \frac{z}{Fm} \int dE \Big|_i \quad [5.14]$$

donde  $e$  y  $m$  son la deformación última bajo sismo y cargas monotónicas, respectivamente,  $F$  es la resistencia de fluencia,  $E$  es la energía disipada y  $z$  es un factor empírico. El índice de daño estructural para el edificio completo esta dado por la ecuación 5.15

$$D = \frac{\sum d_i E_i}{\sum E_i} \quad [5.15]$$

donde la sumatoria se realiza en todos los entrepisos del edificio.

- d) Análisis estadístico de los resultados. En particular, es importante construir funciones bien definidas de distribución de probabilidades del índice de daño global del edificio, correspondiente a cada nivel de amenaza, para cada clase de edificio.
- e) Categorización del índice de daño estructural, con el fin de expresar el grado de pérdidas en los edificios, incluyendo sus elementos estructurales y no-estructurales. Por ejemplo, como lo presenta la tabla 5.4 (Singhal and Kiremidjian, 1996):

**Tabla 5.5:** Niveles de daño según valor de índice

Nivel de Daño	Rango de $D$
Bajo	0.1 a 0.2
Medio	0.2 a 0.5
Severo	0.5 a 1.0
Colapso	> 1.0

Desde el punto de vista del procesamiento electrónico el método de Monte Carlo ha sido una técnica costosa, por lo que ha sido usual que para el análisis probabilista de estructuras se utilice sólo como una técnica de fuerza bruta con el propósito de verificar la precisión de otras técnicas menos costosas. Sin embargo, la aplicación del método de Monte Carlo actualmente se facilita por el progreso de la computación paralela. De hecho, este método es intrínsecamente paralelo y modelos aleatorios diferentes pueden calcularse en equipos independientes (a esto se le denomina paralelismo *coarse-grain*) bajo el control de un nodo maestro, el cual realiza la generación de variables aleatorias, ordena los procesos y lleva a cabo la evaluación estadística final.

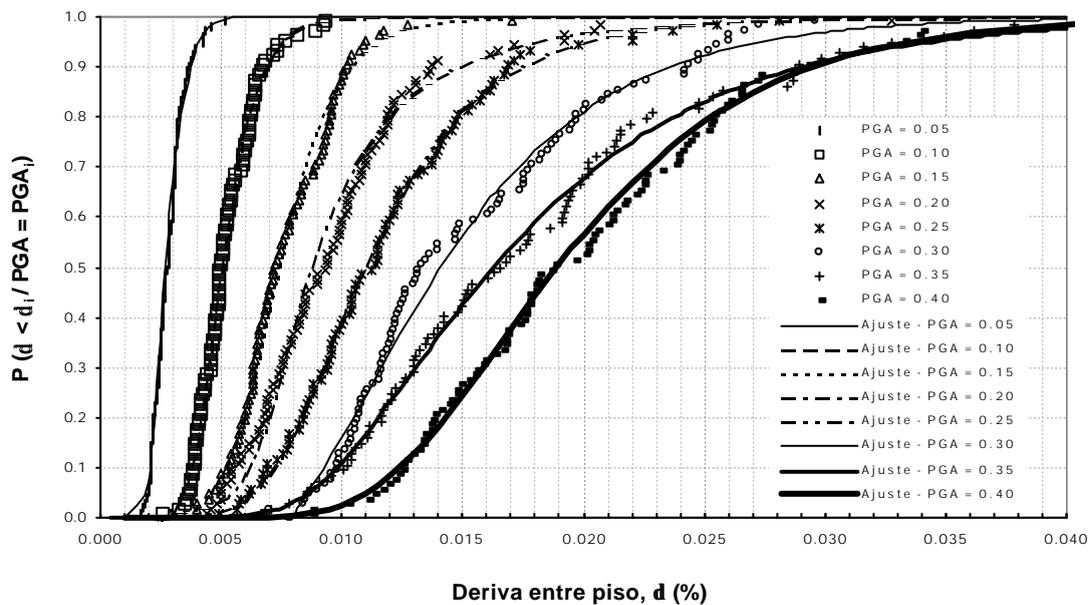
Un ejemplo de aplicación de esta metodología es el realizado por Bonett *et al.* (2001). Para este caso las curvas de fragilidad para el daño global estructural se realizaron utilizando la deriva máxima de entrepiso. La elección de éste parámetro se debe al interés de poder interpretar las curvas de acuerdo con los umbrales definidos en

la metodología HAZUS (FEMA 1999) para los diferentes niveles de daño: leve, moderado, severo y colapso. Estos niveles permiten asociar un valor máximo de la deriva entre pisos con una descripción cualitativa del daño, para un modelo estructural dado, y sus valores dependen a su vez del nivel de diseño sísmico utilizado. En este caso, el modelo identificado fue el CIM (Estructura de hormigón armado de elevación media) según la clasificación del HAZUS. Estos valores dependen a su vez del nivel de diseño sísmico utilizado, por lo cual, se eligieron para efectos de comparación los niveles “Pre-code” y “Moderate” por su correspondencia con el modelo antes y después del código Colombiano, respectivamente. Los valores se indican en la tabla 5.5.

**Tabla 5.6:** Definición de niveles de daño según deriva

Niveles de Daño	Valor de la deriva $d$ en el umbral del nivel de daño	
	Pre-Norma	Pos-Norma
Leve	0.0027	0.0033
Moderado	0.0043	0.0058
Severo	0.0107	0.0156
Colapso	0.0267	0.0400

La figura 5.6 muestra los valores de la deriva máxima obtenidos a partir del análisis dinámico no lineal utilizando el programa IDARC-2D y las funciones de distribución ajustadas para cada una de las aceleraciones definidas.



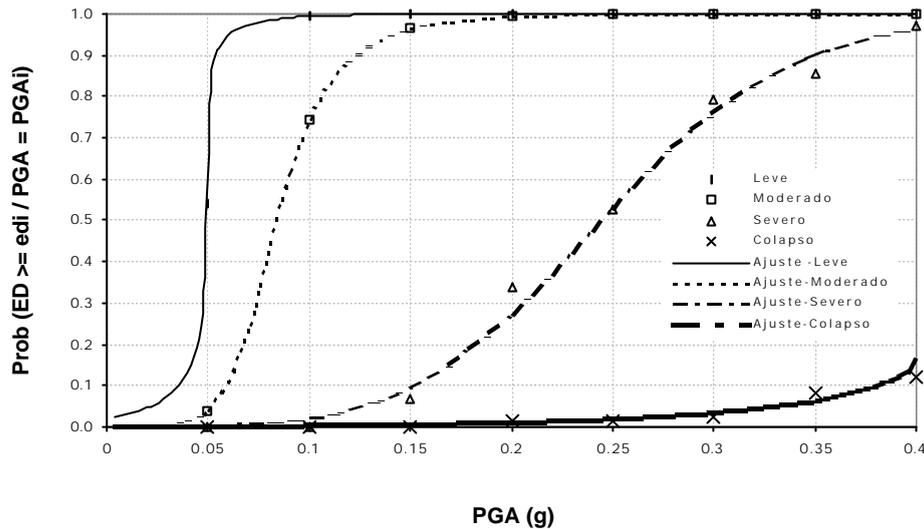
**Figura 5.6 :** Funciones de distribución de probabilidad ajustadas para una estructura de 5 pisos, diseñada antes de la primera normativa Colombiana.

Para el cálculo de 100 modelos por cada curva se usó el programa PROMENVIR (CASA 1997), desarrollado para realizar simulaciones de Monte Carlo de un sistema cualquiera en paralelo, lo que permitió un ahorro notable de tiempo computacional. Para cada una de las estructuras consideradas, se definió un grupo de curvas de fragilidad para cada estado discreto de daño (Figuras 5.7 y 5.8). De esta forma, un

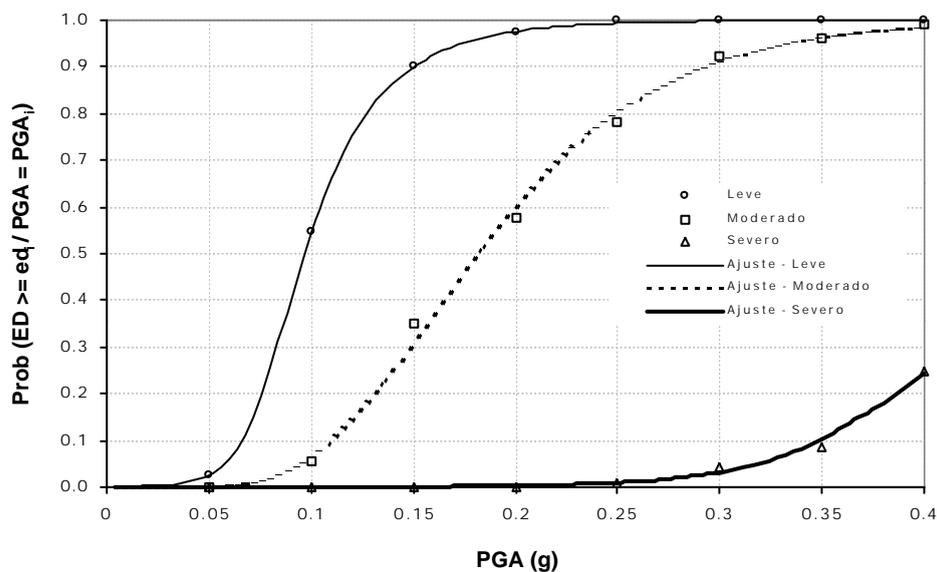
punto sobre una curva dada, está definido como la probabilidad condicional que el daño debido a un sismo de cierta aceleración exceda el estado de daño  $i$ , esto es:

$$FD = P[ED \geq ed_i / PGA = PGA_i]$$

$FD$  es la probabilidad que el daño causado por el sismo con aceleración  $PGA_i$  sea mayor que el estado de daño  $i$ ,  $ED$  es el estado de daño causado por el sismo con aceleración  $PGA_i$ ,  $ed_i$  es el estado de daño global  $i$ .



**Figura 5.7:** Curvas de fragilidad simuladas y ajustadas para una estructura de 5 pisos diseñada antes de la primera normativa Colombiana y para una aceleración pico efectiva  $PGA$ , en el rango 0.05 - 0.4 g.



**Figura 5.8:** Curvas de fragilidad simuladas y ajustadas para la estructura de 5 pisos diseñada con la normativa Colombiana y con una aceleración pico efectiva  $PGA$ , en el rango 0.05 - 0.4 g.

Este ejemplo ilustra el tipo de formato de curvas de vulnerabilidad o fragilidad que actualmente se utiliza, cada vez con mayor frecuencia, para el estudio de la vulnerabilidad sísmica. Metodologías como la propuesta en HAZUS y técnicas como la descrita previamente prometen resultados más refinados para los tipos o clases de edificios que se propongan en diferentes lugares del mundo, contribuyendo a la realización de estudios de riesgo sísmico más depurados en términos físicos.

#### 5.4.2 Daños en líneas vitales

Las líneas vitales son sistemas complejos cuya función es la distribución de recursos, el transporte de personas y bienes, así como la transmisión de información. Hasta hace poco tiempo los efectos de los sismos sobre las líneas vitales sólo se tenían en cuenta en el diseño de algunos de sus componentes. Sin embargo, las prácticas de la ingeniería han venido cambiando de manera paulatina en la medida que el comportamiento de estos sistemas se ha convertido en una preocupación desde el punto de vista del diseño sísmico, la planificación de emergencias y la necesidad de una rápida recuperación después de un sismo.

Los informes de daños posterremoto han proporcionado la mayor parte de la información existente sobre la gravedad y extensión de los daños, la paralización de los servicios y las reparaciones que son necesarias. Estos informes también han sugerido de forma indirecta la manera se puede reducir el riesgo de paralización de los servicios, a través de la planificación de emergencias y la rehabilitación posdesastre de los mismos.

En general las líneas vitales corresponden a la infraestructura de servicios públicos, que se considera básica o esencial. Una clasificación amplia de esta infraestructura es la siguiente:

- a) Energía: presas, subestaciones, líneas de fluido eléctrico, plantas de almacenamiento de combustibles, oleoductos, gasoductos.
- b) Transporte: redes viales, puentes, terminales de transporte, aeropuertos, puertos fluviales y marítimos.
- c) Agua: plantas de tratamiento, acueductos, alcantarillados, canales de irrigación y conducción.
- d) Comunicaciones: redes y plantas telefónicas, estaciones de radio y televisión, oficinas de correo e información pública.

Las líneas vitales tienen algunas características que las distinguen. A diferencia de un edificio, usualmente pueden extenderse a lo largo de muchos kilómetros y con frecuencia se localizan sobre zonas delimitadas por ley. Muchas de ellas están interconectadas y por lo general hacen parte de redes que se extienden sobre grandes áreas. El comportamiento en un sitio de la red puede estar influenciado en gran medida por las alteraciones que puedan ocurrir en otro sitio distante. Por lo tanto, las líneas vitales pueden ser afectadas de manera diferencial de acuerdo con las propiedades dinámicas del suelo y el basamento, que pueden ser muy diferentes de un sitio a otro. Estos sistemas también normalmente son interdependientes, es decir, que la pérdida de operación en uno de ellos puede afectar la operación de otro. La ruptura de las líneas de combustible, por ejemplo, puede causar incendios, y esto debe ser considerado a la hora de analizar las redes de distribución de agua. Las roturas simultáneas de las líneas de agua y desagüe pueden contaminar el agua potable. La interrupción de la energía eléctrica puede afectar las estaciones de bombeo de agua, limitando por consiguiente la

disponibilidad de agua y sobrecargando el sistema de transporte para atender las reparaciones de emergencia.

Para evaluar el funcionamiento de las líneas vitales es necesario definir algunos parámetros que relacionen el nivel de operación de la red en un determinado momento con una de sus características medibles. En ese sentido, por ejemplo, la teoría de redes se perfila como una técnica que puede facilitar la definición de algunas medidas cuantitativas para la evaluación de su nivel de funcionamiento: conectividad, flujo máximo, operatividad, porcentaje de la población servida y pérdidas económicas (ASCE, 1983/86/90; Cardona, 1993d).

Los modelos más elaborados de vulnerabilidad sísmica de líneas vitales relacionan la probabilidad acumulada de falla con la intensidad del sismo. Dichos modelos pueden reflejar los efectos de la amenaza sísmica que contribuyen más al daño de un componente (Yamín y Caicedo 1999). En general, se ha podido observar que componentes localizados sobre la superficie del suelo tienden a ser más vulnerables a los efectos vibratorios de los sismos, mientras que los componentes que se encuentran enterrados tienden a ser más vulnerables al desplazamiento permanente o deformación excesiva del suelo.

La ingeniería sísmica ha realizado progresos significativos en la estimación anticipada de daños en las líneas vitales con fines de reducción de riesgos. Ya en algunos casos se han tomado medidas concretas para reducir los daños potenciales, mediante la aplicación de soluciones convencionales de ingeniería o el buen juicio, aun cuando no se tengan evaluaciones detalladas o rigurosas de su vulnerabilidad. Sin embargo, es necesario que se realicen más investigaciones e innovaciones tecnológicas que permitan optimizar el diseño, la mitigación de los daños y refuerzo sísmico de las líneas vitales existentes.

Un estudio de carácter intermedio, cuando no se cuenta con información detallada de la microzonificación sísmica de una ciudad, sería el utilizar sismos hipotéticos factibles para determinar los niveles de intensidad equivalente del sismo máximo probable para efectos de diseño. Esta técnica permite dimensionar el orden de magnitud del problema que se presentaría, por lo tanto no significa un pronóstico preciso de los daños que podrían ocurrir, como se lograría con estudios detallados, pero sería un estudio de máxima utilidad para estimar el escenario de daños potenciales sobre la red. Una de estas técnicas es la propuesta por el ATC-13 (1985). El daño se evalúa por el número de rupturas por kilómetro para el caso de tuberías enterradas o por metros de líneas de energía caídas. El daño se relaciona con la intensidad sísmica esperada en cada uno de los tramos de la red. El concepto de "matriz de daño" es fundamental para el cálculo de la vulnerabilidad. Las matrices de daño, al igual que en el caso de los edificios, relacionan el nivel de daño (por ejemplo: leve, moderado, alto) con su probabilidad de ocurrencia para diferentes niveles de intensidad del suceso sísmico. La probabilidad de ocurrencia se calcula con base en la opinión de expertos. En la tabla 5.5 se presenta una matriz de daño típica.

La tabla del Estado de Daño relaciona una descripción lingüística del daño con el valor de la pérdida económica esperada. Las matrices de daño calibradas mediante la consulta de expertos se combinan con las de intensidad sísmica esperada para determinar la distribución de daños en una ciudad. Las matrices de daño más conocidas han sido las propuestas en el ATC-13 (1985), que posteriormente fueron modificadas de acuerdo con los procedimientos descritos en el ATC-25 (1991), dependiendo de la edad, el mantenimiento, la calidad de los materiales y la calidad de la construcción.

**Tabla 5.7:** Matriz de daño para líneas de distribución (# 55 ATC-13)

FACTOR CENTRAL DE DAÑO	INTENSIDAD MMI						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0.00	94.10	6.90	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	5.90	78.80	51.00	2.90	0.00	0.00	0.00
5.00	0.00	14.30	48.00	96.30	63.70	10.60	0.50
20.00	0.00	0.00	0.00	0.80	36.30	82.70	39.00
45.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.70	59.20
80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.30
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FACTOR DE DAÑO MEDIO	0.03	1.11	2.66	4.99	10.45	20.09	35.51

Más recientemente nuevos enfoques se han desarrollado dentro de los cuales se puede destacar la metodología HAZUS que promueve FEMA (1999) en los Estados Unidos. También, con la misma orientación en Europa se adelanta un proyecto con alcances similares apoyado por la Unión Europea que se le ha denominado Risk-EU.



## Capítulo 6

# Vulnerabilidad y el riesgo desde una perspectiva holística

### 6.1. Propuesta conceptual

El riesgo es un concepto complejo y extraño, representa algo que parece irreal e inasible, que se ubica en un tiempo futuro como consecuencia de estar siempre relacionado con azar, con posibilidades, con algo que aun no ha sucedido t que puede no suceder. Su sentido tiene que ver con algo imaginario, algo escurridizo que se sitúa necesariamente en el futuro, con la carga de incertidumbre que ello implica. Si hay certeza no hay riesgo, así, el riesgo es algo en la mente, íntimamente ligado a la psicología personal o colectiva, aun cuando se intente a menudo darle un sentido de objetividad (Elms 1992). Otra razón por la cual el riesgo es un concepto complejo, es que se trata de una idea compuesta. En la noción de riesgo más completa, desde el punto de vista del autor, convergen simultáneamente tres aspectos separados: la eventualidad, las consecuencias y el contexto, que contribuyen a la hora de intentar llevar a cabo cualquier estimación o calificación del riesgo. En un análisis de riesgo, el contexto (capacidad de la gestión y actores relacionados) determina los límites, las razones, el propósito y las interacciones a considerar. Cualquier análisis que se realice debe ser congruente con el contexto y tenerlo en cuenta en todos los aspectos que le sean relevantes, de lo contrario el análisis sería totalmente inútil e irrelevante.

El análisis de riesgo se ha venido realizando a través de la historia de manera no formal en innumerables situaciones humanas. Riesgo ha estado siempre asociado a decisión, con algo que debe hacerse; con la ejecución de una acción que va desde lo trivial a lo muy importante. En cada caso se debe elegir una acción que se debe llevar a cabo. Los resultados de cada acción factible están en el futuro y son inciertos. Unos resultados pueden ser mejores que otros, en algunos casos serán buenos y en otros pueden ser desastrosos. El seleccionar una posible acción significa asumir una eventual adversidad o contingencia asociada a dicha acción. Por esta razón, el riesgo debe evaluarse para que se pueda tomar una decisión. Las discusiones acerca del riesgo tocan las raíces de la sociedad, el conocimiento, los valores, las emociones e incluso la propia existencia. Implican reflexionar acerca de qué es el conocimiento científico, de las limitaciones de ese conocimiento y del carácter irreductible de la incertidumbre; es preciso considerar los puntos de vista desde donde se argumenta, la racionalidad de qué

es a lo que se teme y la manera cómo se debe actuar. El tener que arreglarse con incertidumbres en el análisis de sistemas físicos llega a ser una de las circunstancias que define enfáticamente si un modelo dado es el apropiado para el problema que se tiene entre manos. Esto significa mudarse del concepto de verdad al concepto de control o de gestión, alejándose de la necesidad de obtener predicciones verdaderas de futuros escenarios, con o sin la estimación de incertidumbres, y moverse hacia la necesidad de controlar los futuros eventos, aceptando las inevitables contingencias en el entendimiento de que algo podría o no ocurrir. Esto está, obviamente, relacionado en forma directa con las conclusiones que se obtienen acerca de factores humanos. Por lo tanto, aunque la ciencia de la ingeniería pueda hacer algunas predicciones acerca de un riesgo, dichas predicciones serán inevitablemente parciales e incompletas y en consecuencia el énfasis debe estar en la gestión o manejo de la seguridad (Blockley 1992).

En los últimos años, 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 y en un tiempo determinado. Sin embargo, el riesgo no ha sido conceptualizado de forma integral sino de manera 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 multidisciplinar, 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 la susceptibilidad física de los elementos expuestos a ser afectados, sino también con las fragilidades sociales y la falta de resiliencia de la comunidad propensa; es decir, su capacidad para responder o absorber el impacto. La deficiente información, comunicación y conocimiento entre los actores sociales, la ausencia de organización institucional y comunitaria, las debilidades en la preparación para la atención de emergencias, la inestabilidad política y la falta de salud económica en 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 mismo respecto del área geográfica considerada.

Por otra parte, existen serias razones por las cuales se puede dudar acerca de la efectividad de la gestión del riesgo. El incremento y la acumulación de la vulnerabilidad son alarmantes, como lo es la falta de conciencia y responsabilidad sobre el tema por parte de los tomadores de decisiones, las autoridades políticas y la misma comunidad. Esto podría explicar el porqué aunque se realicen muchos estudios de amenaza, vulnerabilidad e incluso de riesgo desde el ámbito de diferentes disciplinas, en muchos lugares del mundo no se logra aun una intervención y gestión efectiva y decidida por parte de las autoridades y las comunidades que mitigue o reduzca el riesgo al cual se encuentran sometidas (Cardona y Hurtado 2000a/b).

Entre otros factores, que contribuyen a esta falta de efectividad de la gestión del riesgo, aparentemente, se encuentra la inadecuada forma como el riesgo ha sido estimado o valorado. Aportes técnicos importantes se han realizado con fines de evaluación, pero de manera reduccionista y fragmentada. La falta de una visión holística del riesgo, es decir, de una valoración integral y multidisciplinar del riesgo que permita

desagregarlo en sus componentes de diferente índole, parece haber contribuido en buena parte a la falta de efectividad de su gestión.

Una concepción holística del riesgo, consistente y coherente, fundamentada en los planteamientos teóricos de la complejidad, que tenga en cuenta no sólo variables geológicas y estructurales, sino también variables económicas, sociales, políticas, culturales o de otro tipo, podría facilitar y orientar la toma de decisiones en un área geográfica. Un enfoque de este tipo, integral y multidisciplinar podría tener en cuenta de manera más consistente las relaciones no lineales de los parámetros del contexto y la complejidad y dinámica de los sistemas sociales. Igualmente, contribuir a mejorar la efectividad de la gestión y a identificar y priorizar medidas factibles y eficientes de para la reducción del riesgo por parte de las autoridades y las comunidades; actores fundamentales para lograr una actitud preventiva ante los fenómenos peligrosos.

### 6.1.1. Dimensiones y tipos de vulnerabilidad

La vulnerabilidad, para el autor, puede tener varias dimensiones dependiendo del aspecto que se esté teniendo en cuenta para su análisis. Wilches-Chaux (1989) propuso el concepto de vulnerabilidad global para integrar los diferentes aspectos que caracterizan la vulnerabilidad desde varias perspectivas. Dichas dimensiones de la vulnerabilidad se describen a continuación brevemente:

- a) *Dimensión física*. Expresa las características de ubicación en áreas propensas y las deficiencias de resistencia de los elementos expuestos, de los que depende su capacidad de absorber la acción del suceso que representa la amenaza. La sismorresistencia de un edificio, la ubicación de una comunidad en el área de influencia de un deslizamiento o en el cauce de un río, son ejemplos de la dimensión física de la vulnerabilidad.



**Foto 6.1:** A la izquierda se aprecia un edificio nuevo en Colombia, construido por profesionales, que ha colapsado y a la derecha una casa informal sin mayores daños. En este caso, el edificio nuevo demostró ser más vulnerable que el informal.

- b) *Dimensión económica.* Los sectores económicamente más deprimidos son los más vulnerables. La pobreza aumenta la vulnerabilidad. Al nivel local e individual este aspecto se expresa en desempleo, insuficiencia de ingresos, dificultad o imposibilidad de acceso a los servicios. En la esfera nacional se traduce en una excesiva dependencia económica de factores externos incontrolables, la falta de diversificación de la base económica, las restricciones al comercio internacional y la imposición de políticas monetarias.
- c) *Dimensión social.* Cuanto más integrada esté una comunidad, superando los inconvenientes que suelen presentarse, le resultará más fácil absorber las consecuencias de un desastre y podrá reaccionar con mayor rapidez que una comunidad que no lo esté. Las sociedades pueden ser más o menos vulnerables en el sentido que pueden reaccionar como grupo organizado, mediante procesos de autoorganización, ó con intereses particulares primando sobre los grupales, con relaciones más estrechas entre sus integrantes, ó relaciones meramente circunstanciales.
- d) *Dimensión educativa.* Se expresa en una educación deficiente o que no tiene una buena cobertura en una comunidad propensa. La ausencia de conocimiento sobre las causas, los efectos y las razones por las cuales se presentan desastres, el desconocimiento de la historia y la falta de preparación y desconocimiento del comportamiento individual y colectivo en caso de desastre son aspectos que hacen que una comunidad sea más vulnerable. Igualmente, la falta de socialización de la información aumenta la vulnerabilidad.
- e) *Dimensión política.* Se expresa en el nivel de autonomía que tiene una comunidad con respecto a sus recursos y para la toma de decisiones que la afectan. La comunidad se hace más vulnerable bajo esquemas centralistas en la toma de decisiones y en la organización gubernamental. La debilidad en los niveles de autonomía para decidir regional o localmente impide una mayor adecuación de las acciones a los problemas sentidos en estos niveles territoriales. En la medida que la comunidad participa más en las decisiones que le atañen es menos vulnerable.
- f) *Dimensión institucional.* Esta relacionada con las dificultades que tienen las instituciones para hacer la gestión del riesgo. Situación que se refleja en la falta de preparación para responder ante un suceso, o cuando aún sabiendo que existe el riesgo no llevan a cabo acciones eficientes y efectivas para reducirlo o mitigarlo. Se expresa en la falta de flexibilidad de las instituciones, en el exceso de burocracia, en el hecho de que prevalecen la decisión política y el protagonismo.
- g) *Dimensión cultural.* Esta dimensión de la vulnerabilidad está referida a la forma en que los individuos se ven a sí mismos en la sociedad y como colectividad, lo que influye en ocasiones de manera negativa debido a estereotipos perniciosos que no se cuestionan y que se consolidan. Al respecto juegan un papel crucial los medios de comunicación, puesto que contribuyen a la utilización sesgada de imágenes o a la transmisión de información ligera o imprecisa sobre el medio ambiente, la misma sociedad y los desastres.
- h) *Dimensión ambiental.* Hay un aumento de la vulnerabilidad cuando el modelo de desarrollo no está basado en la convivencia sino en la explotación inadecuada y la destrucción de los recursos naturales. Esta circunstancia necesariamente conduce al

deterioro de los ecosistemas y a aumentar la vulnerabilidad debido a la incapacidad de auto ajustarse para compensar los efectos directos o indirectos de la acción humana o de sucesos de la misma naturaleza.

- i) Dimensión ideológica. Esta relacionada con las ideas o creencias que tienen las personas sobre el devenir y los hechos del mundo. Se expresa en actitudes pasivas, fatalistas y creencias religiosas que limitan la capacidad de actuar de los individuos en ciertas circunstancias. La percepción dogmática de las cosas puede generar confusión acerca de un propósito, falta de reacción y muchas veces pérdida de la motivación, que debilitan una acción transformadora.

El planteamiento de una vulnerabilidad global resultado de estas y otras dimensiones de la vulnerabilidad, que Wilches-Chaux (1989) describe como vulnerabilidades individuales, es muy útil para visualizar la vulnerabilidad desde múltiples facetas y desde diversas perspectivas del conocimiento. Este planteamiento facilita el entendimiento de la vulnerabilidad como una condición o circunstancia dinámica o cambiante. Además, permite su formulación como un proceso acumulativo de fragilidades, deficiencias o limitaciones que permanecen en el tiempo como factores que inciden en que exista o no una mayor o menor vulnerabilidad. Desde el punto de vista de la gestión del riesgo, las acciones que reduzcan estos factores y que estimulen las fortalezas y capacidades de una comunidad, entendida como los elementos expuestos, deben ser el objetivo de la planificación y la prevención-mitigación (Aysan 1993).

Esta lectura de la vulnerabilidad es de alguna manera compatible con los postulados de Anderson y Woodrow (1989) que plantean la vulnerabilidad integrada por una serie de aspectos que a largo plazo afectan la capacidad de la comunidad para responder a sucesos y la hacen susceptible a sufrir futuras consecuencias. Dichos aspectos tienen carácter:

- a) Físico-material, relacionados con el medio ambiente, la infraestructura, la vivienda, la tecnología, el capital, el nivel de salud y la capacidad de trabajo.
- b) Social-organizacional, relativos a las actividades sociales y económicas y a las estructuras políticas formales u otras mediante las cuales se toman decisiones.
- c) De motivación y actitud, lo que se refiere a la concepción que tienen las comunidades de ellas mismas y sus interrelaciones con el ambiente y la sociedad.

Por otra parte, Cannon (1991) también propuso que la vulnerabilidad debe verse como un conjunto de variables que se refieren a tres tipos de situaciones:

- a) Vulnerabilidad de los sistemas de vida, que explica cómo un sistema de vida de una colectividad o un individuo se hace más resistente o más resiliente a las amenazas, por ejemplo mediante un mayor nivel de salud y nutrición, mediante mayores ingresos y ahorros que le permitan una mayor capacidad de adaptación.
- b) Autoprotección, relacionada con el nivel de conciencia acerca de la amenaza y con la experiencia de sucesos anteriores. Es decir el nivel de preparación del individuo o la colectividad para enfrentar una amenaza, lo que se refleja en la ubicación de la vivienda, la resistencia de los edificios, la construcción de obras preventivas, etc.
- c) Protección social, referida no sólo al nivel local sino en general a la acción del Estado en todo sus niveles, que influyen tanto en la autoprotección, la resistencia de

los sistemas de vida como en factores tales como las normas de construcción, el ordenamiento territorial, los esquemas de seguros, etc.

Estos aspectos ligados a las características de los individuos y su composición por clase, etnia, género, edad y sistema político componen la vulnerabilidad desde una perspectiva fundamentalmente social.

En todos los casos, estos conceptos descansan sobre los enfoques de la Ecología Humana, propuestos en el campo de la geografía, en la Universidad de Chicago, por Gilbert White, Burton y Kates. Estos autores plantearon el concepto “ajuste” o adecuación –que diferencian de adaptación, según el tiempo– para reducir el impacto de los eventos de la naturaleza. Igualmente, hicieron énfasis en la diferencia entre un fenómeno natural y un desastre natural. El concepto de vulnerabilidad, aunque llegó a ser tratado incluso por Engels en 1845, cuando se refirió a la vulnerabilidad de la clase obrera, fue propuesto de una manera explícita desde la perspectiva de los desastres, tal como hoy se conoce, por la escuela ecologista desde mediados del siglo xx.

### **6.1.2. Vulnerabilidad y carencias de desarrollo**

Si bien es cierto que algunas circunstancias sociales pueden considerarse como aspectos asociados con la vulnerabilidad desde la perspectiva de los desastres, no siempre dichos aspectos pueden considerarse como la vulnerabilidad misma. Un ejemplo es el caso de la pobreza, la cual puede considerarse como un factor o como una causa de la vulnerabilidad ante cierto tipo de sucesos. Sin embargo, la pobreza en sí misma no es sinónimo de vulnerabilidad. Por esta razón, es necesario estudiar detenidamente los factores que hacen que las poblaciones sean vulnerables a los fenómenos que caracterizan a las amenazas. Sin duda, muchos desastres actualmente son el producto de factores económicos y políticos, muchas veces exacerbados por presiones, que concentran población en áreas de peligro. En la mayoría de los casos, la reducción de la vulnerabilidad está ligada de manera indisoluble a intervención de las necesidades básicas de desarrollo prevalecientes, razón por la cual se puede afirmar que existe una relación entre las condiciones de marginalidad económica y la vulnerabilidad vista desde la perspectiva de los desastres.

La vulnerabilidad de los asentamientos humanos está íntimamente ligada a los procesos sociales que allí se desarrollan y está relacionada con la fragilidad, la susceptibilidad o la falta de resiliencia de los elementos expuestos ante amenazas de diferente índole. Por otra parte, la vulnerabilidad está íntimamente ligada a la degradación ambiental, no solo urbana sino en general del entorno natural intervenido o en proceso de transformación.

Por lo tanto, la degradación del entorno, el empobrecimiento y los desastres no son otra cosa que sucesos ambientales y su materialización es el resultado de la construcción social del riesgo, mediante la gestación en unos casos de la vulnerabilidad y en otros casos de amenazas o de ambas circunstancias simultáneamente. En consecuencia, desde el punto de vista social, la vulnerabilidad refleja una carencia o déficit de desarrollo ya que el riesgo se genera y se construye socialmente. En los países en desarrollo se percibe un incremento en la vulnerabilidad ocasionado por factores como el rápido e incontrolable crecimiento urbano y el deterioro ambiental, que ocasionan la pérdida de la calidad de vida, la destrucción de los recursos naturales, del paisaje y la diversidad genética y cultural.

Al respecto, Wijkman y Timberlake (1984) indican que “en numerosos países del tercer mundo la degradación ambiental, la pobreza y un rápido crecimiento demográfico pueden transformar un fenómeno natural en un desastre de gran envergadura. Los desastres son acontecimientos sociales y políticos con frecuencia evitables”. Esto conduce a pensar que es necesario cuestionar el modelo de desarrollo si dicho desarrollo exagera la vulnerabilidad, como está ocurriendo en muchos lugares. Desde esta perspectiva se formulan además dos modelos conceptuales para analizar la vulnerabilidad (Blakie *et al.*, 1994/96). El primero examina la evolución de condiciones inseguras específicas en términos de presiones dinámicas como son la urbanización y la degradación ambiental y en términos de causas de fondo inmersas en la economía política. Esto permite revelar los hilos que conectan las condiciones inseguras que caracterizan a una determinada configuración espacial y temporal de vulnerabilidad con procesos económicos, políticos y sociales globales.

El segundo modelo parte del concepto de acceso, desde una familia, comunidad o sociedad dada, a los recursos que permiten seguridad frente a determinadas amenazas, lo que permite identificar los diferentes canales y barreras sociales, económicas, políticas, culturales, examinándose no sólo variables económicas y políticas tradicionales como acceso a la tierra y otros medios de producción, sino también variables como sexo, edad y etnia.



**Foto 6.2:** La vulnerabilidad esta altamente asociada con la pobreza. La fotografía ilustra las condiciones de marginalidad de una familia en la región de Chocó, Colombia. Estas familias han sido afectadas recurrentemente por terremotos, sin embargo sus condiciones de vida ya son un desastre cotidiano.

Analizar la vulnerabilidad dentro de los patrones más amplios de la sociedad, supone encontrar las causas de fondo o subyacentes de la vulnerabilidad desde la perspectiva de los desastres y los mecanismos o procesos dinámicos que trasladan causas de fondo a condiciones inseguras. Las causas de fondo de la vulnerabilidad o causas subyacentes que dan origen a la vulnerabilidad son procesos económicos, demográficos y políticos, que afectan la asignación y distribución de recursos entre

diferentes grupos de personas, y reflejan la distribución del poder (Wisner 2001).

Hay algunos procesos globales a los cuales se debe prestar más atención, como el crecimiento de la población, la urbanización rápida, presiones financieras internacionales, degradación de la tierra, cambio ambiental global y guerra. Como ejemplo, la urbanización ha contribuido considerablemente a los severos daños en ciertos terremotos urbanos: el aumento de la población es una de las razones que explica el incremento de personas afectadas como resultado de sequías e inundaciones, así como la deforestación aumenta las inundaciones y el riesgo de deslizamientos (Blakie *et al.*, 1994/96).

Aceptando la hipótesis que existe una alta relación entre las carencias de desarrollo y la vulnerabilidad, el autor propone los siguientes factores de los cuales se origina la vulnerabilidad:

- a) La exposición, que es la condición de susceptibilidad que tiene el asentamiento humano de ser afectado por estar en el área de influencia de los fenómenos peligrosos y por su fragilidad física ante los mismos.
- b) La fragilidad social, que se refiere a la predisposición que surge como resultado del nivel de marginalidad y segregación social del asentamiento humano y sus condiciones de desventaja y debilidad relativa por factores socioeconómicos.
- c) La falta de resiliencia, que expresa las limitaciones de acceso y movilización de recursos del asentamiento humano, su incapacidad de respuesta y sus deficiencias para absorber el impacto.

Este tipo de planteamiento intenta integrar de manera holística la lectura de las ciencias físicas y las ciencias sociales, con el fin de tener una visión completa de los factores que originan o exacerban la vulnerabilidad, teniendo en cuenta los aspectos de resistencia física ante los fenómenos y los aspectos prevalecientes de autoprotección individual y colectiva (Cardona y Barbat 2000b).

### **6.1.3. Riesgo como resultado de degradación ambiental**

Aun cuando desde el punto de vista urbano ha sido habitual reconocer que el proceso de degradación ambiental se puede convertir en un detonante de procesos supuestamente naturales que afectan el hábitat de los asentamientos humanos, debido a la poca atención que los expertos en temas ambientales le han dado al tema de los desastres, no se ha asociado de manera explícita dichos temas con la prevención y mitigación de riesgos. Algunos especialistas ven en el tema hábitat aspectos artificiales del medio ambiente y no integran a la concepción de los ecosistemas a los asentamientos humanos, que bien pueden entenderse de una manera más holística como socio-ecosistemas y que podrían permitir una síntesis y una visión más integral de la problemática urbana y ambiental. Infortunadamente, algo similar se puede decir de los especialistas en el campo de la gestión de riesgos y prevención de desastres, que al no integrar a sus modelos y marcos conceptuales los aspectos relativos a la protección del medio ambiente facilitan una visión reduccionista e incompleta de la problemática de riesgos y del hábitat urbano. En otras palabras, aparte de los llamados riesgos tecnológicos, podría ocurrir en ocasiones que algunos de los desastres supuestamente naturales sean realmente de origen antrópico, bien porque al degradar el medio ambiente pueden inducir amenazas naturales o porque el aumento de la vulnerabilidad

de los asentamientos humanos incide de manera notoria en la ocurrencia de desastres a los que también, de manera desacertada, se les califica de desastres naturales.



**Foto 6.3:** La degradación ambiental y el aumento del riesgo son, en ocasiones, el resultado de la influencia negativa de asentamientos humanos marginales que no cuentan con servicios públicos adecuados.

En Sudamérica, por ejemplo, la zona andina es altamente propensa a procesos de inestabilidad o deslizamiento y, por su complejidad orográfica, cuenta también con un amplio número de ríos cuyo comportamiento es de régimen torrencial. En estas circunstancias se presentan continuamente crecidas repentinas y avalanchas generadas como resultado de estancamientos en las zonas altas de sus cuencas. Este tipo de sucesos es, en su gran mayoría, el resultado del desequilibrio ambiental que degrada la naturaleza; pero también afecta los asentamientos humanos. Las cuencas hidrográficas se deterioran y con ello se interrumpe el ciclo hídrico, se agota el agua, se reseca la tierra y los cultivos se quedan sin riego. Procesos de deforestación e incendios han estado destruyendo la vegetación protectora de los suelos y estabilizadora del clima, causando erosión e inestabilidad de laderas; los suelos agrícolas se escurren en forma vertiginosa al paso incontenible de las escorrentías, generando sedimentación de valles, cursos de agua, estanques y ciudades donde los sistemas de alcantarillados son colmatados. La destrucción de la vegetación significa despojar de su hábitat a la fauna; la desaparición del manglar en las zonas costeras facilita las inundaciones y empobrece la pesca. Los lagos, ciénagas y cursos de agua en las zonas bajas han estado siendo desecados y terraplenados para habilitar tierras para habitar y cultivar; la minería ha esterilizado tierras y ha contribuido a sedimentar cauces y desestabilizar laderas. Estos procesos en las áreas interandinas son causantes de sucesos hidrogeodinámicos intensos como deslizamientos, inundaciones y avalanchas que arrasan viviendas, obras de infraestructura y generan pérdidas de vidas. Las actividades industriales y agroindustriales en sitios mal escogidos contaminan ciudades, valles, aguas, vegetación y atmósfera y pueden llegar a ser serias amenazas tecnológicas para asentamientos humanos circundantes. La urbanización ha venido contaminando las mejores tierras agrícolas, pecuarias y forestales y ha generado al mismo tiempo, como consecuencia de

desajustes sociales en la estructura de la tenencia, asentamientos humanos marginales en áreas degradadas (Blanco-Alarcón 1992).

De acuerdo con lo anterior, un desastre es la materialización del riesgo y significa un impacto ambiental que puede tener una dimensión variable en términos de volumen, tiempo y espacio. Algunos son causa de pocas pérdidas de vidas; otros afectan millones de personas. Algunos son momentáneos; otros son lentos y duran muchos años. Algunos están localizados en pocos kilómetros cuadrados; otros cubren varios países.

Aunque científicamente todo impacto ambiental intenso podría considerarse como un desastre, el sentido común de las personas reconoce como desastres sólo aquellos que modifican significativamente el volumen o la distribución de la población humana. Por esta razón, sucesos que ocurren en áreas "vacías", en donde no existen asentamientos humanos, raramente son percibidos como desastres. No obstante, es obvio que no existe un criterio único para calificar como desastre un suceso demográfico. Una población grande, por ejemplo, puede ser más afectada que una pequeña en términos absolutos, pero menos afectada en términos relativos (Clarke 1989). En consecuencia, aunque sea ampliamente aceptado, la dimensión de un desastre no sólo depende de la cantidad de población humana que puede ser afectada sino, también, de su escala en términos ecológicos, económicos y sociales. Un suceso podría no afectar personas en forma directa, pero podría causar perjuicios sobre otros elementos naturales renovables y no-renovables que, igualmente, le darían la categoría de desastre.

Desde el punto de vista temporal, habitualmente los desastres son interpretados como graves consecuencias que causan sucesos súbitos, aunque este calificativo depende del contexto. Súbito en relación con el tiempo de duración de una vida es diferente de súbito en relación con el curso de la historia de la humanidad. Existe una real dificultad para definir la duración de un desastre aunque, como se mencionó anteriormente, muchos la relacionan con sus efectos demográficos. En un extremo de la escala del tiempo podrían localizarse como impactos instantáneos desastres provocados por sucesos tales como terremotos, erupciones volcánicas o accidentes aéreos, mientras que como impactos prolongados pueden considerarse otros desastres causados por fenómenos tales como la desertificación, las hambrunas y las guerras, sucesos que usualmente tienen efectos más severos en términos demográficos. Los desastres repentinos impredecibles cuyas causas históricamente son bien reconocidas producen, en general, un mayor temor y son percibidos como más catastróficos; justamente por que son inesperados y causan sensación. Otro aspecto temporal se relaciona con la frecuencia de los fenómenos. Algunas poblaciones, por ejemplo, están habituadas a un ambiente propenso, donde la ocurrencia de los sucesos llega a ser casi parte de su estilo de vida, a los cuales llegan a acostumbrarse o adaptarse; a diferencia de poblaciones localizadas en ambientes en los que ciertos sucesos, por su poca recurrencia, llegan a ser considerados como eventualidades fortuitas.

Espacialmente el impacto de las amenazas es extremadamente variado. Algunos desastres son aislados y localizados; otros son difusos y dispersos. Por lo tanto, algunos sólo son el resultado de los efectos sobre una población, mientras que otros son lo suficientemente amplios, es decir los daños y las consecuencias del fenómeno cubren varias poblaciones. El área de influencia de un accidente aéreo o de una erupción volcánica, por ejemplo, es considerada generalmente como pequeña y discreta; mientras que una sequía, una hambruna o una epidemia puede llegar a afectar grandes superficies,

incluso de orden continental, trascendiendo en ocasiones fronteras políticas. En conclusión, el concepto de impacto ambiental o de desastre es relativo a la manera como se le califica (dimensión temporal, espacial o de volumen) y depende de la valoración social que la comunidad le asigna.

## **6.2 Fundamentos del enfoque holístico**

La teorización científica se halla entre dos estrategias: o bien buscar el acuerdo exacto entre la teoría y la experiencia, siendo inevitables desacuerdos atribuidos a los ruidos locales de los errores experimentales de carácter insignificante. O, por el contrario, aceptar la inexactitud cuantitativa, en provecho de una precisión cualitativa que convendrá mejorar. Por muchos años, las explicaciones de la mecánica clásica y los planteamientos que se derivan de los aportes de Newton y Laplace condujeron a una visión determinista de la naturaleza. Un determinismo cuya conquista principal era postular que todo fenómeno era predecible y en el cual el tiempo básicamente podría entenderse como una “ilusión”; algo que se podía eliminar. No obstante las observaciones visionarias de Maxwell y Poincaré, acerca de la dependencia sensible de las condiciones iniciales en algunas situaciones, y del desarrollo de la mecánica estadística y la física cuántica, científicos como Einstein y Planck mantuvieron su esperanza en un determinismo, simplicidad y causalidad del mundo; aun cuando sus aportes significaron extraordinarios “rompimientos de simetría” en relación con la física clásica. Sin embargo, la posibilidad de “reducir” el comportamiento de un sistema natural a sus componentes básicos, con el fin de explicarlo en forma satisfactoria se logra sólo en casos relativamente simples, que corresponden más a la excepción que a la regla y cuyas idealizaciones lo alejan de la realidad. Las probabilidades, que se creyó que expresaban básicamente la ignorancia de verdaderos procesos deterministas subyacentes demostraron ser esenciales y no reductibles a ninguna forma de determinismo. Hoy, los científicos paulatinamente se han ido convenciendo que un reduccionismo ingenuo, que busque reducir todas las cosas a sus partes constituyentes más pequeñas, se encuentra fuera de lugar. Una aproximación más honesta consiste en establecer, y demostrar, un postulado que explique exactamente en qué sentido una solución exacta de un problema aproximado puede contemplarse como una solución aproximada a un problema exacto (Stewart 2001). Cuando se pretende tener en cuenta la complejidad de los sistemas, es decir, cuando se requiere que la descripción sea más completa, es necesario introducir elementos estocásticos.

No se intenta aquí estimular un debate filosófico en relación con la causalidad del mundo, pero sí describir los fundamentos para postular una conjetura o un “modelo” a cerca del riesgo y el desastre desde una perspectiva científica moderna. La gente hoy tiende a hablar de modelos mejor que de teorías o leyes. El determinismo, no del mundo sino de las descripciones, tal vez sea una abstracción y una simplificación que se practica para hacer inteligible la complejidad cotidiana y actuar con ella. Y el indeterminismo quizás sea la propia desesperación que embarga cuando para entender o explicar la complicación se requiere de una información a la que no es posible acceder. Lo que se necesita es descubrir si hay principios generales gobernando el desarrollo de la complejidad en su totalidad que puedan ser aplicados a toda una variedad de situaciones diferentes sin que se vean enmarañados en sus particularidades.

La mecánica cuántica describe lo que un sistema podría hacer en el futuro, mientras que la mecánica clásica describe que ha hecho en el pasado. El futuro es indeterminado, pero el pasado es determinado porque ha sido observado y esta asimetría, esta diferencia contextual, es responsable del muy diferente carácter de la mecánica cuántica y clásica. Aun más, el presente, donde la conciencia reside, es una frontera que se mueve en la cual el contexto cambia –una “bifurcación” en un espacio paradigmático.

Para muchos, un fenómeno aleatorio es todo aquél que se resiste a ser descrito por un formalismo, que no permite ser reducido por un proceso algorítmico conocido. El azar entendido como un concepto complementario del conocimiento. La palabra “azar” deriva del árabe *al-zahr* que significa “juego de dados”. Sin embargo, aquí, cuando se habla de riesgo como en muchas otras situaciones de los sistemas complejos, azar no es ontológico sino epistemológico, es decir desde la perspectiva del conocimiento.

La capacidad de obtener un conocimiento detallado de un sistema ha experimentado un decidido avance en los últimos años, pero la de integrar ese conocimiento se ha visto frenada por la falta de un marco conceptual apropiado para describir de manera cualitativa el comportamiento. La interacción entre los componentes en una escala puede llevar a un comportamiento global muy complejo en otra escala mayor, que, en general, no puede deducirse del conocimiento de los componentes individuales.

La mayoría en el debate asume que hay solamente una ciencia y sólo un método científico. La propuesta que aquí se presenta desafía este supuesto monológico y argumenta que un solo método no puede ser apropiado para el entendimiento de la complejidad. Aquí se argumenta que los científicos tienen una pluralidad de métodos de los cuales pueden escoger cuando investigan un sujeto y su responsabilidad es seleccionar el método que mejor se ajuste al contorno ontológico del problema que se estudia. Lo que hay que preguntarse, primero, es si el fenómeno físico o social que el científico escoge investigar impone límites ontológicos en el método que puede emplear.

Uniendo la ontología y epistemología realista del “naturalismo crítico” del filósofo británico Bhaskar (1989), sensitivo a las diferencias estructurales que existen en el mundo, con el enfoque de los “sistemas disipativos”, se puede elevar a una nueva visión científica, fundamentada en los axiomas del caos determinista, y en la cual se reconocen las profundas diferencias que separan el mundo social del de la naturaleza. Tal realismo dinámico es capaz de sustentar la particularidad y pluralidad del mundo social preservando simultáneamente los cánones del entendimiento científico.

El naturalismo del que aquí se habla demanda el empleo de un pluralismo metodológico cuando se estudian organizaciones complejas, como una población o comunidad humana, desde la perspectiva de sistemas disipativos, teniendo en cuenta dos supuestos: Primero, con la notable excepción de la que parece ser una adecuada aplicación en áreas tales como la demografía, la ecología y la conformación espacial urbana, la simple incorporación del paradigma del caos determinista en la investigación científica social y al análisis del riesgo no tiene mayor relevancia. Segundo, si los actuales modelos matemáticos del caos determinista y sus resultados concretos en las ciencias físicas tienen un valor limitado en su aplicación a las ciencias sociales y al análisis del riesgo, ellos si proveen una heurística básica vigorosa desde la cual los científicos e investigadores del riesgo pueden trabajar en el futuro.

De la crítica de Bhaskar se concluye que la ciencia y sus resultados, a pesar de la insistencia de algunos de sus apologistas, es un producto humano y se soporta igualmente en indelebles marcas como todas las demás que produce el ser humano. La

ciencia es una actividad transitiva condicionada históricamente. Si el conocimiento tiene una estructura acumulativa entonces también la tiene la realidad en sí misma. Bhaskar argumenta que debe organizarse de la misma forma. La estratificación ontológica forma una jerarquía de estructuras abiertas y anidadas así que, en la medida en que la ciencia penetra cada nuevo estrato descubre la base ontológica de esas entidades y estructuras que previamente no tenía cubiertas. Existe una división científica del trabajo en una estratificación ontológica del universo desde las partículas elementales hasta las estructuras sociales. Anderson (1972) sugiere que cada estrato de la realidad es estructuralmente único y opera de acuerdo con sus propias leyes, y demanda sus propios protocolos de investigación. Los mecanismos de rompimiento de simetría proveen los fundamentos ontológicos para la emergencia de nuevos niveles de realidad de los niveles establecidos. El rompimiento de simetría permite que cada nuevo nivel ontológico se organice el mismo alrededor de su propia serie de principios irreducibles. Puesto que diferentes principios regulan las actividades de cada nivel, ningún nivel es reducible a aquellos de los cuales ha emergido. La pirámide resultante de complejidades producida por la geometría de simetrías rotas es la fuente, por lo tanto, de nuestra división moderna de profundización de la labor científica.

Harvey y Reed (1999) proponen que siguiendo la lógica de Bhaskar lo que se necesita es una visión científica del mundo para llenar los vacíos filosóficos, y que esa visión es la ciencia de la termodinámica del no equilibrio. Esta nueva ciencia estudia los mencionados “sistemas disipativos”, que involucran una amplia variedad de sistemas caóticos: procesos químicos catalíticos que a menudo parecen imitar la vida misma; sistemas evolutivos constituidos física y biológicamente; y los sistemas sociales. Estos autores proponen una matriz en la cual se definen seis estrategias de modelación o niveles de abstracción, en los cuales jerárquicamente los supuestos deterministas decrecen, para enfrentar doce diferentes niveles de complejidad ontológica. Dichas estrategias son las modelaciones predictiva, estadística, iconográfica, estructural, simulativa, y la narrativa histórica; y los niveles de complejidad van desde las regularidades determinantes del universo físico, la evolución biológica, la organización ecológica biótica, la organización ecológica institucional, la estructura de sistemas socio-técnicos, y sucesivamente en orden de jerarquía hasta la cultura hegemónica y sus procesos de conflicto de clases y evolución social.

Según este paradigma los modelos predictivo, estadístico e iconográfico deben restringirse a niveles ontológicos en los cuales el fenómeno puede ser legítimamente tratado como un agregado estadístico; es decir, como un compuesto aditivo, numerable e intercambiable de unidades individuales. Los modelos estructural, simulativo o narrativo pueden ser usados donde no son adecuados los tres primeros y, por lo tanto, son útiles en niveles ontológicos en los cuales procesos poblacionales, productos culturales y eventos históricos son la regla. Un uso inadecuado de los modelos o abstracciones en contextos con los cuales no son consistentes conduce a falacias: como intentar modelar los desarrollos culturales como objetos gobernados por leyes básicas de la naturaleza, ignorando el rol de la intencionalidad humana, o a considerar los hechos de la naturaleza como puras y discrecionales construcciones humanas.

Así las abstracciones de la realidad resultan coherentes según sea el contexto o nivel ontológico correspondiente. Los patrones explotados por la física pueden ser imperfectos, meras aproximaciones; pero son buenas aproximaciones y eso no puede ser justamente una coincidencia. La lógica del reduccionismo es la más precisa en las

profundidades matemáticas y llega a ser gradualmente más “borrosa” en la medida que se asciende a niveles más complejos como la biología y las ciencias sociales. De hecho, el modelo Darwinista de la evolución ha llegado a ser más verbal o figurativo que matemático. Es decir, construido en un muy preciso y sutil lenguaje, y mucho de esto soportado en submodelos matemáticos y simulaciones. La lógica explicativa es ya muy precisa pero su estilo ha cambiado sutilmente. Sin duda, la estrategia del reduccionismo parece ser de lejos menos exitosa cuando se piensa acerca ya de altos niveles de organización de la evolución. La cadena de explicación de los niveles de “abajo” hacia “arriba” llega a ser más difusa, y una cuidadosa mirada muestra que alguno de sus eslabones hacen falta.

Así, las leyes de la naturaleza, en una luz diferente, son patrones que prevalecen en algún contexto escogido. Depende de las preguntas que se formulen y justamente no son acerca de su química o su física fundamental. Hay medidas que tienen sentido dependiendo del contexto escogido. No hay duda de que el marxismo contiene más ideología que el psicoanálisis; que el psicoanálisis contiene más ideología que la física atómica y que la física atómica contiene más ideología que la topología algebraica. La complejidad de un sistema tentativamente se puede definir como la cantidad de información necesaria para describirlo.

La complejidad de los ecosistemas y sociedades es el resultado de una red de transacciones y comunicaciones entre organismos individuales. El concepto de estructura no necesariamente emerge de promediar el comportamiento de sus componentes, como podría ser en el caso de las leyes de los gases o la estadística de sus fluctuaciones. La estadística es justamente un camino para que el sistema colapse el caos de su fina estructura y desarrolle una característica confiable a gran escala. Cualquier sistema interesante es típico en algún sentido, en un contexto lo suficientemente limitado; y si se quiere entender dicho sistema, ayudará mucho saber cuál es dicho contexto (Stewart 2001). La explicación reduccionista de la dinámica de un asentamiento humano es interna, opaca y complicada. La contextual o representativa (simulativa) es externa, transparente y simple. Hay que buscar explicaciones en términos de contexto tanto como en contenido.

Aquí se propone una abstracción estructuralista y simulativa para tratar el fenómeno del desastre y las condiciones de riesgo en un sistema socio-técnico, como lo es un asentamiento humano (un centro urbano) en su ambiente natural. La “fractalidad” de las fronteras en aspectos reales hace que no exista una línea que los diferencie sino una frontera difusa. Holismo es una alternativa al reduccionismo, siempre que se diferencie de la abstracción común (la oriental), que consiste en ver únicamente el aspecto global en detrimento de lo particular: un sistema se considera como una unidad y a menudo se ignora su contexto. Aquí, holismo significa integralidad (Smuts 1926), proviene de *holos* que en griego significa “todo”, “íntegro”, “entero”, “completo”, en tanto que el sufijo *ismo* denota su práctica (Weil 1990; CONICIT 1999). El enfoque holístico, al que aquí se refiere el autor, significa proceso de integración y desagregación, conservando las sinergias o relaciones entre componentes. Es la noción de pensamiento complejo, a la que se refiere el sociólogo francés Edgar Morin (1994), que separa y reúne, que distingue – sin desunir– y religa.

La imagen holográfica es una buena representación contextual de la visión integral que aquí se desea proponer. En la imagen holográfica cada parte de la figura que uno ve esta dispersa sobre toda la superficie. Por esta razón, en cada fragmento de la imagen

esta toda la figura y no un pedazo de ella como en una fotografía convencional. La visión de un fragmento de la imagen equivale a tener un cierto grado de resolución; corresponde a la calidad del conocimiento que se tiene acerca de algo y no a una parte de ese algo. Esta propiedad del holograma explorada por Karl Pribram en neurología y en física por David Bohm (teoría holónica del universo) se plantea aquí como el enfoque mediante el cual se debe intentar llevar a cabo la estimación del riesgo sísmico urbano.

La naturaleza opera de una manera holística para crear un equilibrio armonioso en el que cada ingrediente interacciona con los otros ingredientes vecinos para producir un todo que es más que la suma de sus partes. No es difícil ver por qué la perspectiva holística oriental supuso un obstáculo para el progreso científico. Niega la presunción de que se puede estudiar partes del mundo aislándolas del resto –que puede analizar el mundo y entender una de sus partes sin conocer el todo. La perspectiva holística a la que aquí se hace referencia supone que la naturaleza es intrínsecamente no lineal, de manera que las influencias no locales prevalecen e interaccionan entre sí para formar un todo complejo. No es que la concepción oriental estuviera desencaminada; era sencillamente totalitarista, absolutista y tal vez prematura. Sólo desde hace poco, los científicos, ayudados por potentes programas gráficos de ordenador, han logrado hacerse con la descripción de sistemas no lineales intrínsecamente complejos. Un estudio fructífero de las leyes naturales que pretenda llegar a dominar alguna vez las complejidades holísticas ocasionadas por la no linealidad, debe comenzar con los problemas lineales simples. El mundo real es inmensamente complicado: es una madeja de hilos anudados y enmarañados, cuyo principio queda fuera de nuestro alcance y cuyo fin no podemos conocer (Barrow 1994). Se utilizan aquí los fundamentos de la teoría general de sistemas, como abstracción o modelo simulativo (representación) que investiga el paralelismo entre los diversos campos de la ciencia.

En el mundo real no se observan leyes de la naturaleza, se observan resultados. Puesto que la representación más eficaz de estas leyes viene dada por ecuaciones matemáticas, se podría decir que sólo se ven las soluciones de esas ecuaciones y no las ecuaciones mismas. Los resultados son mucho más complicados que las leyes; las soluciones mucho más sutiles que las ecuaciones. Aunque una ley de la naturaleza pueda poseer una cierta simetría, ello no significa que todos los resultados de la ley necesiten manifestar la misma simetría. La situación en que se rompe la simetría de los resultados de una ley se denomina “ruptura de simetría”. A ella se debe la vasta diversidad y complejidad del mundo real.

Hay varias formas de inteligibilidad, ciencia dura, causalidad y clasificación. No menos es la inteligibilidad de estructura, es decir, la que relaciona un “todo” con unas “partes” más o menos arbitrariamente elegidas. Se habla de “análisis” cuando se parte del “todo” para llegar a las “partes”, y de “síntesis” cuando el procedimiento es el inverso. Aunque la física teórica siempre ha mirado a los usuarios de esta forma de inteligibilidad con una leve compasión, no tiene otra posibilidad en aceptarla como la posible cuando de complejidad se trata. El éxito de la física, en parte, se debe a haber hecho la vista gorda a la complejidad. No se pueden seguir buscando fórmulas matemáticas para predecir la estabilidad de un ecosistema de 20 000 variables. En rigor, un sistema así ni siquiera puede “observarse”. No es que sea invisible por pequeño, ni por grande, sino por complejo. No puede observarse ni modelarse en el sentido clásico. Eventualmente, puede “simularse”. La simulación va camino de

alcanzar el rango de las otras dos grandes y tradicionales vías de aproximación a la realidad, esto es, el de la vía teórica y de la vía experimental (Wagensberg 1998).

Los postulados que aquí se presentan no tienen la intención de ser propiamente una teoría sobre el riesgo y el desastre desde el punto de vista de los sistemas dinámicos complejos. Más bien, puede entenderse como una conjetura que podrá ser con el tiempo verificada mediante simulación. Entre tanto se propone una conceptualización estructuralista y figurativa, utilizando representaciones de la interacción del asentamiento humano y su ambiente; aproximación que puede llegar a ser útil para la gestión del riesgo y la prevención de los desastres.

### **6.3 Postulado de los sistemas dinámicos**

El análisis de todo proceso real comienza con la selección de un conjunto de elementos o partes de la realidad, operativamente interactivos, del que se quiere conocer su comportamiento global. Esta porción del mundo que interesa se conoce con el nombre de *sistema*. Este concepto se aplica a cualquier ámbito del saber por lo que así se habla, no sólo de sistemas físicos, químicos o biológicos, sino también de un sistema económico o financiero, de un ecosistema, de un sistema lingüístico, etc.

El método que la ciencia emplea para el análisis y comprensión de esta pequeña ventana del universo, o sistema, consiste en construir un modelo. Con él se pretende explicar los acontecimientos presentes o pasados que afectan o han afectado al sistema y, lo que es más importante, al menos desde el punto de vista del método científico, el modelo ha de servir para predecir su comportamiento futuro. Por otra parte, que un modelo es también un sistema. Se trata de un sistema abstracto en el que los elementos que intervienen son variables y las relaciones entre ellas vienen expresadas mediante conjuntos de ecuaciones.

Para que un sistema real pueda ser formalizado debe satisfacer una serie de requisitos cuya formulación precisa queda en manos de los teóricos de la ciencia. La construcción de un modelo formal que se ajuste "lo mejor posible" al sistema real en estudio es una tarea que conlleva una gran dificultad y, en cualquier caso, el resultado no es necesariamente único. Por ejemplo, en los complejos sistemas que aparecen en biología, sociología o economía (Lorenz 1997), donde el número de factores que intervienen puede ser del orden de miles o millones.

Aunque la intención es conocer la realidad y las observaciones que se realicen y las cualidades que se obtengan de los modelos se refieren en última instancia a la realidad que el modelo representa, lo cierto es que, dadas las restricciones impuestas en su construcción, no existe un isomorfismo exacto entre el conjunto de estados del sistema real y el conjunto de estados del sistema formal.

Un proceso se dice *determinista* si todo su curso futuro y pasado están unívocamente determinados por su estado en el momento presente. Lo que equivale a decir que los valores observables de los estados del sistema en un instante vienen dados por las observaciones en el instante de partida –por las condiciones iniciales– En definitiva, que para distintas series temporales de los estados del sistema los científicos han sido capaces de descubrir una relación que las comprime a todas ellas, es decir, han descubierto una ley científica. Por el contrario, en un proceso *aleatorio* no se aprecia claramente una regularidad en las observaciones que permita establecer una ley determinista. La única manera de describir el comportamiento del sistema es indicando

todos sus estados –lo cual es una tarea imposible en sistemas complejos–, o hacer uso de la teoría de la probabilidad y la estadística para tratar de ajustar las observaciones a alguna ley estadística. Tal distinción de sistemas deterministas y aleatorios no resuelve el problema determinismo-indeterminismo, pues aunque todo el mundo acepta la existencia de procesos indeterministas –en el sentido de impredecibles, v.g. lanzamiento de un dado–, surge inmediatamente la cuestión de si su existencia se debe a la ignorancia de los científicos en hallar las leyes que regulen determinísticamente el proceso, aparentemente aleatorio, o, por el contrario, dichas leyes no existen y se puede concluir que existe un azar ontológico. Aunque no es posible una respuesta contundente a dicha pregunta, sí cabe tomar distintas actitudes ante esta disyuntiva. Actitudes que definen dos formas de pensamiento ideológicamente enfrentadas: deterministas versus indeterministas. No se puede negar, sin embargo, la existencia de un azar epistemológico, surgido de las limitaciones del propio método científico. Aparece éste por caminos diferentes. El indeterminismo cuántico trae ya a colación el problema de una imposibilidad de exactitud total en la medida, lo que tiene profundas repercusiones en sistemas con sensibilidad a los errores en las mediciones de las condiciones iniciales. Por otra parte, cuando se consideran sistemas muy complejos (caso de los sistemas socio-técnicos, biológicos, etc.), el número de factores que intervienen en su comportamiento es tan grande que resulta imposible considerarlos todos, con lo cual cualquiera que sea el enfoque que se utilice en su estudio, bien la construcción de un modelo determinista simplificado del que se puede esperar sirva de cierta aproximación a la realidad, bien utilizando un tratamiento estadístico que permita estimar los valores medios de las variables relevantes, en ambos casos no se puede excluir un margen de error –fluctuaciones: separación sobre los valores medios– que imposibilita la predicción exacta, determinando que el azar sea componente ineludible del proceso.

En este desarrollo conceptual para representar y modelar el “desastre” y la condición potencial del mismo, o riesgo, se considerará el isoformismo del sistema en el cual ocurre este proceso con la dinámica de los sistemas disipativos al límite del caos. El sistema es, aquí, el conjunto de componentes que configuran el asentamiento humano o la ciudad (el hábitat urbano constituido por edificios, infraestructura, población, organización, interacciones y relaciones entre esos componentes, etc.) dentro de otro sistema que corresponde al sistema natural, donde igualmente ocurren episodios e intercambios de energía con el sistema socio-técnico base. Se plantea en adelante el funcionamiento de este tipo de sistemas intentando desarrollar los metaconceptos de los sistemas dinámicos complejos, asociando dichos metaconceptos con las situaciones de riesgo y desastre.

### **6.3.1 Dependencia sensible y dimensión fractal**

Para saber cómo evoluciona un sistema desde un estado inicial dado, se recurre a la dinámica (las ecuaciones del movimiento) que explica el movimiento, por incrementos, a lo largo de la secuencia cronológica de estados. Las herramientas matemáticas para estudiar los sistemas dinámicos son las ecuaciones diferenciales, que equivalen a un conjunto de formulas que conjuntamente expresan las tasas de cambio de las variables en función de los valores actuales de esas variables. Una solución completa contendrá expresiones que darán los valores de las variables en cualquier instante dado en función de los valores que tuvieron en cualquier instante anterior.

En el caso de sistemas simples y lineales, puede ocurrir que las ecuaciones admitan una solución explícita, o sea, una fórmula que exprese cualquier estado futuro en función del inicial. Una solución explícita proporciona un atajo, un algoritmo simple que precisa sólo el estado inicial y el tiempo final para predecir el futuro sin pasar por los estados intermedios. La utilidad de la solución o de la imagen que así se obtiene reside en la posibilidad de representar el comportamiento del sistema en forma geométrica. Un espacio hipotético que tiene tantas dimensiones como el número de variables necesarias para especificar un estado de un sistema dinámico dado. Algo así como el espacio de lo posible. No son exactamente los estados que ocurren, son también los que podrían haber ocurrido. Un péndulo con rozamiento, por ejemplo, termina por detenerse, lo que significa que la órbita o trayectoria se aproxima a un punto en el espacio de configuraciones o también llamado espacio de fase. Dicho punto no se mueve: está fijo; por atraer a las órbitas próximas, recibe el nombre de *atractor*. Algunos sistemas no tienden al reposo a largo plazo, sino que recorren periódicamente una sucesión de estados. Un atractor es, *grosso modo*, a lo que tiende, a lo que es atraído, el comportamiento de un sistema. Un sistema puede tener varios atractores. Si así ocurre, diferentes condiciones iniciales pueden llevar a diferentes atractores. En el caso de los asentamientos humanos o los centros urbanos, considerando la dinámica de la interrelación social-espacial las ciudades son atractores de la actividad (Dendrinos 1997).

Los éxitos en la obtención de soluciones explícitas en el caso de muchos sistemas simples suscitaron la esperanza de que tales soluciones existieran para cualquier sistema mecánico. Desgraciadamente, se sabe ahora que esto no es así, en general. El comportamiento impredecible de los sistemas dinámicos “irregulares”, como los llamó originalmente Edward Lorenz (1995) a los sistemas caóticos, no puede expresarse mediante una solución explícita. Consecuentemente no hay atajos para predecir su comportamiento. El espacio de configuraciones proporciona, no obstante, una herramienta poderosa para describir el comportamiento de estos sistemas. El conjunto de puntos que evoluciona hacia un atractor se llama su cuenca de atracción. Los atractores caóticos actúan como multiplicadores que elevan las fluctuaciones microscópicas a una expresión macroscópica. Esto explica porqué no existen las soluciones exactas, los atajos para predecir el futuro. Tras un breve período, la incertidumbre en la medición inicial cubre el atractor por entero y se pierde toda capacidad predictiva: simplemente no hay conexión causal entre el pasado y el futuro. El marco del que emerge el “caos” es la llamada teoría de los sistemas dinámicos. La importancia de dicho comportamiento fue reconocida por primera vez por Maxwell en la segunda mitad del siglo XIX, luego por Poincaré y Lyapunov a finales del mismo siglo, y posteriormente en el siglo XX por Birkhoff, Smale y Lorenz antes de que se le conociera por su actual nombre, que se debe a Li y Yorke.

Un sistema dinámico consta de dos partes: la noción de estado (la información esencial de un sistema) y una dinámica (una regla que describe cómo evoluciona el estado en el tiempo). La evolución se representa en el espacio de configuraciones donde las coordenadas de un punto son el conjunto de valores simultáneos de las variables. En general, las coordenadas del espacio de configuraciones varían con el contexto; en el caso de un sistema mecánico podrían ser posiciones y velocidades y, en el de un modelo ecológico, las poblaciones de las diferentes especies.

Una aparente paradoja es que el caos es determinista, generado por reglas fijas que no encierran en sí mismas ningún elemento de azar. En principio: el futuro está enteramente determinado por el pasado, pero en la práctica las pequeñas incertidumbres se agrandan, de suerte que, si bien el movimiento es predecible a corto plazo, no lo es a largo plazo. Este aserto presupone que no se pueden realizar mediciones que estén completamente libres de incertidumbre. El descubrimiento de los sistemas dinámicos con dependencia sensible ha creado un nuevo paradigma en la construcción de modelos científicos. Por una parte establece los límites fundamentales en la capacidad de avanzar predicciones. Pero, por otra, su determinismo inherente muestra que muchos fenómenos aparentemente aleatorios son más predecibles que lo que se había pensado. Antes que la idea de caos estuviera bien establecida, los científicos habían abordado el estudio de procesos complicados de esta índole como un problema originalmente estadístico. Esto es, consideraban que el proceso sometido a análisis era, a todos los efectos prácticos, “aleatorio”. Se sabía de la aleatoriedad en sistemas con un número grande de grados de libertad –o variables necesarias para describir el sistema– pero no que ocurría con una enorme generalidad, insospechada hasta hace poco, incluso en sistemas de aspecto muy simple con pocos grados. El comportamiento caótico está determinado por leyes bien precisas, mientras ocurre consiste en cosas que *no son* de verdad aleatorias sino que *sólo lo parecen*. Este comportamiento no es aleatorio puesto que puede ser generado con una ecuación completamente determinista. Un sistema caótico puede aparecer más o menos aleatorio dependiendo de su complejidad.

El descubrimiento de la ubicuidad del caos es, sin duda, la tercera gran revolución de la física del siglo XX (Scientific American 1994). Su existencia afecta incluso al mismo método científico. El procedimiento clásico para verificar una teoría consiste en hacer predicciones y contrastarlas con los datos experimentales. Ahora bien si los fenómenos son caóticos, las predicciones a largo plazo resultan intrínsecamente imposibles. Y esto debe tenerse en cuenta al juzgar los méritos de una teoría. El proceso de verificación se hace así mucho más delicado, y se debe basar en propiedades estadísticas y geométricas antes que en la predicción. El caos presenta un nuevo desafío al punto de vista reduccionista, según el cual un sistema puede entenderse descomponiéndolo y estudiando cada parte por separado. Si esta idea ha prevalecido en la ciencia es en parte porque hay muchos sistemas en los que el comportamiento del todo es realmente la suma de sus componentes. El caos demuestra, sin embargo, que un sistema puede tener un comportamiento complicado que emerge en virtud de simples interacciones no lineales entre unos cuantos componentes.

En la dinámica del ambiente natural, en el cual ocurren cambios intensos tanto lentos como súbitos en una escala de tiempo relativa se tipifica el comportamiento caótico, la no linealidad y la dependencia sensible. De la misma manera, la dinámica de las interacciones y procesos de un asentamiento humano obedece a pautas y atractores que pueden cambiar por inestabilidades internas de este sistema socio-técnico, como por perturbaciones o descargas del ambiente en el cual se encuentra.

Mandelbrot (1975, 1987) utilizó el término *fractal* introducido por Hausdorff y Besicovitch en 1919, para describir sistemas con dimensionalidad fraccionaria. La propiedad de los fractales es la *autosimilitud*: en muchos sistemas fractales, diversas piezas adecuadamente elegidas se hacen idénticas a todo el conjunto cuando se les amplifica apropiadamente. Lo cual implica desde luego que las diversas subpiezas de cada pieza, aumentadas, equivaldrían a la pieza y, por ende, a todo el sistema. Hay

otros fractales que sólo son autosimilares estadísticamente; las piezas pequeñas, al ampliarse no se superpondrán al sistema entero sino que tendrán una apariencia del mismo tipo general. Existe una estrecha ligazón entre la fractalidad y el caos: un *atractor extraño* es un atractor con estructura fractal. La fractalidad es una nueva simplicidad imbuida en una aparentemente más complicada.

Partiendo de la hipótesis de que el riesgo –que es un estado del sistema socio-técnico– es un atractor que tiene una dimensión fractal, se puede establecer que los escenarios de riesgo a diferentes escalas están vinculados aunque no necesariamente de manera simétrica y sincrónica; es decir sus relaciones de una escala a otra pueden variar de manera no lineal. Un escenario de riesgo a nivel local sería un fractal de escenarios de riesgo a otras escalas (Maskrey 1998); por ejemplo, el riesgo para una familia en relación con el riesgo a nivel de un asentamiento humano o de una región.

La dimensión fractal, equivalente a la denominada “capacidad” propuesta por el matemático ruso Andrei Kolmogorov, es una medida de la complejidad y la heterogeneidad y no corresponde a un número entero. En lugares donde los escenarios de riesgo son muy heterogéneos y complejos la dimensión fractal podría ser alta (un valor cercano a 2 o más). En otros contextos, donde los escenarios son más homogéneos y muestran menos diferenciación o “rugosidad”, la dimensión fractal podría ser baja (cercana a 1). La diferenciación, por ejemplo, podría ser una estratificación socio-económica altamente dispar. Así, en contextos donde el riesgo tiene una baja dimensión fractal para que ocurra un desastre sería necesario una perturbación muy intensa para que sus efectos puedan constituirse en crisis, a diferencia de contextos donde el riesgo tiene una alta dimensión fractal donde una mínima perturbación podría significar un desastre.

Por otra parte, en contextos donde la dimensión fractal del riesgo es alta, se requiere una mayor resolución de observación para poder apreciar la compleja variabilidad del riesgo a nivel local. Estos son los contextos caracterizados por numerosos desastres pequeños altamente diferenciados, aún cuando éstos sean provocados por un solo suceso, como un gran terremoto. La diferenciación visible del riesgo aumenta según se aumenta la resolución de observación, sobre todo en contextos donde la dimensión fractal es muy alta (Maskrey 1998). Esto significa que no existe una respuesta adecuada a la pregunta de qué efectos suceden en un contexto determinado, sin especificar la resolución de observación y la dimensión fractal del riesgo.

Una estimación del riesgo en forma global sólo permite diferenciar niveles de riesgo entre grandes regiones o países, por ejemplo. Según se aumente la resolución, es posible visualizar mayores niveles de complejidad, pudiendo identificar las diferenciaciones entre provincias, asentamientos humanos o ciudades, comunidades y eventualmente entre hogares e individuos. En aquellos contextos donde el riesgo tiene mayor dimensión fractal, mediante aumentos en la resolución se podría apreciar cada vez más diferenciación. En aquellos contextos donde el riesgo tiene baja dimensión fractal, existirá un límite donde al aumentar la resolución no se obtiene una mayor diferenciación del riesgo de los componentes.

### **6.3.2 Teoría de la complejidad**

Un diccionario podría sugerir que el caos es un estado de completa confusión o una falta de organización alguna. Pero en el campo de la dinámica no lineal, como ya se

mencionó, el término implica propiedades específicas de turbulencia en un sistema no lineal. Existe un enorme terreno para la confusión en torno a términos como caos y complejidad. Para la mayoría caos significa azar. En el ámbito de los sistemas dinámicos no lineales no es así. También para la mayoría, complejo puede significar casi lo mismo que caótico. Los sistemas más complejos exhiben atractores; estados en los que el sistema acaba estabilizándose en función de sus propiedades. Al examinar estos atractores esto sirve como una gráfica fundamentación de la noción de “orden en el caos”. Siempre los datos numéricos describen un régimen caótico apareciendo desordenado. Su representación geométrica crea una única forma de orden. Una estabilidad existe en el caos. El comportamiento caótico es globalmente estable y localmente inestable.

El azar (epistemológico) es el nombre que se le da a la ignorancia –léase leyes insuficientes, débil potencia de cálculo, torpes observaciones (limitadas)– el azar es un concepto de conocimiento. Este azar admite medida y control, de él han nacido términos nuevos (fluctuaciones, ruido, error, mutación) con vocación de describir la esencia del cambio de la complejidad del mundo. Los sistemas que se ven al alrededor, como las formaciones geológicas o un centro urbano, gozan de cierta estabilidad (por eso pueden verse). Eso significa que pueden defenderse de la contingencia, del azar, ruido o fluctuaciones propias y de su entorno. Adaptarse significa amortiguar las sorpresas que el mundo depara. Hacerse insensible a ellas. La ignorancia de un sistema con respecto a su entorno es un reto para el sistema, de modo que éste se ve obligado a aumentar su complejidad para hacer frente a tal ignorancia. Evolucionar es superar una adaptación y asumir la siguiente. La otra alternativa, es claro, desaparecer.

Lo complejo es una categoría cualitativamente distinta de lo simple que no se debe sólo a una acumulación de elementos. Pero como el comportamiento simple y complejo coexisten en íntima unión en la generalidad de los sistemas físicos, más que antagónicos resultan complementarios. La diferencia entre orden y caos depende de la limitación de la capacidad en la medida del mundo. Si se pudiera determinar con precisión infinita los datos iniciales, muchos movimientos serían a la vez predecibles y caóticos.

Se ha demostrado en los últimos años que un número creciente de sistemas exhiben un comportamiento estocástico provocado por un simple atractor caótico. Los latidos del corazón, la oscilación de concentraciones químicas y muchos osciladores eléctricos y mecánicos. Actualmente se busca el caos, en sistemas tan dispares como las ondas cerebrales y los procesos económicos. Importa señalar que la teoría del caos está lejos de constituir una panacea. Cuando hay muchos grados de libertad, los movimientos son complicados y aleatorios. Pero, aun cuando se determine que un sistema es caótico, esto no aclara mucho; saber que un sistema es caótico no facilita la predicción de su comportamiento. Son tantas las variables que intervienen, que todo lo alcanzable es una posible descripción estadística, y las propiedades estadísticas esenciales pueden obtenerse sin tener en cuenta el caos.

El término complejidad se utiliza a veces para indicar la dependencia sensible y todo lo que ella conlleva. A veces se hace una distinción entre *caos* y *complejidad*, refiriéndose con el primer término a la irregularidad temporal y con el segundo a la irregularidad espacial. El comportamiento caótico se revela como la regla antes que la excepción, en lugar de una ecuación en particular. Se ha llegado a considerar que los fenómenos lineales, predecibles y simples prevalecen en la naturaleza porque se inclina

a elegirlos para el estudio. Son los más fáciles de entender. En el fondo el mundo no es inteligible por esa razón. Los fenómenos simples pueden ser analizados por partes. El todo, en ese caso, no es más que la suma de sus partes. Así pues, se puede entender algo sobre un sistema sin entender todo sobre él. Los sistemas caóticos no lineales son diferentes. Requieren de un conocimiento del todo, al igual como lo predica el holismo, para poder entender sus partes, porque el todo equivale a más que la mera suma de sus partes. En un sistema complejo no hay una clara división entre una “parte” y otra, lo que impide conseguir “toda” la información. La emergencia de simplicidad “colapsa el caos” trae orden a un sistema que parece estar deslizándose esperanzadamente en un mar de fluctuaciones aleatorias (Cohen y Stewart 1994). Aunque el caos exige la *no linealidad*, ésta no asegura la existencia del caos.

Puede que no resulte especialmente sorprendente que el comportamiento cualitativo de un sistema pueda cambiar cuando la intensidad de determinada influencia perturbadora pasa de cierto nivel crítico. Un equilibrio es inestable si un estado que difiere levemente del equilibrio, por ejemplo el que se podría introducir moviéndolo un poco, termina por evolucionar enseguida en un estado ampliamente diferente. La definición de equilibrio inestable o precario tiene mucho en común con la de la dependencia sensible: ambas suponen la amplificación de diferencias inicialmente pequeñas. Los sistemas caóticos pueden poseer estados de equilibrio, que son necesariamente inestables. En una familia de sistemas dinámicos, se le denomina bifurcación un cambio brusco del comportamiento a largo plazo de un sistema, cuando el valor de una constante cambia, pasando de ser inferior a ser superior a determinado valor crítico. Una bifurcación, por ejemplo, un cambio de fase: líquido a gaseoso.

Desde la óptica de la gestión del riesgo el ambiente se puede entender como un sistema dinámico complejo cuyos elementos se hallan en permanente interacción o como una red de relaciones activas entre dichos elementos, que determina las condiciones de existencia de los mismos y de la totalidad del sistema. Cuando dentro de la dinámica o proceso de interacción ocurren cambios, transformaciones o alteraciones que no son posibles de absorber o “disipar” por falta de flexibilidad o capacidad de adaptación del sistema, surge una *crisis* (Wilches-Chaux 1989). Esta bifurcación, que puede presentarse como consecuencia de una reacción en cadena de influencias, representa el *desastre*, calificativo que depende de la valoración social que la comunidad le asigne y que en todos los casos es un impacto ambiental desfavorable. Las crisis que pueden presentarse como consecuencia de eventos exógenos al sistema o como resultado de tensiones no resueltas al interior del mismo. Se desemboca en desastre cuando se dan reacciones en cadena, *runaway reactions*, que a la manera de bucles positivos incrementan las fuerzas disociativas hasta el punto de volverlas tendencias predominantes (Morin 1995), enfrentado al sistema con alternativas destructivas como la pérdida de alguna de sus partes o elementos, la escisión del conjunto, la agregación forzada a un sistema mayor, la mutación de sus valores fundamentales o incluso la desaparición del sistema que se contempla.

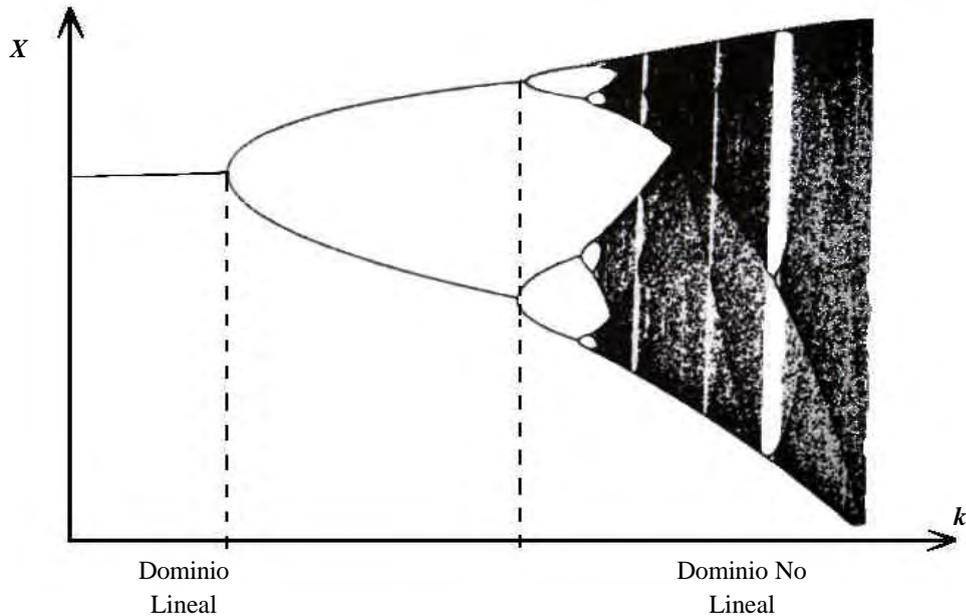
La evolución en el tiempo de los complejos sistemas sociales y biogeoquímicos no puede ser representada adecuadamente por funciones lineales o curvas suaves y continuas, excepto en el caso de aproximaciones sobre cortos segmentos de tiempo (Dodrecht *et al.* 1988). La evolución real de estos sistemas usualmente contiene retroalimentaciones positivas y comportamientos no lineales e incluso discontinuidades, lo que hace muy difícil predecirlos aunque en retrospectiva sea fácil explicarlos

(Merkhofer 1987). Los conceptos de “vulnerabilidad”, o predisposición a la afectación, y “resiliencia”, o capacidad de recuperación, entran a jugar un papel fundamental debido a su significativa relación con la posible ocurrencia de discontinuidades. Un sistema puede saltar de un atractor a otro si es alterado por una perturbación suficientemente impactante, lo cual no depende solamente de la intensidad del suceso sino, también, de posibles inestabilidades no fácilmente perceptibles del sistema. De esta forma se puede plantear, desde la perspectiva de los sistemas dinámicos complejos que el *riesgo* caracteriza un estado del sistema socio-técnico –incluso las condiciones iniciales– y equivale a una situación de crisis potencial (Cardona 2001). Una bifurcación, que depende no solamente de la acción de un agente perturbador o detonante, que bien podría ser un suceso o un proceso acumulativo de deterioro, sino también de unas condiciones de inestabilidad –equilibrio al límite del caos–, que es el estado que favorece o facilita que se desencadene la crisis ante la ocurrencia del suceso detonante o la superación de un umbral crítico del proceso de deterioro. Metodológicamente este planteamiento puede expresarse (Ecuación 6.1) como:

$$Cp = Ta \cdot Ic \quad [6.1]$$

donde  $Cp$  (*crisis potential*) expresa la factibilidad de crisis,  $Ta$  (*trigger agent*) representa la posibilidad de ocurrencia de un agente detonante, e  $Ic$  (*instability conditions*) son las condiciones de inestabilidad del sistema (Cardona 1995/99a). Las condiciones de inestabilidad son debilidades o deficiencias que pueden ser de carácter ambiental o ecológico, demográfico o social, económico, institucional o político, cultural o ideológico, entre otras. Esta expresión, la ecuación 6.2, es más general que la propuesta previamente por el autor (1985) expresada mediante la ecuación 2.2 (descrita en el capítulo 2), que corresponde a un caso particular de comportamiento de un sistema dinámico específico, en el cual no solamente es importante el agente detonante o la perturbación, es decir la *amenaza*, sino las condiciones dinámicas de inestabilidad, o la *vulnerabilidad*. Lo que le da soporte al planteamiento de que la vulnerabilidad tiene especial incidencia en el potencial de desastre, que se traduce en la crisis en este caso. Los sistemas dinámicos no pueden olvidar las perturbaciones, excepto que sean *disipativos*, es decir poco vulnerables o “resilientes”.

La figura 6.1 representa la estabilidad de un sistema y los puntos de transición a un nuevo estado de comportamiento, mediante la ecuación logística  $X_{n+1} = k X_n (1 - X_n)$ . El valor de  $X$  representa el estado del sistema, mientras que el valor constante de  $k$  describe los parámetros o características del sistema que causan que este sea estable, oscilante, oscilante de manera compleja o caótico. El valor de  $k$  se encuentra entre 1.0 y 4.0. El sistema se bifurca aproximadamente en 3.0, y se mueve a una segunda bifurcación en  $k = 3.5$ , y en caos en aproximadamente  $k = 3.66$ . Sistemas con un  $k$  bajo son bastante resilientes o disipativos. Sistemas con un  $k$  alto son caóticos y operan en trayectorias inesperadas e impredecibles ante las fluctuaciones o perturbaciones. Según Priesmayer (1994), la información que provee el valor de  $k$  en sistemas sociales, obtenido de un proceso de regresión que permita detectar la ecuación logística subyacente, ofrece un iluminante indicador de la manera como operan dichos sistemas y la posibilidad de orientación la gestión que debe llevarse a cabo en ellos.



**Figura 6.1:** Estabilidad de un sistema y puntos de transición siguiendo la ecuación logística.

Con el soporte matemático de la teoría de bifurcaciones y centrándose preferentemente en un tipo particular de sistemas dinámicos (sistemas tipo gradiente) el matemático francés René Thom desarrolló una teoría sobre las singularidades especiales, o catástrofes, de determinadas familias de funciones (Carreras *et al.* 1990). Su teoría, que cuenta con tantos adeptos como detractores, resulta ser una herramienta útil en el estudio cualitativo de sistemas. La teoría de las catástrofes, o teoría de la bifurcación, da la impresión de ser la teoría del caos. Sin embargo, la primera es acerca de cómo cambian sistemas dinámicos estables cuando se altera el sistema un poco y la segunda es acerca de sistemas más complicados donde a los sistemas no es necesario alterarlos sino dejar que se desarrollen. Las dos ideas se pueden combinar y pensar acerca que pasa con estados caóticos cuando el sistema ha sido alterado un poco. Esta síntesis es la utilizada aquí para representar el proceso de riesgo y desastre de un sistema socio-técnico que es el asentamiento humano bajo la influencia de retroalimentaciones generadas con el ambiente natural. La teoría de las catástrofes en el lenguaje de hoy ofrece el estudio del comportamiento de sistemas dinámicos, que pueden tener uno o varios atractores. Cuando tienen varios, dependiendo de las condiciones iniciales es posible terminar en un comportamiento diferente. Una bifurcación puede conducir a un cambio de atractor, a uno desconocido, o a ninguno. El límite del caos se encuentra donde la información llega al umbral del mundo físico, donde consigue ventaja sobre la energía. La habilidad de reconocer la presencia de caos presenta una ventaja estratégica en el comportamiento “adaptativo” ante ese caos. En cada caso, será crítico identificar el grado de caos, distinguiendo entre el “borde del caos” y el caos total.

La ciencia de la complejidad trata de la estructura y el orden. Orden surgiendo de un sistema dinámico complejo; como por ejemplo: las propiedades globales que fluyen del comportamiento general de la sociedad. La estabilidad, es decir la defensa de un sistema a la acción del entorno es una propiedad emergente (Lewin 1995). En

conclusión, en sistemas en los cuales la estructura a gran escala es independiente de los finos detalles de la subestructura, *simplicidad* es la tendencia de que reglas sencillas emerjan del desorden y complejidad subyacente. La *complejidad* es la tendencia de sistemas interactuantes a coevolucionar de una manera que cambios en ambos conduzcan a un crecimiento de la complejidad desde simples inicios –complejidad que no es posible de predecir en detalle, pero cuyo curso general es comprensible y pronosticable (Cohen y Stewart 1994).

### 6.3.3 Sistemas disipativos en el borde del caos

Hoy la termodinámica es una ciencia clave para la comprensión y descripción general del *cambio*. El primer principio de la termodinámica corresponde a la ley de la conservación de la energía. El segundo, en su versión original, describe la evolución de un sistema aislado, que no intercambia energía ni materia con el exterior. El segundo principio de la termodinámica aporta la irreversibilidad del tiempo; el tiempo no como repetición sino como degradación o decadencia. En consecuencia, la *entropía* se plantea como una medida del desorden molecular, creciendo hasta un valor máximo: el equilibrio termodinámico. El segundo principio se convierte en una ley de desorganización progresiva; desde el orden hacia el caos. La propiedad más importante de la entropía radica, entonces, en que como resultado de procesos irreversibles, “orientados” en el tiempo, la entropía del universo (considerado como sistema aislado) va en aumento.

El equilibrio térmico fue por mucho tiempo pensado como el destino de todas las cosas vivientes, y del universo mismo. En efecto, la idea de equilibrio térmico llegó a ser un símbolo de la cultura popular a finales del siglo XIX resultado de la especulación que surgió por la preocupación de la eventual “muerte caliente” del universo. En los últimos decenios del siglo XX, sin embargo, la investigación en sistemas ordenados por procesos de *negentropía*, o entropía negativa, ha cambiado las ideas acerca de los procesos termodinámicos irreversibles y el rol de los mismos en un amplio rango de fenómenos de transformación. Negentropía, a diferencia de la entropía positiva, ocurre en una limitada serie de circunstancias, pero cuando se presenta sus implicaciones son profundas. Como su nombre lo indica, la negentropía representa una tendencia que va en contra de la entropía positiva y del sistema, en el cual ésta se produce, capaz de contrarrestar su descenso hacia el equilibrio térmico. Un sistema puede adoptar estructuras organizadas que son configuraciones improbables considerando el número de configuraciones posibles. Los procesos de negentropía son, por lo tanto, el material fundamental para el crecimiento y desarrollo de sistemas termodinámicos.

Esta contribución de la termodinámica a la teoría de los sistemas naturales parte de que los sistemas, en que pueden ocurrir estas particularidades, son abiertos y están sumergidos en algún entorno. Esto le da la capacidad a ciertos sistemas llamados *disipativos* de aumentar su complejidad o estructuración, transformando energía que proviene del ambiente, a través de mecanismos de aprovechamiento. Por lo tanto, para que los sistemas disipativos sostengan su crecimiento deben no solamente aumentar su potencial de negentropía, deben también eliminar entropía positiva que naturalmente se acumula a través del tiempo y que degrada la estructuración interna del sistema. Esto significa que, en la medida que los sistemas disipativos crecen y llegan a ser más complejos internamente, el precio de su incremento de complejidad estructural es el

aumento de entropía positiva. Dicha entropía es el desperdicio natural que resulta de los procesos por los cuales los sistemas disipativos se desarrollan; energía que se debe trasladar a su ambiente inmediato. Los sistemas disipativos, entonces, se caracterizan por una tensión dinámica entre su habilidad de acumular negentropía y su necesidad de transferir su entropía positiva al su medio ambiente. Si pueden soportar esta tensión, bajo circunstancias apropiadas, pueden lograr un estado de *entropía negativa neta* y persistir. De lo contrario el sistema se desarrolla hacia un estado de equilibrio termodinámico.

Siguiendo la teoría de estructuras disipativas (Nicolis y Pregogine 1989), la evolución de sistemas abiertos puede interpretarse como un movimiento del sistema fuera del equilibrio asociado con algunos procesos internos irreversibles, incrementa la tasa de disipación como medida por la producción de entropía. Inestabilidad, disparada por condiciones de no equilibrio ambiental, conduce a una mayor disipación y producción de entropía; ésta a su vez conduce a la aparición de nuevas inestabilidades. Lejos del equilibrio, la probabilidad incrementa que el sistema, con su proceso interno sea inestable con respecto a ciertas fluctuaciones.

La disipación de energía dirige la fuerza de la transformación. Esta se caracteriza por las condiciones de no equilibrio que dirigen al sistema a cruzar por un umbral crítico. Más allá de este umbral el sistema llega a ser "inestable estructuralmente" en relación con las fluctuaciones, las cuales conducen a incrementar la disipación y en un *loop* positivo de retro alimentación cambiar en el umbral.

Los sistemas abiertos para evolucionar deben evitar las situaciones de equilibrio. Sin embargo, en circunstancias de no equilibrio los sistemas pueden llegar a una situación de pseudo estabilidad que puede considerarse como una *situación estacionaria*. En tales casos en el sistema se produce cierta entropía positiva que, debido a su condición de abierto, la puede disipar totalmente al exterior. De esta manera la variación total de entropía es nula y el sistema mantiene su estructura constante. En conclusión, se necesita una termodinámica del no equilibrio para sistemas no aislados.

La termodinámica del no equilibrio parte del concepto de balance de entropía, introducido por Pregogine. El balance neto de la entropía es la suma algebraica de lo que se produce más lo que se intercambia. Sólo el término producción tiene un signo bien definido. Si se acepta la entropía como una medida del desorden, esta claro que los sistemas aislados tienen una evolución condenada hacia el máximo caos, pero en sistemas abiertos existe la posibilidad de una estructuración interior si la competencia entre los términos del balance (producción y flujo) se resuelve favorablemente.

Por lo tanto, para desarrollarse o evolucionar, un sistema disipativo debe buscar constantemente nuevos estados organizacionales y mantenerse en estados alejados del equilibrio, lo que le permite transformarse en una entidad más compleja. Ambas propiedades son fuentes de inestabilidad y por lo tanto de cambio potencial. La fuente interna de la inestabilidad de un sistema disipativo reside en su capacidad o propensividad de hacer *detecciones de frontera*. Los sistemas disipativos están constantemente tratando de transformarse, moviéndose de su estado actual de equilibrio hacia algún estado alternativo. A menudo no reciben la energía del ambiente para sostener su transformación evolutiva, pero cuando la detección coincide con un repentino y sostenido incremento de energía, debido a su condición o estado alejado del equilibrio, pueden desestabilizarse. Una perturbación puede forzar el sistema a

abandonar su estado previo de referencia e iniciar su desarrollo hacia una nueva configuración. En esta aproximación dada por Pregogine (1996), la racionalidad ya no puede seguir siendo identificada con la “certeza”, ni tampoco la probabilidad con la “ignorancia”.

La diferenciación de los seres vivos se consigue disipando más entropía de la que se produce. Los sistemas vivos roban orden a su ambiente por medio de un flujo de neguentropía. La misma termodinámica de los procesos irreversibles ofrece una nueva alternativa: el *orden por fluctuaciones* y el concepto de *estructura disipativa*. Cuando los sistemas se alejan mucho del equilibrio, la situación deja de describirse como una prolongación lógica de dicho estado. Los sistemas dejan el llamado régimen lineal de la termodinámica para entrar en el no lineal. En este régimen aparecen discontinuidades e inestabilidades, el estado estacionario compatible con las condiciones que impone el ambiente ya no es único y las fluctuaciones espontáneas –antes siempre condenadas a regresar– pueden amplificarse y arrastrar los sistemas hacia nuevos e imprevistos estados estables. Resulta pues muy interesante resaltar aquí la reconciliación entre azar y determinismo. La descripción de un sistema con bifurcaciones implica la coexistencia de ambos: entre dos bifurcaciones reinan las leyes deterministas, pero en su inmediata vecindad de tales puntos críticos reina el azar. Esta rara colaboración entre el azar y determinismo es un nuevo concepto de historia que propone la termodinámica moderna: *la esencia del cambio*.

Este proceso evolucionario empieza con la aparición de comportamiento bifurcacional, que es un comportamiento fluctuante que envía el sistema a un movimiento oscilatorio entre dos o más nuevos puntos de equilibrio posible. Estas oscilaciones cíclicas indican que el sistema disipativo en cuestión se ha sea desestabilizado y ha entrado en fase caótica. En este punto dos cosas pueden suceder: el sistema se mantiene caótico, oscila siempre más rápidamente, y eventualmente se destruye el mismo, o la fluctuación se amortigua tanto como el sistema se asienta en una nueva configuración. Cuando esto ocurre el sistema se ha desarrollado, se ha reorganizado alrededor de una nuevo punto de referencia en el cual inicia su comportamiento de detección de frontera. Esta detección continua hasta que una nueva perturbación o fuerza ocurre y una nueva conjunción de condiciones externas e internas una vez más empujan el sistema a una nueva trayectoria evolucionaria. Los sistemas disipativos son, por lo tanto, entidades estructuradas caóticamente lejos del equilibrio y exhiben la denominada dependencia sensible a las condiciones iniciales.

A menudo se trata el caos en función de las limitaciones que impone, verbigracia, la falta de predecibilidad. Sin embargo, la naturaleza puede usar el caos de manera constructiva. A través de la amplificación de pequeñas fluctuaciones puede facilitar a los sistemas naturales el acceso a lo nuevo. La evolución biológica, por ejemplo, necesita de la variabilidad genética: el caos proporciona un medio de estructurar los cambios al azar, haciendo así posible que la variabilidad esté bajo el control evolutivo.

La naturaleza esta hecha de sistemas dentro de sistemas de manera indefinida. Con referencia a un determinado sistema cualquier perturbación que venga de fuera, o no sea “anticipable” desde dentro del sistema de referencia, representa una entrada de energía que destruye más o menos parcialmente un *pattern* existente y vuelve a poner en marcha un proceso que sigue ciertas vías y acaba, a su vez, al perder energía disponible, atascado en el dominio de complicación creciente. Existe un interesante espectro de frecuencias de los distintos cataclismos. El día y la noche representan

realmente algo traumático para muchos organismos; lo mismo ocurre con las estaciones, con los períodos de sequía, las inundaciones, los terremotos, las glaciaciones, las colisiones de asteroides y así sucesivamente. Lo que se debe retener en este punto es la asimetría en los cambios: la entrada de energía (la energía recibida), la perturbación y el volver a poner el sistema en una situación “inicial”, donde el despertar o recomenzar el proceso, es rápido; pero la “evolución” normal y gradual que conduce a las etapas de gran complejidad puede prolongarse indefinidamente.

Una analogía visual de un sistema en un estado crítico, estado cuasi-estable, es el montón de arena. Al conformarse por un flujo de arena continuo, el montón crece con firmeza hasta pronto alcanzar el límite. Lo que era un montón pequeño va elevándose cada vez más, hasta que, de repente, más arena puede desencadenar una pequeña avalancha y luego una grande, avalanchas de todas clases. El montón, cuando no recibe más arena adicional, representa el equilibrio en estado crítico y las avalanchas de toda gama de tamaños, provocadas por perturbaciones de la misma magnitud (otro grano de arena), representan una distribución exponencial de la respuesta: la marca de un sistema que ha alcanzado el estado crítico. Que ha alcanzado, posiblemente, el límite del caos.

Un gráfico con la magnitud de las extinciones y su frecuencia es muy parecido a una ley exponencial. No es una línea recta es ligeramente convexa (en logaritmos sería una línea recta descendente de izquierda a derecha). El mundo está en equilibrio en el límite del caos (en el borde del caos), sólo que ligeramente del lado congelado del caos (Kauffman 1993).

Los fenómenos de la naturaleza peligrosos para un asentamiento humano, como los terremotos, son la expresión del cambio en el ambiente en el cual se encuentra el sistema socio-técnico. Una configuración geológica, en efecto, es un sistema dinámico, no lineal, abierto, donde el levantamiento tectónico y la actividad sísmica representan la entrada; la masa perdida por el desperdicio y la degradación del relieve representan la salida (Keller y Pinter 1996; Brumbaugh 1999). Es el principio de antagonismo que establece que hay dos tipos de procesos activos en la formación de un paisaje en cualquier instante: el endógeno o tectónico y el exógeno o meteórico (Scheidegger 1987). Generalmente, estos dos procesos hacen más o menos un balance el uno en el otro de tal manera que el paisaje geológico es el resultado del cambio de un sistema complejo cuasi-estable o en estado crítico.

La aparente “estabilidad” se debe al hecho de que los sistemas dinámicos, no lineales, abiertos tienden a desarrollarse en estados cuasi-estables, ordenados en forma auto-organizada en el borde del caos, con un atractor fractal. Estos sistemas restablecen el orden en pasos de varias magnitudes los cuales tienen una distribución que obedece a una ley exponencial. En un conjunto fractal de dimensión  $d$ , existe una ley de potencia para subconjuntos: El número  $N$  de subconjuntos de “tamaño” (lineal)  $L$  es proporcional a  $L \exp(-d)$ . La curva de recurrencia de magnitudes de los terremotos ilustra el cumplimiento de dicha ley de potencia fractal –los sucesos de magnitud grande son escasos y los de magnitud pequeña son comunes– y la existencia de un dominio auto-estructurado. La saturación (sismos máxima magnitud) indica las limitaciones de la ley y de paso las fronteras del dominio.

En el sistema socio-técnico –el asentamiento humano–, los “desastres” no son otra cosa que sucesos sociales de diferentes magnitudes. Al igual que en su entorno natural, estos eventos están gobernados por una ley exponencial. El asentamiento humano es una configuración o estado cuasi-estable que no corresponde simplemente a una

situación de equilibrio dinámico, sino más bien a un orden auto-organizado o auto-estructurado; resultado de múltiples perturbaciones internas y externas, entre otras: desastres. Las condiciones de vulnerabilidad del sistema socio-técnico, en todas sus dimensiones (física, económica, social, política, etc.) caracterizan su inestabilidad que favorece la ocurrencia de crisis. Se trata de esa “susceptibilidad” del sistema complejo no lineal que representa su condición de estado crítico o de estar en el borde del caos.

#### 6.4 Representación conceptual de riesgo, desastre y gestión

Un sistema socio-técnico como el asentamiento humano es, termodinámicamente, un sistema abierto, es decir intercambia materia y energía con su ambiente, que en este caso es al ambiente natural. El balance entrópico refleja en qué forma puede mantenerse una situación o estado estacionario; es decir la estructura o configuración física y social del asentamiento humano. El sistema envía al ambiente toda la entropía que en su interior se produce, lo que puede llegar a afectar nocivamente al ambiente, degradándolo, e incluso desencadenar respuestas de ese ambiente impactado. La persistencia del sistema en un estado estacionario equivale entonces a la conservación de una estructura o grado de organización; que en este caso sería la estructura urbana y de la sociedad misma del asentamiento humano, que se mantiene extrayendo orden del ambiente. Por otro lado, la evolución desde una configuración, supone la adquisición de dicha estructura final al interior del medio natural, o, si se quiere, la acomodación interna del sistema a las condiciones impuestas desde afuera, como el clima, los cambios de la geodinámica interna y externa, etc. Se trata de la primera componente de la nueva esencia del cambio: la adaptación de un sistema a su entorno. Dentro del régimen lineal, la estabilidad del estado estacionario está asegurada, esto es, cualquier perturbación fortuita que suponga un desplazamiento con respecto a dicho estado es vencida por el sistema que tiende a restituirse en la situación estacionaria. Es *persistencia* del sistema socio-técnico o su *resiliencia* ante perturbaciones que ocurren a su interior o que provienen del ambiente; y que puede disipar o absorber. Si se le llama fluctuaciones a tales las desviaciones azarosas, se puede decir que, en los procesos de adaptación termodinámica, las fluctuaciones no tienen la oportunidad de progresar, se amortiguan y no llegan a trascender macroscópicamente. Las fluctuaciones regresan. En este caso, la producción de entropía es una magnitud no negativa que decrece durante cualquier evolución y que se hace constante y mínima una vez se ha alcanzado el estado estacionario. Desde el punto de vista ambiental y urbano esta circunstancia significa el *desarrollo sostenible* y una alta resiliencia ante los fenómenos ambientales. Esta es una ley física, enunciada y demostrada por Prigogine bajo la denominación del principio de la mínima producción de entropía, para el fenómeno de un sistema adaptándose a su entorno. Es la “anticipación” para evitar la crisis que pueda significar un cambio de estado o hasta la destrucción misma del sistema. Esto, desde la perspectiva del riesgo y los desastres, no es otra cosa que la *prevención-mitigación* o *la reducción del riesgo*.

Superada una distancia crítica del equilibrio, es decir cuando se tiene un alto grado de *vulnerabilidad*, las ecuaciones cinéticas y fenomenológicas se hacen no lineales. Hay más de una solución. Las soluciones se bifurcan, pero sólo una es la verdadera, sólo una representa la realidad del sistema. La pregunta es ¿cuál? El azar decide. Incluso una mínima fluctuación (antes irrelevante) decide ahora el futuro del sistema

macroscópico. Es la situación de *alto riesgo*, los sistemas dejan de adaptarse y tienden a nuevos e imprevisibles estados por su alejamiento del equilibrio. El atractor en este momento vigente caracteriza el *riesgo*, es decir, la posibilidad de cambio o mutación, que en el sistema socio-técnico podría significar el *desastre*.

Para reducir la entropía, o el desorden, que se produce en los sistemas sociales es necesario conseguir negentropía que intente reducir o al menos neutralizar el proceso. Esto se traduce en un esfuerzo y un "coste" que debe asumir la sociedad con el fin de evitar el aumento y la acumulación paulatina de la *vulnerabilidad*. Actualmente la velocidad de los procesos de aumento de vulnerabilidad supera la velocidad de los procesos de solución o intervención de la misma. y un cambio de dirección significaría una "bifurcación" (Cardona 1999a) o un nuevo paradigma cuyo coste social sería relativamente igual o más alto al que causó la revolución industrial o la revolución sanitaria en siglos anteriores. Infortunadamente, el coste social de no cambiar la situación actual es también enorme y será cada vez mayor. Al respecto, miembros del Club de Roma han planteado desde los años 1970 que el pago no equitativo del coste social del proceso continuo de deterioro ambiental, que bien puede asimilarse al planteamiento anterior, y los límites del crecimiento que se establecen en términos ambientales, permiten proyectar escenarios factibles (estados del mundo) de colapso global para este siglo que se inicia (Meadows *et al.* 1994).

Elegir un sistema significa definir la frontera que le separa de su entorno. Se trata de una superficie real o ficticia, pero permeable en principio al paso de la información (influencias) en sus dos sentidos: el sistema al entorno y del entorno al sistema. La cantidad de información contenida en la fuente depende de su diversidad potencial de comportamiento. Es la "complejidad del sistema"; primera cantidad fundamental. La complejidad del entorno, es la "incertidumbre" del mismo; segunda cantidad fundamental. La tercera cantidad fundamental es la "capacidad de anticipación" del sistema que está relacionada con qué parte de la información emitida es recibida, es decir de qué tan menor es el error: Esto significa que el sistema conoce bien su entorno. El error inverso, cuanto menor sea, mayor influencia hay del sistema en el entorno; es decir, se ve más afectado. Es la "sensibilidad del entorno"; cuarta cantidad fundamental (Wagensberg 1998). Se trata de las mutuas influencias entre el asentamiento humano (el sistema socio-técnico) y el ambiente natural. La complejidad del ambiente se caracteriza por la incertidumbre que hay en la dinámica de sus influencias o sucesos que pueden causar efectos en el sistema. Estos son flujos (recursos naturales) o descargas de energía (terremotos, erupciones volcánicas, huracanes, etc.) que siguen una ley de potencia, ante los cuales el sistema debe anticiparse para beneficiarse, mejorando su estructura y aumentando su complejidad (desarrollo social, urbano, etc.), y adaptándose en forma *preventiva* para que la influencia de los sucesos naturales no le sea nociva, mediante procesos de *gestión del riesgo*.

La información neta que llega a un destino se obtiene, lógicamente sustrayendo el error a la información de la fuente. Por lo tanto: la complejidad del sistema, que paradójicamente caracteriza su susceptibilidad  $S_s$  (*susceptibility of the system*), menos su capacidad de anticipación con respecto a su entorno, o persistencia  $P_s$  (*persistence of the system*), no es más que la información o influencia que el entorno introduce al comportamiento del sistema  $I_e$  (*influence of the environment on the system*). Esta influencia es igual a la incertidumbre del entorno  $U_e$  (*uncertainty of the environment*), menos su tendencia a mantenerse estable, u homeóstasis  $H_e$  (*homeostasis of the*

*environment*), que en sentido inverso representa la sensibilidad del entorno. Así, la incertidumbre del entorno menos su sensibilidad *Se* (*sensitivity of the environment*), no es más que la información o influencia *Ise* (*influence of the system on the environment*), que el comportamiento del sistema suministra al comportamiento del entorno, lo que se puede expresar en forma general (Ecuaciones 6.2 y 6.3):

$$Ss - Ps = Ies \quad [6.2]$$

$$Ue - He = Ise \quad [6.3]$$

la condición de equilibrio estacionario por mutuas influencias (Ecuación 6.4) implica que:

$$Ies \sim Ise \quad [6.4]$$

por lo tanto, se puede establecer la siguiente equivalencia (Ecuación 6.5):

$$Ss - Ps \sim Ue - He \quad [6.5]$$

ambos mensajes contienen las mismas cantidades de información. Una perturbación en un término de la ecuación requiere el ajuste de los otros tres. Si aumenta, por ejemplo, la incertidumbre del entorno (lo más desconocido), el sistema debe aumentar su complejidad, esmerar su capacidad de anticipación, o inhibir su efecto sobre el entorno.

Usualmente, por los desequilibrios sociales y económicos los sistemas más desarrollados explotan a los menos (Margalef 1986) y los ponen a disipar más entropía, lo que se traduce en deterioro de la calidad urbana, pobreza, segregación social y un aumento diferencial de la *vulnerabilidad*; lo que aumenta la complejidad y también la inestabilidad del sistema. La *degradación ambiental* causada por las influencias del asentamiento humano sobre el hábitat natural, debido a la sensibilidad del entorno reduce su homeóstasis, lo que se traduce en efectos que aumentan su incertidumbre y, por lo tanto, el potencial de *fenómenos peligrosos* contra el mismo sistema socio-técnico.

Se puede definir el “desorden” como la entropía presente dividida por la entropía máxima posible. Entre cero y uno. Normalmente la entropía y el desorden aumentan a la vez aunque formalmente se ha podido desenganchar los conceptos de entropía y desorden; “orden” + “desorden” = 1 Pero al aumentar el espacio o la entropía máxima el desorden puede disminuir. Entropía y orden aumentan al contrario de lo que se espera. (Wagensberg 1998). De la misma manera se puede proponer que “persistencia” + “vulnerabilidad” = 1 y que “homeóstasis” + “sensibilidad” = 1. Esto se puede expresar de la siguiente forma (Ecuaciones 6.6 y 6.7):

$$Ps + Vs = 1 \quad [6.6]$$

$$Ps = 1 - Vs \quad [6.7]$$

reemplazando la Ecuación 6.7 en la Ecuación 6.5 se puede escribir (Ecuación 6.8):

$$Ss - 1 + Vs \sim Ue - He \quad [6.8]$$

además, se tienen las Ecuaciones 6.9 y 6.10,

$$He + Se = 1 \quad [6.9]$$

$$He = 1 - Se \quad [6.10]$$

lo que permiten expresar la equivalencia de la siguiente forma (Ecuaciones 6.11 y 6.12):

$$Ss - 1 + Vs \sim Ue - 1 + Se \quad [6.11]$$

$$Ss + Vs \sim Ue + Se \quad [6.12]$$

los dos términos de la izquierda de la Ecuación 6.12 expresan la susceptibilidad interna o intrínseca del sistema socio-técnico y su *vulnerabilidad* ante acciones externas. Es decir, las condiciones de inestabilidad que determinan el potencial de crisis o *desastre*. Es lo que aquí se le ha denominado: *riesgo*; el cual es función de los dos términos de la derecha de la Ecuación 6.12, que expresan la incertidumbre interna o propia de procesos dentro del ambiente y su sensibilidad ante las acciones externas que lo afectan. Es decir, el potencial de sucesos o agentes detonantes, que aquí se les ha denominado *amenazas*.

Cuando en el antagonismo del sistema-entorno se sortean todas las dificultades y se consigue no violar la ley fundamental, entonces se dice que hay “adaptación”. El sistema socio-técnico adecua su estructura para seguir siendo compatible con su ambiente. El sistema se adapta. Cuando esto no es posible, cuando una perturbación (fluctuación) en uno de los términos no puede ser absorbida por una respuesta de los otros tres, la adaptación se rompe y el sistema entra en crisis: se presenta el *desastre*. El sistema entonces, o bien se destruye, o bien cambia a otra nueva estructura; es decir, se auto-organiza o se reconstruye con una mayor capacidad o defensa de su ambiente. Sobreviene una bifurcación en cualquier caso.

El éxito del sistema socio-técnico se observa claramente en la historia a través de estos conceptos: la sociedad y su unidad humana son cada vez más complejas. La ciencia le provee de un poder de anticipación cada vez mayor –*la prevención*– y su tecnología le asegura cada vez más independencia frente a los caprichos ambientales o *fenómenos peligrosos*. Los sistemas complejos adaptativos son buscadores de pautas. Interaccionan con el entorno, aprenden de la experiencia y, como resultado, se adaptan. Así, las adaptaciones son un comportamiento determinista y las autoorganizaciones son comportamientos indeterministas, como resultados positivos posteriores a una crisis. Los sistemas adaptativos, como los asentamientos humanos, pueden hacer compatible consigo mismos el ambiente natural en que se encuentran. Pueden lograr adaptarse logrando una estructura característica, en el borde del caos, en que sus influencias con el ambiente estén mutuamente equilibradas. Eso es la *sostenibilidad*; una propiedad que puede emerger de este sistema socio-técnico si se logra establecer una adecuada anticipación o lo que aquí se le denomina la *gestión del riesgo*.

La toma de decisiones y otros aspectos del manejo de estos sistemas están llegando a ser cada vez más difíciles. Los asentamientos humanos son sistemas dinámicos complejos que se desarrollan en dominios de inestabilidad y pueden emerger en nuevas estructuras urbanas a causa de *desastres*. Es difícil conocer con precisión el estado de inestabilidad o *vulnerabilidad* de un sistema complejo de este tipo. Por lo tanto políticas y decisiones de *gestión del riesgo* deben ser desarrolladas para *prevenir* la

precipitación del sistema en un inesperado estado de inestabilidad (vulnerabilidad creciente) o de reconfiguración (reconstrucción post-desastre). Teniendo en mente la gestión del riesgo y considerando que la vulnerabilidad refleja las condiciones de inestabilidad, entonces el entendimiento de las características de los sistemas disipativos es fundamental para estimular una acción colectiva efectiva para reducir el riesgo.

Comfort (1999) identifica cuatro condiciones como las necesarias, aunque no suficientes, para iniciar una transición de un sistema organizativo: la articulación de conceptos y significados comunes entre los actores sociales; la confianza entre quienes dirigen las instituciones y los ciudadanos; la resonancia entre las instituciones en la búsqueda del cambio y los suficientes recursos y la capacidad institucional para sostener la acción colectiva. De estas condiciones depende que prevención-mitigación, la preparación para emergencias y la capacidad de respuesta ante un desastre.

La coordinación de las operaciones en caso de desastre, por ejemplo, debe llevarse a cabo de manera amplia y a través de diversos medios. Esta se basa fundamentalmente en procesos de búsqueda de información, intercambio y retroalimentación que facilitan un aprendizaje intra e inter institucional ante la situación de crisis.

La interpretación de los sistemas dinámicos complejos que aquí se ha expuesto aparte de representar la dinámica del riesgo y la vulnerabilidad también permite representar la situación de desastre y la respuesta al mismo por parte del sistema socio-técnico. En cualquier caso si el sistema no se destruye por completo debe adaptarse y ese proceso de ajuste podrá ser más o menos rápido y eficiente dependiendo de sus posibilidades reales de adaptación. En términos de Stuart Kauffman (1993), cuando se presenta un desastre la respuesta que emerge en el sistema socio-técnico representa un movimiento hacia el orden del caos que significa el desastre. Kauffman sustenta que todos los sistemas operan en un continuo entre caos y orden y que los sistemas en el extremo de ese continuo tienden a moverse hacia el centro. Es decir, que sistema en condiciones de caos se moverá hacia el orden y en una situación de orden el sistema se moverá hacia el caos. En el centro del continuo entre caos y orden se encuentra el “borde del caos” donde según Kauffman hay suficiente “estructura” para soportar y intercambiar información y suficiente “flexibilidad” para adaptarse a las condiciones ambientales. En esta región estrecha, en el borde del caos, un sistema podría ser capaz de dar una respuesta creativa a las condiciones exigentes de una situación de crisis. El balance entre estructura y flexibilidad es el criterio que define la adaptabilidad de un sistema en el proceso de respuesta en un ambiente dinámico. Lo que equivale, en el caso de una sociedad o un asentamiento humano, la integración de los componentes técnicos y organizacionales que facilita a las instituciones la capacidad para atender rápidamente y efectivamente las demandas que surgen de la complejidad que se desencadena. La respuesta en caso de desastre involucra un proceso paralelo y no lineal. Las condiciones locales gobiernan el curso inicial de la acción de la respuesta y ésta se desarrolla simultáneamente por muchos actores en diferentes lugares. Las decisiones que se toman en ciertas situaciones críticas son la base de las interacciones posteriores. El grado de resiliencia o la capacidad para adaptar los recursos y capacidades existentes a nuevas situaciones y condiciones operativas está directamente relacionada con el grado de acceso a y el intercambio de información en un sistema en proceso de cambio y ajuste. Los requerimientos de acción en sistemas sociales complejos dependen de la efectividad y amplitud de los procesos de información y comunicación que operan en el sistema. La acción colectiva requiere,

primero, estructura para la efectiva movilización de recursos, segundo, exhibir flexibilidad adaptativa para la acción.

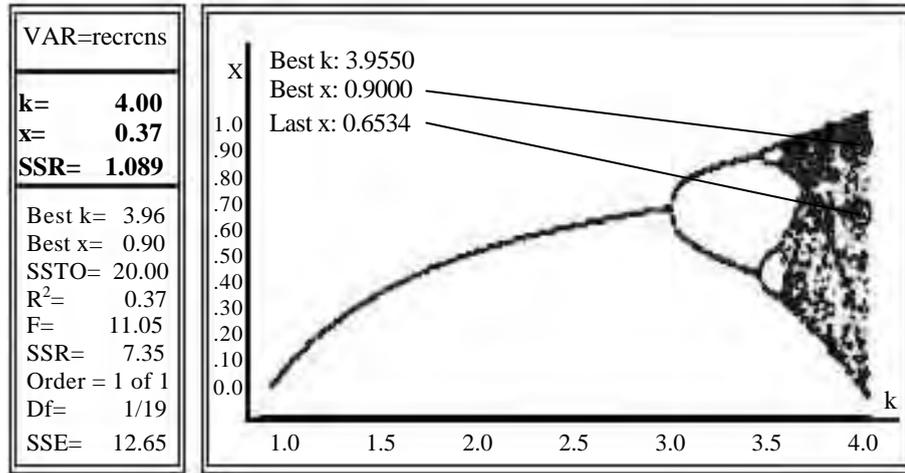
El estudio de casos, en particular de desastres originados por terremotos (Comfort 1999) indica que se pueden presentar cuatro tipos de respuesta dependiendo de la estructura técnica, la flexibilidad y la apertura cultural al uso de tecnología en el sistema socio-técnico. Estos tipos de respuesta son: respuesta no adaptativa (inadecuada para nivel de riesgo que existe), adaptativa emergente (insuficiente pero aceptable movilización), adaptativa operativa (reacción adecuada con restricciones) y auto adaptativa (innovadora, creativa y espontánea). Cada tipo de adaptación corresponde a una respuesta del sistema socio-técnico según el nivel de efectividad de su estructura técnica y nivel de organización, los cuales producen varios patrones de acción, inacción, innovación y determinación para restaurar las funciones de la comunidad.

Louise K. Comfort de la Universidad de Pittsburgh, con base en los planteamientos aquí expuestos –que el autor ha compartido con esta investigadora desde hace varios años– y el estudio que realizó sobre once desastres causados por terremoto en diferentes países propone un modelo que identifica cinco fases o estados en la evolución de la respuesta operativa después de un desastre: las condiciones iniciales (que a criterio del autor corresponden al riesgo mismo), la búsqueda de información, el intercambio de información, el aprendizaje intra e inter institucional y el comportamiento adaptativo. El primer estado representa las condiciones existentes en la comunidad antes del terremoto. Estas condiciones incluyen no sólo las características físicas de la comunidad sino también sus condiciones sociales, económicas y políticas, las cuales inciden en la capacidad organizacional para la acción colectiva. Una vez ocurrido el sismo se desencadena la necesidad de recuperación de la comunidad y se activan una serie de procesos de información –búsqueda e intercambio de información– que sirven como base para la acción colectiva. Estos procesos interactivos conducen a un aprendizaje al interior de las instituciones de manera individual, las cuales contribuyen a su vez a esquemas interinstitucionales entre las entidades involucradas en las operaciones de respuesta.

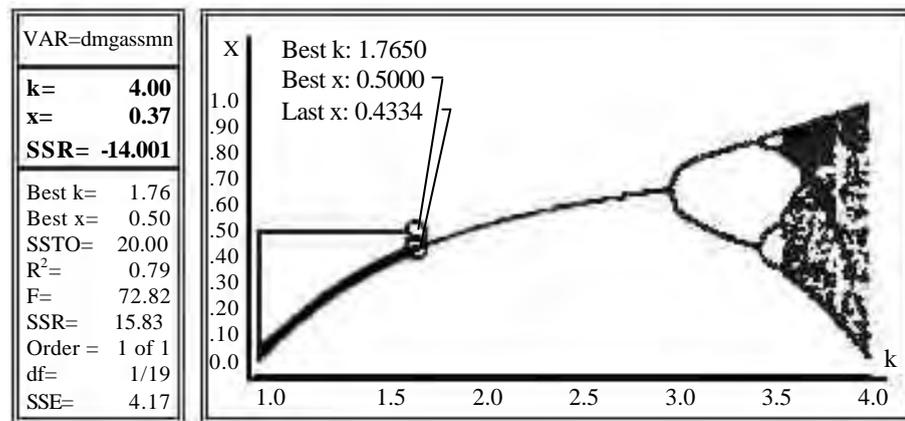
Las tres fases dinámicas –búsqueda de información, intercambio de información y aprendizaje intra e inter institucional– culminan en un comportamiento adaptativo, el cual representa un ajuste ante el desastre, que no es más que la respuesta ante el mismo. El grado de coherencia alcanzado en dicha respuesta refleja la amplitud con que la comunidad ha sido capaz de llevar a cabo las tareas para enfrentar las demandas urgentes causadas por el impacto del fenómeno. La coherencia, según Comfort (1999) se puede medir con el número, densidad y tipo de transacciones o interacciones realizadas entre las instituciones involucradas durante las operaciones de respuesta. Según Priesmayer (1994) dicha coherencia se puede estimar evaluando las diferentes funciones de respuesta ante un desastre, lo que se puede estimar con el análisis de regresión logística no lineal desarrollado por el mencionado investigador. Las figuras 6.2 y 6.3 ilustran dos casos en los cuales hay y no hay un comportamiento caótico en funciones como la recuperación y reconstrucción por entidades del sector privado y la evaluación de daños por parte de instituciones públicas (durante un lapso de 21 días) en el desastre causado por el sismo de 1987 en el Ecuador.

La metodología utilizada para estas estimaciones se basa en el modelo N-K propuesto por Kauffman (1993). Este investigador sugiere que el aumento de la complejidad en sistemas dinámicos complejos se puede representar considerándolos como sistemas N-K, donde N es el número de componentes dentro del sistema y K el número de interacciones

entre ellos. En un sistema N-K el proceso de coevolución depende del número de partes que interaccionan y de la frecuencia, el contenido y la dirección del flujo de información entre ellas. Aún mas, dicha coevolución depende de la selección que hacen los componentes del sistema al aceptar o rechazar el intercambio de información y en adaptar su comportamiento de acuerdo con sus acciones reciprocas. Así, para que haya cambio se requiere de orden y flexibilidad, de acción y reacción.



**Figura 6.2:** Regresión logística de la acción de organizaciones privadas en la recuperación y rehabilitación en el desastre sísmico de Ecuador 1987.



**Figura 6.3:** Regresión logística de la acción de instituciones públicas en la evaluación de daños en el desastre sísmico de Ecuador 1987.

Modelar en un sistema dinámico complejo no es buscar identificar una secuencia de relaciones causales que confiablemente produzcan unos resultados específicos. Mas bien, es identificar qué pasos se están dando a través de un espectro de muchos posibles cursos de acción y obstáculos, en un proceso en desarrollo que es guiado por una meta específica. En términos del método científico, el concepto de causalidad pasa a ser una abstracción de segundo orden en el estudio de sistemas no lineales. En este caso el

problema de política pública no es cómo lograr un resultado específico, sino más bien cómo generar y sostener un proceso de acción y consulta interactiva que, a través de su operación, conduzca a sus miembros a crear nuevas y más apropiadas estrategias y prácticas para responder a las necesidades de su ambiente.

El comportamiento adaptativo entre instituciones significa la capacidad de cambiar no sólo acciones sino prioridades para localizar recursos y atender las nuevas e inmediatas demandas que la crisis genera. Este cambio ocurre más eficientemente cuando las comunidades son capaces de “auto-organizarse”, es decir de reordenar sus prioridades y acciones de manera espontánea o sin la imposición de controles externos.

## **6.5 Técnicas para la modelización**

Para modelizar un sistema con fines de predicción o pronóstico existen diversas técnicas o herramientas. Tratándose de una representación del riesgo sísmico desde una perspectiva holística, algunas herramientas pueden ser más apropiadas que otras, debido al enfoque multidisciplinar y a la naturaleza de las variables que se desean involucrar. En particular cuando se trata de modelizar un sistema socio-técnico, como un asentamiento humano, el cual puede ser tan complejo como se quiera. Algunas herramientas que podrían ser utilizadas son la simulación (de la dinámica del sistema) y la evaluación multiobjetivo o multicriterio para la toma de decisiones, que puede estar basada en matrices de análisis de impacto o en redes de interrelación (Garret 1999).

En el primer caso, la estructura interna del sistema y de sus relaciones usualmente se mantienen fijas y el analista cambia ciertas condiciones, con el fin de estimar la respuesta del sistema cuando se procesa con unas condiciones específicas. La simulación puede ser determinista o estocástica, discreta o continua, lineal o no lineal, lo que hace en cada caso más complicado y eventualmente más confuso el proceso de la estimación de escenarios futuros. Su interés usualmente es identificar las causas subyacentes del comportamiento del sistema, aunque en algunas ocasiones se desarrolla con fines de predecir “futuros” con base en información histórica o para optimizar o identificar las mejores soluciones. Un ejemplo notable de este tipo de técnica, aplicada para la estimación de escenarios de potencial “sobrepasamiento”, crisis o “colapso” (estados del mundo), ha sido el modelo World3, desarrollado en M.I.T. por los hermanos Dennis y Donella Meadows, por solicitud del Club de Roma. Mediante este modelo tanto en los años 70 como, posteriormente, en los años 90, cuando se realizó la versión World3/91 en lenguaje de simulación STELLA, se ratificó que de seguir el actual crecimiento exponencial de la población, del capital, de la utilización de recursos y de la contaminación en el mundo será inevitable su colapso. (Meadows *et al.* 1974, 1994).

Ahora bien, la segunda posibilidad es la evaluación multicriterio, que también ha servido para representar situaciones o estados de sistemas dinámicos, complejos o no lineales. Puesto que este tipo de evaluación está basada en una racionalidad “constructiva” y permite tener en cuenta aspectos y efectos inciertos, inconmensurables, multidimensionales y conflictivos, es un marco de estimación prometedor para realizar evaluaciones integrales (macro y micro) y para la toma de decisiones en ambientes de múltiples variables (Munda 2000). Por ejemplo, la evaluación ambiental integrada (EIA), evaluaciones macroeconómicas, contabilidad verde o índices de sostenibilidad.

Este proceso se inicia con la identificación de variables imaginables que puedan “representar” o “reflejar” el estado de un sistema. Estas variables pueden no tener comparabilidad fuerte o conmensurabilidad. El análisis jerárquico o estructural de las variables (indicadores) es el paso siguiente. Consiste en determinar el impacto de cada variable en todas las demás o su influencia, con el objetivo de determinar su “peso” o importancia, para lo cual se conforman matrices de relaciones. Esta actividad se puede realizar teniendo en cuenta la opinión de expertos o de diversos actores sociales involucrados, si es necesario, utilizando el método Delphi (proceso de consenso y retroalimentación con el anonimato de los participantes). La evaluación multicriterio es una técnica para la toma de decisiones que permite involucrar diferentes perspectivas, por ejemplo la estimación del riesgo sísmico desde un punto de vista físico, económico, social, político, institucional, etc. Técnicas de evaluación multidisciplinar, como la mencionada, basadas en indicadores o índices han sido recomendadas recientemente por diversos especialistas con fines de reformular políticas públicas de prevención y reducción de riesgos (Maskrey *et al.* 1998; Comfort *et al.* 1999; BID 2000; Benson 2001; Cannon 2001; Wisner 2000, 2001; UNDP 2001).

Por lo tanto, el autor optó aquí por utilizar la segunda técnica de las dos antes mencionadas, dado que no se pretende simular la dinámica del asentamiento humano y la manera como se desencadena un desastre a causa de un terremoto. El objetivo de la modelización es, más bien, estimar el estado del sistema dinámico antes de que ocurra el suceso, caracterizado por su inestabilidad o “vulnerabilidad” que lo puede llevar a la crisis. Dicho estado corresponde al riesgo sísmico del asentamiento humano, que puede interpretarse como un atractor hacia donde la dinámica del sistema esta orientada durante el tiempo anterior a la manifestación sísmica o como las condiciones iniciales de las cuales depende la respuesta del sistema en el momento que es perturbado.

La prevención o reducción del riesgo sísmico es la política pública que se desea estimular con la estimación holística del riesgo sísmico urbano. Se intenta identificar las circunstancias que favorecen o facilitan que el desastre sísmico se presente, con el fin de “anticiparse” y lograr que el sistema pueda adaptarse y disipar la influencia del fenómeno peligroso. El proceso de elaboración de una política pública, a diferencia de lo que muchos creen, esta muy ligado a la técnica de evaluación que se utilice para orientar dicha política (Corral 2000). La calidad de la técnica de evaluación, llamada por algunos su *pedigree* científico, tiene una influencia insospechada en la elaboración de la política. Si el diagnóstico, por ejemplo, invita a la acción es mucho más efectivo que si sus resultados se limitan a identificar la simple existencia de debilidades o falencias.

La calidad se entiende como la habilidad de un producto para satisfacer unos determinados requisitos o atributos deseables que, en este caso, debe tener la técnica de evaluación (Funlowicz y Ravetz 1990, 1992). Estos atributos son su “aplicabilidad”, “su transparencia”, su “presentación” y su “legitimidad”. Del cumplimiento de estos atributos o propiedades de la técnica de evaluación dependerá su *pedigree* científico.

La aplicabilidad está ligada a la adecuación del modelo al problema, a su alcance y completitud; a la accesibilidad, aptitud y fiabilidad de la información requerida. La transparencia esta relacionada con la estructuración del problema, la facilidad de uso, la flexibilidad y adaptabilidad, y con la inteligibilidad o comprensión del modelo o algoritmo. La presentación se relaciona con la transformación de la información, la visualización y comprensión de los resultados. Finalmente, la legitimidad esta ligada con

el papel del analista, el control y contrastación, la posibilidad de verificación y la aceptación y consenso de los evaluadores y tomadores de decisiones.

Para la modelización, el autor propone una representación simplificada pero multidisciplinar del riesgo sísmico urbano, basada en una “parametrización” de rasgos o variables que representen o reflejen aspectos o factores de dicho riesgo. Esta parametrización no es más que un modelo formulado de la manera más realista posible, al que continuamente se le podrán introducir correcciones o esquemas alternativos. Las técnicas metodológicas que se proponen para estimar el riesgo sísmico urbano –indicadores relativos y redes neuronales difusas– son modelizaciones simplificadas multicriterio con las cuales se intenta tener una aproximación de la situación de un sistema dinámico complejo (no lineal), como lo es el asentamiento humano. En su diseño se han intentado cubrir todos los requisitos o atributos de calidad mencionados previamente.

El enfoque para la estimación holística del riesgo sísmico que aquí se propone y se aplica en el capítulo siguiente puede suscitar alguna controversia desde una perspectiva reduccionista. Sin embargo, ante la complejidad del sistema socio-técnico que se desea representar para modelizar el riesgo sísmico urbano, el autor prefiere una respuesta “aproximada” a la correcta formulación del problema desde una perspectiva holística –que necesariamente se tiene que hacer con cierta vaguedad– que una respuesta exacta a la formulación “incorrecta” del problema, que de manera reduccionista y fragmentada podría realizarse con cierta precisión.

## 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

$$IRT_k = IRH_k \times \mathbf{d}RH_k + IRS_k \times \mathbf{d}RS_k \quad [7.1]$$

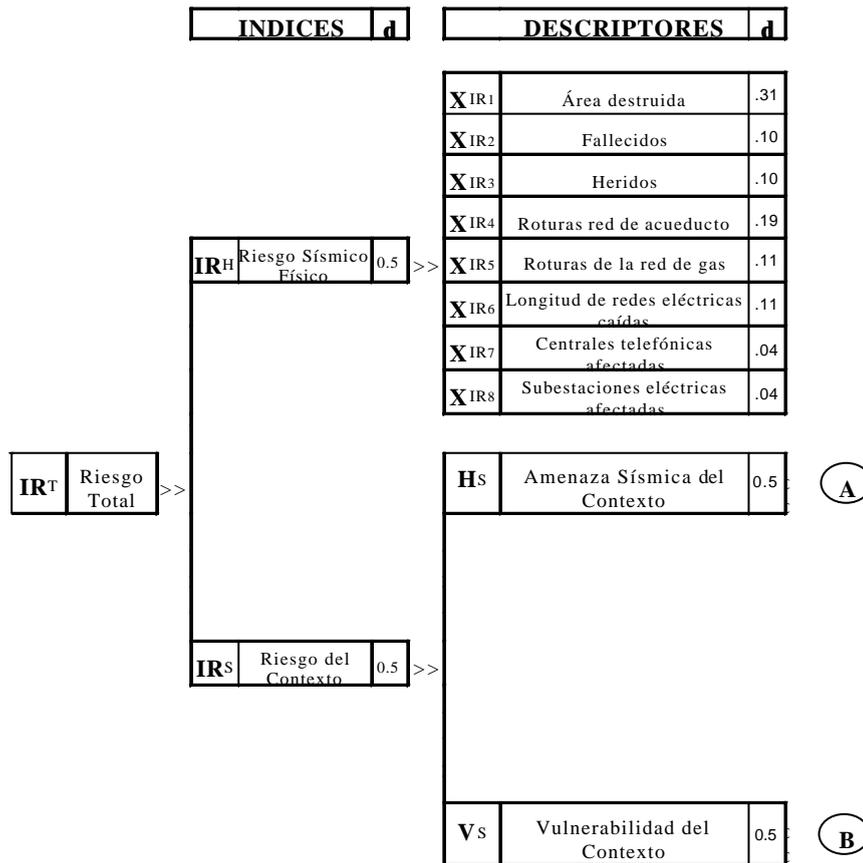
donde  $IRH_k$  es el índice de riesgo sísmico físico (*hard* o duro), que está basado en descriptores obtenidos de los estimadores de las pérdidas potenciales urbanas que pueden causar los futuros terremotos;  $IRS_k$  es un índice de riesgo sísmico del contexto (*soft* o blando), obtenido del valor escalado del producto de los descriptores de amenaza sísmica y de vulnerabilidad del contexto; y  $dIRH_k$  y  $dIRS_k$  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

$$IRH_k = \sum_i X_{IR_i} \times dIR_i \tag{7.2}$$

donde  $X_{IR_i}$  es el valor de cada indicador  $i$  obtenido de la información de los escenarios de pérdidas y  $dIR_i$  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

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

donde  $HS_k$  es el descriptor de la amenaza sísmica del contexto,  $VS_k$  el descriptor de la vulnerabilidad del contexto y  $\mathbf{a}$  y  $\mathbf{b}$  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.

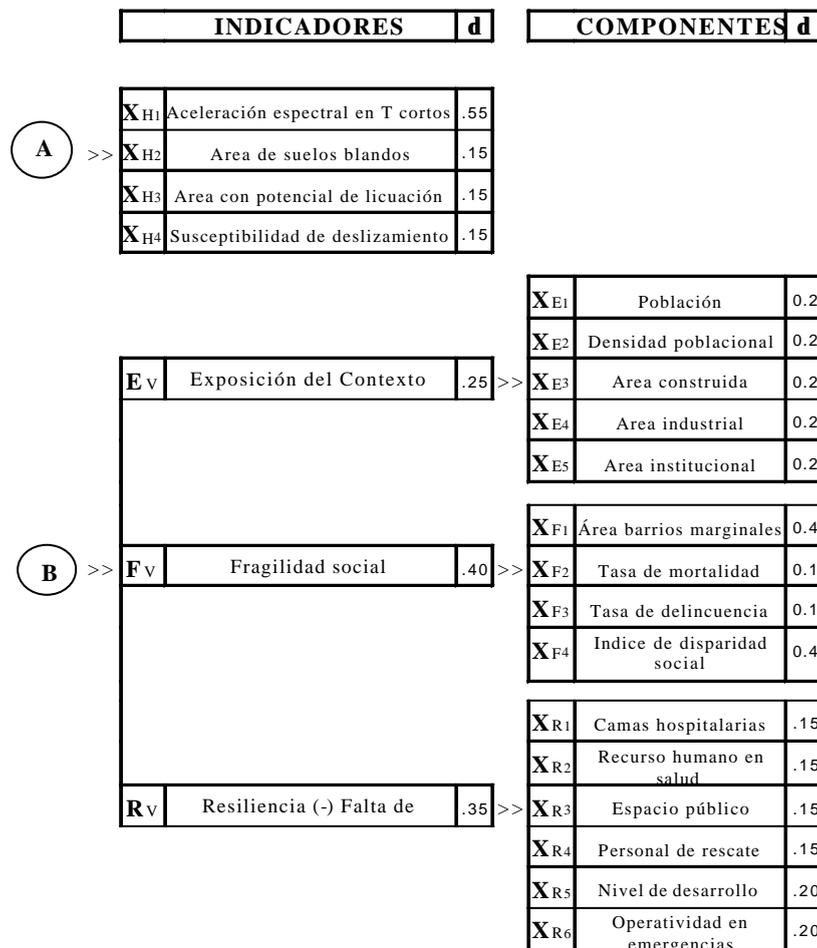


Figura 7.2: Indicadores y componentes de la amenaza y vulnerabilidad del contexto con los factores de participación obtenidos de la opinión de expertos.

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

directamente y los indicadores no están bien correlacionados, cualquiera de las técnicas que requieran esos prerrequisitos no es más efectiva. La única opción que queda para la ponderación es la evaluación subjetiva y esta es la única técnica factible y razonable para capturar el criterio, la experiencia y el juicio de expertos (Davidson 1997).

El análisis multicriterio basado en importancias relativas y pesos obtenidos mediante comparaciones sucesivas entre parejas de criterios (*pairwise*), desarrollado para la toma de decisiones, es una técnica útil para asignar los factores de participación o importancia de los componentes de un indicador de una manera más rigurosa que la directa apreciación utilizando el “juicio” o “sentimiento” de los expertos (Hayman 1998). Una de las técnicas más desarrolladas es el proceso jerárquico analítico (*Analytical Hierarchy Process* - AHP) que permite medir la consistencia de los factores de peso asignados mediante comparaciones *pairwise* (Saaty 1980).

De acuerdo con la técnica AHP la relación de consistencia  $CR$  (Ecuación 7.8a) es el cociente entre el índice de consistencia  $CI$  de una matriz de comparaciones *pairwise* dada y el valor del mismo índice para una matriz de comparaciones *pairwise* generada aleatoriamente:

$$CR = \frac{CI}{CI_{random}} \leq 0.1 \tag{7.8a}$$

donde el índice de consistencia  $CI$  está definido como

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{7.8b}$$

el término  $\lambda_{max}$  en la ecuación 7.8b es el mayor valor propio (*eigenvalue*) positivo de la matriz de comparaciones *pairwise*.

Hayman indica que la confiabilidad es suficiente si  $CR$  es menor o igual a 0.10. En caso contrario se debe revisar los elementos de la matriz de comparaciones *pairwise* con el ánimo de mejorar su consistencia. Una vez obtenida una consistencia aceptable se procede a normalizar la matriz y se determinan los valores ajustados de los factores de participación. Las Tablas 7.1 y 7.2 ilustran con un ejemplo la técnica para obtener factores de participación (o pesos) para los indicadores de Exposición, Fragilidad Social y Falta de Resiliencia del descriptor Vulnerabilidad del Contexto.

**Tabla 7.1:** Matriz de Vulnerabilidad del Contexto

	EV	FV	EV
EV	1	0.50	1
FV	2	1	1
RV	1	1	1
S	4	2.50	3

Valor propio mayor: 3.05362  $CI$  0.02681  
 $CR$  0.05156

**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
S	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).



### 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.

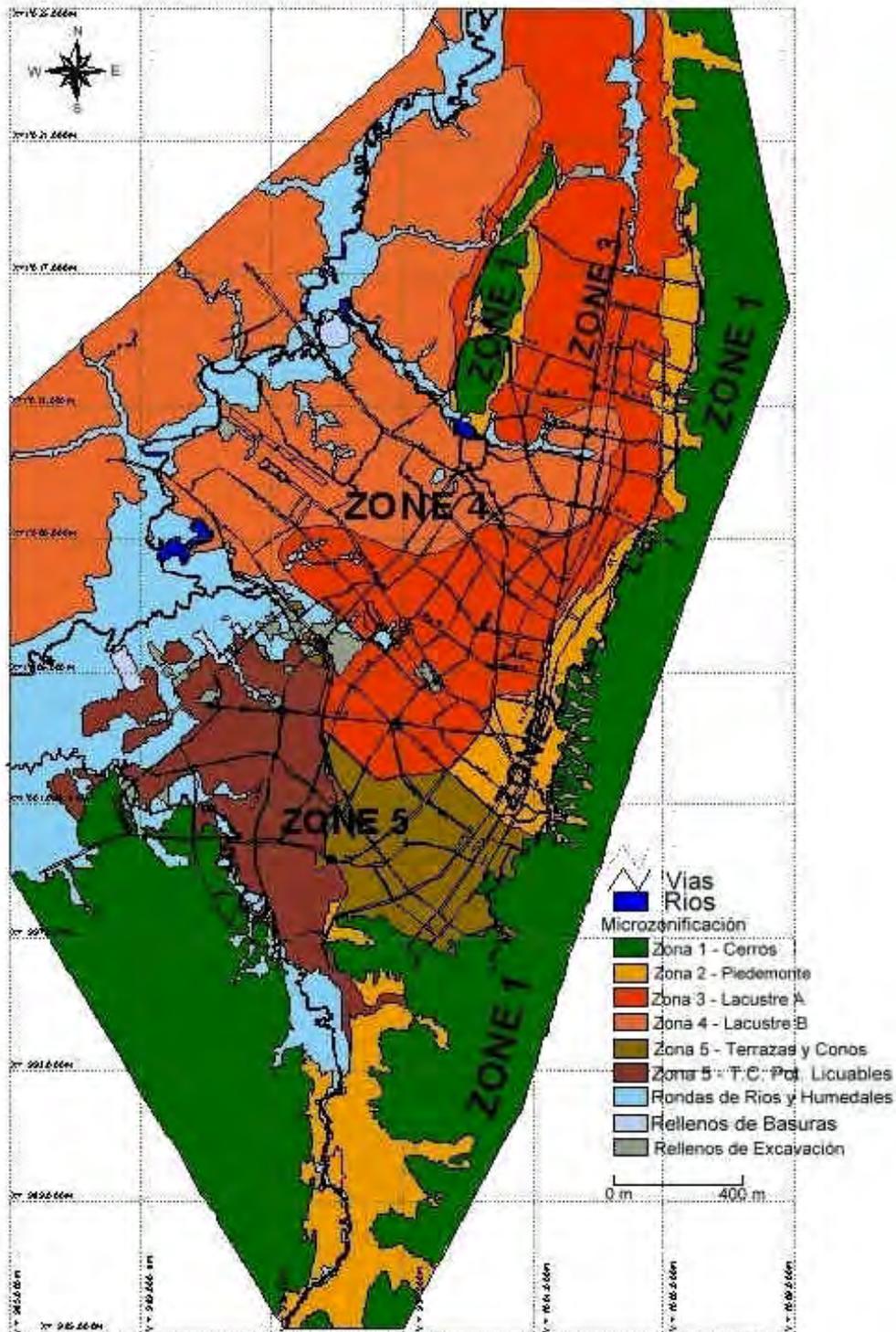


Figura 7.4: Mapa de microzonificación sísmica de Bogotá (Universidad de los Andes, 1996).

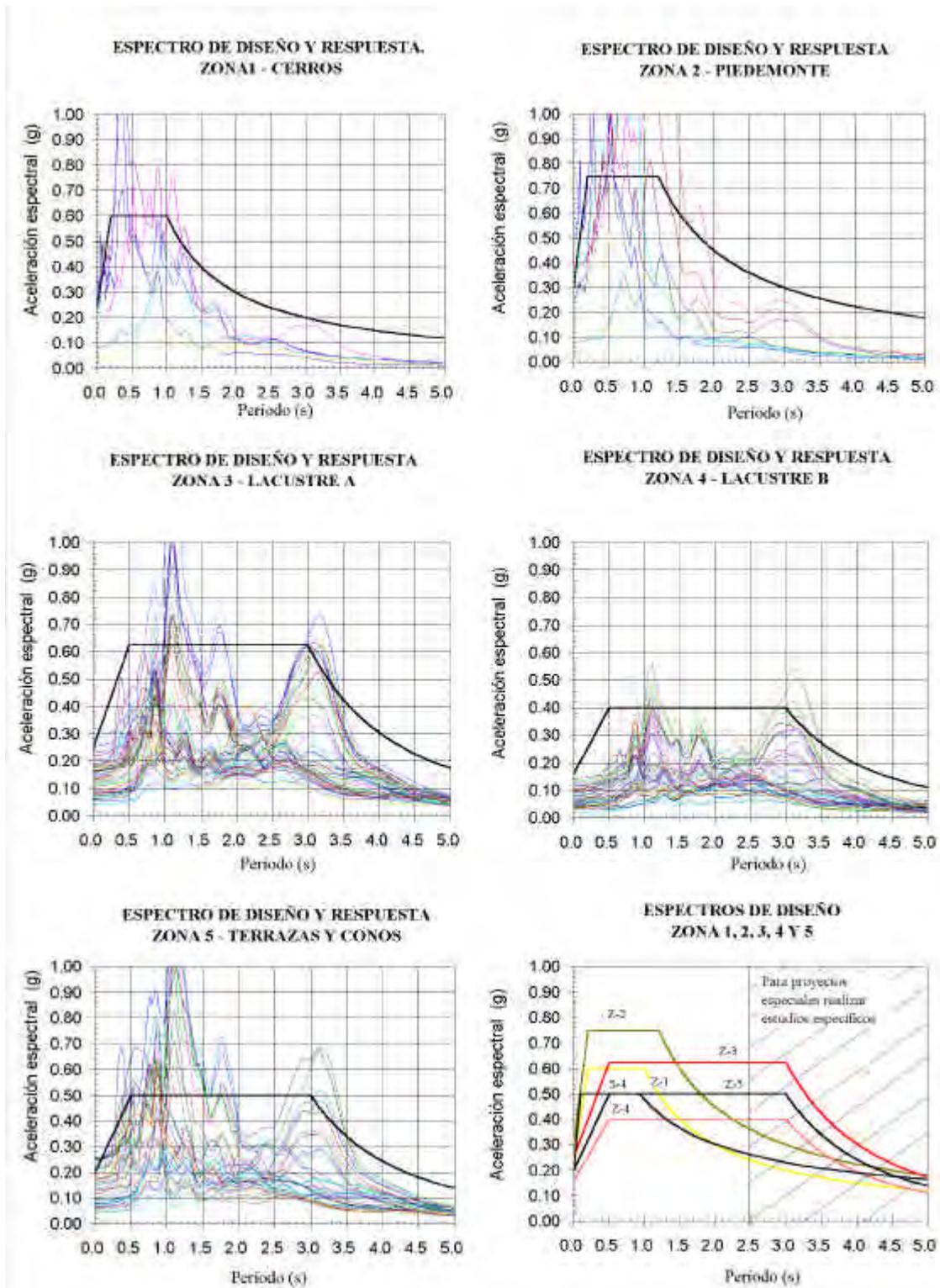
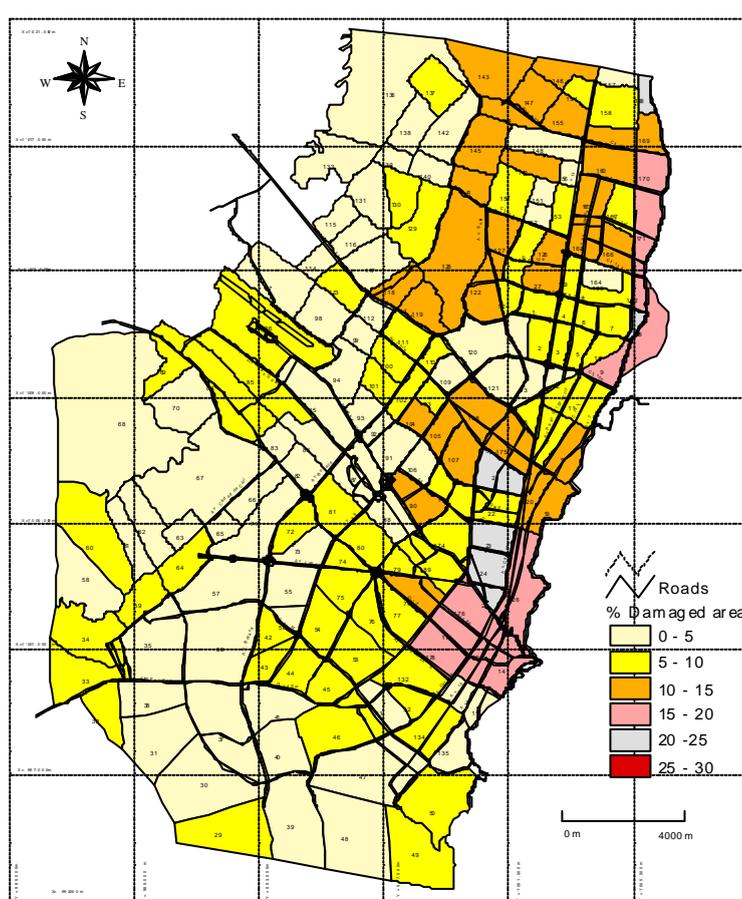


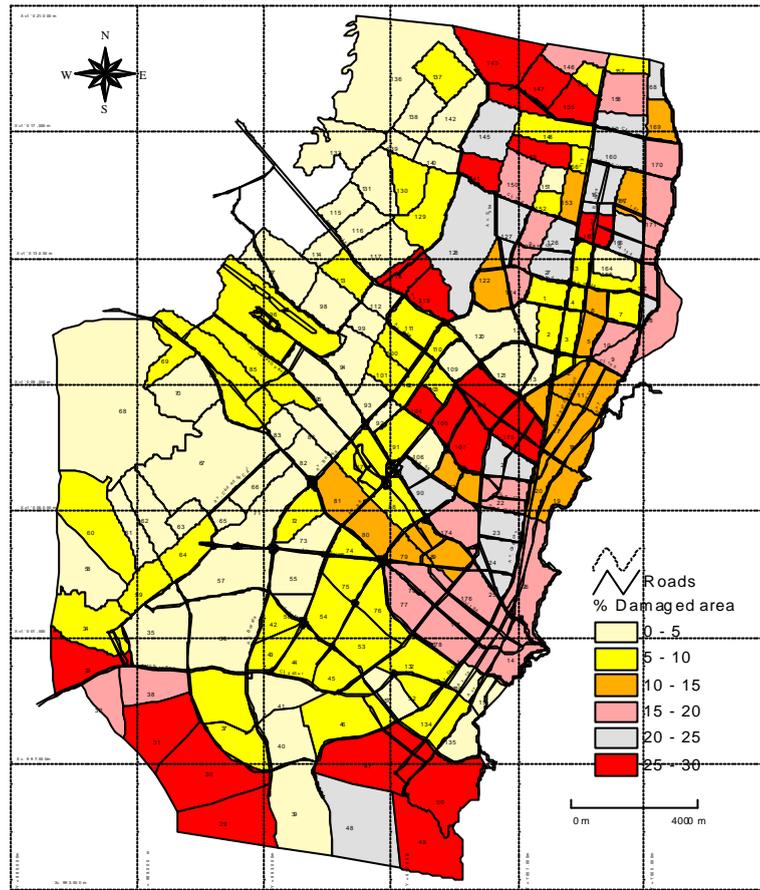
Figura 7.5: Espectros de aceleración,  $S_a$ , para cada zona (Cardona y Yamín 1997)

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.

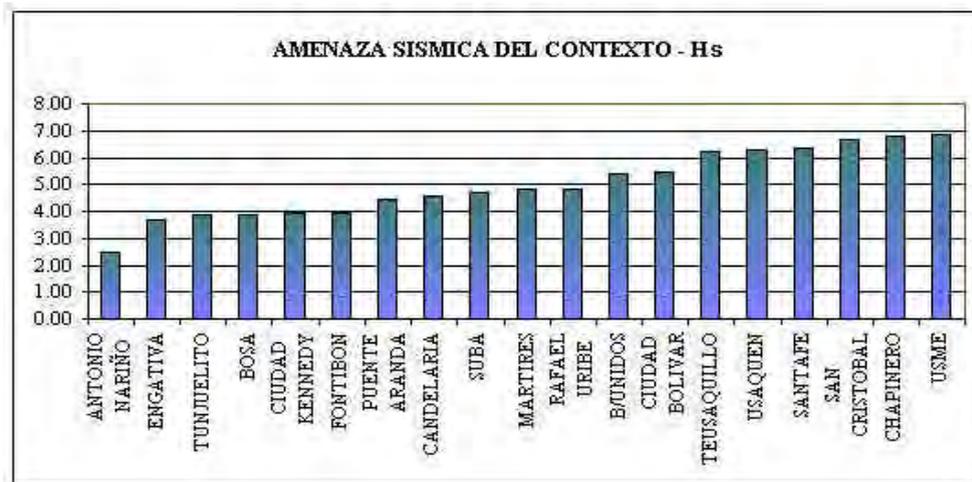


Figura 7.9: Descriptor de la amenaza sísmica del contexto.

2. *Vulnerabilidad sísmica del contexto*,  $V_{S_k}$ : 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*,  $E_{V_k}$  : 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.

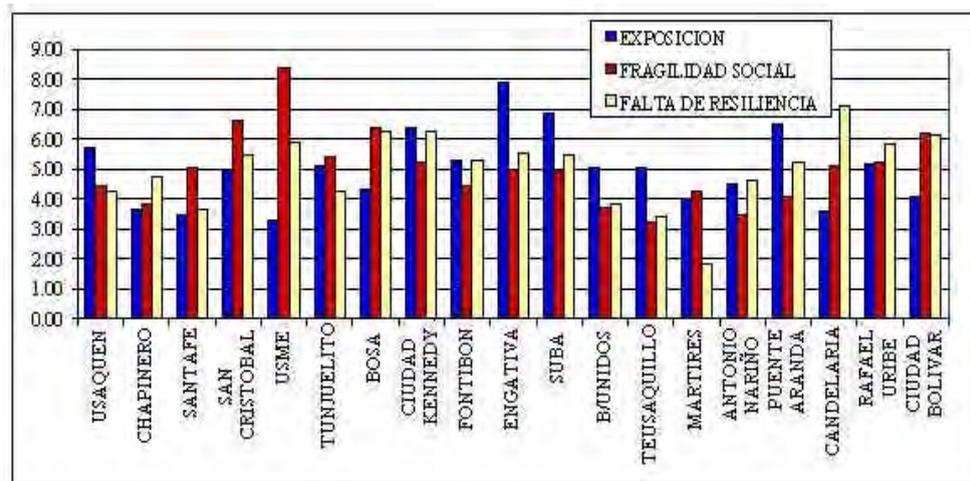
2.3 *Falta de resiliencia* ,  $\mathbf{RV}_k$ : Definida como el inverso de la capacidad económica, social e institucional (resiliencia), que representa la debilidad para absorber el impacto de una crisis, la falta de capacidad para responder en caso de emergencia y

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.

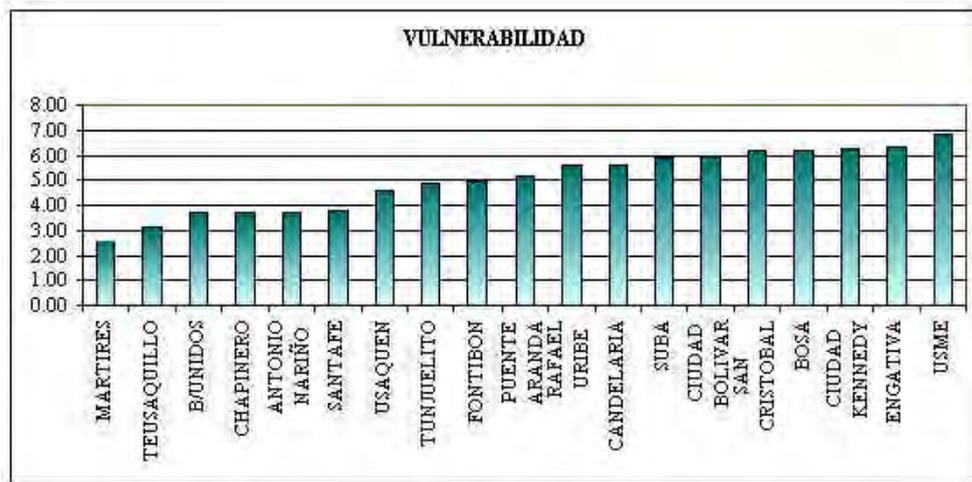


Figura 7.11: Descriptores de vulnerabilidad del contexto para las alcaldías menores.

### 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.

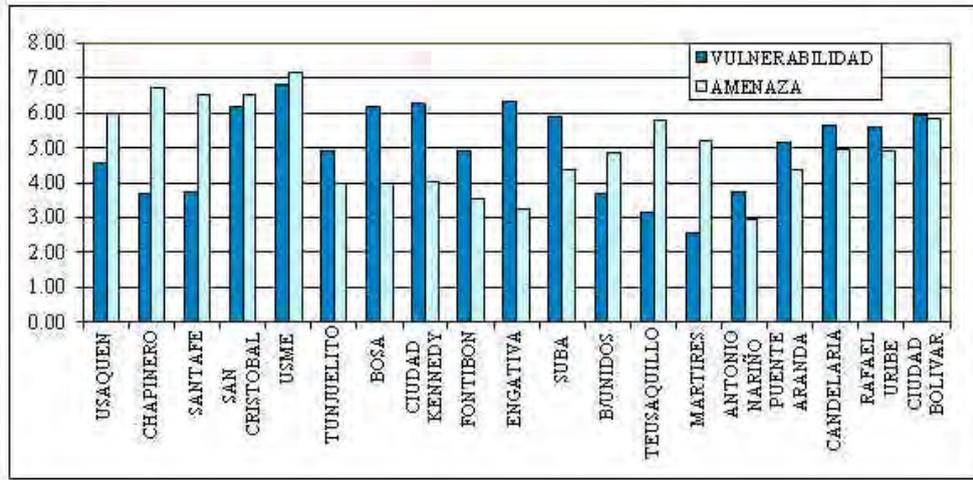


Figura 7.12: Descriptores de amenaza y vulnerabilidad del contexto.

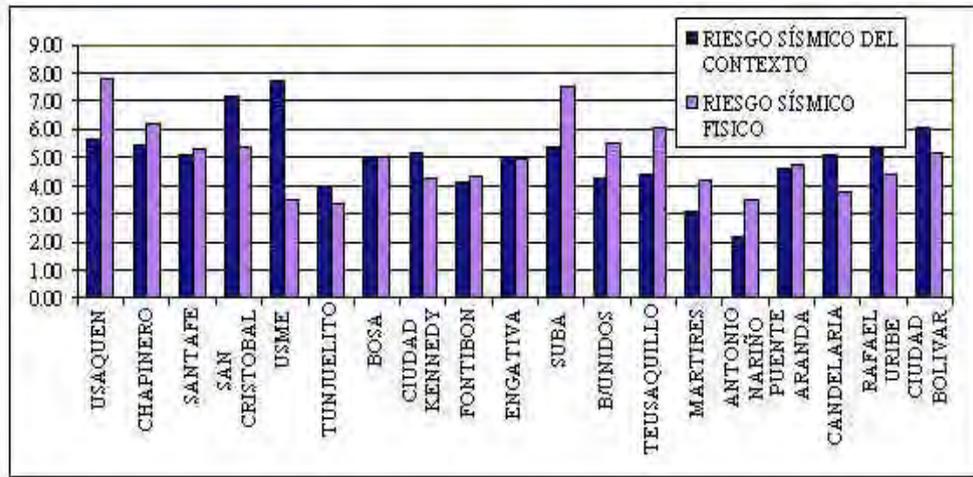


Figura 7.13: Índices de riesgo sísmico físico y riesgo sísmico del contexto.

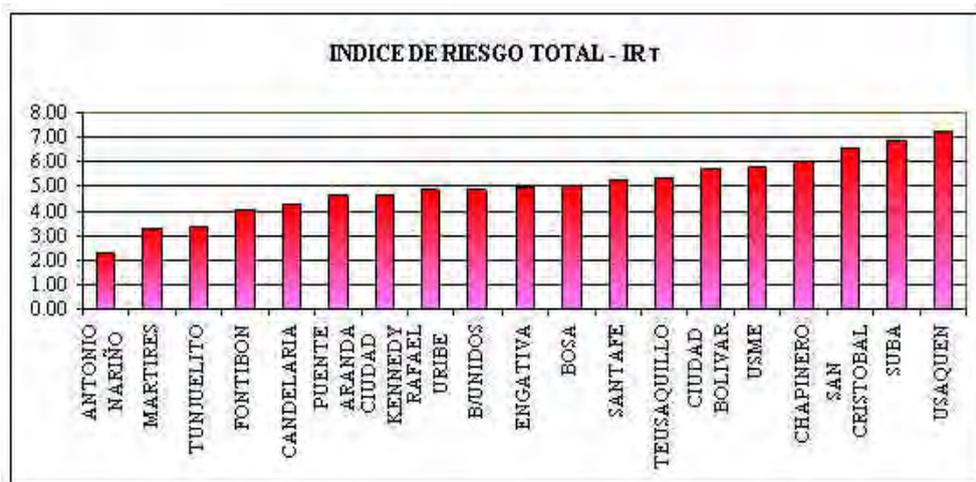


Figura 7.14: Categorización de las alcaldías menores por el índice de riesgo sísmico total.

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.

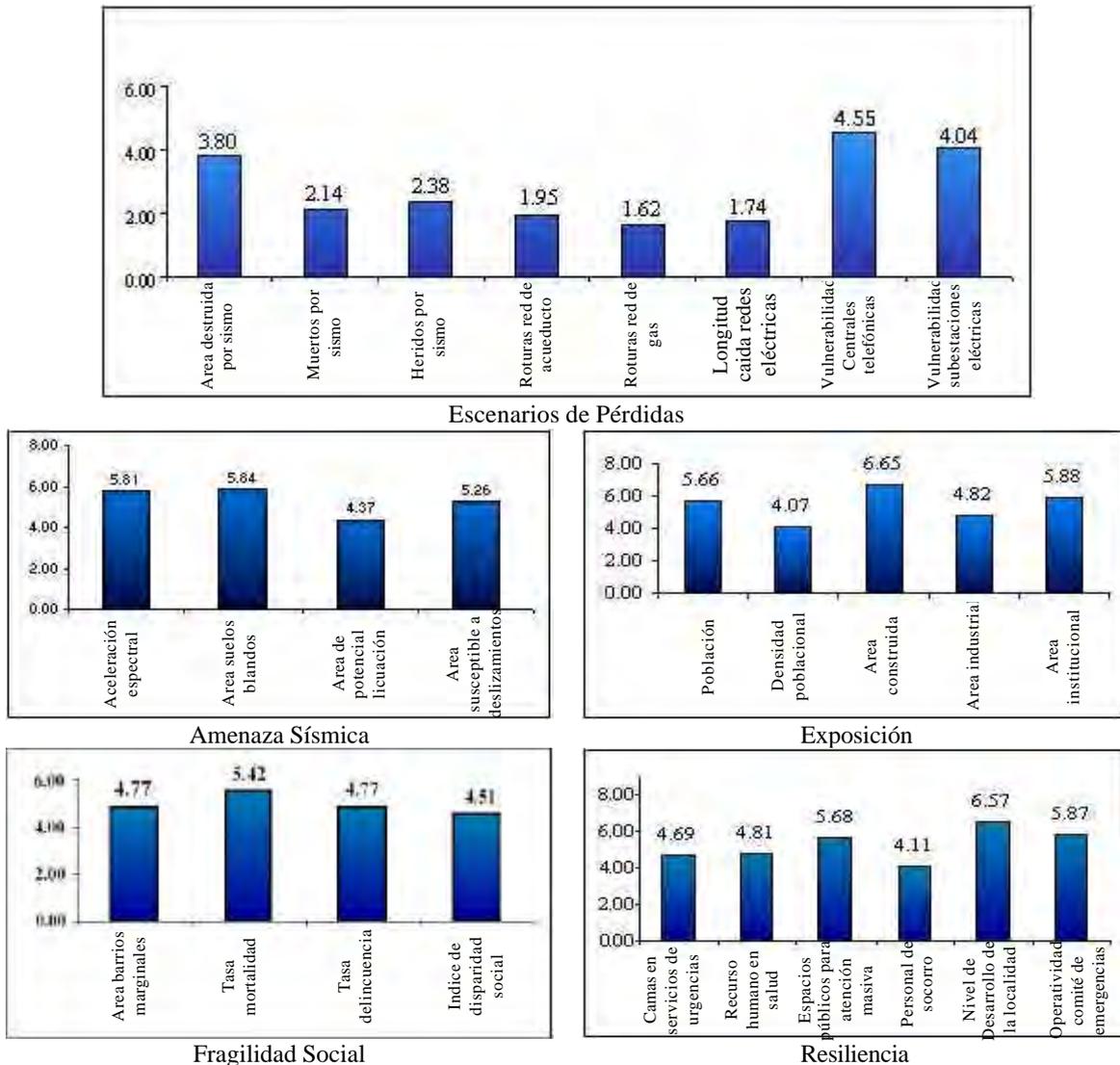


Figura 7.15: Desagregación de indicadores para una alcaldía menor.

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).

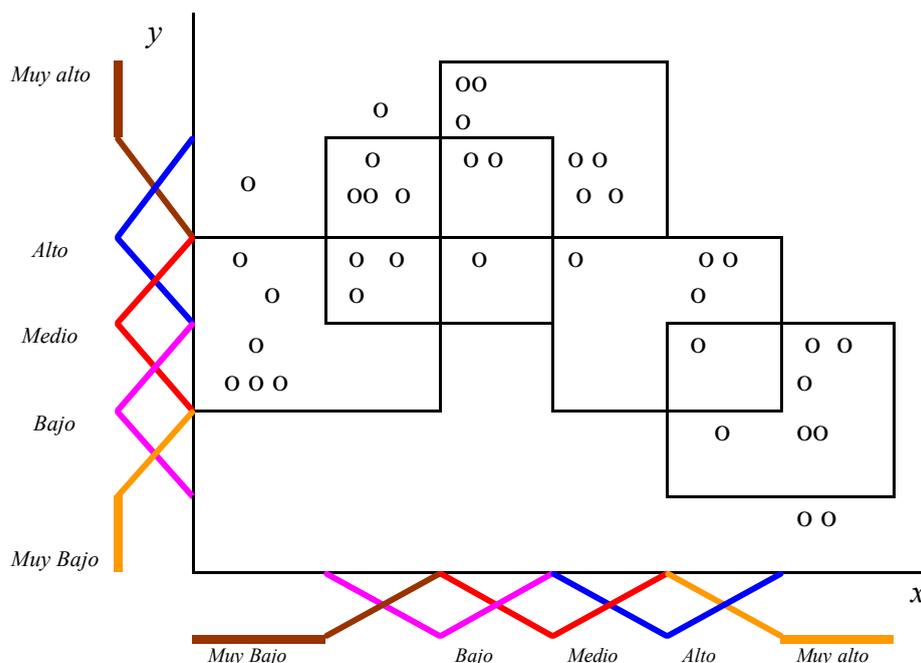
El elemento central de la lógica difusa son las llamadas funciones de pertenencia, con las cuales se trata de modelar matemáticamente los calificativos de una cantidad cualquiera  $x$ , tales como, por ejemplo, *alto*, *medio* o *bajo*. El significado de estas funciones es tal que ellas alcanzan su valor 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

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

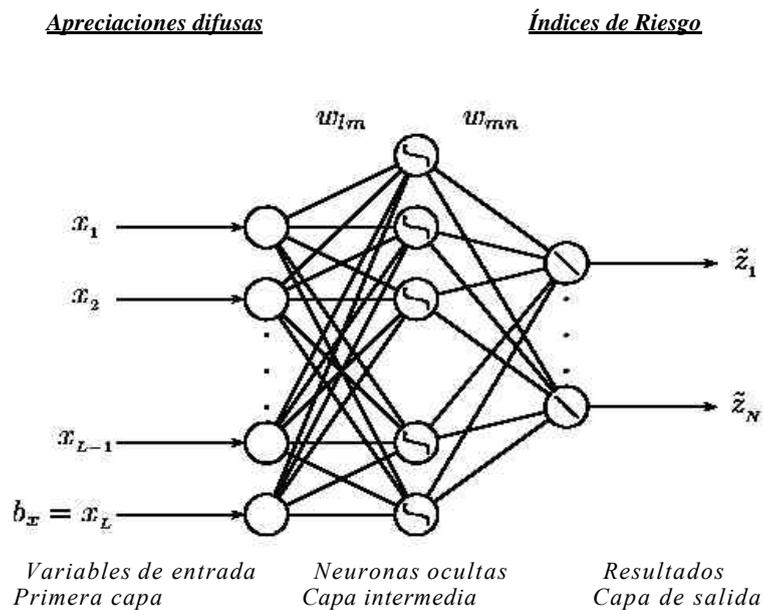
donde  $A, A', B$  y  $B'$  son calificativos, de los cuales se conocen las funciones de pertenencia de los tres primeros, siendo el objetivo del problema calcular la del cuarto. Existen varias técnicas y algoritmos para calcular matemáticamente las funciones de pertenencia de los consecuentes  $B'$  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.

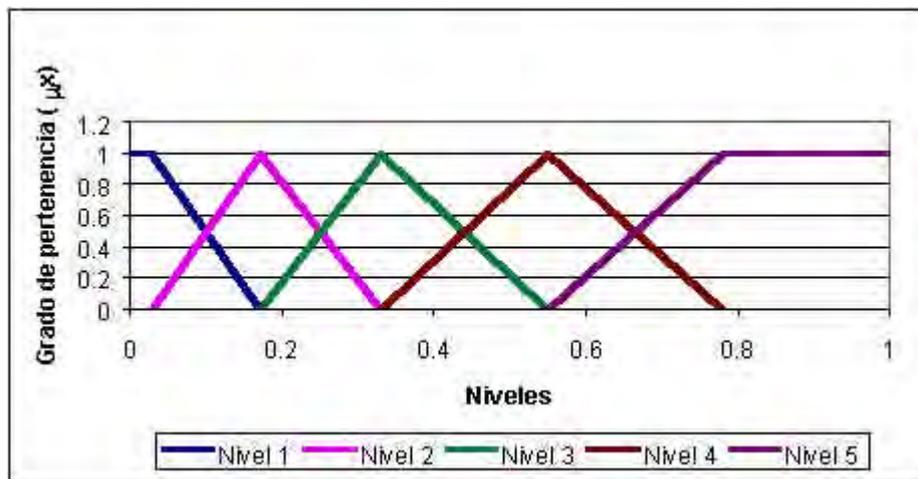


**Figura 7.17:** Esquema de cálculo de la red neuronal difusa

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.

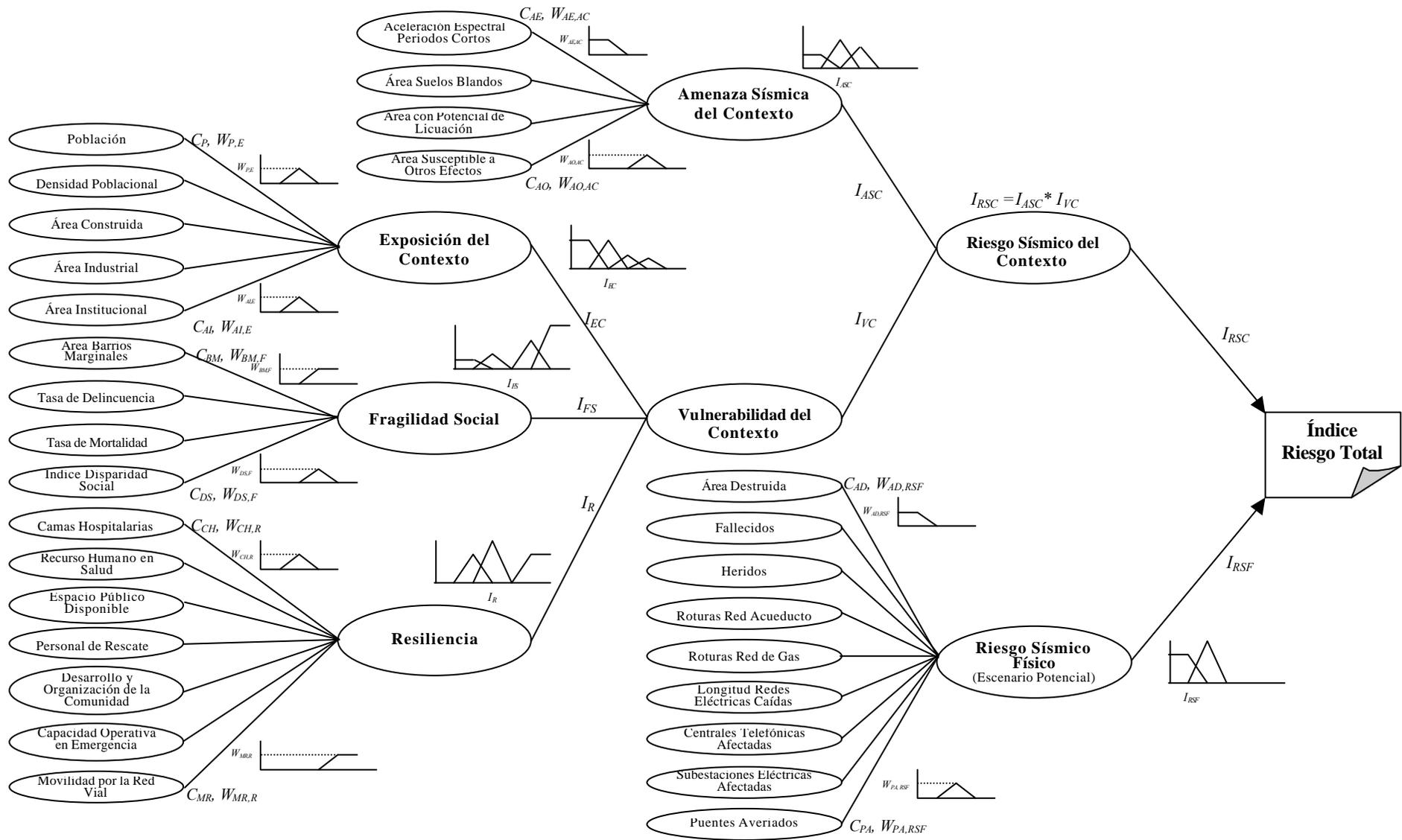


Figura 7.19 Estructura de la red neuronal

### 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.

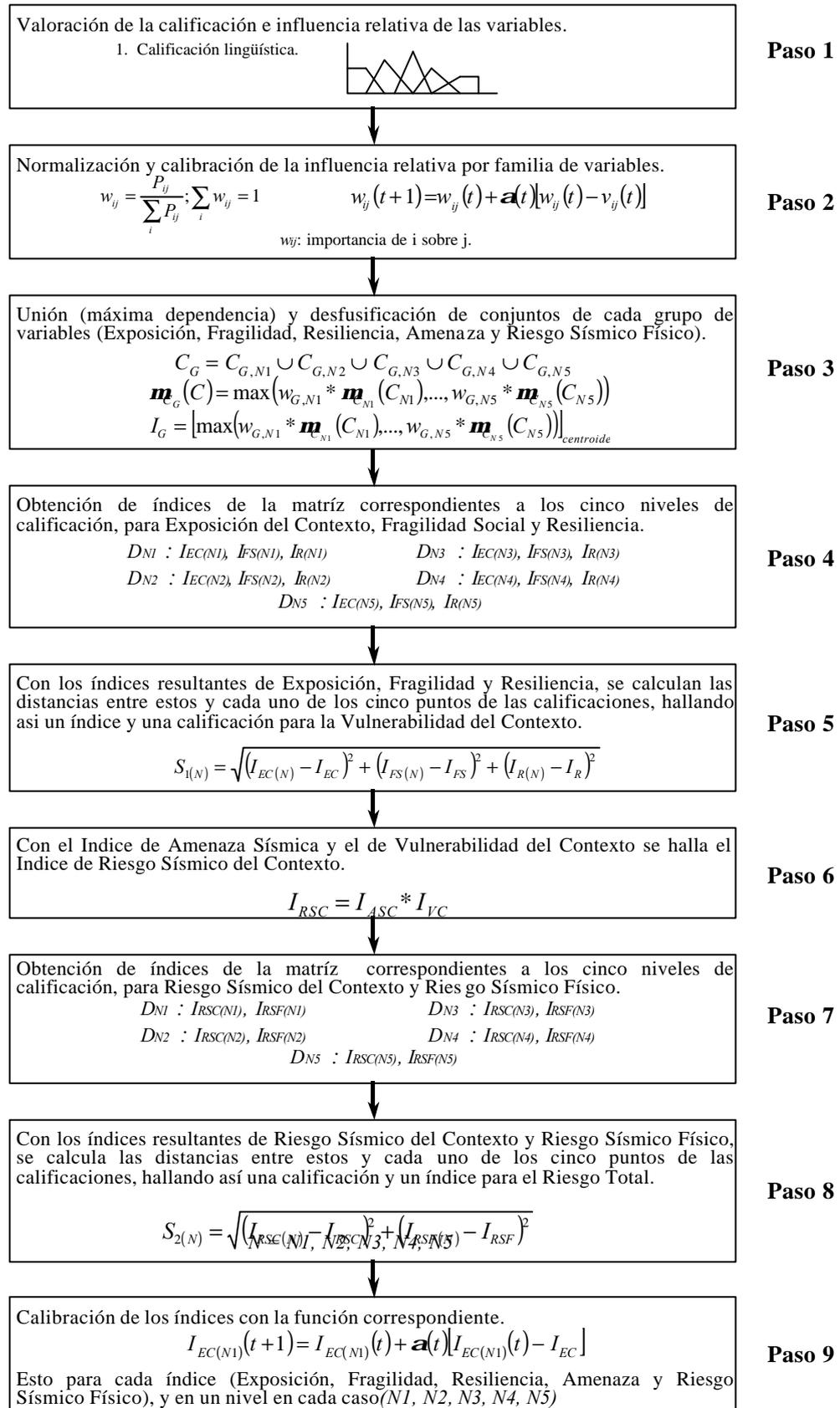


Figura 7.20 Pasos del modelo

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.

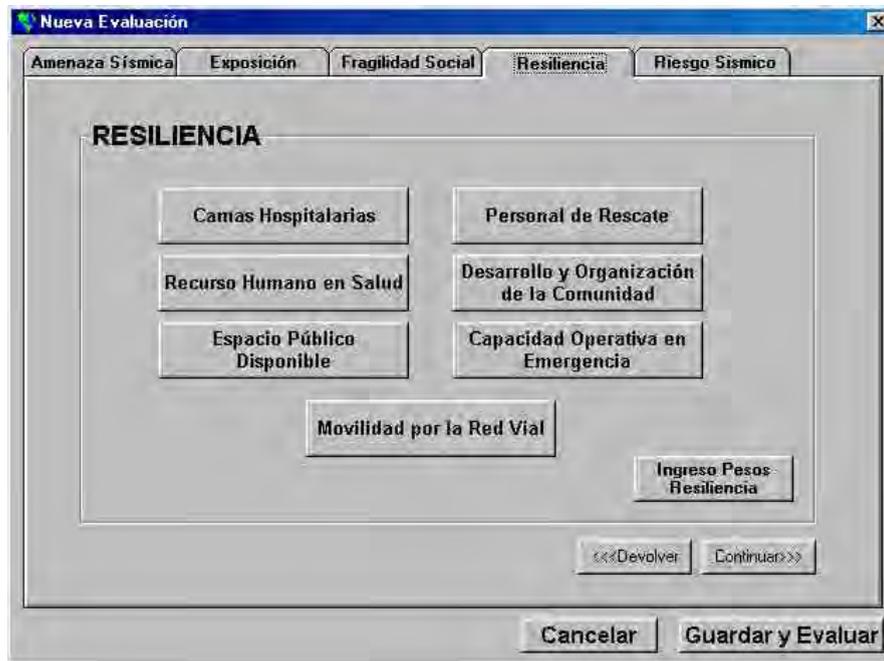
The screenshot shows a software window titled "Nueva Evaluación" with a menu bar containing "Amenaza Sísmica", "Exposición", "Fragilidad Social", "Resiliencia", and "Riesgo Sísmico". The main content area is titled "ESCENARIOS DE DAÑOS FÍSICOS POTENCIALES" and contains several input fields for data entry: "Area Destruida", "Fallecidos", "Heridos", "Roturas Red de Acueducto", "Roturas de la Red de Gas", "Longitud de Redes Eléctricas Caidas", "Centrales Telefónicas Afectadas", "Subestaciones Eléctricas Afectadas", and "Puentes Averiados". There is also a checkbox labeled "Información no disponible" and a field for "Ingreso Pesos Riesgo Sísmico". At the bottom of the window, there are buttons for "<<<Devolver", "Cancelar", and "Guardar y Evaluar".

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.

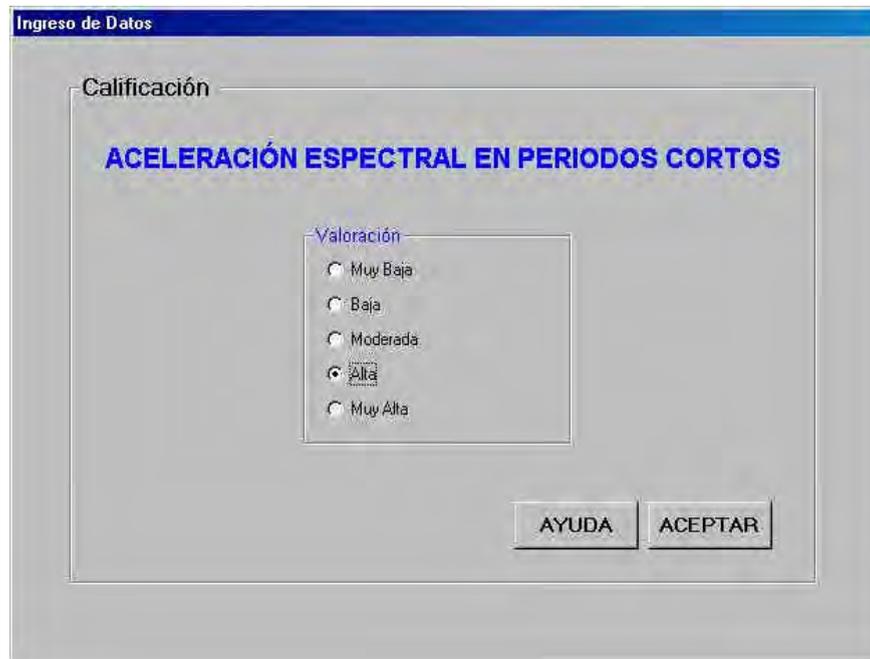
En este caso se han incluido variables que no es factible medir con técnicas convencionales o para las cuales es difícil definir un indicador que refleje

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.



**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.



**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*.

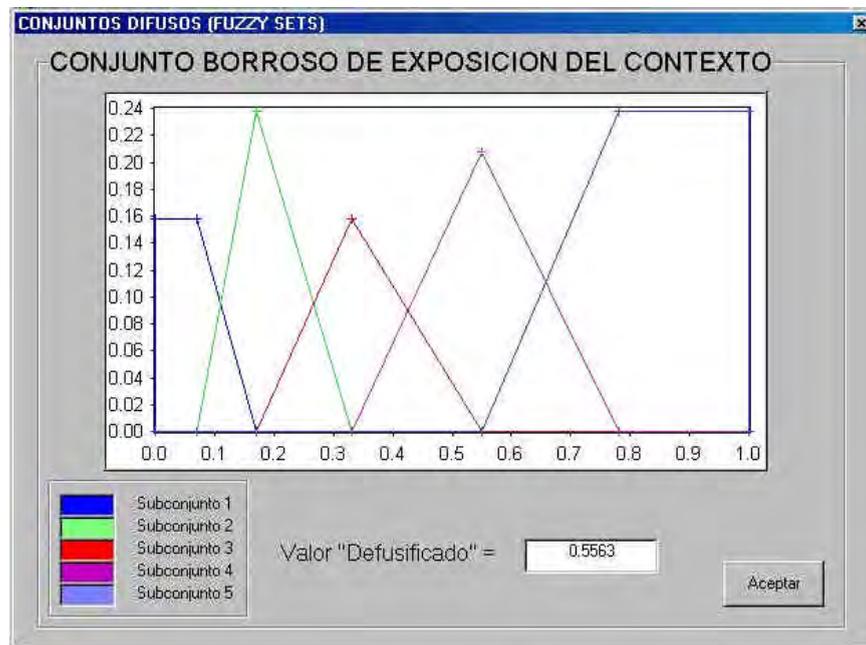


Figura 7.24: Definición de las funciones de pertenencia

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.

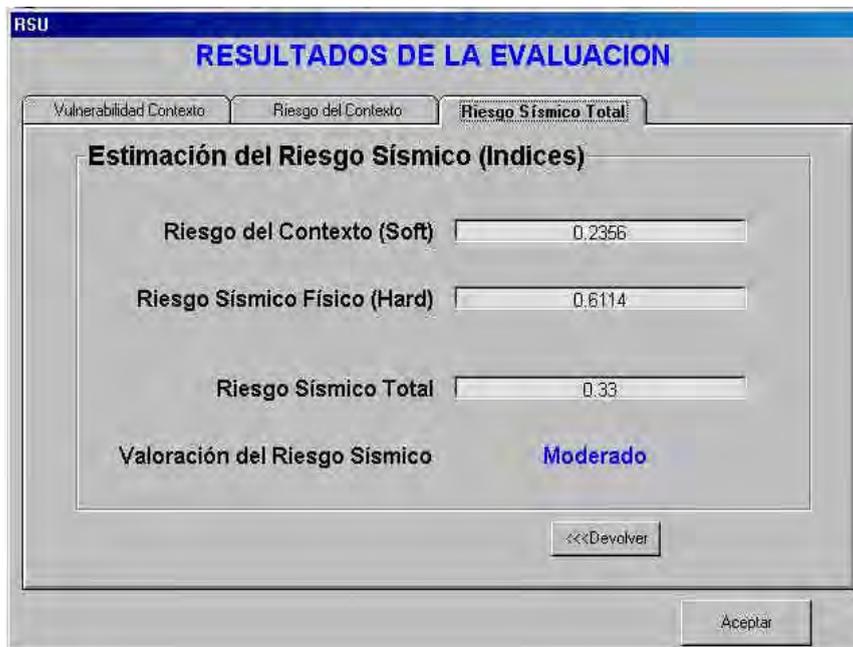


Figura 7.25: Cálculo del valor numérico de un índice parcial o global.

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.

## Capítulo 8

# Gestión del riesgo como concepto de planificación

### 8.1. Habitat, desastres y gestión urbana

La situación ambiental de las ciudades está directamente relacionada con los problemas que conlleva el acelerado proceso de urbanización, producto de desequilibrios de orden social y económico a través de la historia. El proceso del desarrollo y urbanización para el cual los países industrializados necesitaron muchos años, se efectúa en los países en desarrollo en un lapso de tiempo mucho más corto, con características completamente diferentes. Este proceso comienza en forma notoria a partir de los años treinta y se acentúa en las décadas de los años cincuenta y sesenta siendo su fenómeno más marcado el acelerado crecimiento demográfico y urbano, que se generó por el proceso de industrialización a partir de la crisis mundial de los años treinta y la migración de las zonas rurales hacia los centros urbanos. Las consecuencias de este proceso, tanto en el orden social y económico con sus características de marginalidad, disgregación urbana y deterioro ambiental, son bien conocidas: desempleo, alto déficit de vivienda, carencia de servicios públicos y sociales, economía informal, violencia social, aumento de la vulnerabilidad ante fenómenos naturales y disminución de la calidad de vida.

La relación de la distribución de la población y su tendencia a una mayor concentración en las ciudades, está exigiendo una pronta y eficaz solución de los problemas ambientales urbanos, por ser allí donde está ubicada la mayor parte de la población y donde se producen graves impactos al medio ambiente, que trascienden los límites mismos de la ciudad. La situación ambiental de muchas ciudades de los países en desarrollo se refiere a problemas de salud y bienestar originados por diversos tipos de contaminación, saneamiento ambiental en amplias capas de la población (carencia o baja calidad del agua potable, alcantarillado, basuras, convivencia con animales domésticos, afectación por roedores y otras plagas), deterioro e invasión del espacio público, deficiencia en el servicio de transporte, degradación del entorno, ubicación en barrios en zonas de peligro y marginalidad. Por la concentración de personas, de empresas, de todos sus desechos y de vehículos motorizados, las ciudades a menudo son lugares peligrosos para vivir y trabajar. Pero esta concentración brinda oportunidades. Hay considerables economías en la reducción de riesgos por inundación,

terremotos o ciclones y en la respuesta rápida y eficaz a los desastres. Generalmente hay una mayor capacidad entre los habitantes de la ciudad de contribuir al pago de tales medidas, si los costes están controlados y los riesgos bien explicados. Las soluciones desarrolladas por la comunidad pueden ser posibles aún si las autoridades locales o nacionales son indiferentes.

Las altas densidades de población significan menores costes por hogar y por empresas para el suministro de agua potable de cañería, recogida de basura, drenajes para aguas superficiales, casi todas las formas de atención a la salud y la educación y servicios de emergencia. La concentración de la industria reduce los costes unitarios para el control de la contaminación, la gestión de los desechos peligrosos y el control de plantas, equipos, salud y seguridad ocupacional. Aún en ciudades donde cientos de miles de personas viven en lugares de riesgo de inundación o deslizamientos de tierra, el problema no es tanto la falta de tierras sino que los hogares de bajos ingresos no pueden costearse sitios más seguros y los gobiernos les dan poca ayuda para encontrar otras alternativas.

Muchos gobiernos han tratado de presentar los problemas de la administración del cambio urbano como si estuvieran relacionados principalmente con la tasa de crecimiento. Más que las tasas de crecimiento, los problemas de ciudades en la mayoría de los países de ingresos bajos o medios (rápida expansión de asentamientos informales, superpoblación, fallos de las autoridades de la ciudad en el suministro de agua, saneamiento, recolección de basura, cuidado de la salud y más) están relacionados con la incapacidad de los gobiernos de cambiar su base institucional para poder manejar una sociedad urbana creciente (Gallopín 1994).

En la evaluación de los riesgos urbanos, está claro que muchas ciudades están construidas sobre, o contienen, sitios propensos a desastres debido a tres razones principales. Primero, las ciudades se fundaron en lugares peligrosos porque en esa época las ventajas del sitio valían más que los riesgos. El desarrollo inicial de muchas ciudades en valles con ríos o deltas propensos a inundarse se vinculaba a la disponibilidad de agua fresca o tierra fértil. Muchas ciudades también se establecieron en las costas o cerca de los ríos debido a la importancia económica, política y militar de los puertos y el transporte acuático.

Segundo, el desarrollo de las ciudades no estaba conducido por una cultura de gestión de riesgos. La construcción de cualquier ciudad involucra modificaciones masivas del sitio natural, usualmente sin medidas que minimicen el riesgo. La explotación de los bosques y suelos para alimentos, leña y otros materiales, con frecuencia trastornan el régimen de las cuencas. La exposición de los suelos para la construcción ocasiona la erosión, incrementando las cargas de arena que bloquean los drenajes, levantan el fondo de los ríos y aumentan las inundaciones. La extracción de agua subterránea puede causar serios hundimientos e interfiere con los sistemas de drenaje, lo cual incrementa el riesgo de inundaciones. La expansión de áreas para construir incrementa los deslizamientos. A menudo, las medidas capaces de reducir todos estos riesgos se ejecutan de manera inadecuada o no se llevan a cabo.

Tercero, las ciudades traspasaron lo que originalmente fueron sitios relativamente seguros. Muchas de las ciudades más grandes del mundo se fundaron siglos atrás, en sitios que originalmente eran seguros y convenientes. Cuando estas ciudades eran relativamente pequeñas, no había necesidad de un desarrollo urbano en sitios peligrosos. Conforme éstas crecieron, la población no pudo ser ubicada en áreas

seguras, o bien todos los sitios seguros se volvieron muy caros para los grupos de bajos ingresos.

¿Por qué una ciudad que está en un lugar peligroso no deja de crecer y permite que las nuevas inversiones urbanísticas se vayan a otras partes? Una de las razones es el monto de las inversiones existentes y la multiplicidad de intereses creados, que propician la inercia contraria al traslado de una nueva localidad o al enfoque que tome medidas para disminuir los riesgos en un sitio.

La opción de los conceptos de sostenibilidad y desarrollo sostenible, implican una redefinición de los enfoques tradicionales para abordar los problemas ambientales urbanos. Su reciente formulación demanda un esfuerzo definitorio como categorías interpretativas y operativas idóneas. Las ciudades pueden favorecer o impedir procesos de sostenibilidad a partir de sus relaciones con el medio y dependiendo de su forma y estructura, ya que a su vez son ordenadoras del territorio, generan procesos de producción, son consumidoras y productoras de desechos.

La aplicación del concepto de “sostenibilidad” urbana debe necesariamente referirse a formas de ocupar, producir y consumir el espacio edificado para garantizar la permanente regeneración de sus sistemas sociales y económicos lo cual sólo se logra mediante la adopción de patrones de ordenamiento y ocupación del suelo que garanticen dicha regeneración (Otero y Marti 1995). Estos patrones de ordenamiento se materializan en diversos “atributos” que distinguen una ciudad sostenible de una que no lo es, independiente de su tamaño, localización o papel regional. Un sistema urbano sostenible se caracteriza por su “capacidad portante” definida como aquella que permite la regeneración permanente de los sistemas de soporte de la vida y la actividad económica mediante patrones específicos de ocupar y utilizar el territorio.

Las zonas de peligro en los centros urbanos coinciden, en general, con las áreas que presentan condiciones de marginalidad. Los costes de las reubicaciones y, en general, la insuficiencia de recursos técnicos y financieros por parte de los municipios y la limitada capacidad económica de la población potencialmente beneficiada, implican la necesidad de contar con el apoyo técnico y financiero por parte de entidades gubernamentales y organizaciones no gubernamentales, ONG, (Ramírez, 1991).

En consecuencia, el desarrollo de nuevos proyectos de vivienda, de reubicación de asentamientos humanos y de mejora de vivienda y entorno requiere que las entidades del estado y las ONG además de su apoyo financiero, aporten asesoría técnica, la cual debe realizarse promoviendo tecnologías constructivas adecuadas que permitan garantizar la protección de la inversión y el patrimonio de las familias favorecidas por este tipo de programas asociativos, contribuyendo no sólo a disminuir el riesgo sino también a mejorar la calidad de vida de la población expuesta a las amenazas, que por motivos de la tenencia de la tierra en general corresponde a la más pobre.

Por otra parte, desde el punto de vista de la ecología humana, es importante mencionar que el riesgo proviene en ocasiones del inadecuado desarrollo de los asentamientos humanos, no sólo en términos de localización de los mismos en zonas amenazadas por fenómenos de inestabilidad o por la posible influencia de peligros de origen industrial o tecnológico, sino también por el desorden urbano, la pérdida del espacio público y el bajo nivel de saneamiento ambiental.

Muchos de los países en desarrollo duplicarán su población urbana en los próximos veinte años, lo que puede significar un aumento dramático de la vulnerabilidad como resultado del desorden urbano, de la dificultad de proveer servicios públicos y del

proceso de industrialización. Solamente incorporando criterios de prevención en la planificación física (urbana y/o territorial), la planificación sectorial y socio-económica y formulando modelos prospectivos de indicadores que permitan detectar mediante alertas tempranas posibles crisis, es posible un proceso equilibrado que pueda interpretarse como desarrollo sostenible.

## **8.2. Prevención para el desarrollo sostenible**

Los términos *prevención* y *mitigación* se han utilizado para referirse a las actividades que pretenden reducir los factores de amenaza y vulnerabilidad en la sociedad y así reducir la posibilidad o la magnitud de futuros desastres o daños en general. Los *preparativos* o la *fase de preparación* comprende actividades que promueven mejores opciones y prácticas durante la fase previa a un desastre o una vez impactada una sociedad por un evento físico determinado. La *respuesta de emergencia* o ayuda humanitaria pretende garantizar condiciones de seguridad y de vida para las poblaciones afectadas durante el período pos-evento. Y, las actividades de *rehabilitación* y *reconstrucción* pretenden, óptimamente, restaurar, transformar y mejorar las condiciones económicas, sociales, infraestructurales y de vida en general de las zonas afectadas, dotándolas de mayores condiciones de seguridad en el futuro a través de esquemas de intervención que puedan reducir el riesgo. En este sentido la recuperación (rehabilitación y reconstrucción) se ha visto imbuida de la idea de la prevención y mitigación de futuros desastres.

La *gestión de riesgos* es el conjunto de elementos, medidas y herramientas dirigidas a la intervención de la amenaza o la vulnerabilidad, con el fin de disminuir o mitigar los riesgos existentes. Este concepto de prevención ha jugado un papel delimitador respecto a otro conjunto de elementos, medidas y herramientas cuyo objetivo es intervenir principalmente ante la ocurrencia misma de un desastre, es decir que conforman el campo de los preparativos para la atención de emergencias, la respuesta y la reconstrucción una vez ocurrido un suceso. La gestión de riesgos, tiene como objetivo articular los tipos de intervención, dándole un papel principal a la prevención-mitigación, sin abandonar la intervención sobre el desastre, la cual se vincula al desarrollo de las políticas preventivas que en el largo plazo conduzcan a disminuir de manera significativa las necesidades de intervenir sobre los desastres ya ocurridos. La gestión de riesgos no sólo debe identificarse con lo que significa el Estado sino que debe estimular una convocatoria dirigida tanto a las fuerzas gubernamentales como no gubernamentales, con el propósito de enfrentar los desastres con en forma preventiva. En este sentido, una política de gestión de riesgos no sólo se refiere a la identidad territorial, sino por su propósito, a la articulación de las diversas fuerzas existentes: sociales, políticas, institucionales, públicas, privadas de todos los niveles territoriales. Esto permite planteamientos de participación democráticos, suma de esfuerzos y responsabilidades, de acuerdo con el ámbito de competencia de cada cual.

El concepto de *desarrollo* intenta comunicar la idea que el entorno puede ser más productivo o mejor en algún sentido, teniendo en cuenta factores ecológicos, políticos, culturales, y tecnológicos. El concepto de *sostenible* se refiere al mantenimiento o prolongación de un proceso o actividad sobre el tiempo. Aparentemente, las palabras desarrollo y sostenible pueden parecer contradictorias, sin embargo no es necesario ser muy optimista para creer que el desarrollo puede ser sostenible mediante innovaciones

tecnológicas y la aplicación de estrategias de gestión tales como la prevención.

Parte de la mejora de las condiciones de vida del ser humano consiste en lograr un mayor nivel de seguridad y supervivencia en relación con las acciones y reacciones del entorno a través de la comprensión de la interacción del mismo con el medio ambiente (Duque 1990). De aquí se desprende que *la gestión de riesgos es una estrategia fundamental para el desarrollo sostenible*, dado que permite compatibilizar el ecosistema natural y la sociedad que lo ocupa y explota, dosificando y orientando la acción del hombre sobre el medio ambiente y viceversa.

El desafío actual del desarrollo sostenible es lograr cambiar la gestión ambiental de reparadora a preventiva, evitando cada vez más los cambios sobre la marcha del planteamiento de la resolución de los problemas y consolidando la aplicación de alternativas de acción después de una adecuada evaluación de ventajas, desventajas y de escenarios de interacción previstos (Wathern 1988). La evaluación de riesgos y de impacto ambiental son elementos de gran similitud para la planificación, cuyo interés está dirigido a determinar las consecuencias del cambio ambiental (Clarke y Herington 1989).

Considerando, en términos generales, como actividades inherentes a la gestión ambiental el conocimiento, el aprovechamiento, la conservación, la preservación y el fomento de los recursos naturales, el concepto de prevención se encuentra ligado a todas y cada una de ellas. En otras palabras, la prevención puede explicitarse como estrategia de la gestión ambiental.

### **8.2.1. Perspectiva de planificación**

Los fenómenos de origen natural y antrópico que afectan severa y continuamente a los asentamientos humanos son el resultado no sólo de la ocurrencia de los fenómenos, sino también de la alta vulnerabilidad que ofrecen dichos asentamientos como consecuencia de su desordenado crecimiento y del tipo de tecnologías utilizadas en los mismos. El riesgo puede reducirse si se entiende como el resultado de relacionar la amenaza, o probabilidad de ocurrencia de un suceso, con la vulnerabilidad o susceptibilidad de los elementos expuestos. Medidas de protección, como la utilización de tecnologías adecuadas, no vulnerables, son la base para reducir las consecuencias de las amenazas o peligros naturales y tecnológicos.

El aumento y densificación de la población en grandes centros urbanos, el desarrollo de tecnologías vulnerables y el deterioro del medio ambiente hacen que cuando ocurren fenómenos naturales tales como sismos, erupciones volcánicas, inundaciones, deslizamientos, etc., se producen graves daños a las personas, bienes e infraestructura, causando en muchos casos enormes pérdidas, que en ocasiones pueden llegar a afectar en forma muy severa el desarrollo económico y social de regiones o países que posteriormente tardan muchos años en recuperarse (Cardona y Barbat 2000).

La gestión de riesgos hace referencia a un complejo proceso social cuyo objetivo último es la reducción o control del riesgo en la sociedad. Toma como punto de partida la noción de que el riesgo como manifestación social es una situación dinámica. El cambio en las condiciones de riesgo de una sociedad o un subconjunto de la sociedad se relaciona con cambios paulatinos en las prácticas y la incidencia de las prácticas sociales a distintos niveles o con cambios graduales o abruptos en las condiciones ambientales (Lavell 2000). Dadas las condiciones dinámicas del riesgo la sociedad requiere de mecanismos diferenciados para manejar las distintas condiciones de riesgo que existen o que pueden llegar a existir.

Las nociones desarrolladas en las secciones anteriores sobre el riesgo, los desastres y la intervención por vía de la gestión de riesgo ayudan perfilar una serie de áreas de intervención o acción que se deben considerar y contemplarse en el diseño de una política de gestión de riesgos, a saber:

- a) Conocimiento sobre la dinámica, la incidencia, la causalidad y la naturaleza de los factores de riesgo, amenazas y vulnerabilidades, y la capacidad de construir escenarios y mapas dinámicos de riesgo para el país y sus distintos territorios.
- b) El estímulo y promoción de diversos mecanismos y acciones adecuadas para la reducción de las condiciones de riesgo *existentes* incluyendo mecanismos de reordenamiento territorial, reasentamiento humano, recuperación y control ambiental, reforzamiento de estructuras, construcción de infraestructura de protección ambiental, diversificación de estructuras productivas, fortalecimiento de los niveles organizacionales, etc.
- c) Capacidades para predecir, pronosticar, medir y difundir información fidedigna sobre cambios continuos en el ambiente físico y social y sobre la inminencia de eventos dañinos, destructivos o desastrosos.
- d) Mecanismos de preparación de la población, de instituciones y organizaciones para enfrentar casos inminentes de desastre y para responder eficazmente después del impacto de un determinado suceso físico. Esto en el marco de la promoción de esquemas que fortalecen y aprovechan las habilidades de la población fortaleciendo las opciones de desarrollo a través de la intervención humanitaria.
- e) Mecanismos que garanticen la instrumentación, organización y control eficaz de esquemas de rehabilitación y reconstrucción que consideren, entre otras cosas, la reducción del riesgo en las zonas afectadas.
- f) La reducción en perspectiva del riesgo en futuros proyectos de desarrollo, a través del fomento de la incorporación del análisis de riesgo en los procesos de toma de decisiones y de inversiones y la utilización de mecanismos de ordenamiento del territorio, de control sobre construcciones, de gestión ambiental, etc.
- g) El fomento de procesos educativos a todo nivel que garanticen un más adecuado entendimiento del problema de riesgo y de las opciones para su control, reducción o modificación.

Por este motivo, *la reducción del riesgo debe ser, en forma explícita, un objetivo del desarrollo* entendiendo como mejora no sólo de las condiciones de vida sino también de la calidad de vida y del bienestar social. Más allá de las discusiones ideológicas, el desarrollo debe cubrir las necesidades del hombre y de su entorno y permitir el crecimiento con calidad. La seguridad, en general, es un componente fundamental del desarrollo humano sostenible, razón por la cual la prevención es una estrategia fundamental para el justo equilibrio entre el asentamiento humano y la naturaleza. Indicadores como el Índice de Desarrollo Humano IDH propuesto por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD (UNDP 1991; Sen 2000), permiten una evaluación más elaborada del desarrollo que los indicadores convencionales de crecimiento económico, los cuales tienden a promover acciones a corto plazo, que evalúan normalmente la relación consumo/producción y que no consideran acciones preventivas y de mitigación.

En entornos naturales caracterizados por agentes detonantes extremos, que bien pueden ser sucesos súbitos intensos o procesos de deterioro acelerados que superan umbrales críticos, identificar y estimar el riesgo de los elementos expuestos y analizar su origen y evolución a lo largo del tiempo, permitiría priorizar el tipo de medidas para neutralizar o reducir dicho riesgo mediante acciones de intervención y planificación. Metodológicamente, la identificación y análisis de la vulnerabilidad física, ambiental, social, económica, cultural, etc., constituyen una herramienta de diagnóstico que facilita clasificar los problemas y deficiencias de desarrollo y priorizar las acciones de carácter político, económico, social y ambiental que deben realizarse para lograr un desarrollo equilibrado.

La elaboración de técnicas de monitoreo y seguimiento de la acumulación territorial y social de la vulnerabilidad y de la gestación de procesos detonantes facilitaría la aplicación de técnicas de planificación realistas, en forma dinámica, que se ajusten a los cambios producidos como consecuencia de los procesos de intervención o debidos a nuevos factores o sorpresas del entorno natural, económico o social. Un enfoque preventivo y prospectivo de este tipo podría ser prometedor, dado el nivel de incertidumbre e inestabilidad que caracteriza actualmente los procesos de cambio, debido a la imposibilidad de poder proponer planes a mediano y largo plazo que puedan cumplirse sin mayores traumatismos. En muchos países en desarrollo estos aspectos están incidiendo en la dinámica de su crecimiento y progreso. Ante estas características es necesario plantear modelos menos rígidos de planificación, que permitan incorporar de manera más adecuada las incertidumbres, inestabilidades y sorpresas, mediante técnicas de alerta temprana o anticipada de las condiciones del entorno social y de los agentes perturbadores; es decir: una visión preventiva y prospectiva del desarrollo.

### **8.2.2. Organización interinstitucional para la gestión**

En relación con las actividades inherentes a la gestión ambiental y la gestión de riesgos, es inevitable hacer la observación de que en los países en desarrollo no han existido organizaciones institucionales coherentes para llevarlas a cabo. Por el contrario, en estos países existe una dispersión de entidades que, desde diversos sectores y a diferentes niveles, han venido ejerciendo una o varias funciones de administración de los recursos naturales renovables, de control de factores de deterioro ambiental y de prevención-mitigación de desastres.

Los medios tradicionales de análisis político y de planificación han sido usados en diversas ocasiones y en diferentes lugares para atender problemas de riesgo sin buenos resultados o con muy poco efecto. Las comunidades usualmente son resistentes a soluciones impuestas de manera externa y con frecuencia no están en capacidad de reorientar sus propias energías de acción colectiva para lograr poner en marcha una estrategia constructiva y eficiente de prevención-mitigación. Aunque muchos esfuerzos se llevaron a cabo para impulsar políticas y planes para reducir el riesgo, los planificadores y quienes toman decisiones no han sido muy exitosos en reducir el riesgo, o si alguna vez lo han logrado ha sido una rara excepción y por un período muy breve. (Comfort 1999).

Los problemas del riesgo colectivo difieren de la dinámica que pueden llevar a cabo sistemas cerrados, como una industria o una empresa. En estos sistemas la gerencia usa información para intervenir sus operaciones y para promover un cambio deseable, en la búsqueda de cierto comportamiento dentro de un rango de posibilidades de riesgo

(pérdida) y de ingreso o ganancia. La meta del sistema es mantener el control. En contraste, en materia de riesgo público o colectivo, no sólo los problemas sino también las responsabilidades de la toma de decisiones son compartidas. Para los ciudadanos, las autoridades de las instituciones públicas son responsables de las decisiones que ellas toman (o no toman) en procura de la seguridad pública y del bienestar. Para resolver efectivamente estos problemas se requiere de un proceso continuo de descubrimiento de elementos comunes entre diferentes grupos. Es necesario clarificar siempre aspectos para el entendimiento del público e integrar las diferentes perspectivas dentro de una base común de comprensión, que permita sustentar los diferentes tipos de acción. Las estrategias y métodos que se requieren para resolver los problemas de riesgo implican siempre un proceso continuo de aprendizaje colectivo, mas que el simple control de la acción de la comunidad.

Cuando se ocurre un desastre se ponen en peligro los patrones existentes de poder y acción y se requiere una respuesta creativa para enfrentar lo urgente y la demanda de atención de las necesidades de toda una comunidad. La situación crea una oportunidad para la emergencia de un proceso de auto-organización en un corto lapso si las condiciones para que se desarrolle están presentes antes del suceso. El riesgo es un problema real de política pública que ilustra la necesidad de interdisciplinariedad, interinstitucionalidad y multisectorialidad que hacen que los problemas de riesgo mismo sean extraordinariamente difíciles de resolver. La coordinación voluntaria o la auto-organización dependen de la existencia de una adecuada organización interinstitucional, una infraestructura de información y una base común de conocimiento con anterioridad a la manifestación de un fenómeno peligroso.

En otras palabras, se requiere una adecuada coordinación para la formulación de políticas y para su respectiva ejecución, entre el nivel nacional, provincial y municipal y los sectores comprometidos en el tratamiento de aspectos ambientales y de riesgo, con el fin de evitar contradicciones y vacíos que finalmente terminan por perjudicar tanto a los recursos como a sus usuarios. Los planificadores y quienes hacen la política pública, que deben diseñar y construir una base de conocimiento compartida, tienen más posibilidades de llevar a cabo una coordinación más eficiente a través de un proceso de aprendizaje conjunto que a través de procedimientos y reglas impuestas de manera externa.

En muchos países, usualmente con motivo de la ocurrencia de un gran desastre se han creado organismos cuyo objetivo ha sido la planificación de preparativos y la atención de emergencias. Bajo esta figura se han creado organizaciones de protección o defensa civil, normalmente dirigidos por militares activos o retirados. Estas organizaciones, con algunas excepciones, son de carácter nacional y de poca presencia local, y no incluyen dentro de sus actividades acciones relacionadas con la prevención y mitigación (Lavell y Franco 1996). El intento de mejorar el comportamiento tanto de sistemas técnicos como de sistemas organizativos en forma separada no han sido exitosos debido a sus inevitables funciones interdependientes. La integración de estos sistemas requiere del encadenamiento de instituciones, de su tecnología informática, de sus sistemas de monitoreo físico y de un proceso coherente y adaptativo de la comunidad para reducir el riesgo. De esta manera se pueden relocalizar los recursos y energías para enfrentar las necesidades cambiantes. Un enfoque integral de gestión requiere modificar la concepción de la respuesta para cambiarla de reactiva, basada en el "comando y control", a una respuesta basada en procesos de consulta y validación que le permita ser creativa y que facilite la auto-organización.

El entrenamiento y la tradición militar ejemplifican el concepto de “comando y control” y también reflejan el diseño jerárquico de estructuras de autoridad y sus tareas altamente especificadas de “sistemas acoplados”. El principio del “comando y control” es una clara especificación de relaciones de autoridad entre unidades para incrementar el control sobre el comportamiento de toda la organización. Es un modelo altamente determinístico y busca reducir la incertidumbre en el comportamiento de la organización a través de planes detallados y entrenamiento. Este diseño organizacional ha probado ser funcional y robusto en condiciones de una rutina bien estructurada, pero ha demostrado ser muy débil en condiciones dinámicas inciertas. En condiciones complejas y ambientes dinámicos se ha observado que los modelos de control son altamente vulnerables a “cerrarse” o bloquearse. Es decir, fácilmente excluyen o rechazan información relevante para el proceso de toma de decisiones.

La mayoría de las organizaciones existentes en los países obedecen al paradigma del “comando y control” y su objetivo ha sido básicamente la preparación para la atención de emergencias o desastres, no para la gestión integral del riesgo. En consecuencia, las actividades inherentes a la reducción de riesgos y la gestión ambiental y del hábitat urbano no se han llevado a cabo de manera coherente; en el mejor de los casos se han realizado en forma dispersa por entidades relacionadas con diversos sectores sin vincular a las localidades y sin una debida orientación y coordinación.

Excepcionalmente, en algunos países se han creado en el último decenio organismos interinstitucionales, cuyo propósito es mejorar la coordinación entre el nivel nacional, provincial y municipal, y entre los sectores no solo comprometidos con la preparación y respuesta en caso de emergencia sino también con la prevención y la reducción del riesgo. A este tipo de organización se le ha denominado “sistema” y, a diferencia de los modelos tradicionales centralizados y basados en una entidad rectora, su estructura corresponde a una red de instituciones que son coordinadas por entes focales en cada nivel (nacional, provincial o departamental, municipal), orientando las actividades para la prevención y atención de desastres en cada nivel territorial. En términos generales para que una organización interinstitucional sea realmente un "sistema" es necesario que su estructura corresponda a un modelo de entidades que para efectos de la prevención, la atención y recuperación sean interdependientes, no obstante que conserven su autonomía en relación con sus competencias y responsabilidades individuales sectoriales y territoriales. Sus actividades y resultados deben ser sinérgicos, dado que en conjunto son más que la suma de las acciones separadas de cada una de las entidades. Los niveles provincial, departamental o municipal deben ser réplicas o versiones de la organización nacional, y deben actuar en forma integrada, con el fin de garantizar flujos de información coherentes y la ejecución de programas y proyectos, en forma vertical entre los niveles territoriales y en forma horizontal entre los componentes de cada nivel, siendo éstos entes gubernamentales, del sector privado u organizaciones de la sociedad civil. En otras palabras, un Sistema de Gestión de Riesgos es la relación organizada de entidades públicas y privadas que en razón de sus competencias o de sus actividades tienen que ver con los diferentes campos relacionados con las labores de prevención y reducción de riesgos y respuesta en caso de desastre. En este sentido es necesario conformar una red institucional, coordinada por una instancia nacional con réplicas en las unidades territoriales (Cardona 1994/96c).

Un sistema de esta naturaleza debe ser no sólo una organización abierta, dinámica y funcional de instituciones sino el conjunto de orientaciones, normas, recursos, programas

y actividades de carácter técnico-científico, de planificación, de preparación para emergencias y de participación de la comunidad; y su objetivo general debe ser la incorporación de la gestión de riesgos en la cultura y en el desarrollo económico y social de las comunidades. En lo posible, un sistema de gestión de riesgos debe ser instituido con entidades del Estado ya existentes, en todos los niveles, y concebido para que sus acciones se realicen en forma descentralizada. Este sistema debe llevar a cabo sus actividades de gestión de riesgos de acuerdo con la orientación de un plan nacional, el cual debe definir sobre diferentes ámbitos institucionales la formulación de programas, subprogramas, actividades e instrumentos de gestión a nivel nacional, regional y local mediante la concertación interinstitucional.

Aunque una organización de este tipo sólo puede darse dependiendo de las circunstancias históricas y de democratización de cada país, el autor ha recomendado en diferentes ocasiones a los organismos de cooperación técnica internacional, de crédito para el desarrollo y algunos gobiernos, la creación o el impulso de sistemas de gestión de riesgos que cumplan con principios fundamentales como la descentralización, desconcentración, concurrencia, complementariedad y subsidiaridad institucional. Estos sistemas deben estar conformados por entidades del sector público y privado relacionadas con el tema, que lleven a cabo en forma organizada y descentralizada, a través de comités regionales y locales, las actividades de la gestión no solamente desde el punto de vista operativo sino también desde el punto de vista técnico, científico y de planificación de acuerdo con el ámbito de su competencia. Un sistema interinstitucional para la gestión de riesgos (prevención y atención de desastres), en que todas las instituciones tengan definidas sus funciones y responsabilidades a nivel nacional, provincial y local. Uno de los aspectos fundamentales de un sistema de estas características es la clara función de las instituciones nacionales y provinciales como agentes coordinadores y asesores de los niveles locales, donde juegan un papel primordial los sistemas nacionales de planeación de cada país, como estructuras que le dan coherencia a la política, y los municipios como entes ejecutores de la gestión.

Como consecuencia del centralismo administrativo existente en muchos países, los niveles locales han ignorado que también son gestores ambientales y de prevención, lo que podría explicar la razón de la indiferencia al deterioro. Es claro que si no es posible condicionar el propio entorno, porque otras fuerzas externas lo deciden, todo alrededor termina por perder el sentido de lo propio. El argumento fundamental de porqué el municipio debe ser responsable de la gestión ambiental y el hábitat, los preparativos para emergencias, la prevención y la reducción de riesgos, es la recuperación de la conciencia sobre lo regional y sobre lo local, lo que es también el comienzo de un nuevo concepto sobre el nivel de riesgo aceptable o tolerable y la valoración del impacto ambiental. Dicha valoración parte del ciudadano y se desarrolla de abajo hacia arriba, de acuerdo con los deberes y derechos democráticos.

En una sociedad compleja con mucha población y muchas instituciones y organizaciones manejando diversas responsabilidades para el sostenimiento de la comunidad, un la eficiencia se logra cuando la organización esta en capacidad de usar la capacidad de la tecnología de la información para buscar, analizar y distribuir información para respaldar la toma de decisiones y los aspectos públicos que requieren acción conjunta. Los sistemas de gestión de riesgos son inevitablemente interdisciplinarios y por lo tanto son difíciles de diseñar, construir y mantener. Los componentes técnicos requieren conocimiento avanzado y habilidades en ingeniería e informática. Los

componentes sociales requieren un entendimiento del diseño organizacional, de la política pública, de sociología y comunicaciones. Los sistemas de gestión de riesgos requieren un enfoque de equipo para operaciones efectivas, puesto que una persona no puede tener todo el conocimiento y las habilidades requeridas para manejar tareas complejas. Un grupo de gerentes experimentados y capaces, cada uno con un conocimiento profundo y con habilidades específicas y con suficiente entendimiento de los campos complementarios, es más efectivo para orientar y mantener un sistema de gestión. Puesto que estos sistemas son interdependientes y funcionan con base en entendimiento mutuo, la comunicación efectiva es requisito para que cada miembro participe en la adecuada toma de decisiones.

Aunque los organismos internacionales de cooperación técnica y, particularmente, la banca multilateral, después de los notables desastres del final del decenio de los años 90, han empezado a promover la creación o el fortalecimiento de sistemas u organizaciones para la gestión de riesgos en muchos países, se ha podido detectar que aún falta consolidar la voluntad política de los gobiernos, en la mayoría, para hacer del tema de la gestión de riesgos una prioridad del desarrollo. Del análisis realizado por el autor de un amplio número de organizaciones existentes en la mayoría de los países ha sido posible identificar las siguientes debilidades:

- a) Dificultad para responsabilizar los niveles locales. Debido a que el proceso de descentralización administrativa, política y fiscal es reciente en muchos países, en ocasiones lo que se considera una fortaleza cuando funciona se convierte, paradójicamente, en debilidad cuando no funciona. La descentralización es una fortaleza cuando los niveles locales han logrado un nivel aceptable de capacidad de gestión y han comprendido claramente sus competencias. Sin embargo, la misma es una debilidad cuando la capacidad de gestión del nivel local es baja o cuando se espera equivocadamente que el nivel nacional o internacional debe resolver los problemas que se presentan a nivel local. En estos casos la vulnerabilidad es muy alta y la organización en general pierde efectividad y eficiencia.
- b) Falta de socialización. Aunque algunas de estas organizaciones son participativas y han logrado involucrar algunas comunidades, debido a la importancia de muchos otros temas de inmediato interés para los ciudadanos la prevención y la mitigación de riesgos no se ha logrado incorporar efectivamente en la cultura. Estas organizaciones han sido particularmente protagónicas en momentos de crisis o coyunturas, razón por la cual cuando se les reconoce es en un sentido meramente operativo. Por otra parte, todavía tienen un sesgo muy marcado hacia los aspectos operativos y apenas inician sus primeras acciones con base en los aportes de las ciencias naturales y sociales, no obstante que se han realizado esfuerzos en información pública y en educación formal.
- c) Vacíos en la legislación. En la medida que se han venido promoviendo actividades de mitigación y se han tenido experiencias de los desastres atendidos se ha podido detectar que es necesario ajustar la legislación mediante la cual se crearon o se han reglamentado estas organizaciones, para mejorar su capacidad de gestión, su efectividad y eficiencia. Por ejemplo, se ha detectado que en la mayoría de estas organizaciones no son claros los canales por los cuales se pueden generar políticas de mitigación; que no existe agilidad administrativa durante las emergencias; que se requieren medidas de excepción posdesastre más efectivas; que se requiere mayor

apropiación de recursos y que hay que modificar aspectos de manejo centralistas, entre otros.

- d) Trámites y burocracia. En la mayoría de las organizaciones de gestión existen dificultades en procedimientos administrativos claves, tales como la ágil contratación en situaciones de inminente emergencia, situación que sólo se puede realizar en la mayoría de los países en caso de que se materialicen los sucesos.
- e) Desconocimiento del rol y manejo cortoplacista. Es muy común que se presenten dificultades con entidades que hacen parte de la organización por la falta del entendimiento de su papel institucional. También, es común que algunas entidades le den un manejo cortoplacista a los problemas en términos de planificación, razón por la cual no se obtienen los resultados esperados y de manera sostenible .
- f) Falta de conocimiento. Además de que aún faltan muchos estudios acerca de amenazas y riesgos en la mayoría de los países, los pocos que existen no son por la novedad del tema suficientemente conocidos por los funcionarios de las entidades competentes. Por otra parte, el nivel profesional de un amplio número de funcionarios no es el mejor, por lo tanto el entendimiento y conocimiento del tema es, en ocasiones, deficiente.
- g) Alta rotación de funcionarios. Debido a los cambios periódicos de los cargos públicos a nivel municipal y provincial existe un gran desgaste para lograr el interés de los nuevos funcionarios, los cuales en muchas ocasiones cuando ya han tomado conciencia sobre el tema y se han capacitado se retiran o son relevados de su cargo por intereses politiqueros.
- h) Apropiaciones presupuestales menores. Debido a los problemas económicos propios de cada país las apropiaciones presupuestales de las instituciones en su mayoría son insuficientes para la realización de estudios y para la inversión en instrumentación, realización de proyectos de investigación en la prevención, etc. Existen serias deficiencias en la dotación de los organismos operativos y de socorro, los cuales no cuentan con un inventario de elementos suficiente.

Teniendo en cuenta lo anterior, de manera general, se proponen a continuación una serie de recomendaciones que, a criterio del autor, podrían contribuir a mejorar la efectividad y eficiencia de la gestión de riesgos en los diferentes países:

Actualizar la legislación. Tal como se indicó antes, en el desarrollo de las acciones institucionales y las experiencias vividas desde la creación de las diferentes organizaciones en cada país se ha podido detectar que existen vacíos en las leyes. En la mayoría de países, no obstante su reciente creación, estas organizaciones funcionan desbordando su realidad jurídica, lo que significa que es necesario llevar a cabo cambios en la normativa para ajustar la ley a las realidades y para dar una base jurídica que además modernice las instituciones operativas como los Bomberos o la Defensa Civil que tienen grandes debilidades estructurales y financieras en la mayoría de los casos.

Fortalecer la capacitación. Aunque se realizan actividades de educación en general, la mayoría de estas organizaciones necesitan impulsar procesos de capacitación de funcionarios, en los cuales mediante instrumentos previamente elaborados, con el concurso de las entidades, se logre que en el nivel local y provincial se lleve a cabo

procesos de autocapacitación en el tema. De esta manera se podría mejorar el conocimiento y el entendimiento de sus funciones.

Fortalecer la capacidad financiera. No obstante que en algunos países las organizaciones cuentan con fondo de calamidades y que la ley obliga en muchos casos a las entidades a tener presupuesto para la prevención y atención de desastres, es indudable que se requiere una mayor apropiación de recursos financieros que mejoren la capacidad de ejecución de las actividades relativas al tema.

Promover la participación de la sociedad civil. Aunque en varios países operan algunas ONG como la Cruz Roja y los cuerpos de bomberos voluntarios, es necesario que la relación con las ONG que promueven el desarrollo social se establezca fundamentalmente a nivel local. Entidades del sector privado, organizaciones comunitarias, asociaciones o entidades que apoyan el trabajo de comunidades, la reubicación de asentamientos humanos, la gestión ambiental o la reconstrucción post-evento son fundamentales para la adecuada gestión del riesgo. Las estrategias principales para impulsar la participación de la comunidad en el tema preventivo son la utilización de los canales de fortalecimiento y desarrollo institucional y la promoción de representación ciudadana en los niveles locales de gestión. El aumento de la capacidad de los niveles locales reduce dependencia de la ayuda humanitaria nacional e internacional en caso de desastre.

Desarrollar sistemas integrados de información. Uno de los aspectos más complejos pero que a criterio del autor es fundamental para mejorar la efectividad es la concepción y puesta en marcha de un sistema integrado de información que sea descentralizado, interinstitucional y coherente. La información es la base de la planificación y de la adecuada respuesta en casos de situaciones de crisis y facilita la sinérgia que debe procurarse entre las entidades y los individuos.

Esta última recomendación es de especial importancia a criterio del autor, dado que la capacidad técnica para ordenar, almacenar recuperar y diseminar información entre múltiples usuarios en forma simultánea, la posibilidad de representar el conocimiento visualmente y la posibilidad de monitorear las diferentes instituciones en diferentes niveles de ejecución esta creando un potencial de nuevos enfoques para enfrentar los problemas del riesgo. Sin lugar a duda, el encadenamiento de información tecnológica a la capacidad organizacional para enmarcar y revisar políticas que afecten la comunidad como un todo, puede facilitar la creación de un “ambiente rico en información” que le dé soporte a la acción voluntaria e informada, al aprendizaje colectivo y a la auto-organización interinstitucional para reducir el riesgo. Este encadenamiento fortalece la gestión de riesgos, en la cual la habilidad e intercambio oportuno de información precisa entre múltiples participantes le daría lugar a un enfoque más amplio, creativo y responsable para resolver problemas compartidos.

La conclusión en este caso es que los procesos de acción colectiva y voluntaria para reducir el riesgo, que implican comunicación, selección, retroalimentación y auto-organización, dependen de la información. Dado que la construcción de una base de conocimiento para la efectiva reducción del riesgo es un proceso colectivo, una apropiada inversión tanto para el desarrollo técnico como organizacional es fundamental para lograr que la base de conocimiento llegue a ser el foco que facilite el aprendizaje organizacional continuo y la capacidad de la comunidad de monitorear su propio riesgo.

### **8.3. Una estrategia para un mundo más seguro**

En materia de desastres y riesgos es claro que la velocidad del problema supera la velocidad de las soluciones y existe una alta frustración y preocupación científica a nivel internacional (Hayman *et al.* 1991; Rogge 92; Gilbert y Kraimer 1999; Munich RE 1999; UN-OCHA 2000). Aun cuando se reconoce que el problema es cada vez más grave en los países en desarrollo, los investigadores y gestores de los países más desarrollados ya empiezan a preocuparse por el aumento de la vulnerabilidad también en los países ricos. En los Estados Unidos, por ejemplo, la reciente evaluación de la investigación en el tema promovida por el *Harzard Research and Applications Information Center* de la Universidad de Colorado en Boulder, concluyó que era necesario que en ése país se estableciera formalmente una política de “prevención sostenible”, que asocie la gestión inteligente de los recursos naturales con la resiliencia económica y social a nivel local, dividiendo la reducción del riesgo como una parte integral de la política y dentro de un contexto mucho más amplio (Mileti 1999). Ya con anterioridad, un cuarto de siglo antes, un trabajo similar realizado por el geógrafo Gilbert White y el sociólogo J. Eugene Haas concluía implícitamente la necesidad de esa misma estrategia (White y Haas 1975). Durante 25 años hubo un avance notable en el tema de la gestión de riesgos en los Estados Unidos y en el ámbito internacional se promovieron iniciativas que influyeron positivamente para explicitar el problema, sin embargo hoy la preocupación es mucho mayor y los desastres están aumentando en forma dramática. La última evaluación, en la cual participaron cientos de investigadores, dada a conocer por Dennis Mileti en 1999, indica que a pesar de los avances, durante en el nuevo milenio los desastres naturales y tecnológicos serán mayores a los hasta ahora experimentados, simplemente porque ese es el futuro de las acciones que han sido creadas en el pasado. El desarrollo en áreas peligrosas, por ejemplo, ha aumentado la exposición y la vulnerabilidad física, y muchos de los métodos para enfrentar las amenazas han sido miopes, pues han dejado para después las pérdidas en vez de eliminarlas. El informe indica que desastres y riesgos no son problemas que puedan solucionarse aisladamente y que, más bien, son parte o parcelas de muchos procesos y circunstancias más amplias.

Indican en su propuesta que es necesario promover la sostenibilidad local, manteniendo y ampliando la calidad ambiental, la calidad de vida, la resiliencia y la responsabilidad la comunidad; impulsando la equidad intra e inter-generacional y estimulando la construcción de consenso. Destacan como medidas de reducción de riesgo la reglamentación del uso del suelo, las alertas, los códigos de construcción, los seguros y el uso de la tecnología. Consideran que los pasos a seguir son la creación de redes, de capacidad y consenso local; el establecimiento de un enfoque holístico de gestión gubernamental; la estimación general de amenazas y riesgos en todo los niveles; la creación de bases de datos nacionales; el impulso de la educación y capacitación en el tema; y el compartir el conocimiento a nivel internacional.

Finalmente, la agenda de la evaluación antes mencionada propone que en relación con el tema de los desastres es necesario hacer algunos cambios en la forma de pensar y que se debe: adoptar una perspectiva global de sistemas; aceptar la responsabilidad de que el riesgo se construye socialmente; que ante la complejidad es necesario anticiparse a la ambigüedad, el cambio constante y la sorpresa; rechazar el pensamiento cortoplacista; asumir una visión más amplia y generosa de las fuerzas sociales y su rol en la gestión de riesgos; y acoger los principios del desarrollo sostenible (Mileti 1999).

Por otra parte, de la experiencia de los últimos años del autor en la consolidación de una adecuada gestión de riesgos y teniendo en cuenta los nuevos paradigmas que se plantean en relación con la manera de llevar a cabo la estimación de la vulnerabilidad y el riesgo, se concluye aquí que para mejorar la efectividad y eficacia de la gestión es necesario tener en cuenta que:

- a) El conocimiento de las amenazas naturales, su monitoreo y análisis es condición necesaria pero no es suficiente para disminuir el impacto de los fenómenos peligrosos.
- b) Las condiciones de vulnerabilidad de la población se disminuyen con el mejoramiento de sus condiciones de vida. Es decir, como condición esencial para disminuir la ocurrencia de desastres, debe ser superado el estado de subdesarrollo de los países, y en especial, las condiciones de pobreza.
- c) La reducción de riesgos, al entenderse como parte del desarrollo de los países no puede darse bajo condiciones de deterioro del entorno que o bien acentúan o bien crean nuevos riesgos. Por lo tanto, no existe más alternativa que buscar el equilibrio entre el modelo de desarrollo que se adopte y la conservación del medio ambiente.
- d) Especial énfasis debe hacerse sobre el riesgo en las zonas urbanas, en especial en aquellos países donde las ciudades siguen creciendo a ritmos acelerados y la planificación y los controles de ese crecimiento son superados por la realidad, acentuándose y aumentando el riesgo de un cada vez mayor número de personas.
- e) La comunidad enfrentada a una amenaza natural cualquiera debe ser consciente de esa amenaza y debe tener el conocimiento suficiente para convivir con ella.
- f) El modelo de descentralización sobre análisis y toma de decisiones es condición necesaria para la real participación de la comunidad y de las autoridades locales. La responsabilidad de disminuir el impacto de los fenómenos naturales y tecnológicos es multisectorial e interinstitucional. La tarea debe comprometer a los gobiernos, a la comunidad, al sector privado, al sector político, a los organismos no gubernamentales y a la comunidad internacional. La autonomía de las comunidades locales y de sus propias autoridades debe ser una estrategia explícita para lograr resultados efectivos de intervención.
- g) La comunidad internacional y las agencias y organismos bilaterales y multilaterales deben apoyar las iniciativas nacionales y facilitar el intercambio de información así como promover la cooperación técnica horizontal entre los países que deben desarrollar estrategias similares en el análisis de sus amenazas y riesgos, la intervención de las vulnerabilidades y en la gestión del riesgo en general.

De acuerdo con lo anterior, y tal como el autor lo ha planteado en diferentes espacios institucionales, técnicos y políticos a nivel internacional, para consolidar la gestión de riesgos es fundamental promover las siguientes acciones y recomendaciones:

- a) Además de estimular y atraer el interés de la ciencia y la tecnología, es necesario lograr la voluntad político-administrativa y la aceptación por parte de la comunidad de propósitos que deben formularse fundamentalmente por los niveles locales y nacionales, en donde el nivel internacional debe jugar un papel de facilitador, difusor y asesor de las actividades que se desarrollen por parte no sólo de entes de carácter

gubernamental sino, también, por otros componentes de la sociedad, quienes ya han liderado procesos exitosos de gestión de riesgos.

- b) Entendida la vulnerabilidad como una carencia del desarrollo y una cuenta negativa a nivel del medio ambiente, se requiere estimular una voluntad política que reconozca la reducción de la vulnerabilidad como un objetivo explícito de la planificación para el desarrollo sostenible y como un indicador dentro de la contabilidad de valores ambientales. Se debe impulsar la elaboración de técnicas de monitoreo y seguimiento de la acumulación territorial y social de riesgos como una herramienta fundamental para la prevención de desastres.
- c) Es necesario involucrar a las comunidades con un criterio participativo para profundizar el conocimiento acerca de la percepción individual y colectiva del desarrollo y del riesgo e investigar las características culturales y de organización de las sociedades, así como sus comportamientos y relación con el entorno físico y natural, que favorecen o impiden la prevención y la mitigación y que estimulan o limitan la preservación del ambiente para el desarrollo de las generaciones futuras; aspectos de fundamental importancia para poder encontrar medios eficientes y efectivos que logren reducir el impacto de los fenómenos peligrosos.
- d) Es importante realizar estudios sobre desastres que integren lo social con lo técnico-científico y la sociedad civil con los organismos gubernamentales, con el fin de lograr traducir el trabajo de carácter tecnocrático en políticas efectivas de gestión del riesgo.
- e) Dada la validez y trascendencia de lo cultural en torno a los desastres, deben fortalecerse y estimularse programas educativos para la población y esquemas de capacitación que permitan que los investigadores, planificadores, técnicos y funcionarios adquieran conocimientos heterogéneos adecuados a las distintas realidades de la región. Esto, con el fin de contribuir a impulsar la incorporación de la prevención en la cultura.
- f) Dada la importancia del intercambio de experiencias y la necesidad de contar con la mayor cantidad de documentación posible, es necesario fomentar la conformación de redes de instituciones y el acceso rápido a la información y documentación técnica y educativa disponible, ampliando los centros o mecanismos nacionales y regionales existentes con una perspectiva multidisciplinaria y con un enfoque multisectorial.
- g) Se deben fortalecer los sistemas organizativos y administrativos de gestión de riesgos adecuándolos a la realidad de los desastres que se presentan. Esto implica entre otras cosas: la descentralización de los entes gubernamentales responsables, la incorporación y participación de la sociedad civil y la adopción de un enfoque preventivo y no exclusivamente de atención de emergencias.
- h) Teniendo en cuenta que la ejecución y evaluación de proyectos nacionales y locales demostrativos de gestión de riesgos permiten comprobar en la práctica la eficacia de los sistemas organizativos-administrativos y las técnicas utilizadas, se debe promover la recopilación y análisis de estas experiencias y técnicas, o buenas prácticas, como un paso para la generación de nuevos conocimientos y para la formulación y ajuste de las políticas de los países y los organismos bilaterales y multilaterales.
- i) Es muy importante que los organismos, las agencias internacionales y los donantes dirijan apoyos no solamente para el socorro y los preparativos, sino también para

estimular y facilitar la cooperación horizontal y el intercambio de experiencias entre los países, las instituciones y los investigadores de cada región, estimulando el intercambio de información, técnicas y el desarrollo de procesos de apoyo y aprendizaje mutuo para la reducción, prevención y preparativos para desastres.

- j) Las instituciones financieras de carácter global y regional deben establecer y aplicar políticas de financiamiento que apoyen las iniciativas de gestión de riesgos y alienten la incorporación de estos aspectos en los programas de desarrollo regional y nacional.

En otras palabras, los elementos básicos de una política que incorpore los principios de sostenibilidad ecológica, social, cultural y económica, deben ser: la planeación explícita como instrumento de prevención y regulación del uso del medio y los recursos; la respuesta tecnológica como instrumento de eficiencia y como recurso complementario para la debida transformación y modelado de la naturaleza; la educación y la información como instrumentos de culturización y responsabilización; la organización y participación comunitaria como instrumento de adaptación y adecuación del sistema social con base democrática; y la acción legal y jurídica como instrumento de legalización y control de los derechos, deberes y acciones del hombre sobre el medio ambiente.



## Capítulo 9

### Conclusiones y trabajo futuro

El final del siglo xx tuvo en 1998 y 1999 dos años en los que se produjeron desastres muy notables en el mundo. En 1998, cuando aun no se habían acabado los efectos del fenómeno de El Niño en diversos lugares, ocurrieron dos grandes huracanes que afectaron gravemente al Caribe y a Centro América: el George y el Mitch, que dejaron consecuencias sin precedentes en esas regiones. En 1999 ocurrió un número sorprendentemente grande de desastres causados por terremotos. El primero de consecuencias mayores ocurrió en enero en la zona cafetera de Colombia (Escallón y Alarcón 1999; García 1999; INGEOMINAS 1999; Jaramillo y Cowan 1999; Sarriá 1999; Cardona 2000; . Posteriormente, se produjeron daños en la India, en Chamoli, en marzo, y en México, en Tehuacán, en junio. En el segundo semestre, en agosto, ocurrió uno de los más dramáticos desastres sísmicos en tiempos modernos: el terremoto de Koçaeli, en Turquía (Erdik 1999; EERI 1999; MCEER 1999; Mitchell 1999; Cardona y Barbat 2000a). Luego, en septiembre hubo un terremoto que afectó gravemente Atenas, Grecia, y otro muy severo que produjo graves daños en Taiwán en el mismo mes, el terremoto de Chi-Chi. Unos días después, la ciudad de Oaxaca, en México, fue sacudida por un terremoto y en noviembre, la zona de Düzce, de nuevo en Turquía, fue afectada por otro fuerte sismo. El año 1999 terminó con un desastre de otra índole pero que contribuyó a elevar las víctimas por desastre de manera notable: enormes deslizamientos y flujos de escombros destruyeron un amplio número de poblaciones del Estado de Vargas, en Venezuela, en diciembre. Resulta irónico que este tipo de situaciones se haya exacerbado tan notablemente para terminar los años 90, cuando en la misma época finalizaba el *Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales*, promovido por la Naciones Unidas para estimular la mitigación y prevención de los desastres en los diferentes países del mundo. Iniciado el primer decenio del siglo XXI, ya se han registrado nuevos desastres sísmicos que han causado innumerables muertos y pérdidas de vidas en la Provincia de Gujarat en la India y en El Salvador, en Centro América.

La mayoría de estos desastres tienen grandes similitudes que nos permiten reflexionar sobre el riesgo y expresar una profunda preocupación sobre el hecho de que estos escenarios se repetirán con certeza en el futuro, con consecuencias similares o peores, en los mismos o en otros lugares del mundo. Todo esto como resultado de la

poca atención que se le ha dado al tema del riesgo y de la poca voluntad política para hacer prevención en forma decidida.

#### **Impacto económico y social del terremoto del Quindío, Colombia 1999**

Las cifras de las pérdidas indican que 1230 personas perdieron la vida y que se atendieron 5300 heridos en los hospitales. El número de afectados se calcula en 200 000, que perdieron su vivienda y sus espacios de trabajo. El terremoto causó daños a cerca de 45 000 edificios en las poblaciones de la zona cafetera, lo que significa una pérdida económica directa, sin incluir pérdidas en el comercio y la industria, de cerca de 1800 millones de dólares. El impacto total del sismo puede ser del orden del 1,5% del PIB del país, el cual tuvo un crecimiento económico de sólo el 0,2% en 1998, considerado el peor en los últimos 57 años. Este terremoto afectó gravemente una de las zonas más prosperas de Colombia, que más tributa al tesoro nacional, no obstante que desde hace varios años se encuentra en una grave crisis económica, debido al desequilibrio de la economía del café al nivel internacional. De los edificios afectados, se estima que sólo el 10% estaban cubiertas por seguro contra terremoto, que en su mayoría cubría sólo el 72% del valor del edificio, dado que en muchos casos existía un co-aseguro con el propietario. Muchos de los edificios estaban infra-asegurados. La mayoría de los edificios asegurados corresponde a viviendas con deuda hipotecaria. En el sector agrícola del café, se calcula que el impacto pudo involucrar 8000 edificios, lo que compromete el futuro cercano de la producción cafetera.

#### **Impacto económico y social del terremoto del Mar de Mármara, Turquía 1999**

De acuerdo con la información oficial del General Directorate of Disaster Affairs, Earthquake Research Department de Turquía de 9 de septiembre de 1999, las cifras de pérdidas indicaban que 15 613 personas perdieron la vida, pero se desconocía el número de desaparecidos. Ocurrido el terremoto del 12 de noviembre de 1999, se estimaba que la cifra oficial de fallecidos había alcanzado los 18 000, pero el número de desaparecidos aun seguía siendo un número sin cuantificar. Se atendieron 23984 heridos en los hospitales. El número de afectados se calculaba en 220 000 personas que perdieron su vivienda y sus espacios de trabajo. En cifras redondas, los dos terremotos causaron daños graves y la pérdida total de cerca de 77 000 unidades de vivienda que no son reparables, de años moderados a 75 500 y daños leves a 87 000. Se estima que 15 400 edificios colapsaron o sufrieron daños severos, lo que significa una pérdida económica directa de aproximadamente 5000 millones de dólares. Los daños en la industria se estiman 2000 millones de dólares. Los daños en vías y puertos se calculan en US\$ 1400 millones de dólares y, en general, se estima que incluyendo otras pérdidas de carácter socioeconómico, las pérdidas pueden sumar 16 000 millones de dólares, lo que significa un impacto total del sismo del orden del 7% del PIB del país. Sin embargo, se considera que la cifra podría llegar a 25 000 millones de dólares al realizar un análisis más detallados. Este terremoto afectó de manera grave una de las zonas más prosperas de Turquía, de notable desarrollo industrial en los últimos veinte años y con un importante desarrollo turístico que se tradujo en una notable actividad de la construcción de edificios en los últimos años. Aun cuando los daños en la industria se encuentran aparentemente cubiertos en su totalidad, se estima que sólo el 8% de los edificios afectados estaban cubiertos por seguros. El sismo del 12 de noviembre, por su parte, causó daños graves en más de 100 edificios, cerca de 700 personas perdieron la vida y 800 fueron atendidas por las instituciones de salud. No obstante que este desastre favoreció mejora de las relaciones internacionales de Turquía con Grecia y con la Unión Europea, esta crisis compromete de manera severa su desarrollo económico y social. En los últimos años, Turquía ha realizado esfuerzos para lograr pasar a la categoría de los países desarrollados. Infortunadamente, el impacto en la industria del terremoto y el proceso de reconstrucción implicarán gastos que cambiarán las políticas y programas de gobierno así como su nivel de endeudamiento, lo que se traduce en empobrecimiento, retraso por varios años y un obstáculo más para lograr entrar en el grupo de países desarrollados del mundo.

Muchas regiones y países tienen situaciones de riesgo similares. Edificios con las mismas características, vulnerables por ejemplo a los terremotos, que se siguen construyendo en muchas ciudades del mundo. Finalizando el siglo ocurrieron varios desastres notables en varios países, pero probablemente en los próximos años esta situación se repetirá en otros lugares. Para que haya un desastre sísmico, por ejemplo, no sólo se requiere que exista una alta amenaza o peligrosidad sísmica. Una alta vulnerabilidad de los edificios de una zona, que con frecuencia está asociada al hecho de que durante un largo período de tiempo se haya considerado como bajo el nivel de amenaza sísmica en el sitio, también puede dar origen a un desastre, incluso con un sismo menor o moderado. El nivel de la amenaza sísmica, como se sabe, es completamente dependiente del tiempo de exposición en el cual se espera, en términos probabilistas, que puede ocurrir un suceso de cierta severidad. Subestimar la amenaza sísmica es la razón por la que muchos desastres pueden ocurrir en lugares donde la vulnerabilidad sísmica de los edificios es alta y la amenaza se considera de menor importancia. En muchas ciudades, donde el desarrollo urbano es el resultado de un proceso histórico de edificación de varios siglos, se ha hecho evidente que no es cierto que la vida de los edificios sea corta, tal como se considera cuando se definen los períodos de retorno de los sismos utilizados en el diseño de los edificios.

Sin duda, no es posible intervenir mediante refuerzos estructurales todos los edificios vulnerables existentes en una zona, pues en muchos lugares del mundo la mayoría han sido construidos sin tener en cuenta los requisitos sismorresistentes modernos. Sin embargo, es una negligencia y una grave omisión no rehabilitar o reforzar desde el punto de vista sísmico al menos los edificios esenciales, tales como hospitales, cuarteles de bomberos, centrales de líneas vitales y, en general, los edificios indispensables para la atención de la comunidad una vez haya ocurrido un terremoto. En cada ciudad debería existir un inventario de edificios vulnerables identificados y una priorización de la intervención preventiva de acuerdo con su importancia y su grado de vulnerabilidad sísmica. Es una obligación de la generación actual con las futuras generaciones reducir la vulnerabilidad sísmica tanto como sea posible y garantizar la aplicación del estado del conocimiento y de los requisitos de sismorresistencia a todas las construcciones que se realizan en la actualidad, al menos para evitar que aumente la vulnerabilidad física y el riesgo sísmico.

Teniendo en cuenta la magnitud de los desastres que pueden ocurrir en el futuro, las dificultades de comunicación que se pueden presentar en esas circunstancias, las restricciones para una evaluación inmediata de los daños, la falta de recursos para atender la crisis y la ausencia de capacitación del personal que debe asumir la atención de una emergencia de este tipo, es posible que a cualquier país o región le ocurra una situación de estas características. Esto no disculpa la demora y falta de coordinación institucional de las entidades oficiales, pero sí ratifica que, aun existiendo una alta capacidad de respuesta y reacción ante un desastre, dicha capacidad siempre será un mínimo paliativo y la crisis será siempre abrumadora. Sin duda, estos sucesos pueden producirse en muchos otros lugares del mundo y sus consecuencias podrían ser similares. En el caso de los terremotos, aplicar en forma correcta las normas de diseño y construcción sismorresistente, reforzar los edificios sísmicamente vulnerables y llevar a cabo medidas de prevención y reducción del riesgo a todo nivel, considerando aspectos sociales, económicos, culturales y ambientales, es el único y verdadero camino para reducir las consecuencias de un fenómeno de esa naturaleza.

## 9.1. Conclusiones

En general se puede concluir que los desastres son un problema en aumento. El impacto de los fenómenos naturales o socio-naturales es cada vez mayor debido a los estilos o modelos de desarrollo imperantes en muchos países. El crecimiento demográfico y los procesos de urbanización, las tendencias en la ocupación del territorio, el proceso de empobrecimiento de importantes segmentos de la población, la utilización de sistemas organizacionales inadecuados y la presión sobre los recursos naturales, han hecho aumentar en forma continua la vulnerabilidad de los asentamientos frente a una amplia diversidad de peligros naturales.

A manera de síntesis y como resultado de la realización de este trabajo se pueden presentar las siguientes conclusiones:

1. La concepción del riesgo y la terminología asociada a su definición no sólo ha variado con el tiempo; también, ha variado desde la perspectiva disciplinar desde la cual se ha abordado su noción. Esto significa, que a pesar del refinamiento con que se le ha tratado desde los diferentes ámbitos del conocimiento, no ha existido en realidad una concepción que unifique las diferentes aproximaciones o que recoja de manera consistente y coherente los distintos enfoques. Es de esperarse que siempre existirán diferentes enfoques y aunque se podría argumentar que dicha circunstancia puede ser irrelevante, el autor considera que parte de las dificultades para lograr una gestión efectiva del riesgo ha sido la falta de una concepción integral del riesgo que facilite su estimación e intervención desde una perspectiva multidisciplinar.
2. A diferencia de lo comúnmente considerado, los planteamientos realizados en este trabajo indican que el riesgo mismo es el problema fundamental y que el desastre es un problema derivado. Este cambio paradigmático, a criterio del autor, debe estar acompañado por un creciente énfasis en la relación que los riesgos y los desastres deben guardar con los procesos de desarrollo y, en consecuencia, con la problemática ambiental. La ciencia es necesaria pero no es suficiente para garantizar la reducción del riesgo ante los fenómenos naturales y la gestión del riesgo debe surgir como un componente fundamental de la planificación y como una estrategia ineludible para lograr un desarrollo sostenible.
3. El análisis de riesgo basado en modelos probabilistas ha contribuido notablemente a realizar valoraciones consistentes que han sido incorporadas implícitamente en innumerables normativas y leyes. Sin embargo, estas técnicas no han sido suficientes por sí solas para definir la aceptabilidad del riesgo. Aunque se argumente su supuesta objetividad, muchos de sus fundamentos e hipótesis son subjetivas, razón por la cual es cuestionable que el “riesgo aceptable” se determine exclusivamente mediante este tipo de enfoque. Al respecto aún queda mucho camino que recorrer, pues parece ser que es necesario combinar los resultados de los análisis probabilistas con apreciaciones u otras valoraciones cualitativas que dependen en la mayoría de los casos de la percepción del riesgo.
4. La revisión del estado del conocimiento en materia de evaluación del daño sísmico ha permitido identificar la manera como se puede llevar a cabo la estimación del riesgo sísmico físico en forma analítica cuando no existe buena información o datos que no son realistas. Se puede generar de manera sintética una muestra de los diferentes estados de daño en modelos de edificios que sean representativos en el sitio en diferentes épocas. Funciones de fragilidad o vulnerabilidad se pueden

obtener en la actualidad utilizando técnicas de simulación y la aplicación del método de Monte Carlo.

5. Para hacer gestión del riesgo es necesario dimensionarlo y para dimensionar el riesgo es necesario tener en cuenta, desde un punto de vista multidisciplinar, no solamente el daño físico esperado, las víctimas o pérdidas económicas equivalentes, sino también factores sociales, organizacionales e institucionales. Por lo tanto, el riesgo, es decir las consecuencias potenciales, no sólo está relacionado con el impacto de un suceso peligroso, sino también con la capacidad para soportar el impacto y sus implicaciones en el área geográfica considerada.
6. Se ha propuesto un enfoque conceptual unificado del riesgo, teniendo en cuenta diferentes perspectivas disciplinares, con el objetivo de sustentar un planteamiento teórico coherente y consistente. Este enfoque o estimación holística del riesgo se ha fundamentado en la teoría de los sistemas dinámicos complejos o no lineales y para su modelización se han propuesto dos técnicas diferentes de análisis multicriterio: indicadores relativos y redes neuronales difusas. Su propósito ha sido involucrar y orientar las decisiones durante el mismo proceso de simulación de los factores de riesgo. De estas técnicas se espera que dada su adecuación al problema, su transparencia técnica, su versatilidad y la posible legitimidad con que puedan ser utilizadas en el futuro, contribuyan a facilitar la desmitificación del riesgo sísmico y a formular de manera eficiente políticas públicas eficaces que lo reduzcan.
7. Las técnicas de modelización del riesgo sísmico urbano desde una perspectiva holística se aplicaron a Bogotá, Colombia. La principal ventaja de estas técnicas ha sido 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 de la ciudad presenta un mayor índice de riesgo sísmico que otra. Esta virtud permitió 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.
8. Se ha propuesto como política pública la reducción de riesgos, entendida como el conjunto de elementos, medidas y herramientas dirigidas a la intervención de la amenaza o la vulnerabilidad, con el fin de disminuir o mitigar el riesgo existente. Este concepto juega un papel delimitador respecto a otro conjunto acciones cuyo objetivo es intervenir principalmente cuando ya ha ocurrido un desastre; es decir los preparativos para la atención de emergencias, la respuesta y la reconstrucción. La gestión de riesgos, así planteada, tiene como objetivo articular los dos tipos de intervención, dándole un papel principal a la prevención-mitigación, sin abandonar la intervención sobre el desastre, la cual se vincula al desarrollo de las políticas preventivas que en el largo plazo conducen a disminuir de manera significativa las necesidades de intervenir sobre los desastres ya ocurridos.

## 9.2. Recomendaciones para futuros trabajos

Intentar modelizar el riesgo de manera integral y desde una perspectiva multidisciplinar es tratar de simular un contexto dinámico, complejo, no lineal, donde se presenta la interacción de varios sistemas. La simulación, tal como lo plantea Jorge Wagensberg (1997) es una alternativa legítima de aproximación a la realidad, pues aunque no es propiamente teoría ni tampoco es experiencia, permite explorar

comportamientos y tendencias. Los planteamientos que aquí se han presentado se espera que puedan verificarse con el tiempo mediante simulaciones eventualmente más depuradas, pero en todo caso sencillas y transparentes, para que sean realmente útiles. La parametrización que aquí se utilizó no es más que un modelo simplificado, al que continuamente se le pueden introducir correcciones o esquemas alternativos.

En el caso de la técnica basada en índices e indicadores, el campo está abierto para identificar nuevos parámetros que reflejen aspectos del riesgo de la manera más fiel posible. Incluso, de ser necesario, podrían proponerse desde ahora nuevos descriptores para los cuales se realice un cuidadoso levantamiento de información hacia el futuro. Es importante identificar las fuentes de error tanto de la información como de los modelos mismos y estimar la sensibilidad, por ejemplo, por modificaciones en aspectos como los factores de participación, la composición de los indicadores, etc. Sería interesante explorar técnicas que involucren umbrales, manteniendo la posibilidad de utilizar valores conmensurables relativos, que permitan el monitoreo en forma directa de los indicadores; esto con el fin de desarrollar sistemas de alerta temprana de los factores de vulnerabilidad del contexto. En general, pueden realizarse depuraciones o ajustes que contribuyan a mejorar la calidad del proceso de toma de decisiones.

Por otra parte, en relación con la técnica basada en conjuntos difusos y redes neuronales, el autor considera que existe una diversidad de posibilidades que hace intuir que se está apenas en los inicios de una nueva forma de aproximarse a problemas complejos donde los modelos reduccionistas son inconvenientes y muy limitados. Al respecto del modelo propuesto hay posibilidades, por ejemplo, de refinar las funciones de pertenencia por parte de expertos e incorporar nuevos criterios de saturación. Esta situación se puede presentar debido a que se identifiquen nuevos componentes que, al alcanzar ciertos valores causan un elevamiento brusco de los valores 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 los componentes, como se tiene en la versión actual. También, es deseable contrastar del modelo con datos reales, con el fin de validarlo periódicamente para su debida aplicación en la planeación territorial, económica y social. Finalmente, podría ser muy interesante explorar el uso de reglas de lógica difusa y, si los modelos lo requirieran, explorar algoritmos genéticos y evolutivos (Peña 2000).

A raíz de la realización de este trabajo que aquí concluye, el autor ha tenido la oportunidad de iniciar la orientación de dos proyectos en el ámbito internacional, cuyo objetivo es la modelización de la vulnerabilidad y el riesgo desde una perspectiva holística, utilizando indicadores y sistemas expertos basados en redes neuronales y conjuntos difusos. El primero de ellos es la elaboración del Índice de Vulnerabilidad Global (de Riesgo) por desastres, IVG, para el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD, en Ginebra (UNDP 1999). Se espera, que al igual que el conocido Índice de Desarrollo Humano, IDH, de las Naciones Unidas, se pueda obtener un IVG para todos los países del mundo, con el objetivo de promover la gestión de riesgos y categorizar anualmente regiones y países a través del Reporte de Vulnerabilidad Global (Global Vulnerability Report, en inglés). Por otra parte, un segundo proyecto que involucra diez países de América Latina y el Caribe se ha iniciado en Washington, con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo, BID. Su objetivo es la definición y el análisis de diferentes tipos de indicadores de vulnerabilidad y desempeño sobre gestión de riesgos y sus fundamentos conceptuales.

# Referencias

- Abrams, D.P., Shinozuka, M. (Eds.) (1997): "Loss Assessment of Memphis Buildings". *Technical Report NCEER-97-0018*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- Adams, J. (1995): *Risk*, London, UCL Press.
- Aguiar, R., Barbat, A.H. (1997): "Método para el Cálculo del Índice Global de Daño para Edificios de Hormigón Armado Sometidos a Acciones Sísmicas". *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 2 No.1, Quito.
- Akiyama, H. (1985): *Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings*. Tokio.
- Akiyama, H., Kitamura, H. (1992): "Design Energy Spectra for Specific Ground Conditions" . *International Workshop on Recent Developments in Base Isolation Techniques for Buildings* Tokio.
- Aktan, A.E., Ho, I.K. (1990): "Seismic Vulnerability Evaluation of Existing Buildings", *Earthquake Spectra*, 6(3).
- Alexander, D., (1993): *Natural Disasters*, Chapman and Hall, New York.
- Algermissen, S.T. y Steinbrugge, K.V. (1984): "Hazard and Risk Assessment: Some Case Studies", *The Geneva Papers on Risk and Insurance*, 9-30.
- Anderson M.B., Woodrow P.J. (1989). *Rising from the Ashes: Development strategies in times of disaster*. Boulder, Westview Press.
- Anderson, P.W. (1972): "More is Different: Broken Symmetry and the Nature of the Hierarchical Structure of Science". *Science* 177:393-96.
- Ang A. H-S., Kim S.B. (1993): "Damage Estimation of Existing Bridge Structures, Structural Engineering" en *Natural Hazards Mitigation: Proc. ASCE Structures Congress*, Irvine CA, Vol. 2, 1137-1142.
- Atkins, J P, S Maíz, C D Easter. (2000): "A Commonwealth Vulnerability Index for Developing Countries: The Position of Small States". *Commonwealth Economic Paper Series 40*, Commonwealth Secretariat, London.
- Ayala, G., Xianguo, Y. (1995): "Analytical Evaluation of the Structural Seismic Damage of Reinforced Concretes Frames", *Proceedings of Seventh Canadian Conference on Earthquake Engineering* , Montreal.
- Aysan, Y. (1993): "Vulnerability Assessment", *Natural Disasters: Protecting vulnerable communities*, Marriman P.A., Browitt, C.W, (Ed). IDNDR, Thomas Telford, London.
- Bankoff, G. (2001): "Rendering the World Unsafe: 'Vulnerability' as Western Discourse", *Disaster*, 25(1): 19-35, Overseas Development Institute, Blackwell Publishers, Oxford.

- Barbat, A. H., Yepez, F., Canas, J. A. (1996): "Damage Scenario Simulation for Risk Assessment in Urban Zones", *Earthquake Spectra*, **12**, 371-394.
- Barbat, A. H. (1998): *El riesgo Sísmico en el Diseño de Edificios*, Calidad Siderúrgica, Cuadernos Técnicos, 4, Madrid.
- Barrow, J.D. (1994): *Teorías del Todo*, Drakontos, Editorial Crítica, Barcelona.
- Bendimerad, F. (1999): "*Risk Management Solutions*", Menlo Park, comunicación personal.
- Benson, C. (2001): *Macroeconomics Concepts of Vulnerability: Dynamics, Complexity and Public Policy*, International Work-Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice, University of Wageningen, Netherlands.
- Bertero, V. (1997): "Rehabilitación Sísmica de Edificios Existentes", *Terremoto de Caracas 30 Años Después*, Caracas.
- Bertero V. V., Anderson J.C., Krawinkler H., Miranda E. (1991): *Design Guidelines for Ductility and Drift Limits*, Report No. UCB/EERC-91-15, CUREe and Kajima Research Teams.
- Bertero V., Bertero R. (1993): "Tall Reinforced Concrete Frame Buildings: Conceptual Earthquake Resistant Design Methodology", *VIII Seminario Latino-americano de Ingeniería Sismo-resistente*, Julio, Mérida, Venezuela.
- Bhaskar, R. (1989): *The Possibility of Naturalism: A Philosophical Critique of the Contemporary Human Sciences*. New York: Harvester Wheatsheaf.
- Bohm, D. (1980): *Wholeness and Implicate Order*, Londres.
- Borda, M. (1999): "Resiliencia: Competencia para Enfrentar la Adversidad" *Revista de la División de Ciencias*, Vol. **14** Universidad del Norte, Barranquilla.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., Wisner, B. (1996): *Vulnerabilidad, el Entorno Social de los Desastres*, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, La RED, ITDG, Bogotá.
- Blanco-Alarcón A. (Ed.) (1989): *Gestión Ambiental para el Desarrollo*, compilación de artículos, Sociedad Colombiana de Ecología, Intercor, Editora Guadalupe, Bogotá.
- Blockley, D. (Ed.) (1992). *Engineering Safety*, MacGraw-Hill International Series in Civil Engineering, London.
- Bracci, J.M., Reinhorn, A.M., Mander, J.B., y Kunnath, S.K. (1989): "Deterministic Model for Seismic Damage Evaluation of Reinforced Concrete Structures" *Technical Report NCEER-89-0033*, State University of New York at Buffalo.
- Briguglio, L. (1992): *Preliminary Study on the Construction of an Index for Ranking Countries According to their Economic Vulnerability*, UNCTAD/LDC/Misc.4. Geneva.
- Briguglio, L. (1995): *Small Island Developing States and Their Economic Vulnerabilities*, <http://www.geic.or.jp/docs/lino.html>
- Brumbaugh, D.S. (1999): *Earthquakes, Science and Society*, Prentice Hall, New Jersey.
- Burby R.J. (Ed.) (1998): *Cooperating with Nature: Confronting Natural Hazards with Land Use Planning for Sustainable Communities*, Joseph Henry Press, Washington.

- Burton, I. (1962): Types of Agricultural Occupance of Flood Plains in the United States, University of Chicago, Department of Geography Research Paper **121**.
- Burton, I., Kates, R.W., White, G.F. (1968): "The Human Ecology of Extreme Geophysical Events", *Natural Hazard Research*, Working Paper **1**, Department of Geography, University of Toronto.
- Burton, I., Kates, R.W., White, G.F. (1978): *The Environment as Hazard*, New York, Oxford University Press.
- Cannon, T. (1991): "A Hazard Need not a Disaster make: Rural Vulnerability, Flood, and the Causes of Natural Disasters", *Hazard 91 Conference*, Perugia, Italy.
- Cannon, T. (1994): "Vulnerability Analysis and the Explanation of Natural Hazards, en Varley, Ann, *Disasters Development and Environment*, Wiley, Chichester.
- Cannon, T.(2001): *Vulnerability Analysis and Disasters*, International Work-Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice, Univesity of Wageningen, Netherlands.
- Cardona, O.D. (1985): *Hazard, Vulnerability and Risk Assessment*, unedited working paper, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology IZSIS, Skopje, Yugoslavia.
- Cardona, O.D. (1986a): "Estudios de Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo Sísmico: Planificación Física y Urbana en Áreas Propensas", *Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica*, *Boletín Técnico AIS No. 33*, Bogotá.
- Cardona, O.D. (1986b): "Enfoque Metodológico para la Evaluación de la Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico", *Memorias del Seminario Nacional Sobre Prevención y Manejo de Catástrofes Naturales*, Asociación de Ingenieros Estructurales, Medellín.
- Cardona, O.D. (1990): *Terminología de Uso Común en Manejo de Riesgos*, AGID Reporte No. **13**, EAFIT, Medellín, actualizado y reimpresso en *Ciudades en Riesgo*, M.A. Fernández (Ed.), LA RED, USAID, 1996.
- Cardona O.D. (1991): "Metodología para la Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones y Centros Urbanos", *VII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmo-Resistente - IX Jornadas Estructurales*, SCI/AIS/MOPT, Bogotá.
- Cardona O.D. (1993a): "Evaluación de la Amenaza, la Vulnerabilidad y el Riesgo", *En los Desastres No son Naturales*, A. Maskrey (Compilador), LA RED, Tercer Mundo Editores, Bogotá, Colombia.
- Cardona O.D. (1993b): *Mitigación de Desastres en las Instalaciones de la Salud*, Serie de 4 Volúmenes, Organización Panamericana de la Salud, Washigton.
- Cardona, O.D. (1993c): "Natural Disasters, Global Change and Sustainable Development: A Strategy for Reducing Effects", *III Meeting of the Scientific Advisory Council for the International Geosphere-Biosphere Programme, Forum on Earth System Research*, ICSU, Ensenada, Baja California, México.
- Cardona O.D. (1993d): "Reducción de la Vulnerabilidad Sísmica de Líneas Vitales", Seminario Internacional *Prevención y Reducción de Riesgos en Sistemas de Acueducto y Alcantarillado*, Cali, Colombia.
- Cardona O.D. (1994): "Prevención de Desastres y Participación Ciudadana", *Viviendo en riesgo: comunidades vulnerables y prevención de desastres en América Latina*, Allan Lavell (Ed.), LA RED, Tercer Mundo Editores, Bogotá.

- Cardona, O.D. (1995): *Prevención de Desastres y Preparativos para Emergencias: Aspectos Técnico - científicos, Sociales, Culturales e Institucionales*, Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos Naturales CEDERI, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Cardona O.D. (1996a): "Manejo Ambiental y Prevención de Desastres: Dos Temas Asociados", *Ciudades en Riesgo*, M. A. Fernández (Ed.), La RED, USAID, reimpresión como *Cities at Risk*, A/H Editores, 1999.
- Cardona O.D. (1996b): "Manejo de la Crisis Volcánica del Galeras" / "Variables Involucradas en el Manejo de Riesgos", *Desastres & Sociedad*, No. 6, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, Tarea Gráfica, Lima.
- Cardona O.D. (1996c): "Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres", *Estado, Sociedad y Gestión de los Desastres en América Latina*, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, Tercer Mundo Editores, Bogotá.
- Cardona, O.D. (1996d): "Vulnerability Reduction: A Purpose for Sustainable Development, Holistic Approach for Risk Mitigation and Disaster Preparedness", *Proceedings of Pan Pacific Hazards '96*, CD-ROM, Conference on Natural Disaster Reduction, Vancouver, Canada.
- Cardona, O.D. (1997): "Management of the Volcanic Crises of Galeras Volcano: Social, Economic and Institutional Aspects", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1698, Elsevier, London.
- Cardona, O.D. (1999a): "Environmental Management and Disaster Prevention: Two Related Topics - A Holistic Risk Assessment and Management Approach", *Natural Disaster Management*, Ingleton J. (Ed.) IDNDR, Tudor Rose, IDNDR, London, UK.
- Cardona, O.D. (1999b): *Vulnerabilidad Sísmica de Hospitales: Fundamentos para Ingenieros y Arquitectos*, Monografías de Ingeniería Sísmica, **IS-32**, CIMNE, Barcelona.
- Cardona, O.D. (2000): "The January 25th 1999 Earthquake in the Coffee Growing Region of Colombia: Damage Description in the Area and Emergency Response", *Proceedings of the 12WCCEE*, Auckland, New Zealand.
- Cardona, O.D. (2001): "Holistic Approach to Seismic Risk Estimation" *Natural Hazards Review*, in process of publishing, ASCE, Washington D.C.
- Cardona, O.D., Barbat, A.H. (2000a): *El Riesgo Sísmico y su Prevención*, Cuaderno Técnico 5, Calidad Siderúrgica, Madrid.
- Cardona, O.D., Barbat, A.H. (2000b): "El Riesgo Sísmico de Estructuras" en *Estructuras Sometidas a Acciones Dinámicas* Car, E., López Almansa, F. & Oller, S. (Eds.), CIMNE, Barcelona.
- Cardona O.D. y Hurtado J.E. (1992): "Análisis de Vulnerabilidad Sísmica de Estructuras de Concreto Reforzado", *III Reunión del Concreto*, Cartagena.
- Cardona O.D. y Hurtado J.E. (1995): "Seismic Urban Vulnerability Assessment in Terms of Energy Absorption Capacity and Demand". *EERI, Fifth International Conference on Seismic Zonation*, Nice, France.
- Cardona O.D. y Hurtado J.E. (1996): "Vulnerabilidad de Edificaciones Indispensables: Análisis, Diseño y Evaluación de Hospitales", *Seminario de Vulnerabilidad Sísmica*, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Cardona, O.D., Hurtado J.E. (2000a): "Holistic Approach for Urban Seismic Risk Evaluation and Management", *Proceedings of Sixth International Conference on Seismic Zonation*, EERI, November 2000, Palms Springs, California.

- Cardona, O.D., Hurtado J.E. (2000b): "Holistic Seismic Risk Estimation of a Metropolitan Center" *Proceedings of 12<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering*, January-February 2000, Auckland, New Zeland.
- Cardona, O.D., Hurtado J.E. (2000c): "Modelación Numérica para la Estimación Holística del Riesgo Sísmico Urbano, Considerando Variables Técnicas, Sociales y Económicas" *Métodos Numéricos en Ciencias Sociales (MENCIS 2000)*, Oñate, E. *et al.* (Eds.) CIMNE-UPC, Barcelona.
- Cardona O.D., Meyer, H. (1991): "Integrated Urban Seismic Risk Mitigation Project - Its Coordination and Management in Cali, Colombia", *Fourth International Conference on Seismic Zonation*, EERI, San Francisco.
- Cardona O.D., Sarmiento-Prieto J. P. (1988): *Análisis de Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo para la Salud de una Población en Caso de Desastre*, Plan de Atención Hospitalaria, Ministerio de Salud de Colombia, Bogota.
- Cardona O.D., Yamín L.E. (1997): "Seismic Microzonation and Estimation of Earthquake Loss Scenarios: Integrated Risk Mitigation Project of Bogotá, Colombia", *Earthquake Spectra*, **13(4)**.
- Carreras, A., Escorihuela, J.L., Requejo A. (Eds.) (1990): *Azar, Caos e Indeterminismo*, Seminario Interdisciplinar 1988, Universidad de Zaragoza.
- Chambers, R. (1989): *Vulnerability, Coping and Policy*, IDS Bulletin No. **20**, Institute of Development Studies, Sussex
- Chapman, O.J.V., Crossland, A.D. (1995): "Neural Network in Probabilistic Structural Mechanics", *Probabilistic Structural Engineering Handbook. Theory and Industrial Applications*, Sundararajan, C. (Ed.). Chapman and Hall, New York.
- Clark M., Herington J. (1989): *The Role of Environmental Impact Assessment in the Planning Process*, London, New York: Mansell Publishing Limited.
- Clarke J. I., Curson, P., Kayastha, S.L., Prithvish, N. (Eds.) (1989): *Population and Disaster*, Basil Blackweell in association with International Geographical Union, The Institute of British Geographers, London.
- Coburn, A., Spence, R. (1992): *Earthquake Protection*, John Wiley & Sons, New York.
- Cohen J., Stewart, I. (1994): *The Collapse of Chaos*, Penguin Books, New York.
- Comfort, L.K. (1999): *Shared Risk: Complex Systems in Seismic Response*, Pergamon, New York.
- Comfort, L.K., Wisner, B., Cutter, S., Pulwarky, R., Hewitt, K., Oliver-Smith, A., Wiener, J., Fordham, M., Peacock, W., Kringold, F. (1999): "Reframing Disaster Policy: The Global Evolution of Vulnerable Communities", *Environmental Hazards*, **1(1)** 39-44, June, Pergamon, Elsevier.
- Cornell, C.A. (1967): *Engineering Seismic Risk Analysis*, Research Report R 67-75, MIT, Boston.
- Cornell, C.A. (1969): "Structural Safety Specification Based on Second-Moment Reliability", *Proc. Symposium of the International Association of Bridge and Structural Engineers*, London.
- Cornell, C.A., Vanmarke, E.H. (1969): "The Mayor Influences on Seismic Risk", *Proceedings 3<sup>rd</sup> WCEE*, Santiago.
- Corral, S. (2000): "Explorando la Calidad de los Procesos de Elaboración de Políticas Ambientales" *Métodos Numéricos en Ciencias Sociales (MENCIS 2000)*, Oñate, E. *et al.* (Eds.) CIMNE-UPC, Barcelona.

- Corsanego A. (1985): "A Review of Methodologies for Seismic Vulnerability Assessment", *International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas*, November, Skopje, Yugoslavia.
- Covello V.T., Mumpower J. (1985): "Risk Analysis and Risk Management: An Historical Perspective", *Risk Analysis*, Society for Risk Analysis, Volume 5 (2), pp 103-20
- Cuny, F. C. (1984): *Disaster and Development*, New York: Oxford University Press.
- Cutter, S.L. (Ed.) (1994): *Environmental Risks and Hazards*, Prentice Hall, New Jersey.
- Davidson, R. (1997): *An Urban Earthquake Disaster Risk Index*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Stanford University, Report No. 121, Stanford.
- Davis, I., Wall, M. (Eds.) (1992): *Christian perspectives on disaster management*, IRDA, Middlesex, UK.
- Dendrinis, D.S. (1999): "Cities as Spatial Chaotic Attractor" In *Chaos theory in the social sciences*, Douglas, K. Elliot, E., (Eds.), The University of Michigan Press.
- Dewey, J. (1929): "The Quest for Certainty", en J. Boydston (Ed.), *The Later Works: 1925-1953*, Carbondale, Southern Illinois University Press.
- Dodrecht, D., Reidel, A., Munn R.E., (1988): "Environment Prospects for the Next Century: Implications for Long-term Policy and Research Strategies", *Technological Forecasting and Social Change*, IIASA, Austria.
- Douglas, M. (1985): *Risk Acceptability According to the Social Sciences*, Routledge & Kegan Paul, London.
- Drabek, T. E. (1986): *Human Systems Response to Disasters*, New York, Springer Verlag.
- Duque, G. (1990): *Desarrollo Sostenido en la Prospectiva de la Problemática Ambiental y la Supervivencia*, Sociedad de Mejoras Públicas de Manizales, Colombia.
- Dynes, R.R., Drabek, T.E. (1994): The Structure of Disaster Research: Its Policy and Disciplinary Implications. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters* 12 :5-23.
- Elms, D.G. (1992): "Risk Assessment", en *Engineering Safety*, D. Blockley, (Ed.), MacGraw-Hill International Series in Civil Engineering, 28-46, London.
- Elms, D.G. (Ed.) (1998): *Owing the Future: Integrated Risk Management*. Centre of Advanced Engineering, University of Canterbury Christchurch, New Zealand.
- Erdik, M., Alpay Biro, Y., Onur, T., Sesetyan, K. Birgoren, G. (1999): *Assessment of Earthquake Hazard in Turkey and Neighboring Regions*, Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Istanbul. <http://www.koeri.boun.edu.tr/earthqk/earthquake.htm>
- Escallón, J., Alarcón, A. (1999): "The January 25th 1999 Earthquake in the Coffee Growing Region of Colombia: Tectonic and Seismological Aspect", *12<sup>th</sup> WCEE, Auckland*, New Zealand.
- Faifar, O. y Gaspersic, P. (1996): "The N2 Method for the Seismic Damage Analysis of RC buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25 (1) 31-46.
- Ferrigni, F. (1990): San Lorenzello: á la Recherche des "Anomalies" qui Protégent. Centre Universitaire pour les Biens Culturels, Ravello, Italia.

- Fournier d'Albe, M. (1985) "The Quantification of Seismic Hazard for the Purposes of Risk Assessment", *International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas*, Skopje, Yugoslavia.
- Funlowicz, S., Ravetz, J. (1990): *Uncertainty and Quality in Science for Policy*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Funtowicz, S., Ravetz, J. (1992): The Role of Science in Risk Assessment. *Social Theories of Risk*, S. Krimsky and D. Golding. Westport, Praeger: 59-88.
- Galambos, T.V. (1992): "Design Codes", en *Engineering Safety*, Blockley, D. (Ed.) MacGraw-Hill International Series in Civil Engineering, London.
- Galambos, T.V., Ellingwood, B. (1986): Serviceability Limit States: Deflection, ASCE, *Journal Structural Engineering*, Vol. 112, No 1, pp. 67-84.
- Gallopín G., (1994): *Impoverishment and Sustainable Development: A System Approach*, International Institute for Sustainable Development, Manitoba, Canada.
- García, L. E. (1984): "Development of the Colombian Seismic Code", *Proceedings of the Eight World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, Ca. USA.
- García, L.E. (1998): *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá.
- García, L. E. (1999): "The January 25th 1999 Earthquake in the Coffee Growing Region of Colombia: Accelerographic Records, Structural Response and Damage, and Code Compliance and Enforcement", *12<sup>th</sup> WCEE, Auckland*, New Zealand.
- Garret, M.J. (1999): *Health Futures*, World Health Organization, Geneva.
- Gilbert, R., Kreimer, A. (1999): 'Learning from the World Bank's Experience of Natural Disaster Related Assistance'. *Urban and Local Government Working Paper Series* 2, Washington, DC: World Bank, May.
- Gómez-Soberón, C.A., Barbat, A.H., Oller, S. (1999): "Vulnerability Assessment of Motorways Bridges: State-of-the-art", *Technical Report CIMNE IT-315*, Barcelona.
- Grier, B. (1988): *One Thousand Years of Mathematical Psychology* (Artículo presentado en la Society for Mathematical Psychology Convention, Madison, Wisconsin).
- Hadipriono, F.C. (1995): Fuzzy Sets in Probabilistic Structural Mechanics, *Probabilistic Structural Engineering Handbook. Theory and Industrial Applications*, Sundararajan, C. (Ed.). Chapman and Hall, New York.
- Hall, W., Wiggins, J.H., (2000): "Acceptable Risk: A Need for Periodic Review", *Natural Hazard Review*, Journal ASCE, 1 No. 3, Washington.
- Harvey, D. (1992): *The Condition of Postmodernity*, Basil Blackwell, Oxford.
- Harvey, D. Reed, M. (1999): "Social Science as Study of Complex Systems" In *Chaos theory in the social sciences*, Douglas, K. Elliot, E., (Eds.), The University of Michigan Press.
- Hasofer, A.M., Lind, N. (1974): "An Exact and Invariant First-Order Reliability Format", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, **100**, No. EM1, February, pp. 111-121.

- Heyman, B, Davis, C., Krumpel, P.F. (1991): 'An Assessment of Worldwide Disaster Vulnerability'. *Disaster Management* 4(1): 3-14.
- Hayman, B. (1998): *Fundamentals of Engineering Design*, Upper Saddle River, Prentice Hall, New Jersey.
- Helm, P. (1996): "Integrated Risk Management for Natural and Technological Disasters", *Tephra* 15, June, Number 1, Ministry of Civil Defence of New Zealand.
- Hermelín, M. (1991): *Geología, Prevención de Desastres y Planeación Física y Anotaciones sobre el Actual Concepto de Impacto Ambiental en Colombia*, Report AGID No. 16, Environment Geology and Applied Geomorphology in Colombia.
- Hewitt, K. (Ed.) (1983): *Interpretation of Calamity: From the Viewpoint of Human Ecology*, London, Allen and Unwin.
- Hewitt, K. (1997): *Regions of Risk: A Geographical Introduction to Disasters*, Logman, Essex, UK.
- Howard, R.A. (1980): "On Making Life and Death Decisions" *Societal Risk Assessment*, General Motors Laboratories, pp. 89-113, reprinted in R.A. Howard and J.E. Matheson (Eds.) (1989), *Principles and Applications of Decision Analysis, Vol.II: Profesional Collection*, Palo Alto, CA: Strategic Decisions Group, pp. 483-500.
- Hurtado, J.E. (1998): "Modelación Estocástica de la Acción Sísmica" *Monografías de Ingeniería Sísmica*, No. 33. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona.
- Hurtado, J.E., Barbat, A.H. (1998): "Monte Carlo Techniques in Computational Stochastic Mechanics". *Archives of Computational Methods in Engineering* 5: 3-30.
- Jang, J.-S. R., Sun, C.-T., Mizutani, E., (1997): *Neuro-Fuzzy and Soft Computing. A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice Hall, New York.
- Jaramillo J.I., Cowan H.A. (1999): *The 'Eje Cafetero' Earthquake, Colombia of January 25 1999*, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Johnson, B. B., Covello, V.T. (1987): *The Social and Cultural Construction of Risk*. Dordrecht, D. Reidel Publishing Company.
- Jordán, R., Sabatini F. (1988): "Economía Política de los Desastres Naturales: Prevención y Capacitación", *Revista EURE*, XIV, 43, Santiago.
- Kates, R.W. (1962): "Hazard and Choice Perception in Floodplain Management. Research Paper No. 78. Chicago: University of Chicago.
- Kates, R.W. (1971): "Natural Hazard in Human Ecological Perspective: Hypotheses and Models", *Economic Geography*, 47(3), Clark University.
- Kates, R.W. (1978): *Risk Assessment of Environment Hazard*, John Wiley & Sons, New York.
- Kauffman, S.A. (1993): *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York, N.Y.: Oxford University Press.
- Keller, E.A., Pinter N. (1996): *Active Tectonics*, Prentice Hall, New Jersey.
- Kervern, G.Y., Rubise, P. (1991): *L'archipel du Danger. Introduction aux Cindyniques*, Economica Edit.

- Kircher, C.A., Nassar, A., Kustu, O., Holmes, W. (1997): *Earthquake Spectra*. Earthquake Engineering Research Institute. Volume 13, Number 4. November.
- Kletz, T.A. (1976): *Chemical Engineering Program*, Vol 72, No 11, p. 48.
- Kletz, T.A. (1982): Hazard Analysis: A Review of Criteria, *Reliability Engineering*, **3** pp. 325-338.
- Kosko, B. (1995): *Pensamiento Borroso*, Drakontos, Editorial Crítica, Barcelona.
- Kreimer A., Munasinghe M. (Eds.) (1991): "Environmental Management and Urban Vulnerability", *The World Bank Discussion Papers 168*, Washington.
- Kreimer, A., Munasinghe (Eds.) (1992): *Managing Natural Disasters and the Environment*, Washington, The World Bank.
- Lapajne, J. (1985): "Vulnerability and the MSK Scale", *Proceedings of the International Conference on Reconstruction, Restoration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas*, IZIS, Skopje.
- Lavell, A. (1992): "Ciencias Sociales y Desastres Naturales en América Latina: Un Encuentro Inconcluso" *Desastres Naturales, Sociedad y Protección Civil*, COMECSO, México.
- Lavell, A. (1996): "Degradación Ambiental, Riesgo y Desastre Urbano. Problemas y Conceptos: Hacia la Definición de una Agenda de Investigación", *Ciudades en Riesgo*, M. A. Fernández (Ed.), La RED, USAID.
- Lavell, A. (2000): "Draft Annotated Guidelines for Inter-Agency Collaboration in Programming for Disaster Reduction.", unprinted for Emergency Response Division at UNDP, Geneva.
- Lavell A., Franco E., (Eds.) (1996): "Estado, Sociedad y Gestión de los Desastres en América Latina.", Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, La RED, Tercer Mundo Editores, Bogotá.
- Leondes C.T., (Ed.) (1998): *Fuzzy Logic And Expert Systems Applications*, Academic Press, San Diego, California.
- Lewin, R. (1995): *Complejidad*, Tusquets Editores, Barcelona.
- Listone, H.A., Turoff, M. (1975): *The Delphi Method: Techniques and Applications*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Liu, W.K., Belytschko, T., Lua, Y.J. (1995): First-Order And Second-Order Reliability Methods, *Probabilistic Structural Engineering Handbook. Theory and Industrial Applications*, Sundararajan, C. (Ed.). Chapman and Hall, New York.
- Liverman D.M. (1990): Vulnerability to Global Environmental Change, *Understanding Global Environmental Change: The Contributions of Risk Analysis and Management*, R.E. Kasperson, K. Dow, D. Golding, and J.X. Kasperson (Eds.), Worcester, MA, Clark University.
- Lorenz, E.N. (1995): *La Esencia del Caos*, Editorial Debate, Madrid.
- Lorenz, H.W. (1997): *Nonlinear Dynamical Economics and Chaotic Motion*, 2nd edition, Springer-Verlag, Germany.
- Luhmann, L. (1993): *Risk: A sociological theory*, New York: Aldine de Gruyter.

- Mandelbrot, B.B. (1975): *The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman & Co., San Francisco. En castellano por Tusquets Editores (1997), Barcelona.
- Mandelbrot, B.B. (1987): *Los Objetos Fractales: Forma, Azar y Dimensión*, Tusquets Editores, Barcelona.
- Maldonado R., E, Casas, J.R., Canas, J.A. (1999): Utilización de los Conjuntos Difusos en Modelos de Vulnerabilidad Sísmica. *Monografías de Ingeniería Sísmica*. A. H. Barbat (Ed.). Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, UPC, Barcelona.
- Maldonado R., E, Casas, J.R., Canas, J.A. (2000): Modelo de Vulnerabilidad Sísmica de Puentes Basado en Conjuntos Difusos *Monografías de Ingeniería Sísmica*. **IS-40** A. H. Barbat (Ed.). Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, UPC, Barcelona.
- Mansilla, E. (Ed.) (1996): *Desastres: Modelo para Armar*, La RED, Lima.
- Margalef, R. (1986): Variaciones sobre el Tema de la Selección Natural. Exploración, Selección y Decision en Sistemas Complejos de Baja Energía. En *Proceso al Azar*, Edición de J. Wagensberg, Tusquets Editores, Barcelona.
- Maskrey, A. (1984): Community Based Hazard Mitigation, In Disasters Mitigation Program Implementation, Virginia Polytechnic Institute.
- Maskrey, A., Romero, G. (1986): *Urbanización y Vulnerabilidad Sísmica en Lima Metropolitana*, Centro de Estudios y Prevención de Desastres; Lima.
- Maskrey, A. (1989): *Disaster Mitigation: A Community Based Approach*. Oxford: Oxfam.
- Maskrey A., (Comp.) (1993a): *Los Desastres No son Naturales*, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, LA RED, Tercer Mundo Editores, La RED, Bogotá. <http://www.desenredando.org>
- Maskrey, A. (1993b): Vulnerability Accumulation in Peripheral Regions in Latin America: the Challenge for Disaster Prevention and Management, *Natural Disasters: Protecting Vulnerable Communities*, Ed. Marrison P.A., Browitt, C.W, IDNDR, Thomas Telford, London.
- Maskrey, A. (1994): "Comunidad y Desastres en América Latina: Estrategias de Intervención", *Viviendo en Riesgo: Comunidades Vulnerables y Prevención de Desastres en América Latina*, Allan Lavell (Ed.), LA RED, Tercer Mundo Editores, Bogotá.
- Maskrey, A., (Ed.) (1998): *Navegando entre Brumas: La Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica al Análisis de Riesgo en América Latina*, LA RED, ITDG, Peru.
- Maskrey, A., Bender, S., Peacock, W., (Eds.) (1998): The Interamerican Dialogue for Disaster Reduction: Dialogue I, Panama, La RED, Lima.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L. (1974): *Dynamics of Growth in a Finite World*, Cambridge: Wriht-Allen Press.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers J. (1994): *Más Allá de los Límites del Crecimiento*, El País-Aguilar, Madrid.
- Melchers, R. (1999): *Structural Reliability Análisis and Prediction*, Bristish Library Cataloguing in publication data, London.
- Merkhofer M.W., (1987): "Decision Sciencie and Social Risk Management", Dodrecht, D. Reidel, USA.

- Mileti, D.S. (1996): Psicología Social de las Alertas Públicas Efectivas de Desastres, Especial: Predicciones, Pronósticos, Alertas y Respuestas Sociales, Revista *Desastres & Sociedad* No. 6, LA RED, Tarea Gráfica, Lima.
- Mileti, D.S. (1999): *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*. Washington, D.C.: Joseph Henry Press.
- Milutinović, Z., Petrovski J. (1985a): *Earthquake Damage Prediction - Modeling and Assessment*, IZIIS, Skopje
- Milutinović, Z., Petrovski J. (1985b): "Earthquake Vulnerability and Loss Assessment for Physical and Urban Planning", *International Conference on Reconstruction, Restoration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas* IZIIS, Skopje, Yugoslavia.
- Milutinović, Z., Kameda, H. (1983): *Equivalent Ground Acceleration (EQA) as an Engineering Seismic Hazard Parameter: development and Estimation*, Research Report KUCE 83-ST-01, Kyoto University.
- Miranda, E. (1996): "Assessment of the Seismic Vulnerability of Existing Buildings" *11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, CD ROM, paper No. 513, Acapulco.
- Mitchell, J.K., (1992): Natural Hazards and Sustainable Development, Paper presented at *The Natural Hazards Research and Applications Workshop*, Boulder, Colorado.
- Mitchell, W. A. (1999): "Was the Izmit Earthquake of August 17, 1999, Just Another Earthquake in Turkey?", *Natural Hazards Observer*, XXIV(2), November.
- Modarres, M., Kaminskiy, M., Krivtsov, V. (1999): *Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide*, Marcel Dekker, New York.
- Morin, E. (1994): *Introducción al Pensamiento Complejo*, Editorial Gedisa, Barcelona, y Red Colombiana de Pensamiento Complejo REDCOM: <http://www.colciencias.gov.co/redcom>
- Morin, E. (1995): *Sociología*, Editorial Tecnos S.A., Madrid.
- Morris, D.M. (1979): *Measuring the Conditions of the World's Poor*: Overseas Development Council.
- Munda, G. (2000): "Multicriteria Methods and Process for Integrated Environmental Assessment" *Métodos Numéricos en Ciencias Sociales (MENCIS 2000)*, Oñate, E. et al. (Eds.) CIMNE-UPC, Barcelona.
- Muñoz-Carmona, F.A. (1997): "Notes on Communication and Volcanic Risk", en B. M. Drottz Sjoberg (Ed.). *New risk frontiers*, 10th Anniversary, The society for risk analysis-Europe, Stockholm. (pp.123-128), Center for Risk.
- Nicolis, G., Pregogine, I. (1989): *Exploring Complexity: An Introduction*. New York: W.H. Freeman.
- Oppenheim, L. (1977): *Ancient Mesopotamia*, University of Chicago Press, Chicago.
- Ordaz, M., Meli, R., Montoya-Dulché, C., Sánchez, L., Perez-Rocha, L.E. (1994): "Bases de Datos para la Estimación de Riesgo Sísmico en la Ciudad de México", *Cuadernos de Investigación*, 1, CENAPRED, México D.F.
- Otero, R.C., Marti, R.Z. (1995): 'The Impacts of Natural Disasters on Developing Economies: Implications for the International Development and Disaster Community'. In Munasinghe, M., Clarke, C. (Eds), *Disaster Prevention for Sustainable Development: Economic and Policy Issues*,

- Report from the Yokohama World Conference on Natural Disaster Reduction, May 23–27, 1994. Washington, DC: World Bank and International Decade for Natural Disaster Reduction.
- Park, Y. J., Ang A.H-S. (1985): Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol 111, No. ST4, 722-739.
- Park Y.J, Ang A.H-S, Wen Y.K. (1985): Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings, *Journal of Structural Engineering. ASCE*, Vol 111, No ST4, 740-757.
- Park, Y.J. Ang, A. H-S, and Wen, Y.K., (1987): *Seismic Damage Analysis and Damage-Limiting Design of R/C Buildings*, Civil Engineering Studies, Report SRS 516, University of Illinois, Urbana.
- Park Y.K. , Reinhorn A.M., Kunnath S.K. (1987): *IDARC: Inelastic Damage Analysis of RC frame -shear wall Structures*, Technical Report NCEER-87-0008, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Búfalo.
- Parker, R.S., (1991): “Vulnerability and Resiliency: Enviromental Degradation in Major Metropolitan Areas of the Developing World”, *Enviromental Mangement and Urban Vulnerability*. Kreimer, A., y Munasinghe, M. (Eds.), The World Bank, Washington, D.C.
- Pelanda, C. (1981): *Disaster and Socio Systemic Vulnerability* , preliminary paper **68**, Disaster Research Centre, Ohio State University, Columbus Ohio.
- Pate, M.E. (1983): “Acceptable Design Processes and Acceptable Risks in Public Sector regulations” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-13, no. 3, March/April, pp.113-124.
- Peña, C.A. (2000): *Evolutionary Fuzzy Modeling*, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Logical Systems Laboratory, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Petrovski J. (1984): "Development of Empirical and Theoretical Vulnerability and Seismic Risk Models", *8th WCEE*, San Francisco.
- Petrovski, J., Milutinoviç Z. (1990): “Modelo para la Evaluación de la Vulnerabilidad y el Riesgo Sísmico”, *Seminario sobre Desastres Sísmicos en Grandes Ciudades*, Bogotá.
- Pidgeon, N.F. (1992): “The Psychology of Risk”, in *Engineering Safety*, Blockley, D. (Ed.), MacGraw-Hill International Series in Civil Engineering, London.
- Platón (1983): “El banquete, Fedón, Fedro”, Ediciones Orbis, S.A. Barcelona.
- Porter, K., Scawthorn C.Taylor C. Blais N. (1998): Appropriate Seismic Reliability for Critical Equipment Systems, Technical Report MCEER-98-0016, University of Buffalo, State University of New York.
- Priesmeyer, H. R. (1994): *The Chaos System Software*, Fair Oaks Ranch, TX: Management Concepts, Inc.
- Pregogine, I. (1996): “Enfrentándose con lo Irracional” En *Proceso al Azar*, Wagensberg, J. (Ed.), Tusquets Editores, Barcelona.
- Priestley, M.J. Calvi, G. M. (1991): “Towards a Capacity-Design Assessment Procedure for Reinforced Concrete Frames”, *Earthquake Spectra*, **7(3)**.
- Quarantelli, E.L., (1988): “Disaster Studies: An Analysis of the Social Historical Factor Affecting the Development of Research in the Area”, *International Journal of Mass Emergencies* , Vol. **5 (3)** pp. 285-310.
- Quarantelli, E.L., (1995): “What is a Disaster?”, *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, Vol. **13 (3)** pp. 221-229.

- Quarantelli, E.L., (1998): "What is a Disaster?", New York, Routledge.
- Rabin, R.L. (1978): "Dealing with Disasters: Some Thoughts on the Adequacy of the Legal Systems", *30, Stanford Law Review*, 281-298.
- Ramirez F. (1991): "Asentamientos Humanos en Zonas de Alto Riesgo - Elementos para una Política", *Regional Training Workshop on Disaster Management*, PNUD/OPS/OEA, Bogotá.
- Ramírez, F. Cardona O.D. (1996): "El Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres de Colombia", *Estado, Sociedad y Gestión de los Desastres en América Latina: En Busca del Paradigma Perdido*, Lavell, A., Franco E. (Eds.), La RED, FLACSO, ITDG.
- Reid, S.G. (1992): "Acceptable Risk", *Engineering Safety*, D. Blockley, (Ed.), MacGraw-Hill International Series in Civil Engineering, 138-166, London.
- Rogge, J.R. (1992): *Una Agenda de Investigación para el Manejo de Desastres y Emergencias*, PNUD-UNDRO, Universidad de Minotoba.
- Rubinstein, R.Y. (1981): *Simulation and the Monte Carlo Method*. John Wiley and Sons, New York.
- Saavedra, M.R (1996): *Desastre y Riesgo*, CINEP, Bogotá.
- Saaty, T. (1980): *The Analytical Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-HillBook Co.
- Saaty, T.L., Vargas, L.G. (1991): *Prediction, Projection, and Forecasting: Applications of the Analytical Hierarchy Process in Economics, Finance, Politics, Games, and Sports*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Sánchez-Silva, M. (2000): "Basic Concepts in Risk Analysis and Decision-making Process", *International Journal for Civil Engineering and Environmental Systems*
- Sarria, A. (1990): *Ingeniería Sísmica*, Ediciones Uniandes, Bogotá, Colombia.
- Sarria, A. (1999): *Aspectos Generales del Sismo del Eje Cafetero del 25 de enero de 1999*, Federación de Aseguradores de Colombia, FASECOLDA, Bogotá, Colombia.
- Sauter, F., Shah, H.C. (1978): "Studies on Earthquake Insurance" *Proceedings Of The Central American Conference On Earthquake Engineering*, Vol. II, San Salvador, El Salvador
- Scheidegger, A.E. (1987): "The Fundamental Principles of Landscape Evolution, *Catena Supplement* **10**, 199-210.
- Sen, A.K., (1981): *Poverty and Famines: An Essay on Entitlement and Deprivation*, Oxford Clarendon Press.
- Sen, A.K., (2000): *Development as Freedom*. New York: Alfred A. Knopf.
- Shinozuka, M. (1987): "Stochastic Fields and Their Digital Simulation", in: *Stochastic Methods in Structural Dynamics*, edited by G. I. Schuëller and M. Shinozuka. Martinus Nijhoff Publishers, Rotterdam.
- Singhal A., Kiremidjian A.S. (1997): *A Method for Earthquake Motion -Damage Relationships with Application to Reinforced Concrete Frames*. The John A. Blume Earthquake Engineering Center. Department of Civil Engineering. Stanford University. Technical Report NCEER-97-0008.

- Slovic, P. (1992): "Perceptions of Risk: Reflections on the Psychometric paradigm". *Social Theories of Risk*, S. Krimsky & Golding (Eds.), pp.117-152, Wesport, Connecticut, Praeger.
- Smith, K. (1992): *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disasters*, Routledge, New York, London.
- Smithson, M.J. (1996): "Human Judgment and Imprecise Probabilities", published in G. de Cooman and P. Walley (eds.) *Imprecise Probabilities Project*, <http://ensmain.rug.ac.be/~ipp/documentation/judgment/judgment.html>, 13 pp.
- Smolka, A., Allman, A., Ehrlicher, S. (2000): An Absolute Earthquake Risk Index for Insurance Purposes, *Proceedings of 12<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering*, January-February 2000, Auckland, New Zealand.
- Smuts, J.C. (1926): *Holism and Evolution*, Nova Iorque: Mac Millan.
- Soutadé, G. (1998): *Les Tremblements de Terre dans les Pyrénées Orientales et en Catalogne*, Editorial Trabucaire, Perpignan, p.54, Francia.
- Spence R. J. S. (1990): "Seismic Risk Modelling - A Review of Methods", contribution to *Verso il New Planning*, University of Naples, Papers of Martin Centre for Architectural and Urban Studies, Cambridge.
- Spence, R.J.S. (1993): Assessing Vulnerability of Low-income Communities: A Progress Report, *Natural Disasters: Protecting vulnerable communities*, Ed. Marrison P.A., Browitt, C.W, IDNDR, Thomas Telford, London.
- Starr C. (1969): "Social Benefit Versus Technological Risk" *Science*, American Association for the Advancement of Science, **165**.
- Starr C. (1972): "Benefit-Cost Studies in Sociotechnical Systems" *Perspective on Benefit-Risk Decision-Making*, Committee on Public Engineering Policy, National Academy of Engineering, Washington, D.C.
- Steinbrugge, K.V. (1982): *Earthquakes, Volcanos and Tsunamis: An anatomy of Hazard*.
- Stewart, I. (2001): *Juega Dios a los Dados?* Drakontos, Crítica, Barcelona.
- Stewart, M., Melchers, R. (1997): *Probabilistic risk assessment of engineering systems*, Chapman & Hall.
- Stone W.C., Taylor A.W. (1993): Seismic Performance of Circular Bridge Columns Designed in Accordance with AASHTO/CALTRANS standards, *NIST Building Science Series 170*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD.
- Sundararajan, C. (Ed.) (1995): *Probabilistic Structural Engineering Handbook. Theory and Industrial Applications*. Chapman and Hall, New York.
- Susman, P., O'Keefe, P., Wisner, B. (1984): *Global Disasters: A Radical Interpretation*, pp. 264-83 in Hewitt 1984.
- Taylor C., Vanmarcke E., Davis J. (1998): "Evaluating Models of Risk from Natural Hazards" *Paying the Price*, Kunreuther H., Roth R.J., (Eds.) Joseph Henry Press, Washington.
- Timmerman, P. (1981): *Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society*. Environmental Monograph No. **1**, Institute for Environmental Studies, University of Toronto.
- Tversky, A., Kahneman, D. (1974): "Judgment under Uncertainty; Heuristics and Biases, *Science*, **185**.

- Vanmarcke, E.H. (1976): "Structural Response to Earthquakes", in *Seismic Risk and Engineering Decisions*, edited by C. Lomnitz and E. Rosenblueth. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Vere-Jones, D. (1983): "What are the Main Uncertainties in Estimating Earthquake Risk?", *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering* **16**, No. 1, Auckland.
- Wagensberg, J. (1998): *Ideas Sobre la Complejidad del Mundo*, Tusquets Editores, Barcelona.
- Wasgate, K.N., O'Keefe, P. (1976): *Some Definitions of Disaster*, occasional paper No. **4**, Disaster Research Unit, University of Bradford.
- Wathern, P. (1988): *Environment Impact Assessment*, Unwin Hyman, London.
- Weil, P. (1990): *Holística: Uma Nova Visão e Abordagem do Real*, Edit. Palas Athenas, Brasil: Edición en Español: *Holística: una Nueva Visión y Abordaje de lo real*, Edit. San Pablo, 1997, Bogotá.
- White, G.F. (1945): "Human Adjustment to Floods: A Geographical Approach to the Flood Problem in the U.S", *Research Paper* **29**, Department of Geography, University of Chicago.
- White, G.F. (1964): "Choice of Adjustment of Floods", *Research Paper* **93**, Department of Geography, University of Chicago.
- White, G.F. (1973): "Natural Hazards Research", *Directions in Geography*, R. . Chorley (Ed.), 193-216, London.
- White, G.F., Haas, E., (1975): *Assessment of Research on Natural Hazards*, Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Whitman, R.V. (1973): "Damage Probability Matrices for Prototype Buildings". *Structures Publication* **380**, Department of Civil Engineering, M.I.T. Boston, Massachusetts.
- Whitman R., Reed J. W. y Hong, S. T. (1973): "Earthquake Damage Probability Matrices", *Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering* Roma.
- Whitman, R.V., Cornell, C.A. (1976): "Design", in *Seismic Risk and Engineering Decisions*, C. Lomnitz and E. Rosenblueth (Eds.) Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Widemann, P. M. (1993): "Taboo, Sin, Risk: Changes in the Social Perception of Hazards", *Risk is a Construct*, B. Ruck (Ed.), pp.41-63, Munchen, Knesbeck.
- Wiesner, L.R. (1991): *Desastre y Derecho*, Monografías Jurídicas, Editorial TEMIS, Bogotá, Colombia.
- Wiggins, J.H., Moran, D.F. (1970): *Earthquake Safety in the City of Long Beach Based on the Concept of Balanced Risk*, Report, J. H. Wiggins, Co., Redondo Beach California.
- Wiggins, J.H. (1972): "The Balanced Risk Concept: New Approach to Earthquake Building Codes" *Civil Engineering*, ASCE, Aug.
- Wiggins, J.H. (1978): "Seismic Risk Analysis" February 8-9, presentation sponsored by the EERI.
- Wikjman, A., Timberlake, L. (1984): *Natural Disasters: Acts of God or Acts of Man?*, Earthscan, Washington, D.C.
- Wilches-Chaux G. (1989): *Desastres, Ecologismo y Formación Profesional*, SENA, Popayán, Colombia.

- Williams, Martin S., Sexsmith, R.G. (1995): "Seismic Damage Indices for Concrete Structures: A State-of-the-art Review". *Earthquake Spectra*. Earthquake Engineering Research Institute. **11**, No. 2. May.
- Winchester, P. (1992): *Power, Choice and Vulnerability: A Case Study in Disaster Mismanagement in South India*, James and James, London.
- Wisner, B. Westgate, K., O'Keefe, F. (1976): "Poverty and Disaster." *New Society* 37, pp. 546-548, London
- Wisner, B. (1993): "Disaster Vulnerability: Scale, Power and Daily Life". *GeoJournal* 30(2):127-40.
- Wisner, B. (2000): Issues and Challenges in Vulnerability and Risk Indexing, UNDP/ERD Expert Meeting, September, Geneva.
- Wisner, B., (2001): "Disasters: What the United Nations and its World Can Do." *United Nations Chronicle* 37,4, pp. 6-9.
- Wisner, B. (2001): *Vulnerability in Disaster Theory and Practice: From Soup to Taxonomy, Then to Analysis and Finally Tool*, International Work-Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice, University of Wageningen, Netherlands.
- Yeh, C.H., Wen, Y.K. (1990): Modeling of Nonstationary Ground Motion and Analysis of Inelastic Structural Response. *Structural Safety*, 8:281-298.

#### **NORMATIVAS, RECOMENDACIONES, INFORMES**

- AIS (1998): *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente - NSR-98 (Ley 400 de 1997 y Decreto 33 de 1998)*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, Bogotá, Colombia, 4 volúmenes.
- Alcaldía Mayor de Santafé de Bogotá D.C. (1997): *Bogotá 2000: Pacto para una Ciudad Competitiva con Equidad*, Santafé de Bogotá.
- Applied Technology Council (1978): *Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, Commentary, ATC-3-06*, Redwood City, CA., Versión en Español de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 1980, Bogotá.
- Applied Technology Council (1985): *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, **ATC-13**, (FEMA), Redwood City, CA.
- Applied Technology Council (1988): *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook, ATC-21*, (FEMA Report 154), Redwood City, CA.
- Applied Technology Council (1991): *Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States, ATC-25*, (FEMA), Redwood City, CA.
- Applied Technology Council (1999): *Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings - Basic Procedures Manual - Technical Resources - Repair, ATC-40*, (FEMA Reports 306 - 307- 308), Redwood City, CA.
- ASCE (1983): *Advisory Notes on Lifeline Earthquake Engineering*, Report of Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, New York.
- ASCE (1986): *Seismic Evaluation of Lifelines Systems - Case Studies*, Fall Convention Boston, New York, October.

- ASCE (1990): *Recent Lifeline Seismic Risk Studies*, Monograph No.1, New York.
- BID (2000): *El Desafío de Desastres Naturales en América Latina y el Caribe, Plan de Acción del Banco Interamericano de Desarrollo*. Departamento de Desarrollo Sostenible, Informe Especial, Washington, D.C.
- BSSC (1991): *NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Building, Part 2 – Commentary*, Building Sismic Safety Council, FEMA, Washington DC
- CASA (1997): *PROMENVIR – A Meta-computing System for Computational Stochastic Mechanics . User Manual*. Madrid.
- CONICIT (1999): *Reflexiones en Torno a la Investigación y a la Holística* , Memorias de las Primeras Jornadas Internacionales de Investigación Holística, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Caracas.
- Departamento Administrativo de Planeación Distrital (1991): “Hogares con Necesidades Básicas Satisfechas, y Necesidades Básicas insatisfechas, según Sexo y edad del jefe de la Familia”, encuesta de pobreza y calidad de vida, Bogotá 1991.
- Departamento Administrativo de Planeación Distrital (1997): *Desarrollos Residenciales de Origen Clandestino en Trámite de Legalización*, Bogotá.
- EERI (1984): *Glossary of Terms for Probabilistic Seismic –Risk and Hazard Analisis* , Committee on Seismic Risk, El Cerrito, California.
- EERI (1990): The Basics of Seismic Risk Analysis," *EERI Earthquake Spectra* , 5 (4):675-801, Committee on Seismic Risk, El Cerrito, California.
- EERI (1999): *The Izmit (Kocaeli), Turkey Earthquake of August 17, 1999* , Special Earthquake Report, October 1999, EERI Newsketter, **33(10)**, Oakland, California. <http://www.eeri.org>
- FEMA (1989): *Estimating Losses From Future Earthquakes*, Panel Report and Technical Background, Series 51, FEMA 177/June.
- FEMA (1997): *NEHRP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings/ Commemntary* . Federal Emergency Management Agency, (FEMA Reports 273/ 274), Washington.
- FEMA (1999): *Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS*, Technical Manual, Vol. I, II and III, First Edition 1997, National Institute of Buildings Sciences for Federal Emergency Management Agency, Washington.
- Fundación Alemana para el Desarrollo Internacional (1994): *Mesa Redonda sobre Mitigación de Desastres y Políticas de Prevención para el Desarrollo Sostenible*, Berlín.
- ICBO (2000): *International Building Code*, International Council of Building Officials, Whittier, CA
- INGEOMINAS (1999): *Terremoto del Quindío (Enero 25 de 1999)*, Informe Técnico-científico. Volumen I: Aspectos Geodinámicos Regionales; Volumen II: Zonificación Sismogeotécnica”, Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- LA RED, (1992): *Research Agenda and Constitution*,. Network for Social Studies on Disaster Prevention in Latin America - La Red. En Español: Agenda de Investigación y Constitución; [www.desenredando.org](http://www.desenredando.org)
- MCEER (1999): “Kocaeli (Izmit) Earthquake of August 17, 1999”, *MCEER Bulletin*, **13(3)**, Summer 1999. <http://mceer.buffalo.org>

- Munich Re (1999): *A Year, a Century, and a Millennium of Natural Catastrophes are all nearing their End*. Press release of 20 December. Munich Re, Munich.
- National Geographic Society (1997): *Restless Earth: Nature's Awesome Powers*, Washington, D.C.
- OPS (1993): *Mitigación de Desastres en las Instalaciones de la Salud*, Aspectos Generales, de Administración, Arquitectura, e Ingeniería, Cuatro Volúmenes, Organización Panamericana de la Salud, Washington.
- SIED (1995): *Proyecto Sistema de Información Estadística Distrital*, Bogotá.
- Scientific American (1994): *Orden y Caos*, Libros de Investigación y Ciencia, Prensa Científica, Barcelona.
- UN-OCHA (2000): *Structured Humanitarian Assistance Reporting*, SHARE, Geographic Information Support Team (GIST), [www.reliefweb.int](http://www.reliefweb.int)
- UNDP (1991): *Human Development Report*. Oxford University Press. New York.
- UNDP (1999): *Disaster Reduction and Recovery Programme: Progress Report and Plan of Action*. Geneva: Disaster Reduction and Recovery Programme, United Nations Development Programme.
- UNDP (2001): *Feasibility Study Report on Global Risk and Vulnerability Index – Trends per Year*, UNEP/DEWA/GRID for UNDO/Emergency Response Division, Geneva.
- UNDRO (1979): *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*, Report of Experts Group Meeting, Geneva.
- UNDRO. (1990): *Preliminary Study on the Identification of Disaster -Prone Countries Based on Economic Impact*. New York/Geneva: United Nations Disaster Relief Organisation.
- UNDRO, (1991): *Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options*, A Manual for Policy Makers and Planners, New York.
- UNSD (1999): *Development a Vulnerability Index for SIDS*, Division of Sustainable Development of United Nations, <http://www.un.org/esa/sustdev/sidsvind>
- Universidad de los Andes (1996): *Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá*, Ingeominas, 17 volúmenes, Santa Fe Bogotá.

# Apéndice A

## Glosario de términos propuesto

**ADAPTABILIDAD:** Capacidad o habilidad de un grupo social de ajustarse a cambios ambientales con fines de supervivencia y sostenibilidad.

**ALERTA:** Estado que se declara, con anterioridad a la manifestación de un fenómeno peligroso, con el fin de que los organismos operativos de emergencia activen procedimientos de acción preestablecidos y para que la población tome precauciones específicas debido a la inminente ocurrencia del evento previsible. Además de informar a la población acerca del peligro, los estados de alerta se declaran con el propósito de que la población y las instituciones adopten una acción específica ante la situación que se presenta.

**AMENAZA:** Peligro latente que representa la posible manifestación dentro de un período de tiempo de un fenómeno peligroso de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre, que puede producir efectos adversos en las personas, los bienes y servicios y el ambiente. Es un factor de riesgo externo de un elemento o grupo de elementos expuestos, que se expresa como la probabilidad de que un evento se presente con una cierta intensidad, en un sitio específico y en dentro de un periodo de tiempo definido.

**ANÁLISIS DE RIESGO:** En su forma más simple es el postulado de que el riesgo es el resultado de relacionar la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos y consecuencias sociales, económicas y ambientales asociadas a uno o varios fenómenos peligrosos. Cambios en uno o más de estos parámetros modifican el riesgo en sí mismo, es decir, el total de pérdidas esperadas y consecuencias en un área determinada.

**ANTROPICO:** De origen humano o de las actividades del hombre, incluidas las tecnológicas.

**BIENES Y SERVICIOS:** Son aquellas cosas tangibles e intangibles, de valor económico que reportan beneficio a quienes las poseen o usufructúan y que permiten la

vida en comunidad. Serán bienes cuando son susceptibles de apropiación, sea privada pública y servicios cuando su utilidad radica exclusivamente en su consumo.

**CRISIS:** Es el proceso de liberación de los elementos sumergidos y reprimidos de un sistema como resultado de una perturbación exógena o endógena, que conduce a la parálisis de los elementos protectores y moderadores, a la extensión de los desórdenes, la aparición de incertidumbres de todo tipo y de reacciones en cadena y eventualmente a la mutación o desaparición del sistema en crisis. Las crisis pueden ser el resultado de un desastre o constituir ellas mismas el desastre.

**DAÑO:** Efecto adverso o grado de destrucción causado por un fenómeno peligroso sobre las personas, los bienes, sistemas de prestación de servicios y sistemas naturales o sociales.

**DESARROLLO SOSTENIBLE:** Proceso de transformaciones naturales, económico-sociales, culturales e institucionales, que tienen por objeto asegurar el mejoramiento de las condiciones de vida del ser humano, la producción de bienes y prestación de servicios, sin deteriorar el ambiente natural ni comprometer las bases de un desarrollo similar para las futuras generaciones.

**DESASTRE:** Situación o proceso social que se desencadena como resultado de la manifestación de un fenómeno de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre que, al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en una población, causa alteraciones intensas, graves y extendidas en las condiciones normales de funcionamiento de la comunidad; representadas por la pérdida de vida y salud de la población; la destrucción, pérdida o inutilización total o parcial de bienes de la colectividad y de los individuos así como daños severos en el ambiente, requiriendo de una respuesta inmediata de las autoridades y de la población para atender los afectados y restablecer los umbrales aceptados de normalidad y bienestar.

**ECOSISTEMA:** Unidad espacial definida por un complejo de componentes y procesos físicos y bióticos que interactúan en forma interdependiente y que han creado flujos de energía característicos y ciclos o movilización de materiales.

**EFFECTOS DIRECTOS:** Aquellos que mantienen relación de causalidad directa con la ocurrencia de un suceso, representados usualmente por el daño físico en las personas, los bienes, servicios y en el ambiente o por el impacto inmediato de las actividades sociales y económicas.

**EFFECTOS INDIRECTOS:** Aquellos que mantienen relación de causalidad con los efectos directos, representados usualmente por impactos concatenados o posteriores sobre la población, sus actividades económicas y sociales o sobre el ambiente.

**ELEMENTOS EN RIESGO (EXPUESTOS):** Es el contexto social, material y ambiental representado por las personas y por los recursos, servicios y ecosistemas que pueden ser afectados por la manifestación de un fenómeno peligroso.

**EMERGENCIA:** Estado caracterizado por la alteración o interrupción intensa y grave de las condiciones normales de funcionamiento u operación de una comunidad, causada por un evento o por la inminencia del mismo, que requiere de una reacción inmediata y que exige la atención o preocupación de las instituciones del Estado, los medios de comunicación y de la comunidad en general.

**EVALUACION DE LA AMENAZA:** Es el proceso mediante el cual se determina la posibilidad de que un fenómeno se manifieste, con un cierto grado de severidad, durante un período de tiempo definido y en un área determinada. Representa la recurrencia estimada y la ubicación geográfica de eventos probables.

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD:** Proceso mediante el cual se determina el grado de susceptibilidad y predisposición al daño de un elemento o grupo de elementos expuestos ante una amenaza particular.

**EVENTO (PERTURBACION):** Suceso o fenómeno natural, tecnológico o provocado por el hombre que se describe en términos de sus características, su severidad, ubicación y área de influencia. Es el registro en el tiempo y el espacio de un fenómeno que caracteriza una amenaza. Es importante diferenciar entre un evento potencial y el evento mismo, una vez éste se presenta.

**INTENSIDAD:** Medida cuantitativa y cualitativa de la severidad de un fenómeno en un sitio específico.

**INTERVENCION:** Modificación intencional de las características de un fenómeno con el fin de reducir su amenaza o de las características intrínsecas de predisposición al daño de un elemento expuesto con el fin de reducir su vulnerabilidad. La intervención intenta modificar los factores de riesgo. Controlar o encausar el curso físico de un fenómeno peligroso, o reducir su magnitud y frecuencia, son medidas relacionadas con la intervención de la amenaza. La reducción al mínimo posible de los daños materiales mediante la modificación de la resistencia o tenacidad de los elementos expuestos es una medida estructural relacionada con la intervención de la vulnerabilidad física. Aspectos asociados con planificación del medio físico, reglamentación del uso del suelo, seguros, preparación para emergencias y educación pública son medidas no estructurales relacionadas con la intervención de la vulnerabilidad social.

**GESTION DE RIESGOS:** Planeamiento y aplicación de medidas orientadas a impedir o reducir los efectos adversos de fenómenos peligrosos sobre la población, los bienes y servicios y el ambiente. Acciones integradas de reducción de riesgos, preparación para la atención emergencias y recuperación posdesastre de la población potencialmente afectable.

**LINEAS (REDES) VITALES:** Infraestructura básica o esencial. Energía: presas, subestaciones, líneas de fluido eléctrico, plantas de almacenamiento de combustibles, oleoductos, gasoductos. Transporte: redes viales, puentes, terminales de transporte, aeropuertos, puertos fluviales y marítimos. Agua: plantas de tratamiento, acueductos,

alcantarillados, canales de irrigación y conducción. Comunicaciones: redes y plantas telefónicas, estaciones de radio y televisión, oficinas de correo e información pública.

**MITIGACION (REDUCCIÓN):** Planificación y ejecución de medidas de intervención dirigidas a reducir o disminuir el riesgo. La mitigación es el resultado de la aceptación de que no es posible controlar el riesgo totalmente; es decir, que en muchos casos no es posible impedir o evitar los daños y sus consecuencias y sólo es posible atenuarlas.

**PÉRDIDA:** Valor adverso de orden económico, social o ambiental alcanzado por una variable durante un tiempo de exposición específico.

**PLAN DE CONTINGENCIA:** Procedimientos operativos específicos y preestablecidos de coordinación, alerta, movilización y respuesta ante la manifestación o la inminencia de un fenómeno peligroso particular para el cual se tienen escenarios definidos.

**PLAN DE EMERGENCIAS:** Definición de funciones, responsabilidades y procedimientos generales de reacción y alerta institucional, inventario de recursos, coordinación de actividades operativas y simulación para la capacitación y revisión, con el fin de salvaguardar la vida, proteger los bienes y recobrar la normalidad de la sociedad tan pronto como sea posible después de que se presente un fenómeno peligroso.

**PLAN DE GESTION DE RIESGOS:** Conjunto coherente y ordenado de estrategias, programas y proyectos, que se formula para orientar las actividades de reducción de riesgos, los preparativos para la atención de emergencias y la recuperación en caso de desastre. Al garantizar condiciones apropiadas de seguridad frente a los diversos riesgos existentes y disminuir las pérdidas materiales y consecuencias sociales que se derivan de los desastres, se mejora la calidad de vida de la población.

**PREPARACIÓN (PREPARATIVOS):** Medidas cuyo objetivo es organizar y facilitar los operativos para el efectivo y oportuno aviso, salvamento y rehabilitación de la población en caso de desastre. La preparación se lleva a cabo mediante la organización y planificación de las acciones de alerta, evacuación, búsqueda, rescate, socorro y asistencia que deben realizarse en caso de emergencia.

**PREVENCIÓN:** Medidas y acciones dispuestas con anticipación con el fin de evitar o impedir que se presente un fenómeno peligroso o para reducir sus efectos sobre la población, los bienes y servicios y el ambiente.

**PRONÓSTICO:** Determinación de la probabilidad de que un fenómeno se manifieste con base en: el estudio de su mecanismo físico generador, el monitoreo del sistema perturbador y/o el registro de eventos en el tiempo. Un pronóstico puede ser a corto plazo, generalmente basado en la búsqueda e interpretación de señales o eventos premonitorios del fenómeno peligroso; a mediano plazo, basado en la información probabilística de parámetros indicadores de la potencialidad del fenómeno, y a largo plazo, basado en la determinación del evento máximo probable dentro de un período de tiempo que pueda relacionarse con la planificación del área afectable.

**RECUPERACION:** Proceso de restablecimiento de las condiciones normales de vida mediante la rehabilitación, reparación o reconstrucción del área afectada, los bienes y servicios interrumpidos o deteriorados y el restablecimiento e impulso del desarrollo económico y social de la comunidad.

**REDUCCIÓN DE RIESGOS:** Medidas de intervención compensatorias dirigidas a cambiar o disminuir las condiciones de riesgo existentes y acciones prospectivas de control, con el fin de evitar futuras condiciones de riesgo. Son medidas de prevención-mitigación que se adoptan con anterioridad de manera alternativa, prescriptiva o restrictiva, con el fin de evitar que se presente un fenómeno peligroso, o para que no generen daños, o para disminuir sus efectos sobre la población, los bienes y servicios y el ambiente.

**RESILIENCIA:** Capacidad de un ecosistema o de una comunidad de absorber un impacto negativo o de recuperarse una vez a sido afectada por un fenómeno peligroso.

**RESPUESTA:** Etapa de la atención que corresponde a la ejecución de las acciones previstas en la etapa de preparación y que, en algunos casos, ya han sido antecedidas por actividades de alistamiento y movilización, motivadas por la declaración de diferentes estados de alerta. Corresponde a la reacción inmediata para la atención oportuna de la población.

**RIESGO:** Es la probabilidad que se presente un nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio particular y durante un período de tiempo definido. Se obtiene de relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

**RIESGO ACEPTABLE:** Posibles consecuencias sociales, económicas y ambientales que, implícita o explícitamente, una sociedad o un segmento de la misma asume o tolera, por considerar que son poco factibles y, usualmente, a cambio de un beneficio inmediato. Es el nivel probabilidad de una consecuencia dentro de un período de tiempo, que se considera admisible para determinar las mínimas exigencias o requisitos seguridad, con fines de protección y planificación ante posibles fenómenos peligrosos.

**SISTEMA INTEGRADO DE INFORMACIÓN:** Base de conocimiento de las amenazas, vulnerabilidades y riesgos, de vigilancia y alerta, de capacidad de respuesta y de procesos de gestión, al servicio de las instituciones y de la población, fundamental para la toma de decisiones y priorizar de las actividades y proyectos de gestión de riesgos.

**SISTEMA DE GESTION DE RIESGOS:** Organización abierta, dinámica y funcional de instituciones y su conjunto de orientaciones, normas, recursos, programas y actividades de carácter técnico-científico, de planificación, de preparación para emergencias y de participación de la comunidad cuyo objetivo es la incorporación de la gestión de riesgos en la cultura y en el desarrollo económico y social de las comunidades.

**VULNERABILIDAD:** Factor de riesgo interno de un elemento o grupo de elementos expuestos a una amenaza, correspondiente a su predisposición intrínseca a ser afectado o

de ser susceptible a sufrir un daño. Corresponde a la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un fenómeno peligroso de origen natural o causado por el hombre se manifieste. Las diferencias de vulnerabilidad del contexto social y material expuesto ante un fenómeno peligroso determinan el carácter selectivo de la severidad de sus efectos.

## Apéndice B

### Influencias globales, consistencia y confiabilidad de los factores de participación

El análisis multicriterio basado en importancias relativas y pesos obtenidos mediante comparaciones sucesivas entre parejas de criterios (*pairwise*), desarrollado para la toma de decisiones, es una técnica útil para asignar los factores de participación o importancia de los componentes de un indicador de una manera más rigurosa que la directa apreciación utilizando el “juicio” o “sentimiento” de los expertos (Hayman 1998). Una de las técnicas más desarrolladas es el proceso jerárquico analítico (*Analytical Hierarchy Process - AHP*) que permite medir la consistencia de los factores de peso asignados mediante comparaciones *pairwise* (Saaty 1980).

Utilizando la Tabla B.1 propuesta por Saaty y Vargas (1991) para la asignación de importancias o preferencias se puede asignar un puntaje de importancia relativa por parejas de indicadores o *pairwise*, teniendo como referencia qué tanto, en forma comparativa, cada indicador refleja el aspecto que se desea representar. La tabla B.2 indica el grado de relación que, según los expertos, cada indicador tiene con las variables o índices que se evalúan (que puede ser directa o indirecta fuerte, moderada o leve). También, incluye el puntaje inicial asignado (resultado de un proceso Delphi entre los expertos) de importancia relativa entre indicadores, que sirve de punto de partida para realizar el proceso jerárquico analítico AHP.

**Tabla B.1** Escala de asignación de importancia comparativa entre parejas.

Juicio de Importancia	Puntaje
Extremadamente más importante	9
	8
Muy fuertemente más importante	7
	6
Fuertemente más importante	5
	4
Moderadamente más importante	3
	2
Igualmente importante	1

**Tabla B.2:** Nivel de relación e importancia preliminar de las agrupaciones

<b>Identificación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Relación</b>	<b>Importancia</b>
<b>IR<sub>H</sub></b>	<b>Riesgo Sísmico Físico (potencial de)</b>		
<b>X<sub>IR1</sub></b>	Área destruida	Directa	1
<b>X<sub>IR2</sub></b>	Fallecidos	Directa	5
<b>X<sub>IR3</sub></b>	Heridos	Directa	5
<b>X<sub>IR4</sub></b>	Roturas red de acueducto	Directa	3
<b>X<sub>IR5</sub></b>	Roturas de la red de gas	Directa	3
<b>X<sub>IR6</sub></b>	Longitud de redes eléctricas caídas	Directa	3
<b>X<sub>IR7</sub></b>	Centrales telefónicas afectadas	Directa	5
<b>X<sub>IR8</sub></b>	Subestaciones eléctricas afectadas	Directa	5
<b>H<sub>S</sub></b>	<b>Amenaza Sísmica Contexto</b>		
<b>X<sub>H1</sub></b>	Aceleración espectral en períodos T cortos	Directa	1
<b>X<sub>H2</sub></b>	Área de suelos blandos	Indirecta-fuerte	5
<b>X<sub>H3</sub></b>	Área con potencial de licuación	Indirecta-fuerte	3
<b>X<sub>H4</sub></b>	Susceptibilidad de deslizamiento	Indirecta-leve	2
<b>V<sub>S</sub></b>	<b>Vulnerabilidad del Contexto</b>		
<b>E<sub>V</sub></b>	<b>Exposición del Contexto</b>		
<b>X<sub>E1</sub></b>	Población	Indirecta-fuerte	1
<b>X<sub>E2</sub></b>	Densidad poblacional	Indirecta-leve	3
<b>X<sub>E3</sub></b>	Área construida	Indirecta-fuerte	1
<b>X<sub>E4</sub></b>	Área industrial	Indirecta-leve	3
<b>X<sub>E5</sub></b>	Área institucional	Indirecta-leve	3
<b>F<sub>V</sub></b>	<b>Fragilidad Social</b>		
<b>X<sub>F1</sub></b>	Área barrios marginales	Indirecta-fuerte	1
<b>X<sub>F2</sub></b>	Tasa de mortalidad	Indirecta-leve	5
<b>X<sub>F3</sub></b>	Tasa de delincuencia	Indirecta-leve	5
<b>X<sub>F4</sub></b>	Índice de disparidad social	Indirecta-fuerte	1
<b>R<sub>V</sub></b>	<b>Resiliencia (-) Falta de</b>		
<b>X<sub>R1</sub></b>	Camas hospitalarias	Directa	1
<b>X<sub>R2</sub></b>	Recurso humano en salud	Directa	1
<b>X<sub>R3</sub></b>	Espacio público	Indirecta-leve	3
<b>X<sub>R4</sub></b>	Personal de rescate	Directa	1
<b>X<sub>R5</sub></b>	Nivel de desarrollo	Directa	1
<b>X<sub>R6</sub></b>	Operatividad en emergencias	Indirecta-fuerte	1

La asignación de los puntajes de importancia relativa se realiza con base en las dos tablas anteriores, comparando la importancia del primer indicador con respecto a los demás. Por ejemplo, el área destruida de edificaciones es moderadamente más importante (puntaje 5) que el número de centrales telefónicas afectadas, cuando se tiene como referente el riesgo sísmico físico. Con base en estos puntajes iniciales se formula la matriz para el análisis de consistencia. Esta matriz se ajusta y evalúa hasta que se considere que la consistencia es adecuada.

De acuerdo con la técnica AHP la relación de consistencia  $CR$  (Ecuación B.1) es el cociente entre el índice de consistencia  $CI$  de una matriz de comparaciones *pairwise* dada y el valor del mismo índice para una matriz de comparaciones *pairwise* generada aleatoriamente:

$$CR = \frac{CI}{CI_{random}} \leq 0.1 \quad [B.1]$$

donde el índice de consistencia  $CI$  está definido como

$$CI = \frac{I_{max} - n}{n - 1} \quad [B.2]$$

el término  $I_{max}$  en la ecuación B.2 es el mayor valor propio (*eigenvalue*) positivo de la matriz de comparaciones *pairwise*.

Hayman indica que la confiabilidad es suficiente si  $CR$  es menor o igual a 0.10. En caso contrario se debe revisar los elementos de la matriz de comparaciones *pairwise* con el ánimo de mejorar su consistencia. Una vez obtenida una consistencia aceptable se procede a normalizar la matriz y se determinan los valores ajustados de los factores de participación. Los valores finales de los factores de participación se obtuvieron de apreciaciones de expertos relacionados con la prevención de desastres y planificación. A continuación se presentan las matrices para cada uno de los factores e indicadores que constituyen los índices de riesgo sísmico físico y del contexto.

Dado que para iniciar el proceso con el método neuronal difuso se establecen unos pesos de inicio, se utilizó esta técnica para dicho efecto. En ese caso tanto la matriz de riesgo sísmico físico como la de falta de resiliencia incluyeron una variable adicional a considerar, razón por la cual se presentan dos matrices de valores finales en cada uno de esos casos.



### Matriz de Riesgo Sísmico Físico

(Usada en el método de redes neuronales difusas)

	XIR <sub>1</sub>	XIR <sub>2</sub>	XIR <sub>3</sub>	XIR <sub>4</sub>	XIR <sub>5</sub>	XIR <sub>6</sub>	XIR <sub>7</sub>	XIR <sub>8</sub>	XIR <sub>9</sub>
XIR <sub>1</sub>	1	3	3	2	3	6	6	6	3
XIR <sub>2</sub>	0.33	1	1	0.5	1	2	2	2	1
XIR <sub>3</sub>	0.33	1	1	0.5	1	2	2	2	1
XIR <sub>4</sub>	0.50	2	2	1	2	3	3	3	2
XIR <sub>5</sub>	0.33	1	1	0.50	1	2	2	2	1
XIR <sub>6</sub>	0.17	0.5	0.5	0.33	0.5	1	1	1	0.5
XIR <sub>7</sub>	0.17	0.5	0.5	0.33	0.5	1	1	1	0.5
XIR <sub>8</sub>	0.17	0.5	0.5	0.33	0.5	1	1	1	0.5
XIR <sub>9</sub>	0.33	1	1	0.50	1	2	2	2	1
S	3.33	10.5	10.5	6.00	10.5	20	20	20	10.5

Valor Propio Mayor **9.01467**

CI **0.00183**

CR **0.00122**

### NORMALIZADA

	XIR <sub>1</sub>	XIR <sub>2</sub>	XIR <sub>3</sub>	XIR <sub>4</sub>	XIR <sub>5</sub>	XIR <sub>6</sub>	XIR <sub>7</sub>	XIR <sub>8</sub>	XIR <sub>9</sub>	Influencia Global	Peso Obtenido
XIR <sub>1</sub>	0.30	0.29	0.29	0.33	0.29	0.30	0.30	0.30	0.29	0.30	30
XIR <sub>2</sub>	0.10	0.10	0.10	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10
XIR <sub>3</sub>	0.10	0.10	0.10	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10
XIR <sub>4</sub>	0.15	0.19	0.19	0.17	0.19	0.15	0.15	0.15	0.19	0.15	15
XIR <sub>5</sub>	0.10	0.10	0.10	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10
XIR <sub>6</sub>	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	5
XIR <sub>7</sub>	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	5
XIR <sub>8</sub>	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	5
XIR <sub>9</sub>	0.10	0.10	0.10	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	10
S	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100

### Matriz de Amenaza Sísmica

	X <sub>H1</sub>	X <sub>H2</sub>	X <sub>H3</sub>	X <sub>H4</sub>
X <sub>H1</sub>	1	4	2	2
X <sub>H2</sub>	0.25	1	2	2
X <sub>H3</sub>	0.5	0.5	1	1
X <sub>H4</sub>	0.5	0.5	1	1
S	2.25	6	6	6

Valor Propio Mayor = 4.24923

CI = 0.083076667

CR = 0.092307407

### NORMALIZADA

	X <sub>H1</sub>	X <sub>H2</sub>	X <sub>H3</sub>	X <sub>H4</sub>	Influencia Global	Peso Obtenido
X <sub>H1</sub>	0.44	0.67	0.33	0.33	0.444	44
X <sub>H2</sub>	0.11	0.17	0.33	0.33	0.236	24
X <sub>H3</sub>	0.22	0.08	0.17	0.17	0.160	16
X <sub>H4</sub>	0.22	0.08	0.17	0.17	0.160	16
S	1	1	1	1	1	100

### Matriz de Exposición

	<b>XE1</b>	<b>XE2</b>	<b>XE3</b>	<b>XE4</b>	<b>XE5</b>
<b>XE1</b>	1	2	1	2	2
<b>XE2</b>	0.5	1	0.5	2	2
<b>XE3</b>	1	2	1	2	2
<b>XE4</b>	0.50	0.5	0.50	1	1
<b>XE5</b>	0.50	0.5	0.50	1	1
<b>S</b>	3.50	6	3.50	8	8

**Valor Propio Mayor**      **5.07757**      **CI**      **0.01939**  
**CR**      **0.01731**

### *NORMALIZADA*

	<b>XE1</b>	<b>XE2</b>	<b>XE3</b>	<b>XE4</b>	<b>XE5</b>	<b>Influencia Global</b>	<b>Peso Obtenido</b>
<b>XE1</b>	0.29	0.33	0.29	0.25	0.25	0.281	28
<b>XE2</b>	0.14	0.17	0.14	0.25	0.25	0.190	19
<b>XE3</b>	0.29	0.33	0.29	0.25	0.25	0.281	28
<b>XE4</b>	0.14	0.08	0.14	0.13	0.13	0.124	12.5
<b>XE5</b>	0.14	0.08	0.14	0.13	0.13	0.124	12.5
<b>S</b>	1	1	1	1	1	1	100



### Matriz de Falta de Resiliencia

(Usada en el método de indicadores)

	XR <sub>1</sub>	XR <sub>2</sub>	XR <sub>3</sub>	XR <sub>4</sub>	XR <sub>5</sub>	XR <sub>6</sub>
XR <sub>1</sub>	1	1	2	1	1.0	0.5
XR <sub>2</sub>	1	1	1	2	0.5	1.0
XR <sub>3</sub>	0.5	1	1	1	0.5	1.0
XR <sub>4</sub>	1	0.5	1	1	1.0	0.5
XR <sub>5</sub>	1	2	2	1	1	1
XR <sub>6</sub>	2	1	1	2	1	1
S	7	7	8	8	5	5

Valor Propio Mayor **6.27098**

CI **0.0542**

CR **0.0437**

*NORMALIZADA*

	XR <sub>1</sub>	XR <sub>2</sub>	XR <sub>3</sub>	XR <sub>4</sub>	XR <sub>5</sub>	XR <sub>6</sub>	Influencia Global	Peso Obtenido
XR <sub>1</sub>	0.15	0.15	0.25	0.13	0.20	0.10	0.16	16
XR <sub>2</sub>	0.15	0.15	0.13	0.25	0.10	0.20	0.16	16
XR <sub>3</sub>	0.08	0.15	0.13	0.13	0.10	0.20	0.13	13
XR <sub>4</sub>	0.15	0.08	0.13	0.13	0.20	0.10	0.13	13
XR <sub>5</sub>	0.15	0.31	0.25	0.13	0.20	0.20	0.21	21
XR <sub>6</sub>	0.31	0.15	0.13	0.25	0.20	0.20	0.21	21
S	1	1	1	1	1	1	1	100



### Matriz de Vulnerabilidad del Contexto

	Ev	Fv	Ev
EV	1	0.50	1
FV	2	1	1
Rv	1	1.00	1
S	4	2.50	3

**Valor Propio Mayor**                      **CI 0.02681**  
**3.05362**                                      **CR 0.05156**

*NORMALIZADA*

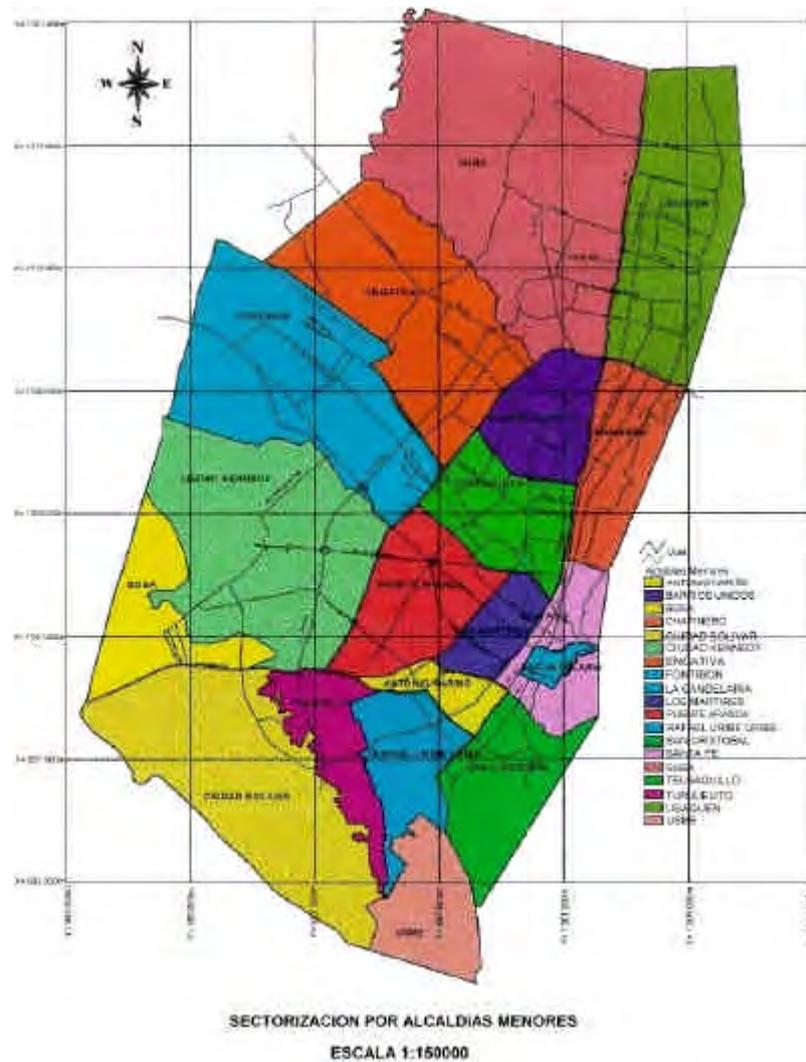
	Ev	Fv	Ev	Influencia Global	Peso Obtenido
Ev	0.25	0.20	0.33	0.26	26
Fv	0.50	0.40	0.33	0.41	41
Rv	0.25	0.40	0.33	0.33	33
S	1	1	1	1.00	100



## Apéndice C

# Índices de riesgo sísmico físico y del contexto de Bogotá, Colombia

Mapa indicativo de las alcaldías menores de Bogotá:

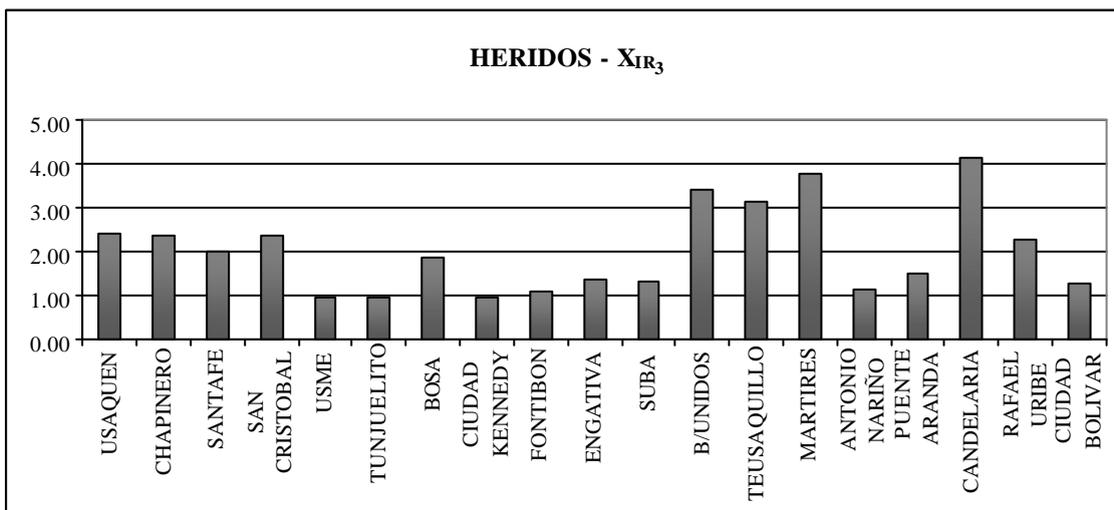
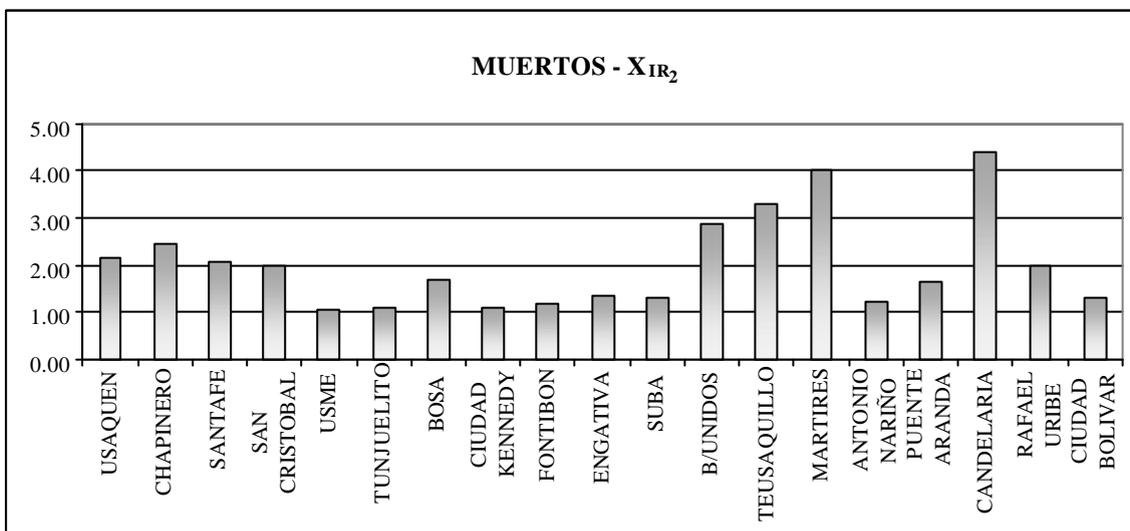
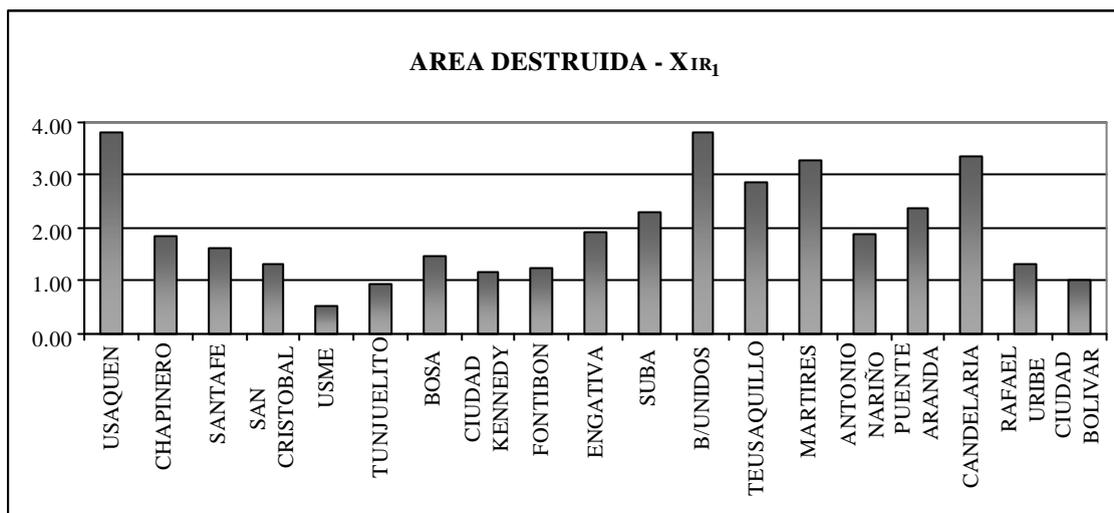


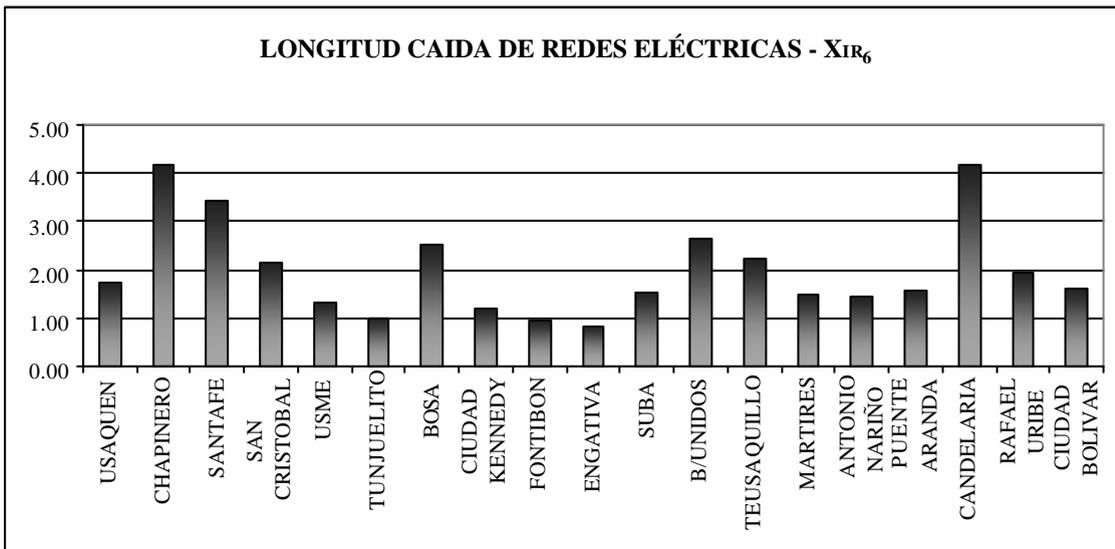
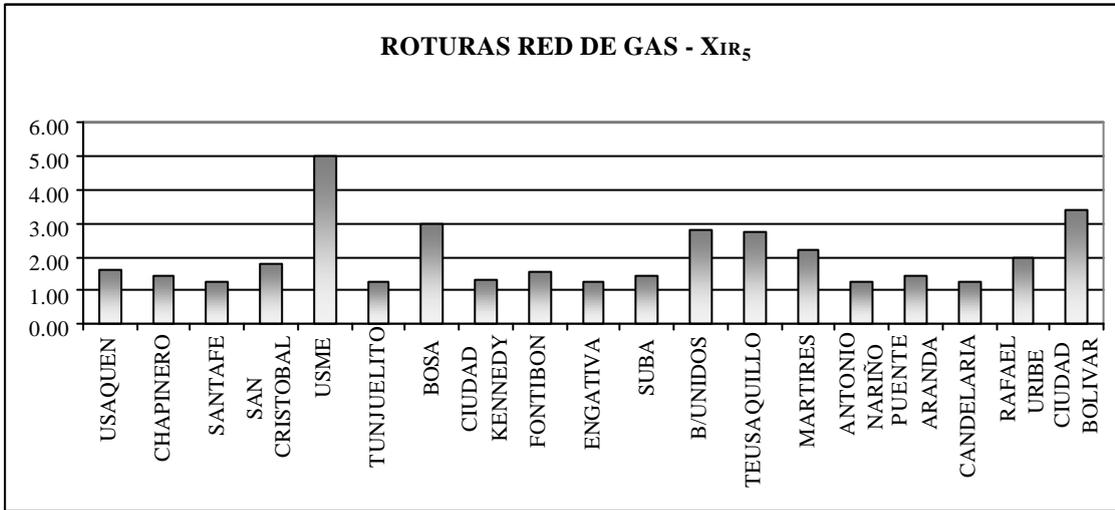
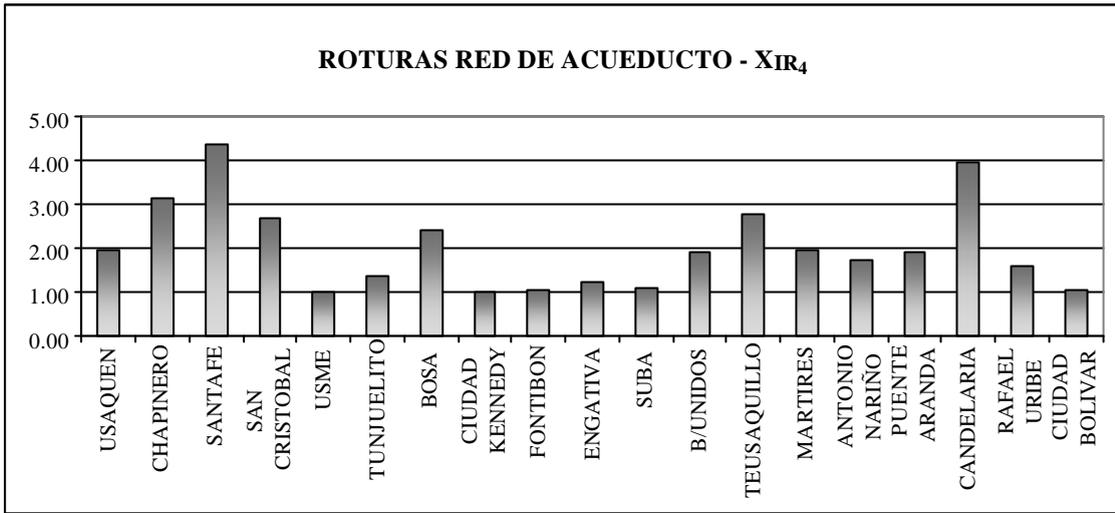
## VALORES ABSOLUTOS DE RIESGO SÍSMICO FÍSICO

LOCALIDAD	Area de localidad m <sup>2</sup>	Area destruida m <sup>2</sup>	Area destruida / Area localidad %Area	Muertos No	Muertos sismo/Area localidad	Heridos No	Heridos sismo/Area localidad	Roturas del acueducto No	Roturas Red Acueducto/ Area localidad	Roturas red de gas No	Roturas Red de Gas / Area localidad	Longitud caída redes eléctricas m	Longitud caída / Area localidad	Vulnerabilidad d centrales teléfónicas	Vulnerabilidad subestaciones eléctricas
USAQUEN	32,635,050	45,058	0.1381	1495	4.58E-05	10,122	0.00031	81	2.48E-06	4	1.23E-07	778.87	2.39E-05	0.7	0.83
CHAPINERO	14,295,420	8,385	0.0587	834	5.83E-05	4,297	0.00030	69	4.83E-06	1	7.00E-08	1155.98	8.09E-05	0.77	0.9
SANTAFE	10,187,140	5,081	0.0499	444	4.36E-05	2,305	0.00023	74	7.26E-06	0	0	639.50	6.28E-05	0.62	0.9
SAN CRISTOBAL	16,016,470	5,905	0.0369	634	3.96E-05	4,868	0.00030	63	3.93E-06	3	1.87E-07	539.69	3.37E-05	0.68	0.9
USME	12,480,360	565	0.0045	23	1.84E-06	175	0.00001	7	5.61E-07	15	1.20E-06	179.02	1.43E-05	0.67	0.9
TUNJUELITO	10,969,910	2,381	0.0217	36	3.28E-06	207	0.00002	14	1.28E-06	0	0	73.12	6.67E-06	0.58	0.7
BOSA	14,152,710	6,016	0.0425	381	2.69E-05	2,841	0.00020	48	3.39E-06	8	5.65E-07	587.86	4.15E-05	0.73	0.9
CIUDAD KENNEDY	42,680,750	13,174	0.0309	149	3.49E-06	939	0.00002	24	5.62E-07	1	2.34E-08	461.06	1.08E-05	0.54	0.7
FONTIBON	40,472,080	13,886	0.0343	295	7.29E-06	1,740	0.00004	28	6.92E-07	4	9.88E-08	222.23	5.49E-06	0.64	0.7
ENGATIVA	35,455,300	21,685	0.0612	496	1.40E-05	3,660	0.00010	38	1.07E-06	0	0	99.88	2.82E-06	0.66	0.8
SUBA	66,638,540	51,540	0.0773	857	1.29E-05	6,181	0.00009	53	7.95E-07	4	6.00E-08	1275.23	1.91E-05	0.66	0.77
BUNIDOS	11,888,540	16,448	0.1384	890	7.49E-05	6,085	0.00051	28	2.36E-06	6	5.05E-07	532.33	4.48E-05	0.75	0.9
TEUSAQUILLO	14,448,470	14,489	0.1003	1330	9.21E-05	6,617	0.00046	59	4.08E-06	7	4.84E-07	516.06	3.57E-05	0.74	0.9
MARTIRES	6,504,098	7,664	0.1178	787	1.21E-04	3,849	0.00059	16	2.46E-06	2	3.07E-07	117.43	1.81E-05	0.66	0.7
ANTONIO NARIÑO	4,854,732	2,910	0.0599	43	8.86E-06	284	0.00006	10	2.06E-06	0	0	81.33	1.68E-05	0.67	0.8
PUNTE ARANDA	17,036,340	13,606	0.0799	434	2.55E-05	2,178	0.00013	40	2.35E-06	1	5.87E-08	343.93	2.02E-05	0.69	0.7
CANDELARIA	1,853,863	2,221	0.1198	253	1.36E-04	1,233	0.00067	12	6.47E-06	0	0	149.43	8.06E-05	0.67	0.9
RAFAEL URIBE	12,216,210	4,516	0.0370	472	3.86E-05	3,481	0.00028	22	1.80E-06	3	2.46E-07	350.14	2.87E-05	0.65	0.9
CIUDAD BOLIVAR	40,356,420	10,347	0.0256	486	1.20E-05	3,512	0.00009	29	7.19E-07	28	6.94E-07	847.92	2.10E-05	0.64	0.9

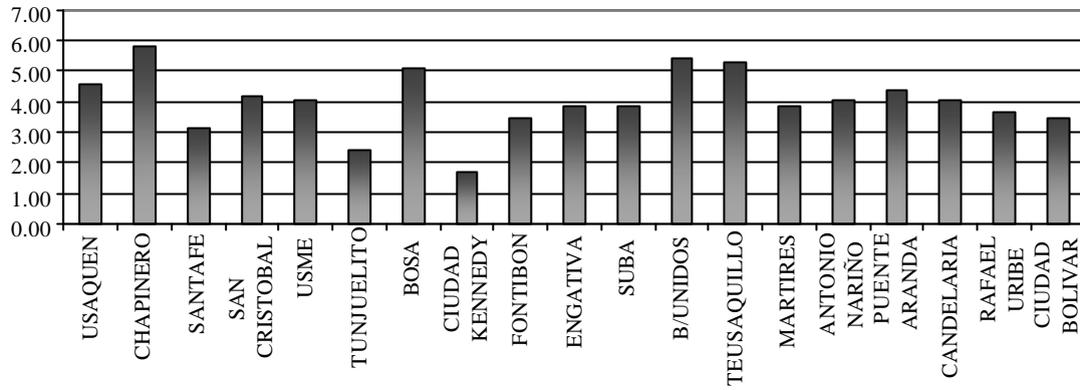
**INDICADORES DE RIESGO SISMICO FISICO**

<b>LOCALIDAD</b>	<b>Área destruida por sismo</b>	<b>Muertos por sismo</b>	<b>Heridos por sismo</b>	<b>Roturas red de acueducto</b>	<b>Roturas red de gas</b>	<b>Longitud caída redes eléctricas</b>	<b>Vulnerabilidad centrales telefónicas</b>	<b>Vulnerabilidad subestaciones eléctricas</b>	<b>Índice de Riesgo Sísmico Físico</b>
	<b>XS<sub>1</sub></b>	<b>XS<sub>2</sub></b>	<b>XS<sub>3</sub></b>	<b>XS<sub>4</sub></b>	<b>XS<sub>5</sub></b>	<b>XS<sub>6</sub></b>	<b>XS<sub>7</sub></b>	<b>XS<sub>8</sub></b>	
USAQUEN	3.80	2.14	2.38	1.95	1.62	1.74	4.55	4.04	7.82
CHAPINERO	1.84	2.45	2.34	3.13	1.46	4.19	5.80	4.84	6.22
SANTAFE	1.63	2.08	1.97	4.37	1.24	3.41	3.12	4.84	5.25
SAN CRISTOBAL	1.31	1.98	2.35	2.68	1.82	2.16	4.19	4.84	5.32
USME	0.51	1.04	0.92	0.97	5.00	1.33	4.01	4.84	3.52
TUNJUELITO	0.93	1.08	0.94	1.34	1.24	1.00	2.40	2.56	3.38
BOSA	1.45	1.67	1.84	2.41	3.01	2.50	5.08	4.84	5.00
CIUDAD KENNEDY	1.16	1.08	0.96	0.97	1.31	1.18	1.68	2.56	4.33
FONTIBON	1.25	1.18	1.06	1.04	1.55	0.95	3.47	2.56	4.37
ENGATIVA	1.91	1.34	1.36	1.23	1.24	0.84	3.83	3.70	4.93
SUBA	2.30	1.31	1.31	1.09	1.43	1.54	3.83	3.36	7.62
B/UNIDOS	3.81	2.86	3.38	1.88	2.82	2.64	5.44	4.84	5.47
TEUSAQUILLO	2.87	3.29	3.11	2.76	2.75	2.25	5.26	4.84	5.98
MARTIRES	3.30	4.01	3.77	1.94	2.20	1.49	3.83	2.56	4.22
ANTONIO NARIÑO	1.88	1.21	1.14	1.73	1.24	1.44	4.01	3.70	3.50
PUENTE ARANDA	2.37	1.63	1.48	1.88	1.42	1.58	4.37	2.56	4.76
CANDELARIA	3.35	4.40	4.14	3.97	1.24	4.18	4.01	4.84	3.77
RAFAEL URIBE	1.31	1.96	2.26	1.60	2.01	1.95	3.65	4.84	4.38
CIUDAD BOLIVAR	1.03	1.29	1.28	1.05	3.41	1.62	3.47	4.84	5.17

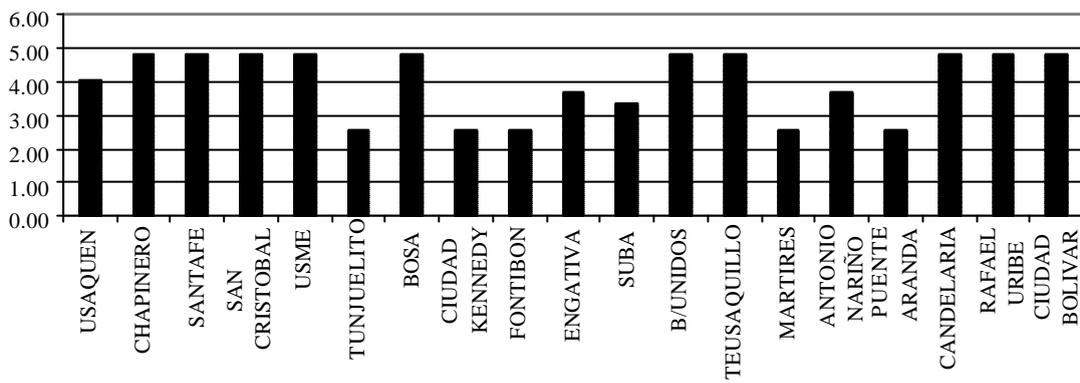




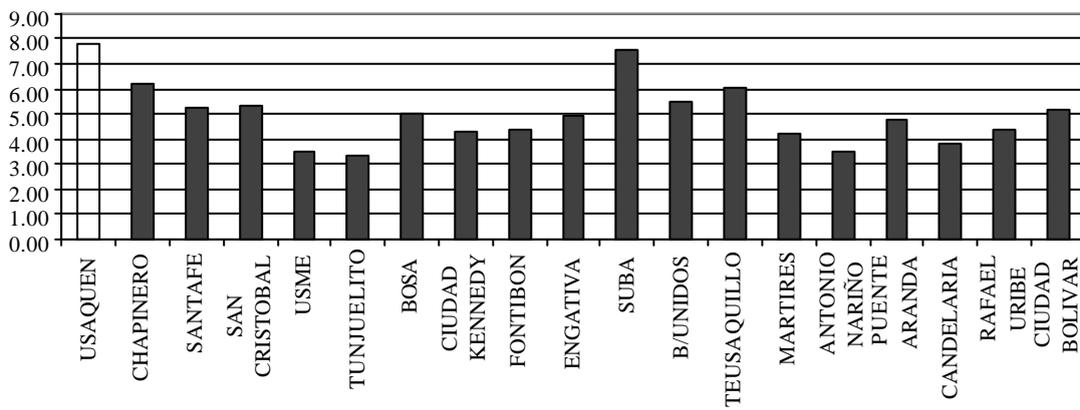
**VULNERABILIDAD DE CENTRALES TELEFÓNICAS -  $X_{IR_7}$**



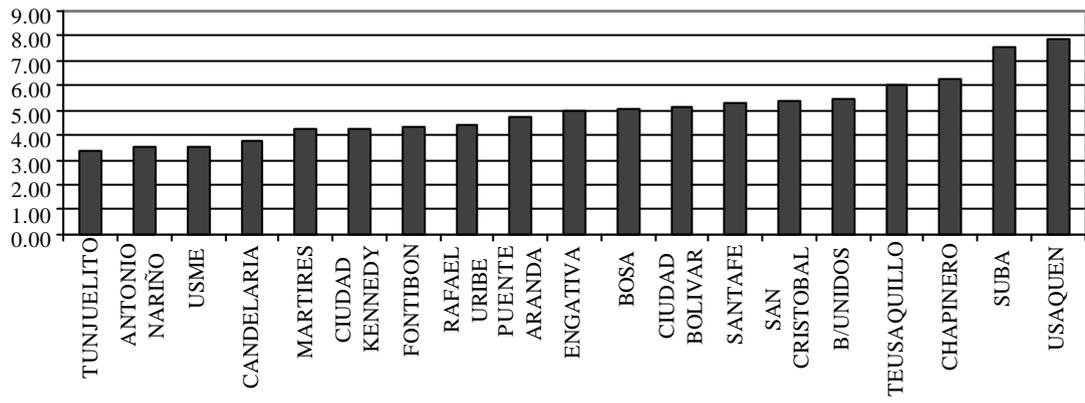
**VULNERABILIDAD SUBESTACIONES ELÉCTRICAS -  $X_{IR_8}$**



**INDICE DE RIESGO SÍSMICO FÍSICO -  $IR_H$**



### INDICE DE RIESGO SÍSMICO FÍSICO - IR<sub>H</sub>



## VALORES ABSOLUTOS DE AMENAZA SÍSMICA DEL CONTEXTO

LOCALIDAD	Area de la alcaldía m <sup>2</sup>	Aceleración Espectral g	Area de Suelos Blandos Area %	Potencial Licuación Area%	Susceptibilidad a Deslizamientos Area%
USAQUEN	32,635,050	0.557	60	0	0.088208963
CHAPINERO	14,295,420	0.616	30	0	0.131611932
SANTAFE	10,187,140	0.605	0	0	0.199096287
SAN CRISTOBAL	16,016,470	0.55	0	0	0.4725469
USME	12,480,360	0.675	0	0	0.07657177
TUNJUELITO	10,969,910	0.4	0	100	0
BOSA	14,152,710	0.4	0	100	0
CIUDAD KENNEDY	42,680,750	0.4055	5	95	0
FONTIBON	40,472,080	0.377	100	0	0
ENGATIVA	35,455,300	0.358	100	0	0
SUBA	66,638,540	0.45	80	0	0
B/UNIDOS	11,888,540	0.472	100	0	0
TEUSAQUILLO	14,448,470	0.546	85	0	0
MARTIRES	6,504,098	0.5575	0	0	0
ANTONIO NARIÑO	4,854,732	0.4	0	0	0
PUENTE ARANDA	17,036,340	0.455	50	15	5.86981E-08
CANDELARIA	1,853,863	0.54	0	0	1.07883E-06
RAFAEL URIBE	12,216,210	0.46	0	40	0.22313156
CIUDAD BOLIVAR	40,356,420	0.6	0	0	4.95584E-08

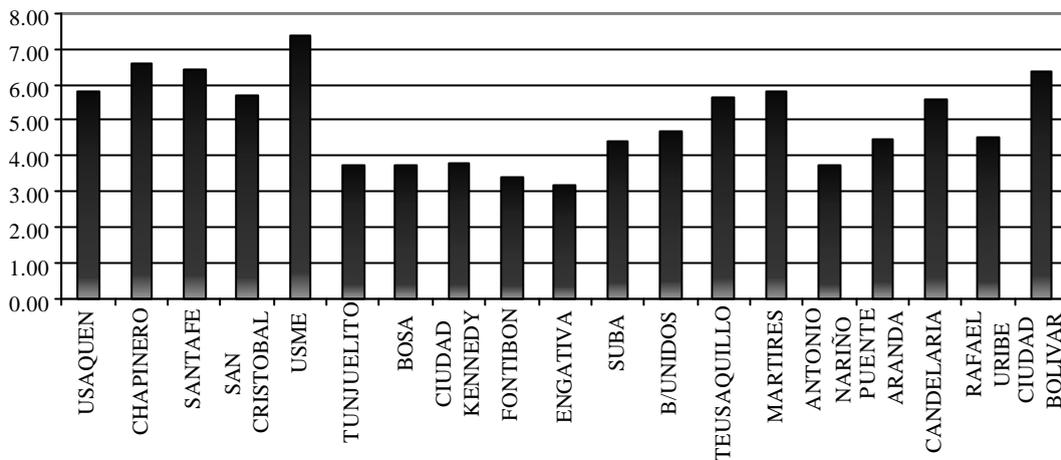
### AMENAZA SÍSMICA DEL CONTEXTO

LOCALIDAD	Area de la alcaldía m <sup>2</sup>	Aceleración Espectral g	Indicador Aceleración Espectral X <sub>H1</sub>	Area de Suelos Blandos Area %	Indicador Area de Suelos Blandos X <sub>H2</sub>	Area Potencial Licuación Area%	Indicador Potencial de Licuación X <sub>H3</sub>	Susceptibilidad a Deslizamientos Area%	Indicador Potencial de Deslizamiento X <sub>H4</sub>
USAQUEN	32.635.050	0.557	5.81	60	5.84	0	4.37	0.0882	5.26
CHAPINERO	14.295.420	0.616	6.60	30	4.94	0	4.37	0.1316	5.70
SANTAFE	10.187.140	0.605	6.45	0	4.03	0	4.37	0.1991	6.39
SAN CRISTOBAL	16.016.470	0.55	5.72	0	4.03	0	4.37	0.4725	9.19
USME	12.480.360	0.675	7.38	0	4.03	0	4.37	0.0766	5.14
TUNJUELITO	10.969.910	0.4	3.72	0	4.03	100	7.77	0	4.36
BOSA	14.152.710	0.4	3.72	0	4.03	100	7.77	0	4.36
CIUDAD KENNEDY	42.680.750	0.4055	3.80	5	4.18	95	7.60	0	4.36
FONTIBON	40.472.080	0.377	3.42	100	7.04	0	4.37	0	4.36
ENGATIVA	35.455.300	0.358	3.16	100	7.04	0	4.37	0	4.36
SUBA	66.638.540	0.45	4.39	80	6.44	0	4.37	0	4.36
BUNIDOS	11.888.540	0.472	4.68	100	7.04	0	4.37	0	4.36
TEUSAQUILLO	14.448.470	0.546	5.67	85	6.59	0	4.37	0	4.36
MARTIRES	6.504.098	0.5575	5.82	0	4.03	0	4.37	0	4.36
ANTONIO NARIÑO	4.854.732	0.4	3.72	0	4.03	0	4.37	0	4.36
PUENTE ARANDA	17.036.340	0.455	4.45	50	5.54	15	4.88	5.8698E-08	4.36
CANDELARIA	1.853.863	0.54	5.59	0	4.03	0	4.37	1.0788E-06	4.36
RAFAEL URIBE	12.216.210	0.46	4.52	0	4.03	40	5.73	2.2313E-01	6.64
CIUDAD BOLIVAR	40.356.420	0.6	6.38	0	4.03	0	4.37	4.9558E-08	4.36

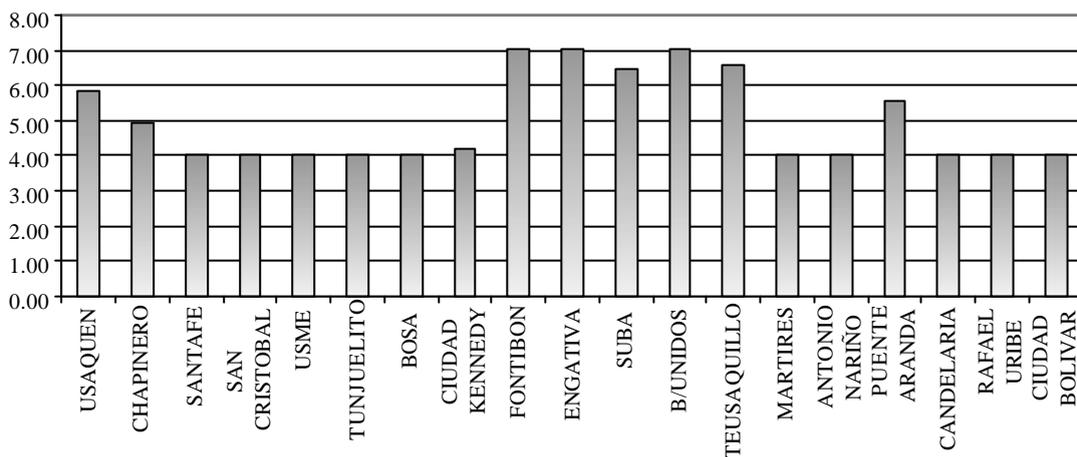
## INDICADORES DE AMENAZA SÍSMICA DEL CONTEXTO

LOCALIDAD	Aceleración Espectral	Area Suelos Blandos	Area de Potencial Licuacion	Area Susceptible a Deslizamientos	Indice Amenaza
	X <sub>H1</sub>	X <sub>H2</sub>	X <sub>H3</sub>	X <sub>H4</sub>	
USAQUEN	5.81	5.84	4.37	5.26	6.27
CHAPINERO	6.60	4.94	4.37	5.70	6.77
SANTAFE	6.45	4.03	4.37	6.39	6.34
SAN CRISTOBAL	5.72	4.03	4.37	9.19	6.66
USME	7.38	4.03	4.37	5.14	6.87
TUNJUELITO	3.72	4.03	7.77	4.36	3.85
BOSA	3.72	4.03	7.77	4.36	3.85
CIUDAD KENNEDY	3.80	4.18	7.60	4.36	3.96
FONTIBON	3.42	7.04	4.37	4.36	3.96
ENGATIVA	3.16	7.04	4.37	4.36	3.68
SUBA	4.39	6.44	4.37	4.36	4.68
B/UNIDOS	4.68	7.04	4.37	4.36	5.37
TEUSAQUILLO	5.67	6.59	4.37	4.36	6.19
MARTIRES	5.82	4.03	4.37	4.36	4.81
ANTONIO NARIÑO	3.72	4.03	4.37	4.36	2.48
PUENTE ARANDA	4.45	5.54	4.88	4.36	4.41
CANDELARIA	5.59	4.03	4.37	4.36	4.55
RAFAEL URIBE	4.52	4.03	5.73	6.64	4.84
CIUDAD BOLIVAR	6.38	4.03	4.37	4.36	5.44

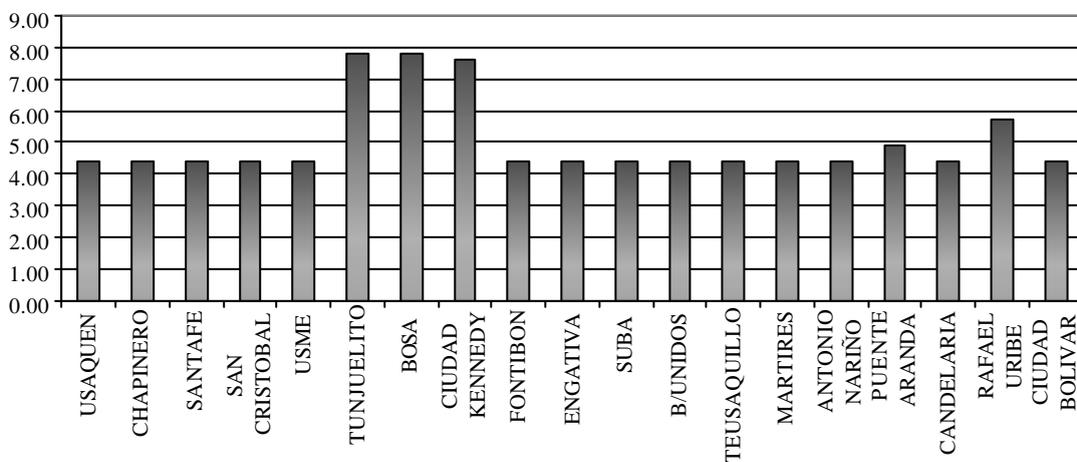
### ACELERACIÓN ESPECTRAL - $X_{H_1}$



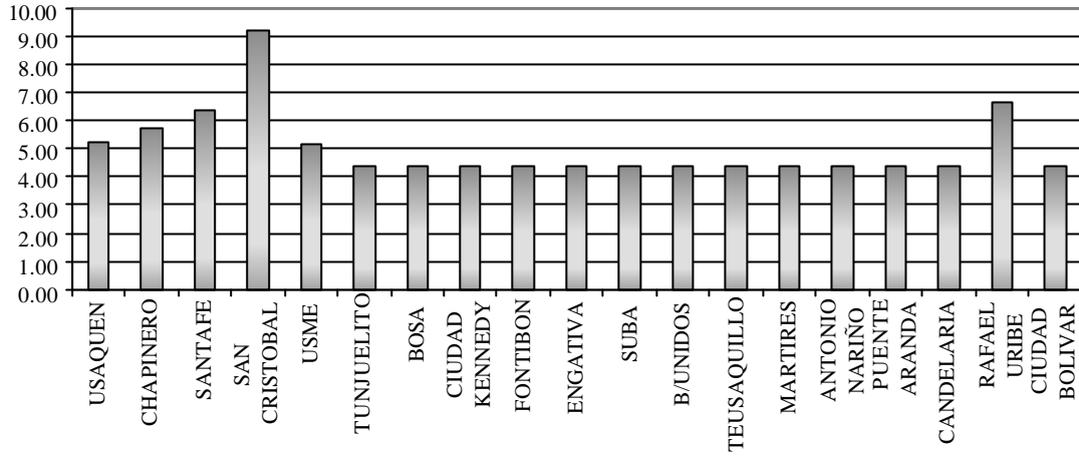
### AREA SUELOS BLANDOS - $X_{H_2}$



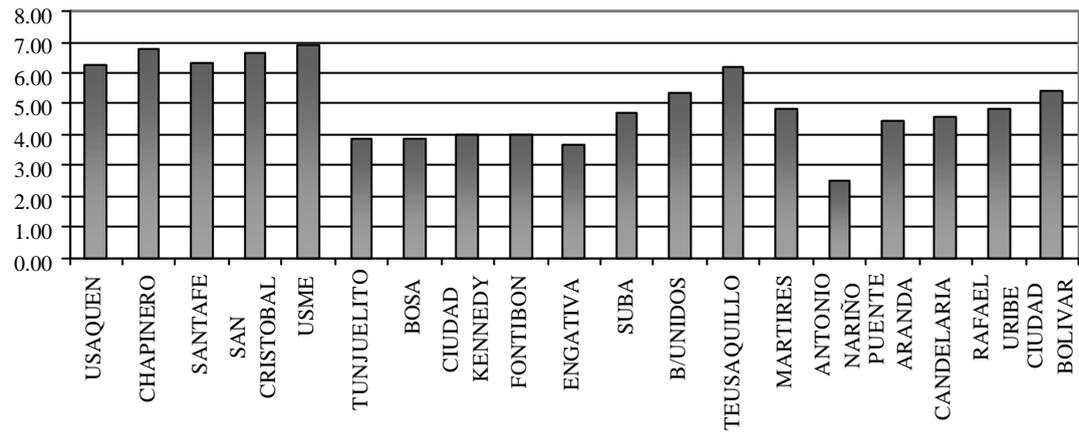
### AREA DE POTENCIAL LICUACIÓN - $X_{H_3}$



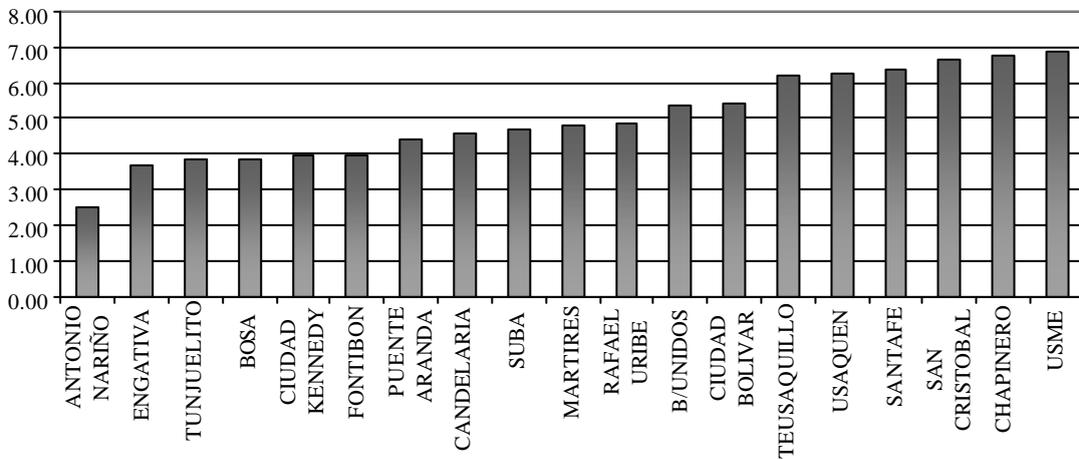
**AREA SUSCEPTIBLE A DESLIZAMIENTOS -  $X_{H_4}$**



**AMENAZA SISMICA DEL CONTEXTO -  $H_s$**



**AMENAZA SISMICA DEL CONTEXTO -  $H_s$**



**VALORES ABSOLUTOS DE EXPOSICIÓN DEL CONTEXTO**

<b>LOCALIDAD</b>	<b>Area localidad m<sup>2</sup></b>	<b>Población hab</b>	<b>Densidad poblacional hab/km<sup>2</sup></b>	<b>Area construida m<sup>2</sup></b>	<b>Area construida / Area localidad %</b>	<b>Area industrial m<sup>2</sup></b>	<b>Area industrial / Area localidad %</b>	<b>Area institucional m<sup>2</sup></b>
USAQUEN	32.635.050	379.097	11.616	29.802.928	0.91	1.749.996.50	0.05	1.068.546
CHAPINERO	14.295.420	160.936	11.258	16.669.448	1.17	0.00	0.00	40.322
SANTAFE	10.187.140	147.833	14.512	7.690.335	0.75	0.00	0.00	0
SANCRISTOBAL	16.016.470	386.365	24.123	11.983.095	0.75	0.00	0.00	233.870
USME	12.480.360	188.443	15.100	533.672	0.04	0.00	0.00	0
TUNJUELITO	10.969.910	222.010	20.238	6.708.209	0.61	3.508.057.75	0.32	850.805
BOSA	14.152.710	246.283	17.402	14.168.329	1.00	616.934.25	0.04	0
CIUDAD KENNEDY	42.680.750	610.939	14.314	27.333.133	0.64	2.983.865.00	0.07	657.256
FONTIBON	40.472.080	255.846	6.322	26.119.459	0.65	6.705.631.70	0.17	48.387
ENGATIVA	35.455.300	709.033	19.998	31.529.460	0.89	5.754.020.75	0.16	979.836
SUBA	66.638.540	471.215	7.071	37.226.775	0.56	1.891.125.25	0.03	2.661.285
BUNIDOS	11.888.540	226.733	19.072	13.409.492	1.13	552.418.75	0.05	1.358.868
TEUSAQUILLO	14.448.470	162.304	11.233	14.069.003	0.97	2.383.059.75	0.16	1.870.964
MARTIRES	6.504.098	129.790	19.955	10.904.433	1.68	0.00	0.00	217.741
ANTONIONARIÑO	4.854.732	147.456	30.374	7.223.241	1.49	0.00	0.00	0
PUENTE ARANDA	17.036.340	362.854	21.299	23.867.550	1.40	6.935.470.00	0.41	92.742
CANDELARIA	1.853.863	28.341	15.288	2.481.156	1.34	3.266.122.50	1.76	0
RAFAELURIBE	12.216.210	321.988	26.357	13.923.944	1.14	995.965.75	0.08	80.645
CIUDAD BOLIVAR	40.356.420	326.533	8.091	11.637.831	0.29	2.205.640.75	0.05	0

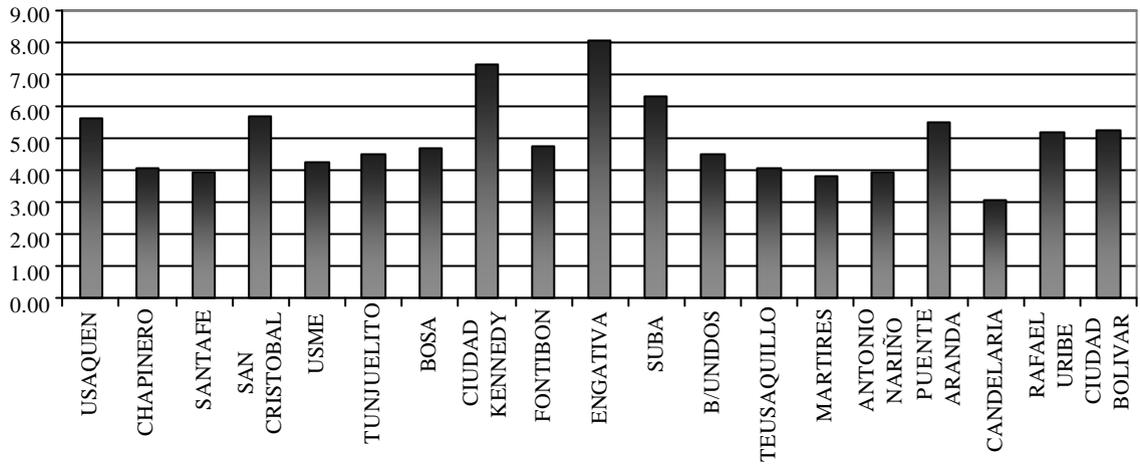
## EXPOSICIÓN DEL CONTEXTO

LOCALIDAD	Area localidad m <sup>2</sup>	Población hab	Población X <sup>E1</sup>	Densidad noblacional hab/km <sup>2</sup>	Densidad noblacional X <sup>E2</sup>	Area construida m <sup>2</sup>	Area construida / Area localidad %	Area construida X <sup>E3</sup>	Area industrial m <sup>2</sup>	Area industrial / Area localidad %	Area industrial X <sup>E4</sup>	Area institucional m <sup>2</sup>	Area institucional / Area localidad %
USAQUEN	32.635.050	379.097	5,66	11,616	4,07	29.802.928	0,91	6,65	1.749.996,50	0,05	4,82	1.068.546	0,03
CHAPINERO	14.295.420	160.936	4,07	11,258	4,00	16.669.448	1,17	5,06	0	0	3,87	40.322	0
SANTAFE	10.187.140	147.833	3,97	14,512	4,62	7.690.335	0,75	3,97	0	0	3,87	0	0
SAN CRISTOBAL	16.016.470	386.365	5,71	24,123	6,45	11.983.095	0,75	4,49	0	0	3,87	233.870	0,01
USME	12.480.360	188.443	4,27	15,100	4,73	533.672	0,04	3,10	0	0	3,87	0	0
TUNIUELITO	10.969.910	222.010	4,51	20,238	5,71	6.708.209	0,61	3,85	3.508.057,75	0,32	5,78	850.805	0,08
BOSA	14.152.710	246.283	4,69	17,402	5,17	14.168.329	1,00	4,76	616.934,25	0,04	4,20	0	0,00
CIUDAD KENNEDY	42.680.750	610.939	7,36	14,314	4,58	27.333.133	0,64	6,35	2.983.865	0,07	5,49	657.256	0,02
FONTIBON	40.472.080	255.846	4,76	6,322	3,05	26.119.459	0,65	6,21	6.705.631,70	0,17	7,52	48.387	0
ENGATIVA	35.455.300	709.033	8,07	19,998	5,67	31.529.460	0,89	6,86	5.754.020,75	0,16	7,00	979.836	0,03
SUBA	66.638.540	471.215	6,34	7,071	3,20	37.226.775	0,56	7,56	1.891.125,25	0,03	4,90	2.661.285	0,04
BUNIDOS	11.888.540	226.733	4,55	19,072	5,49	13.409.492	1,13	4,66	552.418,75	0,05	4,17	1.358.868	0,11
TEUSAQUILLO	14.448.470	162.304	4,08	11,233	3,99	14.069.003	0,97	4,74	2.383.059,75	0,16	5,16	1.870.964	0,13
MARTIRES	6.504.098	129.790	3,84	19,955	5,66	10.904.433	1,68	4,36	0	0	3,87	217.741	0,03
ANTONIO NARIÑO	4.854.732	147.456	3,97	30,374	7,65	7.223.241	1,49	3,91	0	0	3,87	0	0
PUENTE ARANDA	17.036.340	362.854	5,54	21,299	5,92	23.867.550	1,40	5,93	6.935.470	0,41	7,65	92.742	0,01
CANDEJARIA	1.853.863	28.341	3,10	15,288	4,77	2.481.156	1,34	3,34	3.266.122,50	1,76	5,65	0	0
RAFAEL URIBE	12.216.210	321.988	5,24	26,357	6,88	13.923.944	1,14	4,73	995.965,75	0,08	4,41	80.645	0,01
CIUDAD BOLIVAR	40.356.420	326.533	5,28	8,091	3,39	11.637.831	0,29	4,45	2.205.640,75	0,05	5,07	0	0

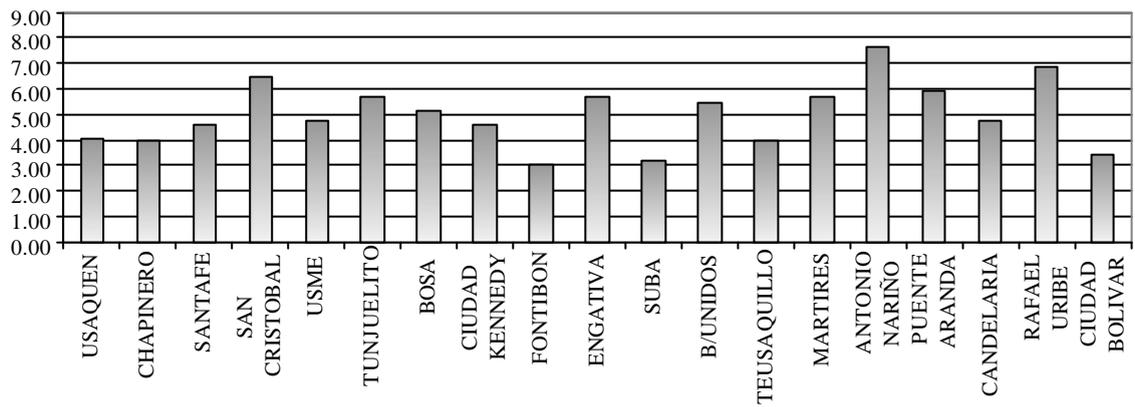
### INDICADORES DE EXPOSICIÓN DEL CONTEXTO

LOCALIDAD	POBLACION	DENSIDAD POBLACIONAL	AREA CONSTRUIDA	AREA INDUSTRIAL	AREA INSTITUCIONAL	EXPOSICIÓN
	XE <sub>1</sub>	XE <sub>2</sub>	XE <sub>3</sub>	XE <sub>4</sub>	XE <sub>5</sub>	
USAQUEN	5.66	4.07	6.65	4.82	5.88	5.88
CHAPINERO	4.07	4.00	5.06	3.87	4.19	3.93
SANTAFE	3.97	4.62	3.97	3.87	4.12	3.58
SAN CRISTOBAL	5.71	6.45	4.49	3.87	4.50	5.21
USME	4.27	4.73	3.10	3.87	4.12	3.36
TUNJUELITO	4.51	5.71	3.85	5.78	5.52	4.75
BOSA	4.69	5.17	4.76	4.20	4.12	4.48
CIUDAD KENNEDY	7.36	4.58	6.35	5.49	5.20	6.65
FONTIBON	4.76	3.05	6.21	7.52	4.20	5.18
ENGATIVA	8.07	5.67	6.86	7.00	5.73	7.92
SUBA	6.34	3.20	7.56	4.90	8.50	6.85
B/UNIDOS	4.55	5.49	4.66	4.17	6.36	4.90
TEUSAQUILLO	4.08	3.99	4.74	5.16	7.20	4.64
MARTIRES	3.84	5.66	4.36	3.87	4.48	4.08
ANTONIO NARIÑO	3.97	7.65	3.91	3.87	4.12	4.46
PUENTE ARANDA	5.54	5.92	5.93	7.65	4.27	6.30
CANDELARIA	3.10	4.77	3.34	5.65	4.12	3.31
RAFAEL URIBE	5.24	6.88	4.73	4.41	4.25	5.29
CIUDAD BOLIVAR	5.28	3.39	4.45	5.07	4.12	4.24

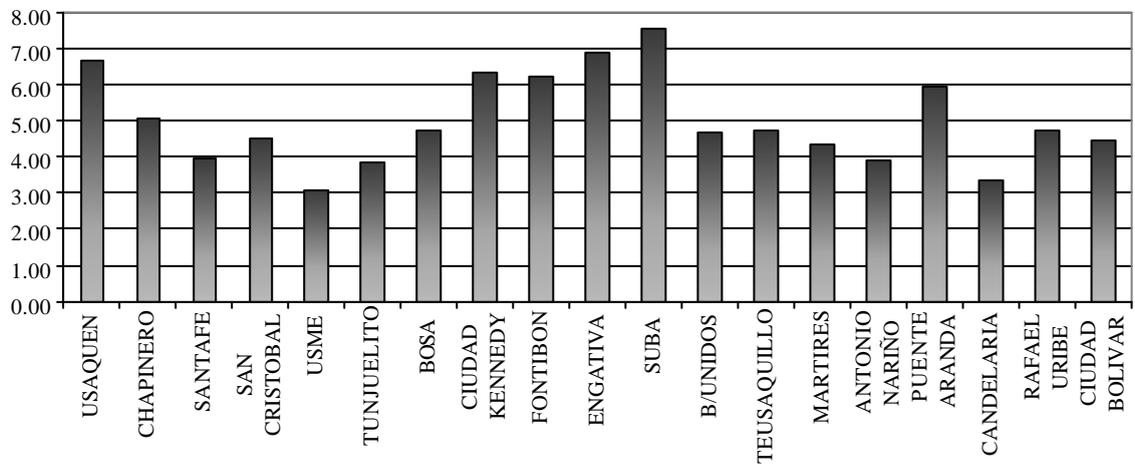
**POBLACION -  $X_{E_1}$**



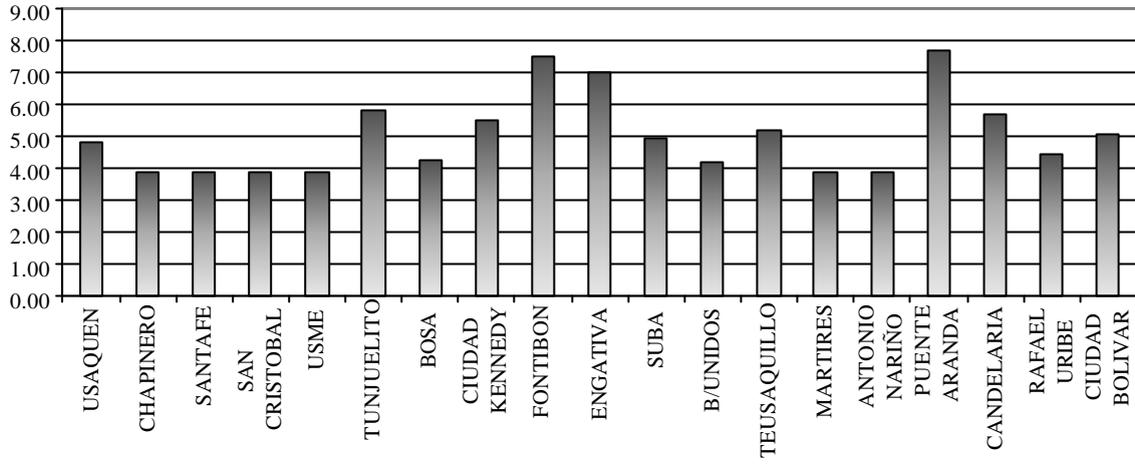
**DENSIDAD POBLACIONAL -  $X_{E_2}$**



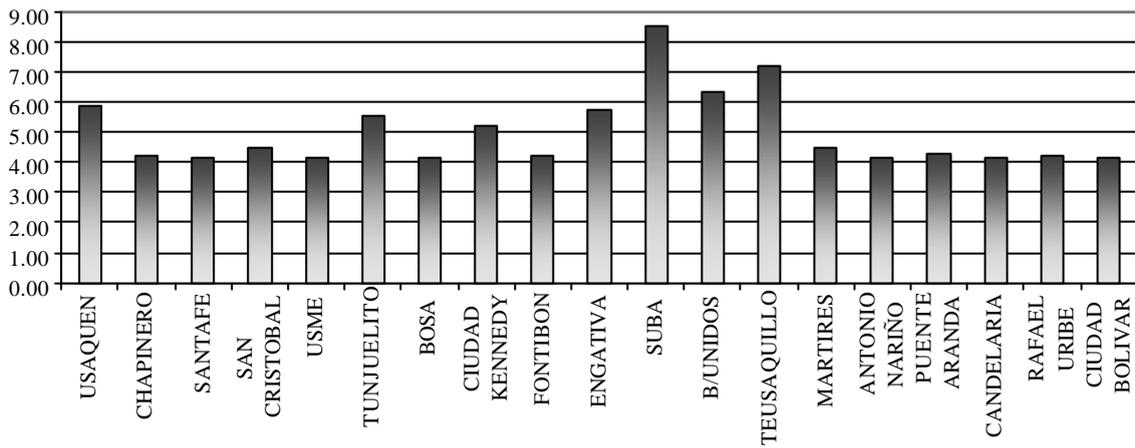
**AREA CONSTRUIDA -  $X_{E_3}$**



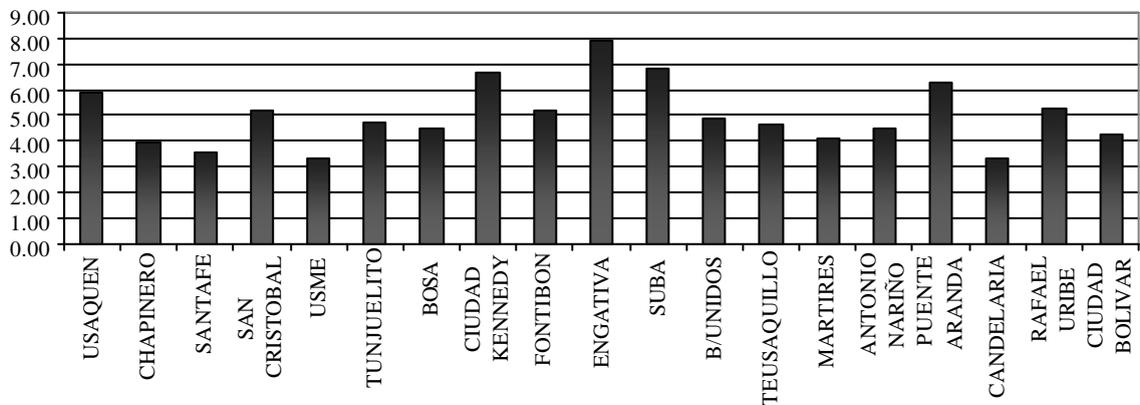
### AREA INDUSTRIAL - $X_{E_4}$



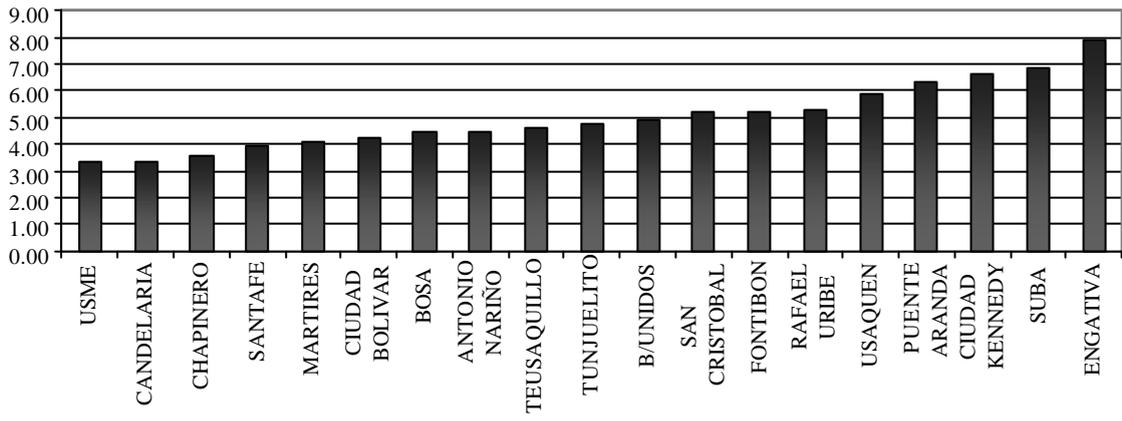
### AREA INSTITUCIONAL - $X_{E_5}$



### EXPOSICION - EV



### EXPOSICION - Ev



VALORES ABSOLUTOS DE FRAGILIDAD SOCIAL

LOCALIDAD	Area de localidad m <sup>2</sup>	Area barrios sin legalizar - Marginales m <sup>2</sup>	Area barrios sin legalizar / Area total	Area estratos socioeconomicos 1 y 2 m <sup>2</sup>	Area estratos 1 y 2 / Area total	Mortalidad tasa por 10000 hab.	Delitos por 1000 hab	Indice de disparidad local
USAQUEN	32,635,050	3,567,600	0.1093	6574192.2	0.2014	1260	4.33	0.3267
CHAPINERO	14,295,420	1,233,200	0.0863	1070726.6	0.0749	1786	12.82	0
SANTAFE	10,187,140	1,587,100	0.1558	2186753.72	0.2147	1082	10.34	0.3622
SAN CRISTOBAL	16,016,470	4,972,200	0.3104	4868161.967	0.3039	1511	2.16	0.816
USME	12,480,360	7,030,700	0.5633	11395381.77	0.9131	421	0.74	1
TUNJUELITO	10,969,910	2,094,600	0.1909	6005843	0.5475	715	3.22	0.4485
BOSA	14,152,710	8,162,810	0.5768	7065813.3	0.4993	664	2.58	0.5148
CIUDAD KENNEDY	42,680,750	6,931,800	0.1624	14451035.83	0.3386	1433	3.8	0.4397
FONIBON	40,472,080	1,221,200	0.0302	12522008.9	0.3094	1000	2.75	0.3852
ENGATIVA	35,455,300	3,740,900	0.1055	5375760	0.1516	2789	2.78	0.4092
SUBA	66,638,540	8,397,200	0.1260	13340776	0.2002	1880	3.16	0.4148
BUNIDOS	11,888,540	7,700	0.0006	0	0	950	5.09	0.2899
TEUSAQUILLO	14,448,470	747,000	0.0517	1654657	0.1145	0	8.88	0.0497
MARTIRES	6,504,098	1,100	0.0002	1304014	0.2005	570	8.31	0.3309
ANTONIO NARIÑO	4,854,732	164,700	0.0339	376820.4	0.0776	534	5.13	0.1978
PUENTE ARANDA	17,036,340	170,500	0.0100	823197.9	0.0483	1147	4.48	0.3731
CANDELARIA	1,853,863	0	0	1437487	0.7754	0	9.04	0.3395
RAFAEL URIBE	12,216,210	1,703,700	0.1395	4800131.967	0.3929	927	2.88	0.5033
CIUDAD BOLIVAR	40,356,420	1,341,500	0.0332	15514476.83	0.3844	970	1.62	0.9196

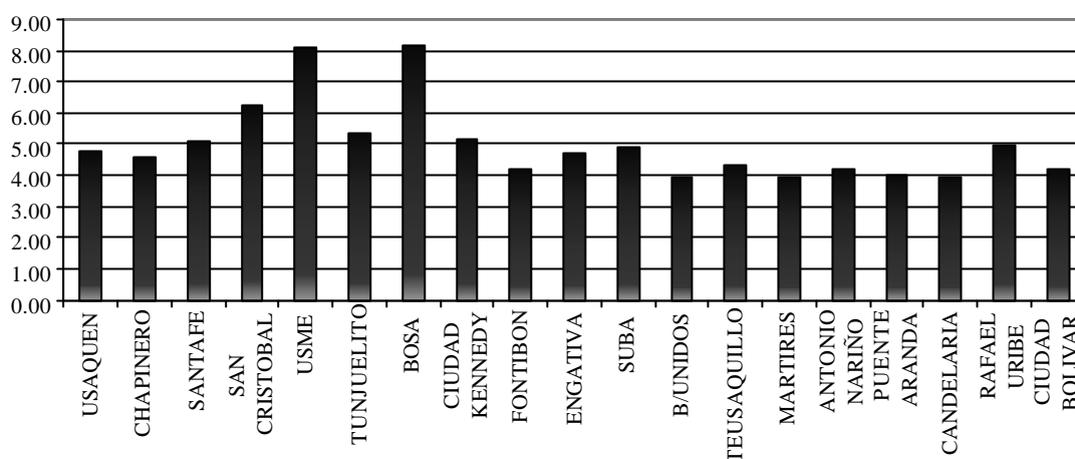
## FRAGILIDAD SOCIAL

LOCALIDAD	Area de localidad m <sup>2</sup>	Area de barrios sin legalizar m <sup>2</sup>	Area barrios sin legalizar / Area total	Indicador Area barrios sin legalizar XF1	Area estratos socioeconomicos 1 y 2 m <sup>2</sup>	Area estratos 1 y 2 / Area total	Indicador Area estratos 1 y 2 XF2	Mortalidad tasa por 10000 hab.	Indicador Tasa de Mortalidad XF3	Delitos por 1000 hab	Indicador Tasa de Delincuencia XF4	Indice de disparidad local	Indicador de Disparidad Local XF5
USAQUEN	32,635,050	3,567,600	0.1093	4.77	6,574,192.2	0.2014	4.48	1260	5.42	4.33	4.77	0.3267	4.51
CHAPINERO	14,295,420	1,233,200	0.0863	4.60	1,070,726.6	0.0749	3.83	1786	6.41	12.82	7.96	0	2.90
SANTAFE	10,187,140	1,587,100	0.1558	5.11	2,186,753.72	0.2147	4.55	1082	5.09	10.34	7.03	0.3622	4.68
SAN CRISTOBAL	16,016,470	4,972,200	0.3104	6.24	4,868,161.97	0.3039	5.01	1511	5.89	2.16	3.95	0.816	6.91
USME	12,480,360	7,030,700	0.5633	8.09	11,395,381.77	0.9131	8.13	421	3.86	0.74	3.41	1	7.81
TUNJUELITO	10,969,910	2,094,600	0.1909	5.36	6,005,843	0.5475	6.26	715	4.40	3.22	4.35	0.4485	5.10
BOSA	14,152,710	8,162,810	0.5768	8.19	7,065,813.3	0.4993	6.01	664	4.31	2.58	4.11	0.5148	5.43
CIUDAD KENNEDY	42,680,750	6,931,800	0.1624	5.15	14,451,035.83	0.3386	5.19	1433	5.75	3.8	4.57	0.4397	5.06
FONTIBON	40,472,080	1,221,200	0.0302	4.19	12,522,008.9	0.3094	5.04	1000	4.94	2.75	4.17	0.3852	4.79
ENGATIVA	35,455,300	3,740,900	0.1055	4.74	5,375,760	0.1516	4.23	2789	8.28	2.78	4.18	0.4092	4.91
SUBA	66,638,540	8,397,200	0.1260	4.89	13,340,776	0.2002	4.47	1880	6.58	3.16	4.33	0.4148	4.94
B/UNIDOS	11,888,540	7,700	0.0006	3.97	0	0.0000	3.45	950	4.84	5.09	5.05	0.2899	4.33
TEUSAQUILLO	14,448,470	747,000	0.0517	4.34	1,654,657	0.1145	4.03	0	3.07	8.88	6.48	0.0497	3.15
MARTIRES	6,504,098	1,100	0.0002	3.97	1,304,014	0.2005	4.48	570	4.13	8.31	6.26	0.3309	4.53
ANTONIO NARIÑO	4,854,732	164,700	0.0339	4.21	376,820.4	0.0776	3.85	534	4.07	5.13	5.07	0.1978	3.87
PUENTE ARANDA	17,036,340	170,500	0.0100	4.04	823,197.9	0.0483	3.69	1147	5.21	4.48	4.82	0.3731	4.73
CANDELARIA	1,853,863	0	0.0000	3.97	1,437,487	0.7754	7.43	0	3.07	9.04	6.54	0.3395	4.57
RAFAEL URIBE	12,216,210	1,703,700	0.1395	4.99	4,800,131.97	0.3929	5.46	927	4.80	2.88	4.22	0.5033	5.37
CIUDAD BOLIVAR	40,356,420	1,341,500	0.0332	4.21	15,514,476.83	0.3844	5.42	970	4.88	1.62	3.75	0.9196	7.41

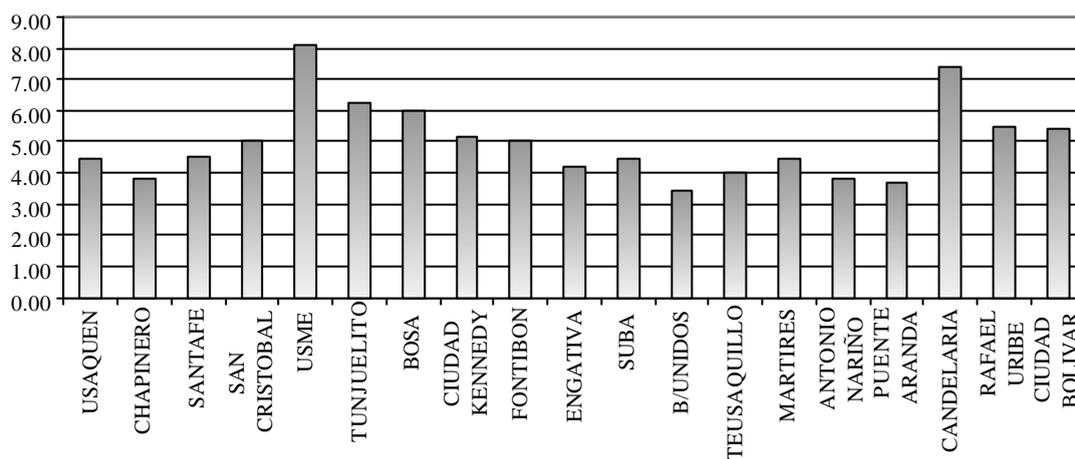
### INDICADORES DE FRAGILIDAD SOCIAL

LOCALIDAD	Area Barrios Marginales XF <sup>1</sup>	Area Estratos Socioeconómicos 1 v 2 XF <sup>2</sup>	Tasa Mortalidad XF <sup>3</sup>	Tasa Delincuencia XF <sup>4</sup>	Indice de Disparidad Social XF <sup>5</sup>	Indice de Fragilidad Social
LUSAQUEN	4.77	4.48	5.42	4.77	4.51	4.47
CHAPINERO	4.60	3.83	6.41	7.96	2.90	3.84
SANTAFE	5.11	4.55	5.09	7.03	4.68	5.02
SAN CRISTOBAL	6.24	5.01	5.89	3.95	6.91	6.61
USME	8.09	8.13	3.86	3.41	7.81	8.39
TUNIUELITO	5.36	6.26	4.40	4.35	5.10	5.39
BOSA	8.19	6.01	4.31	4.11	5.43	6.38
CIUDAD KENNEDY	5.15	5.19	5.75	4.57	5.06	5.20
FONTIBON	4.19	5.04	4.94	4.17	4.79	4.47
ENGATIVA	4.74	4.23	8.28	4.18	4.91	5.00
SUBA	4.89	4.47	6.58	4.33	4.94	4.90
B/UNIDOS	3.97	3.45	4.84	5.05	4.33	3.71
TEUSAQUILLO	4.34	4.03	3.07	6.48	3.15	3.20
MARTIRES	3.97	4.48	4.13	6.26	4.53	4.25
ANTONIO NARIÑO	4.21	3.85	4.07	5.07	3.87	3.50
PUENTE ARANDA	4.04	3.69	5.21	4.82	4.73	4.10
CANDELARIA	3.97	7.43	3.07	6.54	4.57	5.11
RAFAEL URIBE	4.99	5.46	4.80	4.22	5.37	5.23
CIUDAD BOLIVAR	4.21	5.42	4.88	3.75	7.41	6.22

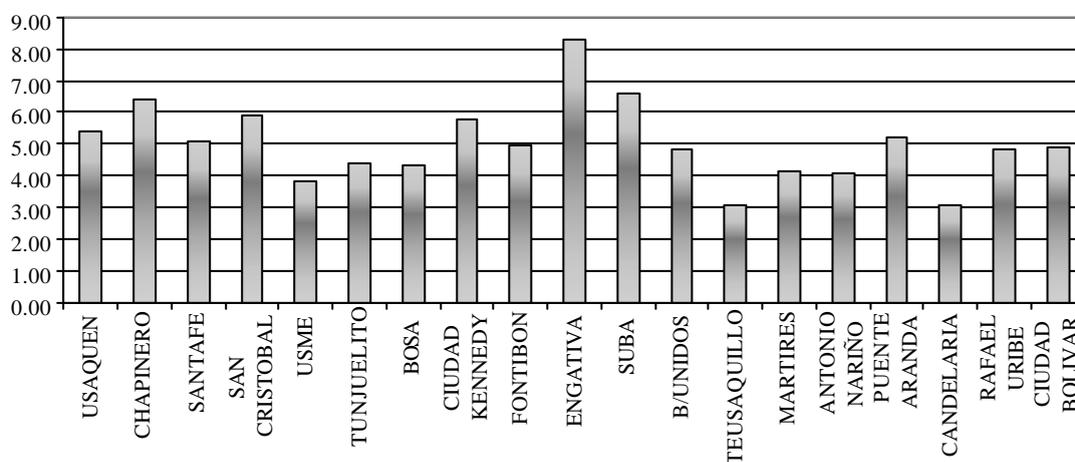
### AREA BARRIOS MARGINALES - $X_{F_1}$



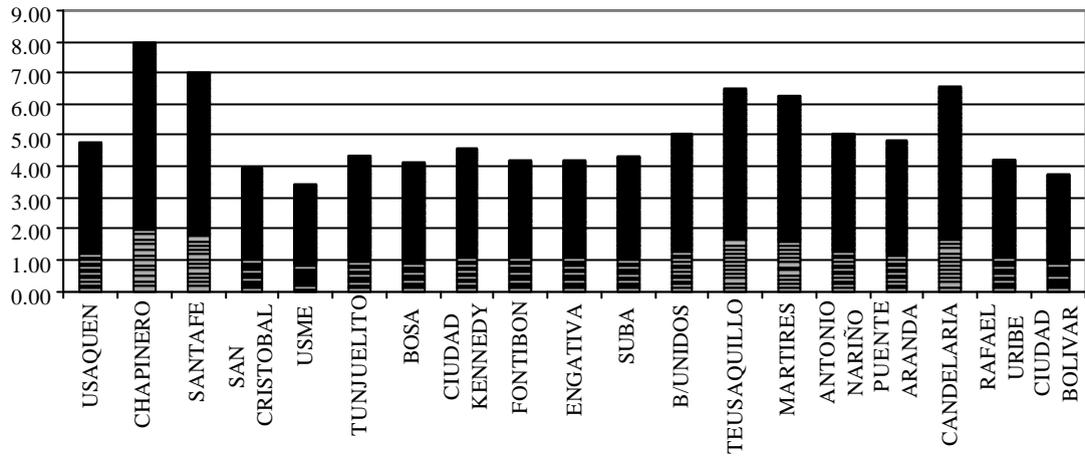
### AREA ESTRATOS SOCIOECONÓMICOS 1 y 2 - $X_{F_2}$



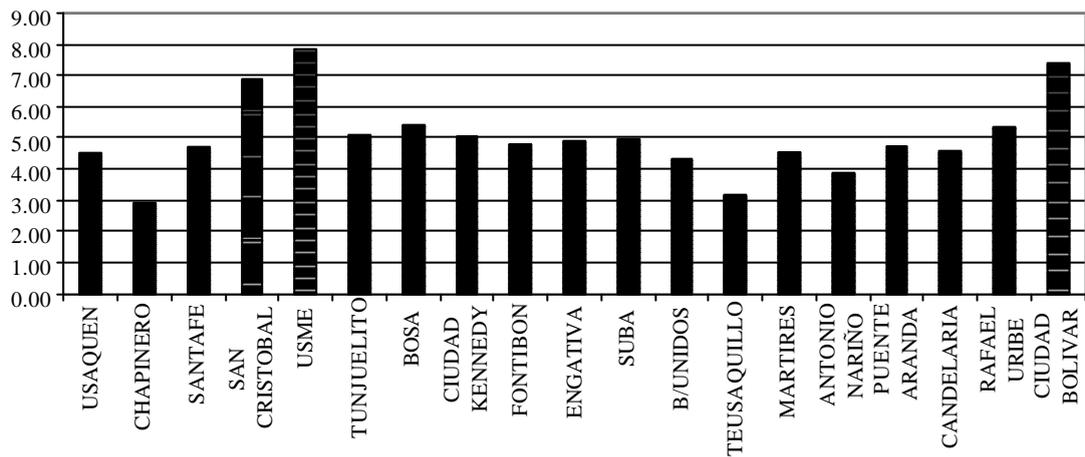
### TASA MORTALIDAD - $X_{F_3}$



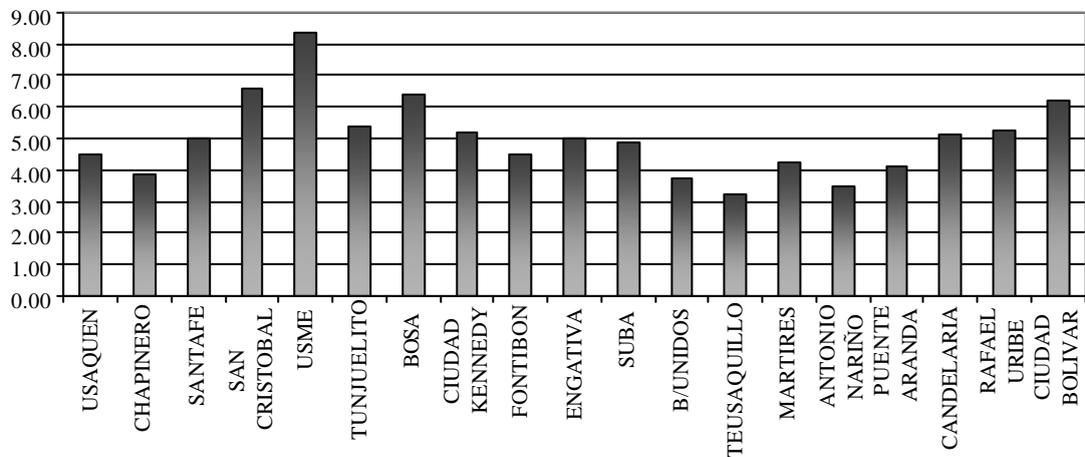
**TASA DELINCUENCIA -  $X_{F_4}$**



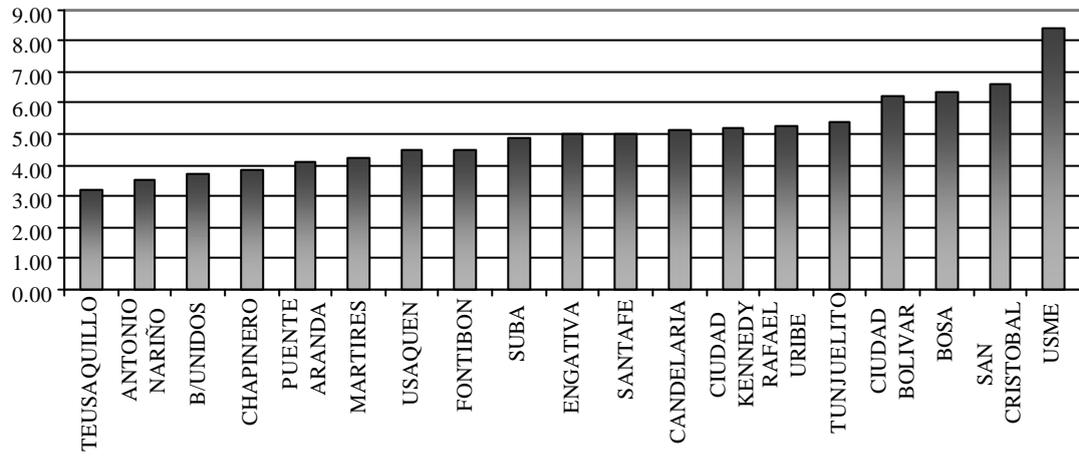
**INDICE DE DISPARIDAD SOCIAL -  $X_{F_5}$**



**FRAGILIDAD SOCIAL -  $F_v$**



### FRAGILIDAD SOCIAL - Fv



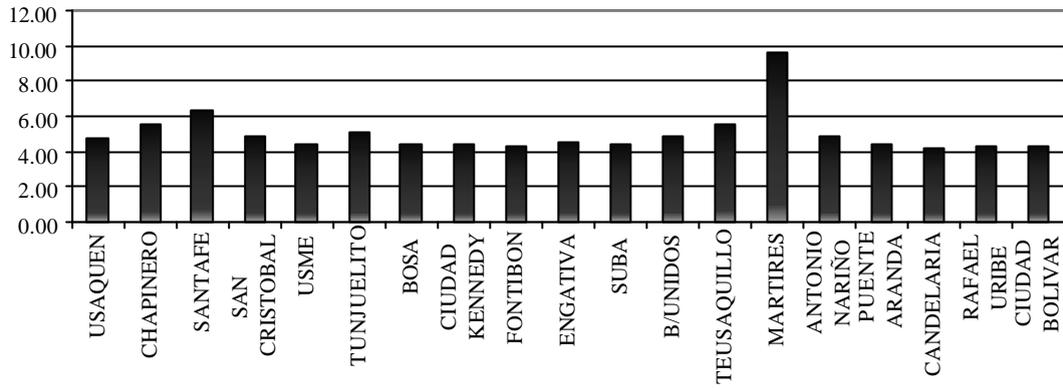
VALORES ABSOLUTOS DE RESILIENCIA

LOCALIDAD	Area por localidad m <sup>2</sup>	Camas en los Servicios de Urgencias Nº	Camas S.U. / Area total	Recurso humano en salud Nº	Recurso humano / area total	Espacios publicos para atencion masiva m2	Espacios públicos / area total	Socorritas mas Bomberos	Personal socorro / area total	Nivel de desarrollo de la localidad (1 - 4)	Operatividad comité de emergencias (0 - 2)
USAQUIEN	32.635.050	68	2.084E-06	1072	3.285E-05	1.619.465	0.0496	32	9.8054E-07	4	2
CHAPINERO	14.295.420	79	5.526E-06	1430	0.00010003	184.678	0.0129	52	3.6375E-06	4	1
SANTAFE	10.187.140	93	9.129E-06	2120	0.00020811	32.494	0.0032	50	4.9081E-06	3	2
SANCRISTOBAL	16.016.470	40	2.497E-06	737	4.602E-05	236.709	0.0148	150	9.3654E-06	1	2
USME	12.480.360	12	9.615E-07	43	3.445E-06	0	0	138	1.1057E-05	1	2
TUNIUELITO	10.969.910	39	3.555E-06	282	2.571E-05	1.073.047	0.0978	100	9.1158E-06	2	2
BOSA	14.152.710	12	8.479E-07	70	4.946E-06	508.560	0.0359	193	1.3637E-05	1	1
CIUDAD KENNEDY	42.680.750	42	9.841E-07	490	1.148E-05	863.138	0.0202	211	4.9437E-06	2	1
FONTIBON	40.472.080	7	1.730E-07	95	2.347E-06	440.000	0.0109	99	2.4461E-06	3	2
ENGATIVA	35.455.300	48	1.354E-06	469	1.323E-05	16.248	0.0005	239	6.7409E-06	2	2
SUBA	66.638.540	41	6.153E-07	723	1.085E-05	1.712.485	0.0257	198	2.9713E-06	2	2
BUNIDOS	11.888.540	35	2.944E-06	754	6.342E-05	1.391.431	0.1170	140	1.1776E-05	4	1
TEUSAQUILLO	14.448.470	84	5.814E-06	318	2.201E-05	1.627.479	0.1126	25	1.7303E-06	4	2
MARTIRES	6.504.098	148	2.275E-05	1341	0.00020618	176.000	0.0271	330	5.0737E-05	3	1
ANTONIO NARIÑO	4.854.732	14	2.884E-06	80	1.648E-05	63.700	0.0131	131	2.6984E-05	4	1
PUENTE ARANDA	17.036.340	14	8.218E-07	157	9.216E-06	50.317	0.0030	54	3.1697E-06	3	2
CANDELARIA	1.853.863	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
RAFAEL URIBE	12.216.210	6	4.912E-07	352	2.881E-05	16.248	0.00133	119	9.7412E-06	1	2
CIUDAD BOLIVAR	40.356.420	23	5.699E-07	103	2.552E-06	0	0	192	4.7576E-06	1	2

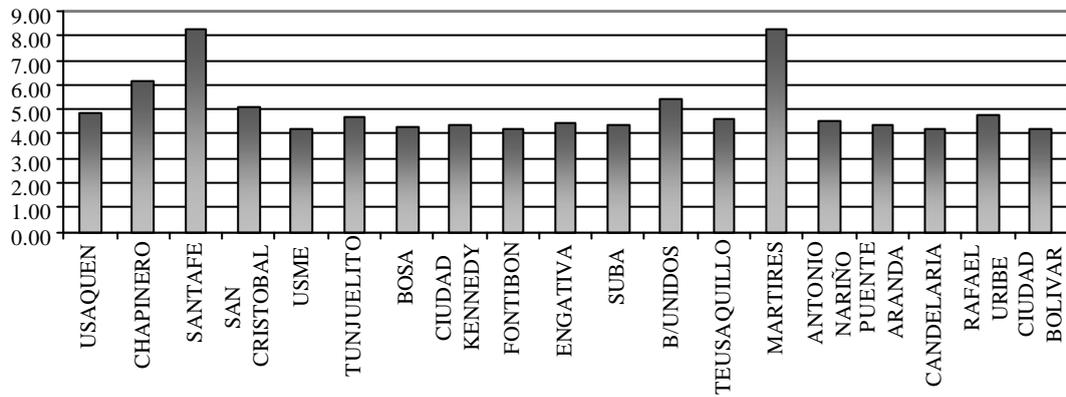
## RESILIENCIA

<b>LOCALIDAD</b>	Indice de n° Camas en los servicios de urgencias	Indice de Recursos humano en salud	Indice de espacios públicos para atención masiva	Indice n° de personal de socorro	Indice del nivel de desarrollo de la localidad	Indice de operatividad comité de emergencias	Falta de Resiliencia
	XR1	XR2	XR3	XR4	XR5	XR6	
USAQUEN	4.6940	4.8084	5.6806	4.1052	6.5714	5.87	4.24
CHAPINERO	5.5137	6.1408	4.4856	4.3874	6.5714	3.81	4.63
SANTAFE	6.3715	8.2840	4.1689	4.5223	5.5051	5.87	3.37
SAN CRISTOBAL	4.7925	5.0695	4.5462	4.9958	3.3725	5.87	5.46
USME	4.4269	4.2253	4.0650	5.1755	3.3725	5.87	5.90
TUNJUELITO	5.0444	4.6668	7.2496	4.9693	4.4388	5.87	4.42
BOSA	4.3998	4.2551	5.2349	5.4495	3.3725	3.81	6.36
CIUDAD KENNEDY	4.4322	4.3847	4.7234	4.5261	4.4388	3.81	6.24
FONTIBON	4.2391	4.2035	4.4190	4.2608	5.5051	5.87	5.25
ENGATIVA	4.5203	4.4193	4.0799	4.7170	4.4388	5.87	5.49
SUBA	4.3444	4.3721	4.9017	4.3166	4.4388	5.87	5.46
B/UNIDOS	4.8989	5.4147	7.8754	5.2518	6.5714	3.81	3.99
TEUSAQUILLO	5.5821	4.5935	7.7322	4.1848	6.5714	5.87	3.51
MARTIRES	9.6157	8.2458	4.9460	9.3901	5.5051	3.81	1.83
ANTONIO NARIÑO	4.8845	4.4838	4.4922	6.8671	6.5714	3.81	4.71
PUENTE ARANDA	4.3936	4.3397	4.1612	4.3377	5.5051	5.87	5.21
CANDELARIA	4.1979	4.1570	4.0650	4.0010	5.5051	1.75	7.06
RAFAEL URIBE	4.3149	4.7284	4.1083	5.0357	3.3725	5.87	5.80
CIUDAD BOLIVAR	4.3336	4.2076	4.0650	4.5063	3.3725	5.87	6.09

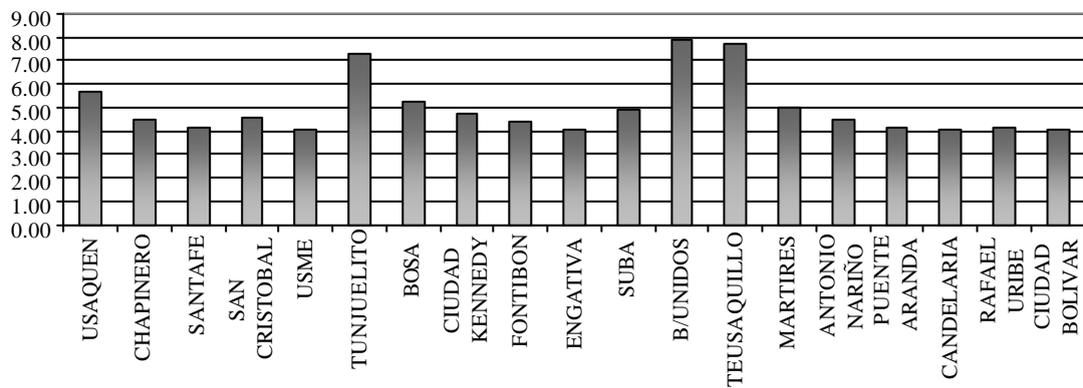
**N° DE CAMAS EN SERVICIOS DE URGENCIAS -  $X_{R_1}$**



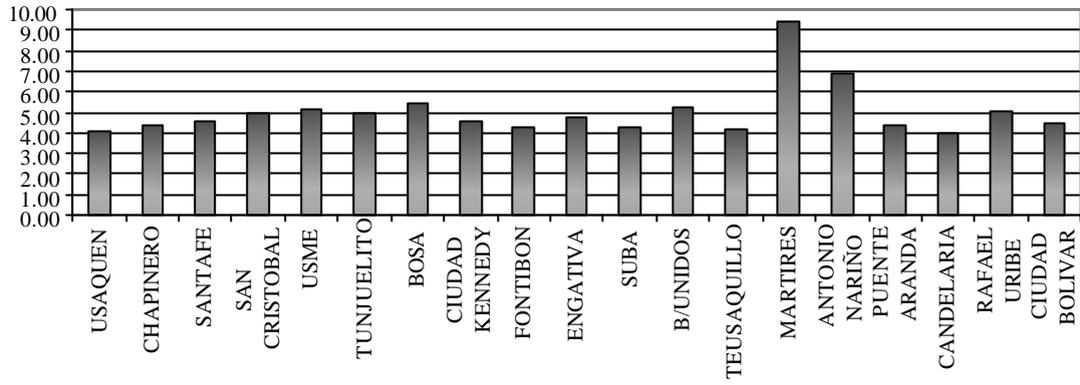
**RECURSO HUMANO EN SALUD -  $X_{R_2}$**



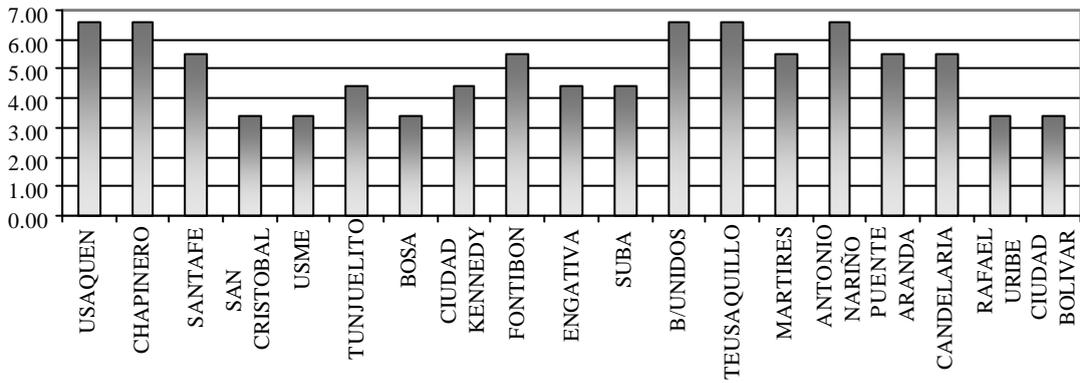
**ESPACIO PUBLICO DISPONIBLE -  $X_{R_3}$**



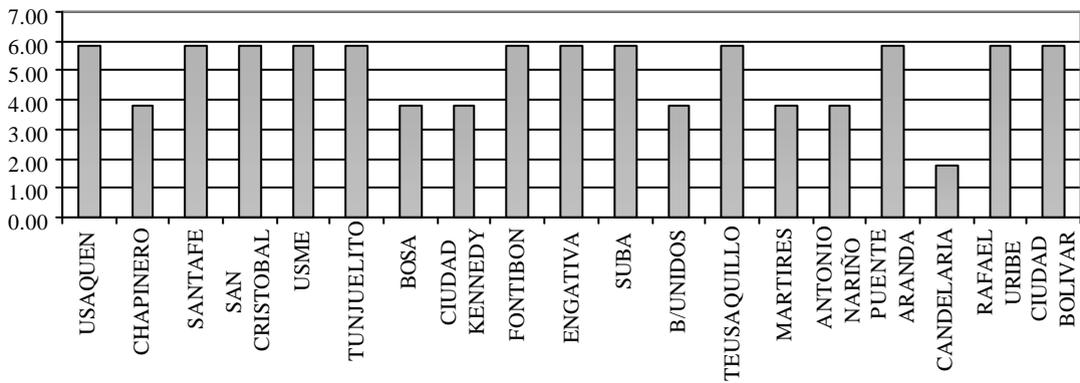
**PERSONAL DE SOCORRO - X<sub>R4</sub>**

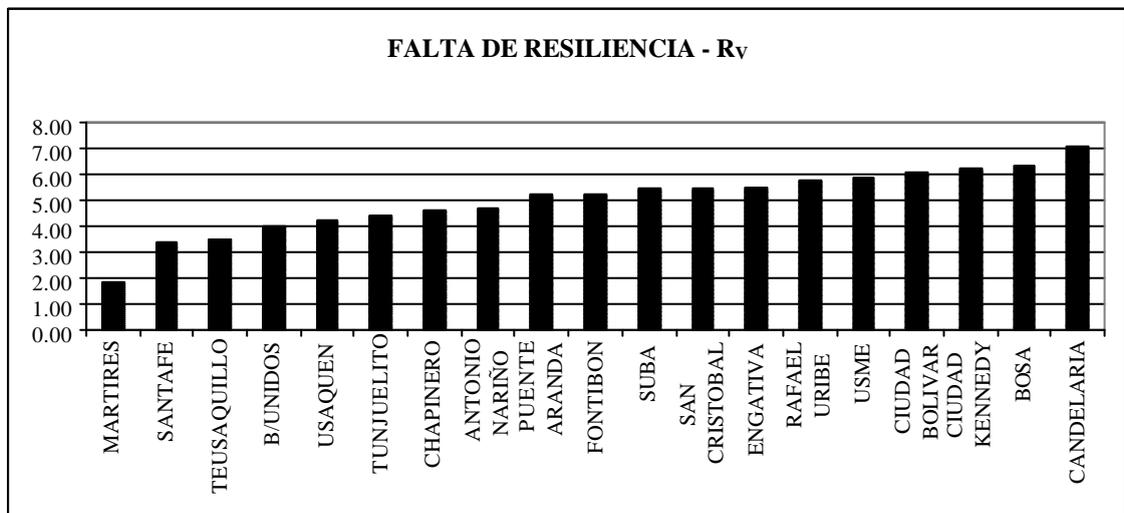
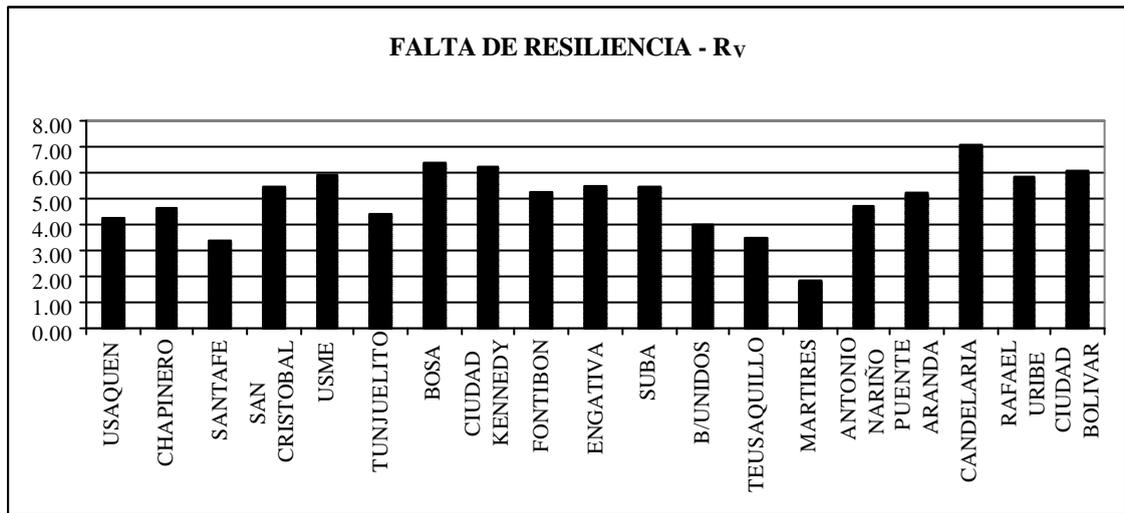


**NIVEL DE DESARROLLO DE LA LOCALIDAD - X<sub>R5</sub>**

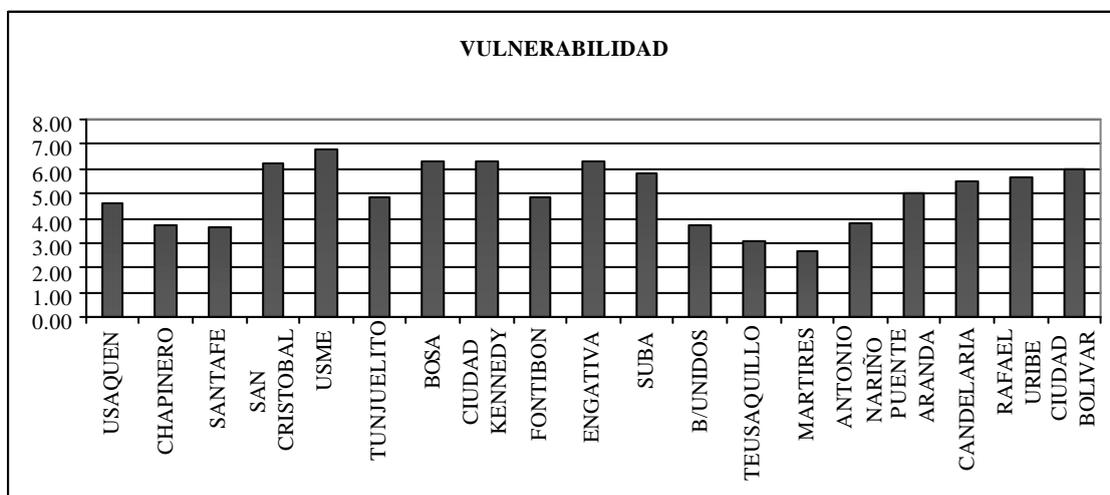
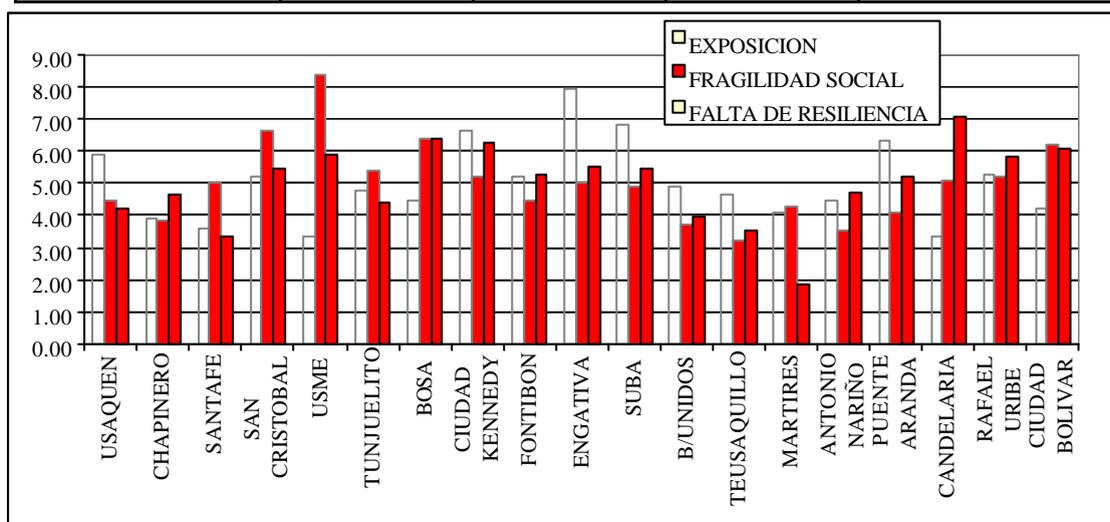


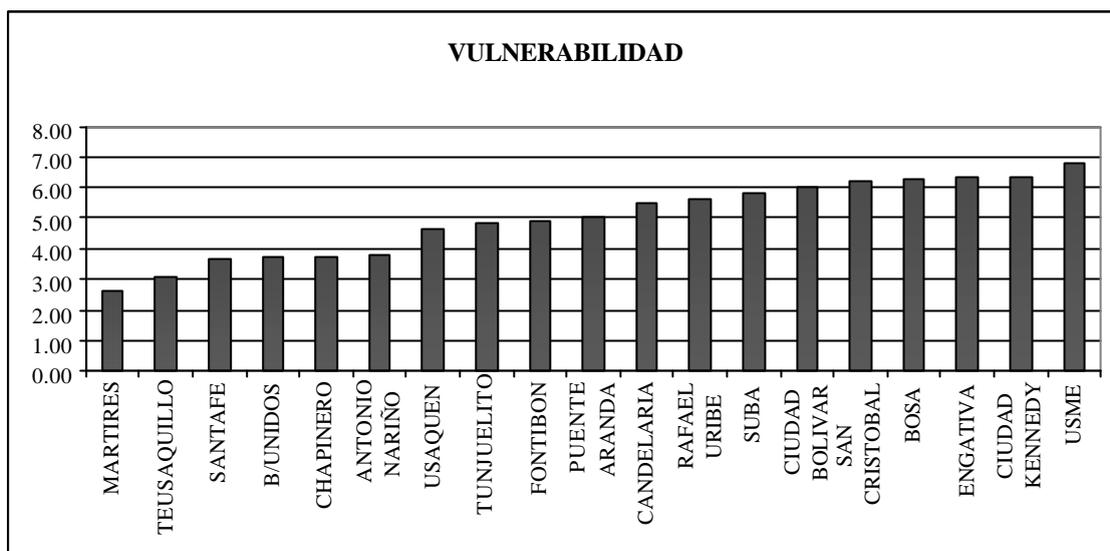
**OPERATIVIDAD EN EMERGENCIAS - X<sub>R6</sub>**



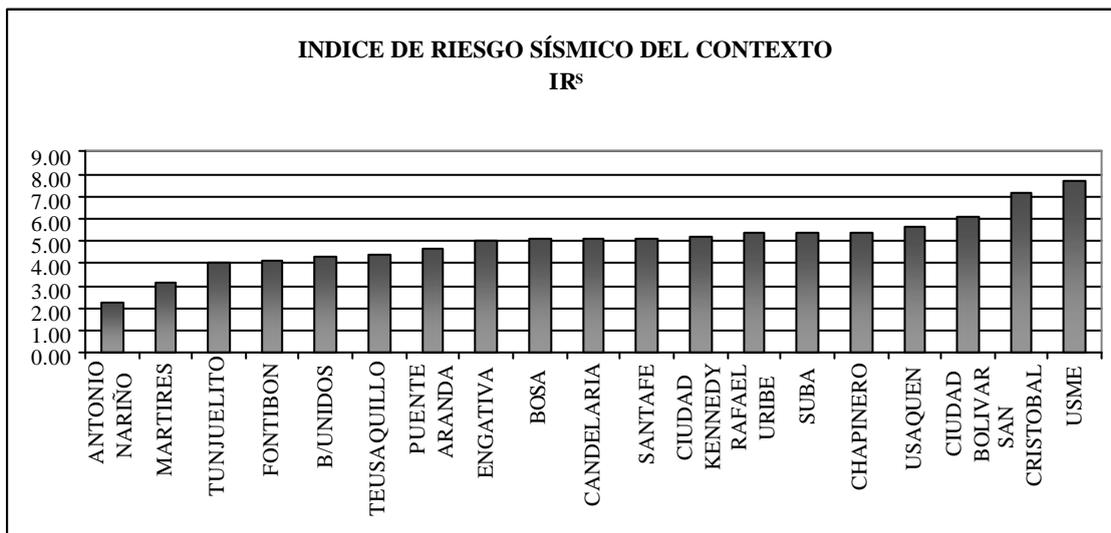
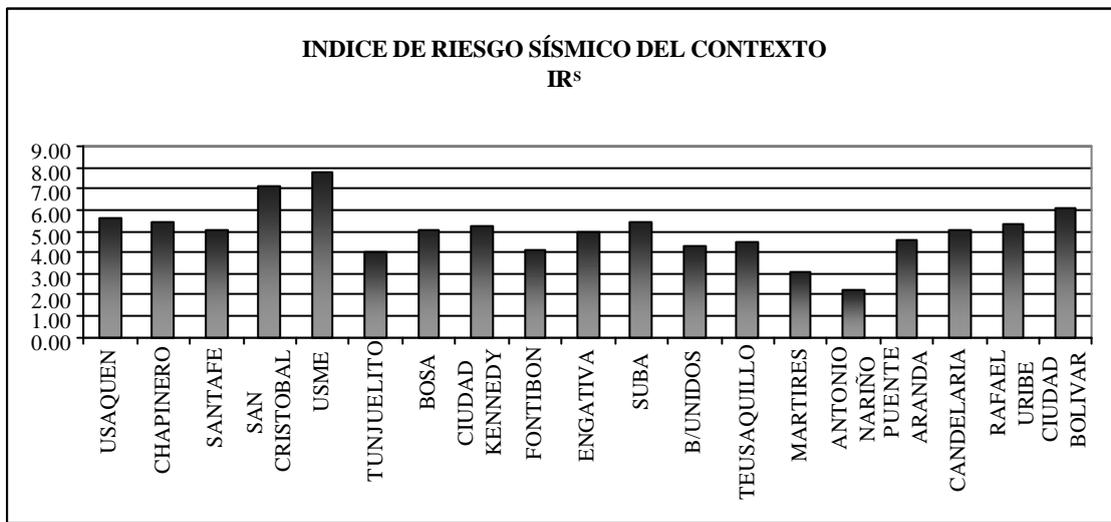
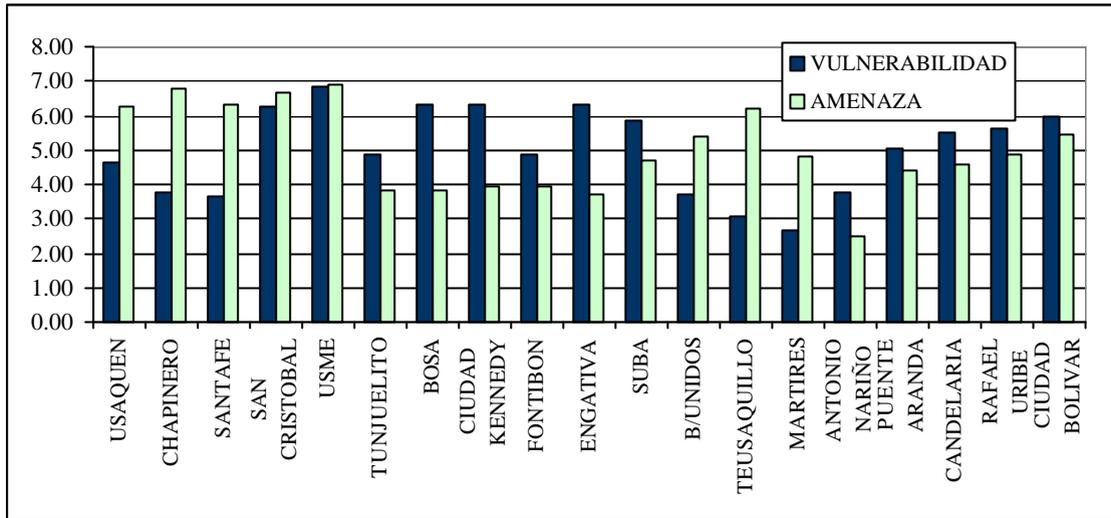


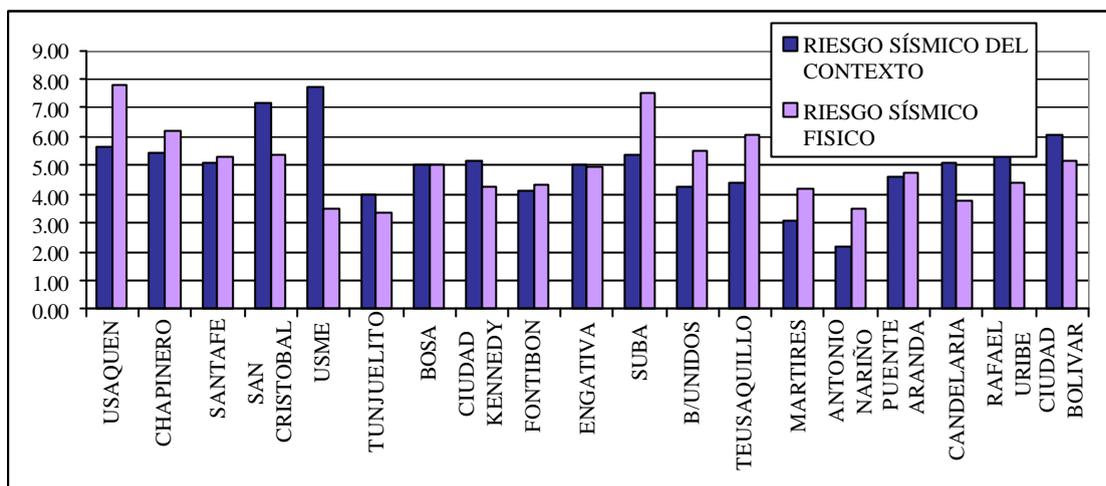
LOCALIDAD	EXPOSICION	FRAGILIDAD SOCIAL	FALTA DE RESILIENCIA	VULNERABILIDAD
	Ev	Fv	Rv	Vs
USAQUEN	5.88	4.47	4.24	4.62
CHAPINERO	3.93	3.84	4.63	3.76
SANTAFE	3.58	5.02	3.37	3.68
SAN CRISTOBAL	5.21	6.61	5.46	6.23
USME	3.36	8.39	5.90	6.82
TUNJUELITO	4.75	5.39	4.42	4.84
BOSA	4.48	6.38	6.36	6.29
CIUDAD KENNEDY	6.65	5.20	6.24	6.33
FONTIBON	5.18	4.47	5.25	4.89
ENGATIVA	7.92	5.00	5.49	6.30
SUBA	6.85	4.90	5.46	5.84
B/UNIDOS	4.90	3.71	3.99	3.71
TEUSAQUILLO	4.64	3.20	3.51	3.08
MARTIRES	4.08	4.25	1.83	2.64
ANTONIO NARIÑO	4.46	3.50	4.71	3.79
PUENTE ARANDA	6.30	4.10	5.21	5.06
CANDELARIA	3.31	5.11	7.06	5.49
RAFAEL URIBE	5.29	5.23	5.80	5.64
CIUDAD BOLIVAR	4.24	6.22	6.09	5.98



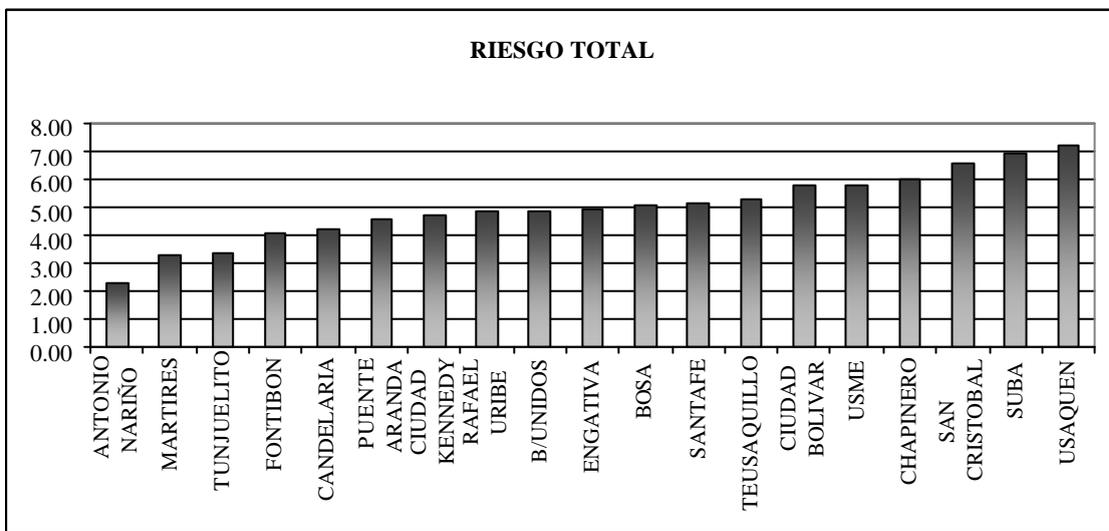
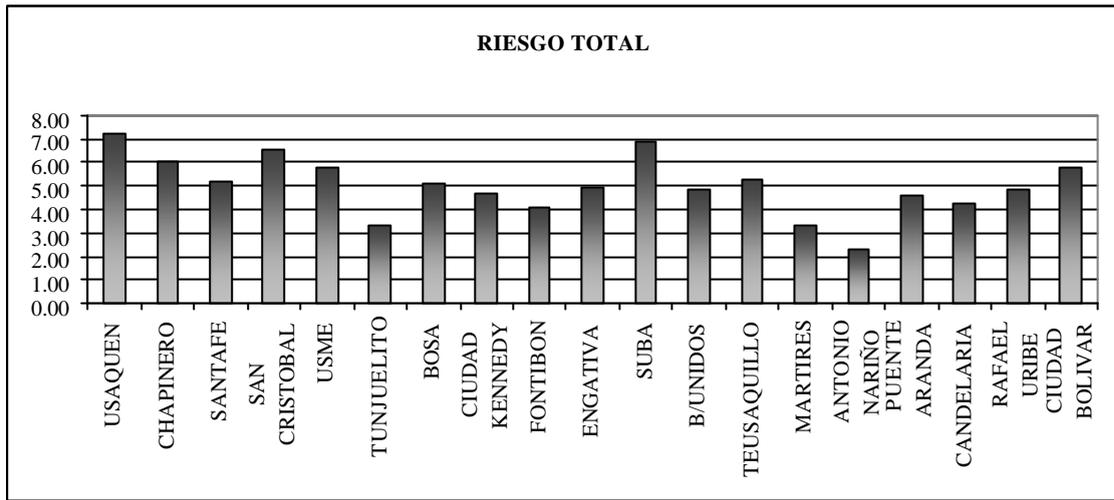


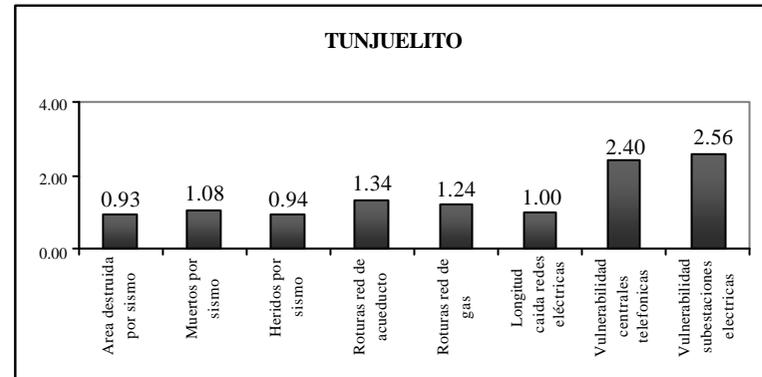
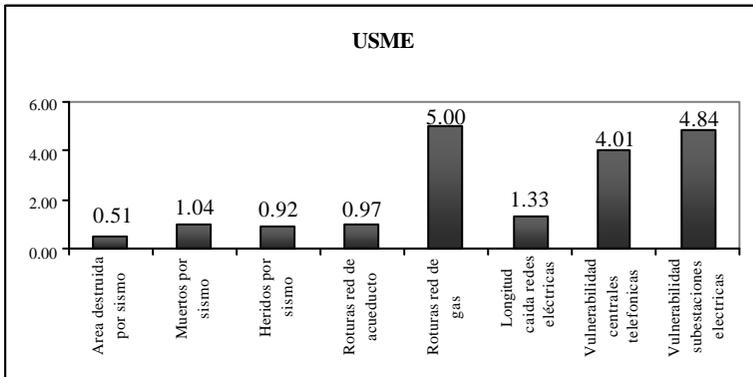
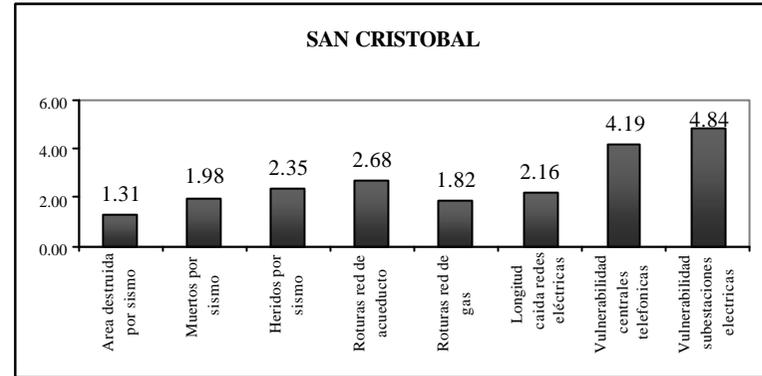
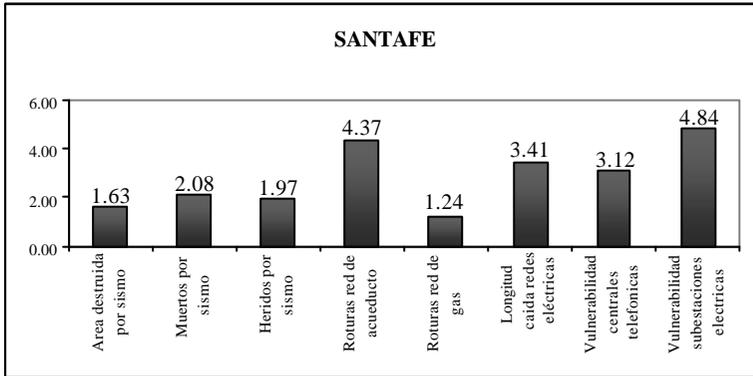
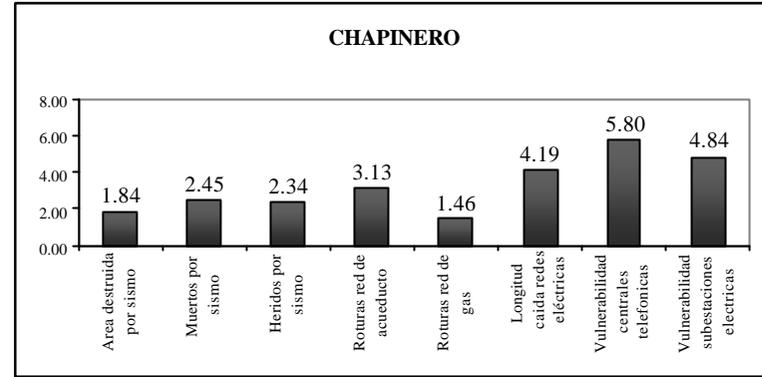
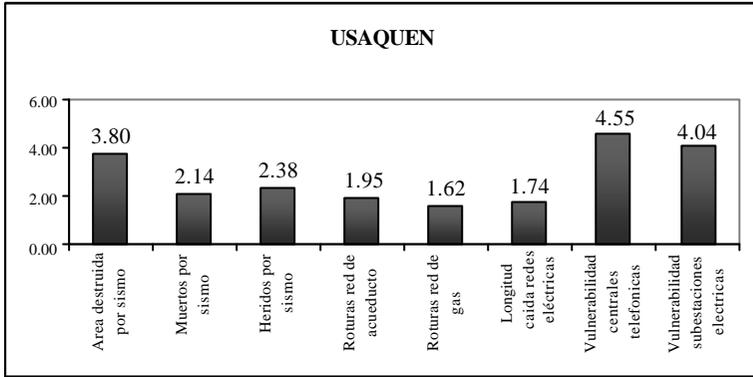
LOCALIDAD	VULNERABILIDAD	AMENAZA	RIESGO SÍSMICO DEL CONTEXTO
	V <sub>s</sub>	H <sub>s</sub>	I <sub>R</sub>
USAQUEN	4.62	6.27	5.66
CHAPINERO	3.76	6.77	5.39
SANTAFE	3.68	6.34	5.01
SAN CRISTOBAL	6.23	6.66	7.15
USME	6.82	6.87	7.75
TUNJUELITO	4.84	3.85	4.03
BOSA	6.29	3.85	5.11
CIUDAD KENNEDY	6.33	3.96	5.22
FONTIBON	4.89	3.96	4.14
ENGATIVA	6.30	3.68	4.99
SUBA	5.84	4.68	5.39
B/UNIDOS	3.71	5.37	4.32
TEUSAQUILLO	3.08	6.19	4.46
MARTIRES	2.64	4.81	3.10
ANTONIO NARIÑO	3.79	2.48	2.22
PUENTE ARANDA	5.06	4.41	4.60
CANDELARIA	5.49	4.55	5.04
RAFAEL URIBE	5.64	4.84	5.36
CIUDAD BOLIVAR	5.98	5.44	6.06

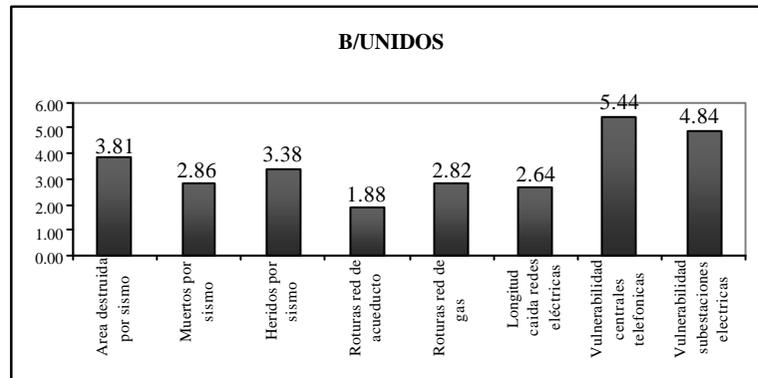
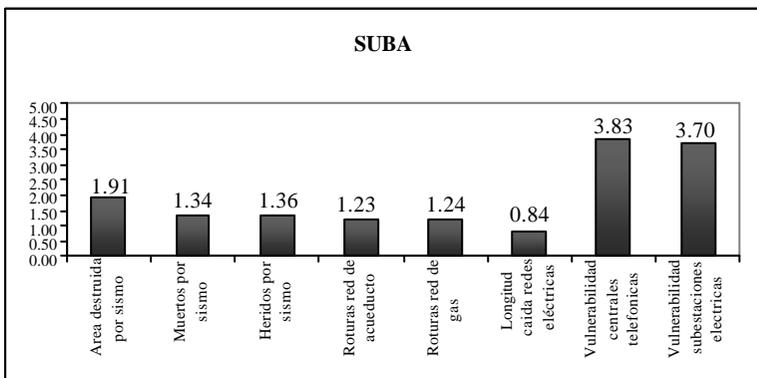
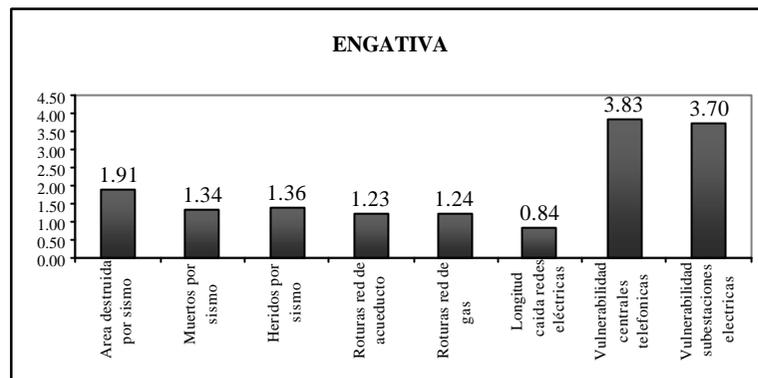
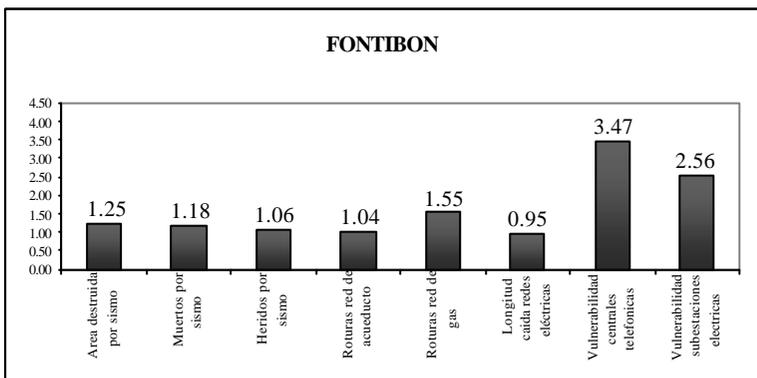
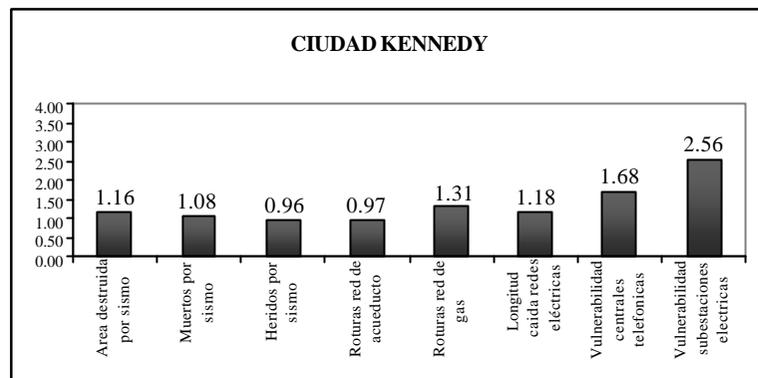
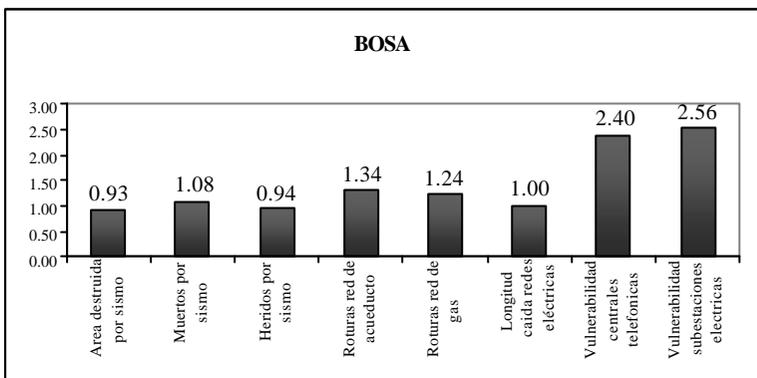


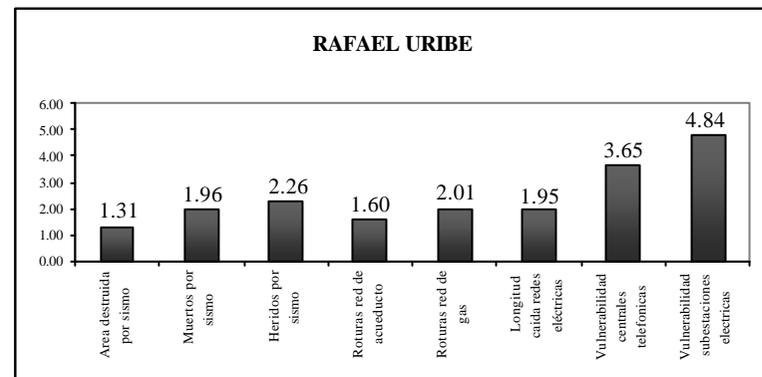
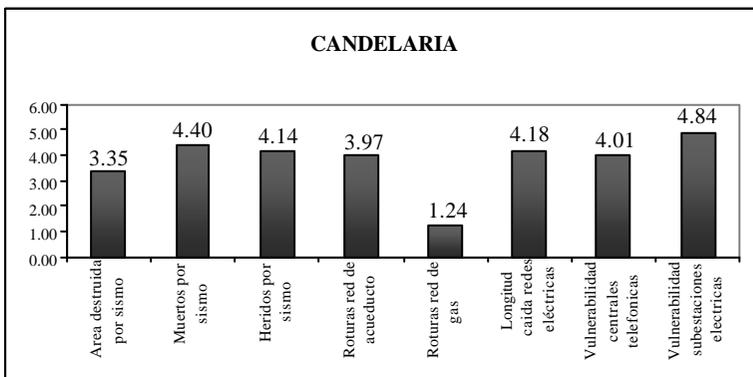
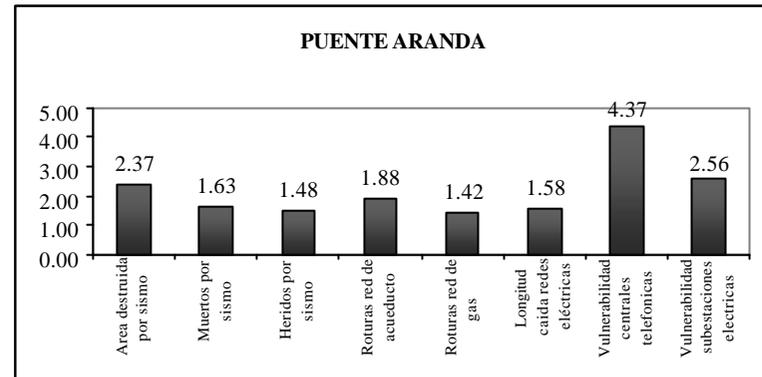
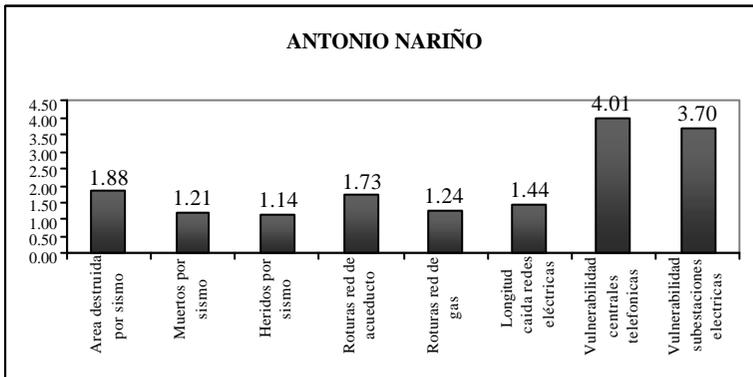
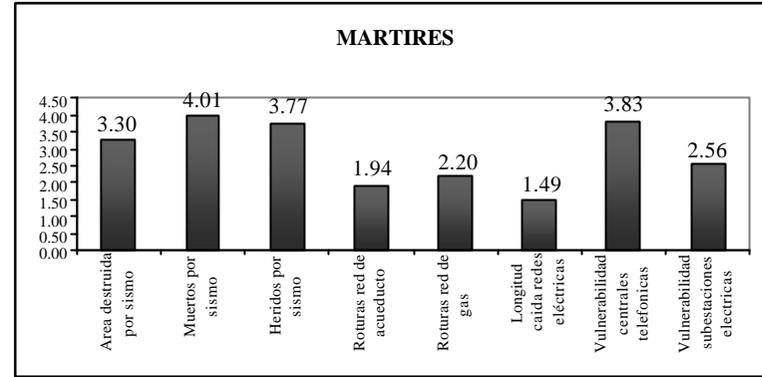
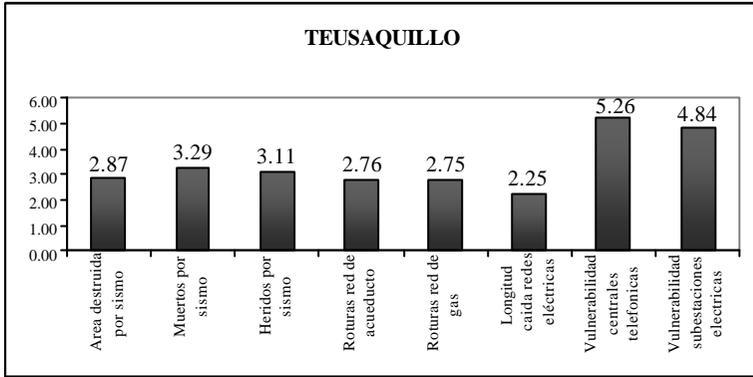


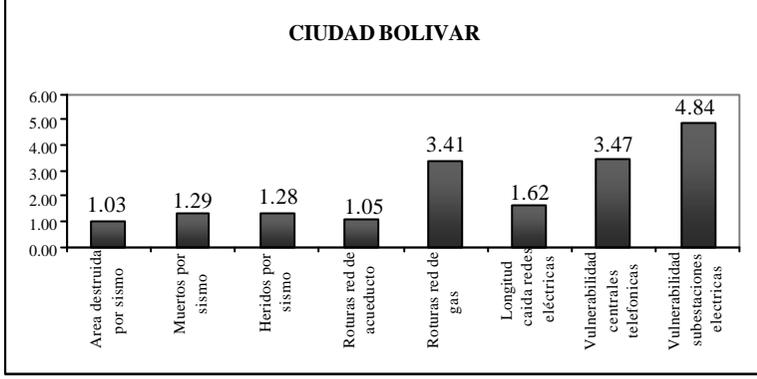
LOCALIDAD	RIESGO SÍSMICO DEL CONTEXTO	RIESGO SÍSMICO FÍSICO	RIESGO TOTAL
USAQUEN	5.66	7.82	7.21
CHAPINERO	5.39	6.22	6.02
SANTAFE	5.01	5.25	5.17
SAN CRISTOBAL	7.15	5.32	6.57
USME	7.75	3.52	5.80
TUNJUELITO	4.03	3.38	3.35
BOSA	5.11	5.00	5.07
CIUDAD KENNEDY	5.22	4.33	4.71
FONTIBON	4.14	4.37	4.06
ENGATIVA	4.99	4.93	4.95
SUBA	5.39	7.62	6.91
B/UNIDOS	4.32	5.47	4.87
TEUSAQUILLO	4.46	5.98	5.28
MARTIRES	3.10	4.22	3.30
ANTONIO NARIÑO	2.22	3.50	2.29
PUENTE ARANDA	4.60	4.76	4.59
CANDELARIA	5.04	3.77	4.24
RAFAEL URIBE	5.36	4.38	4.83
CIUDAD BOLIVAR	6.06	5.17	5.78

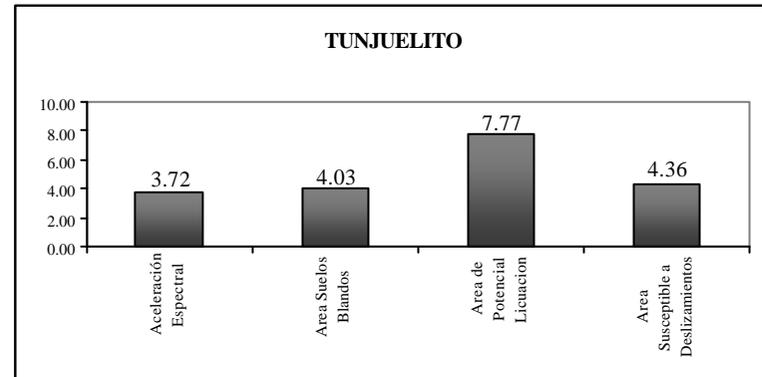
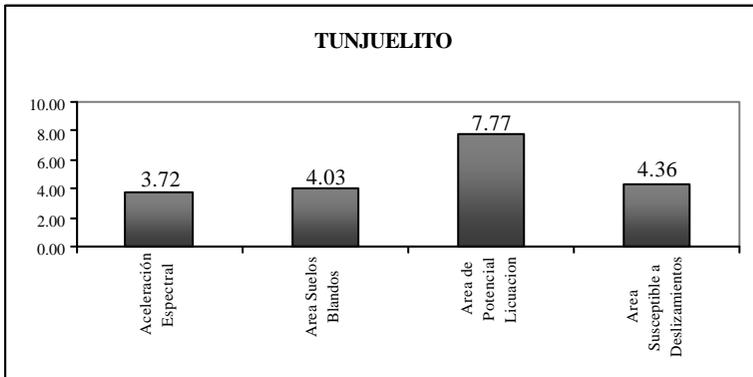
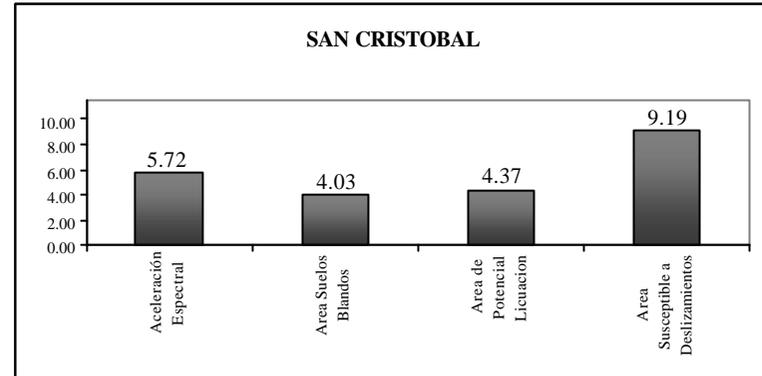
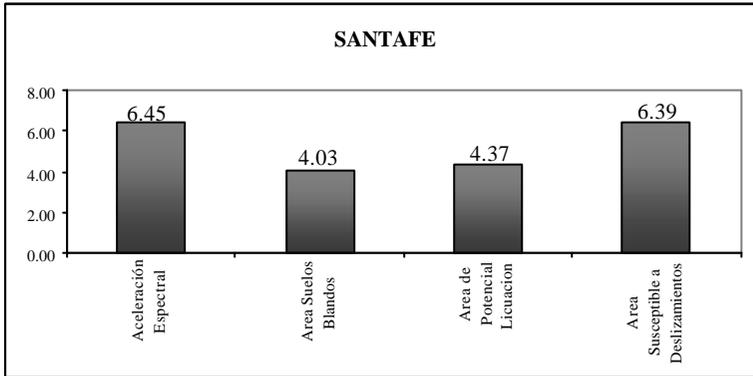
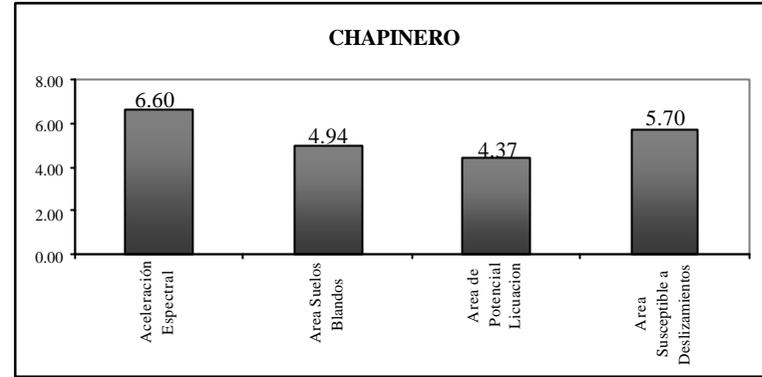
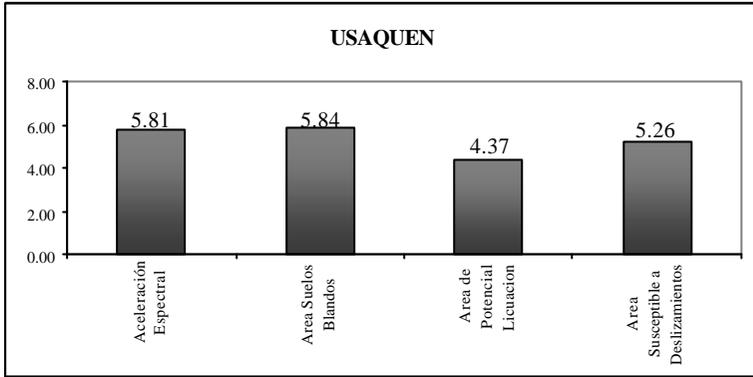


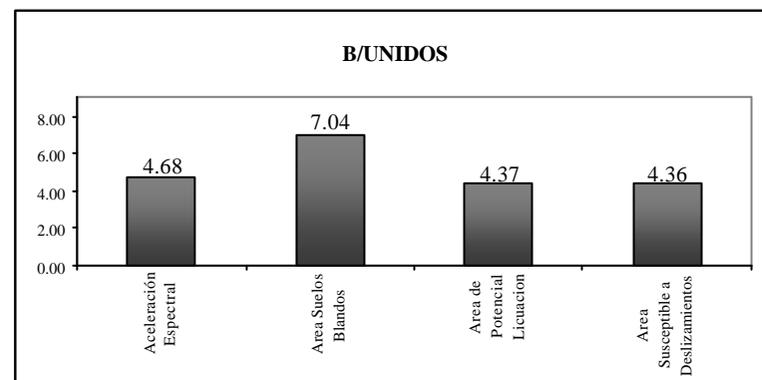
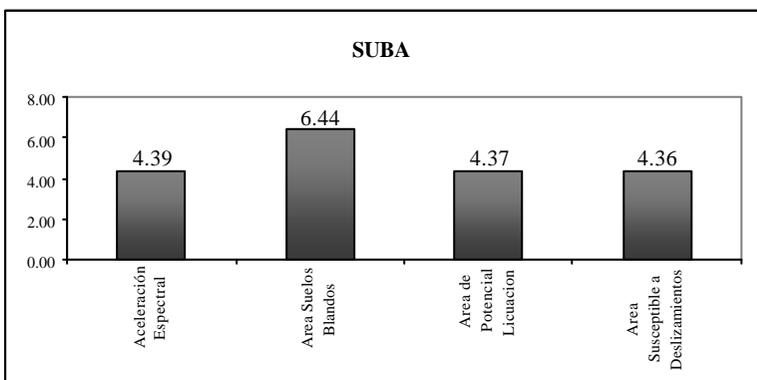
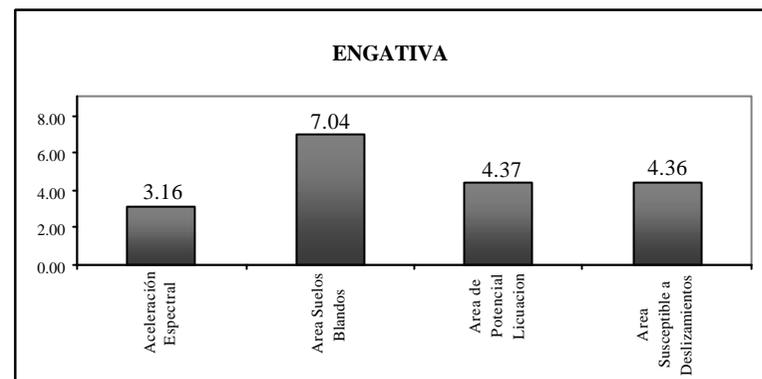
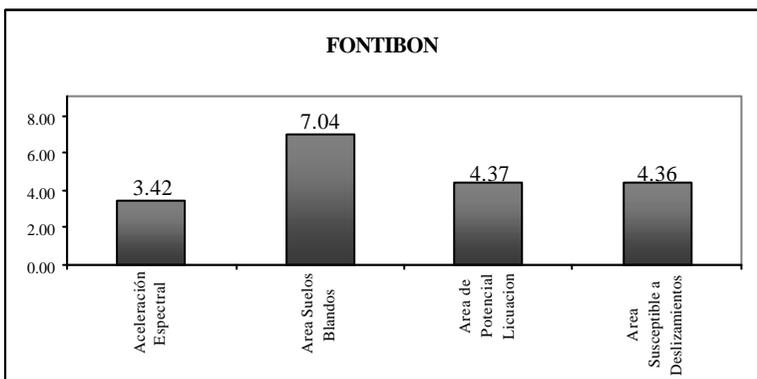
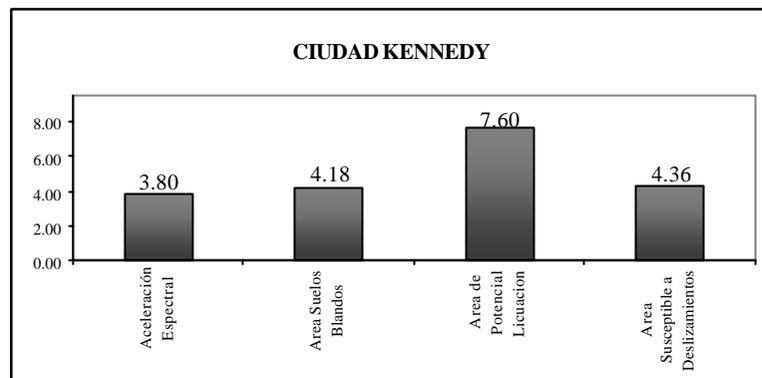
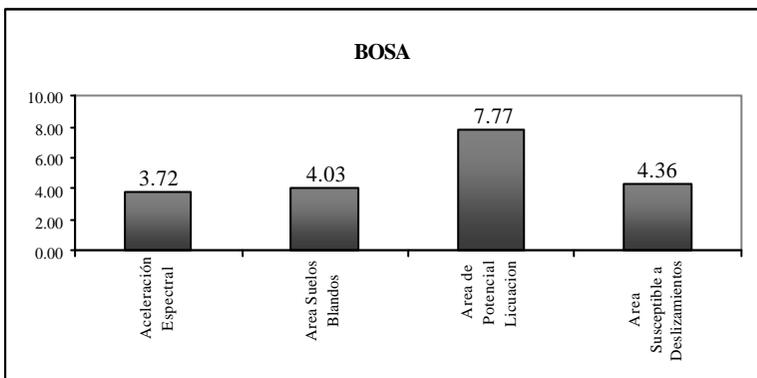


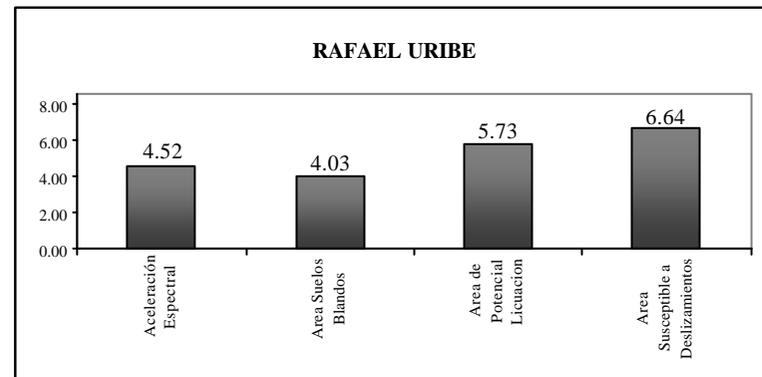
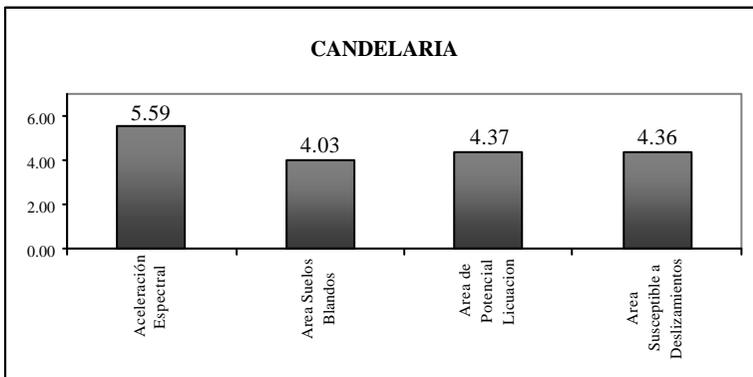
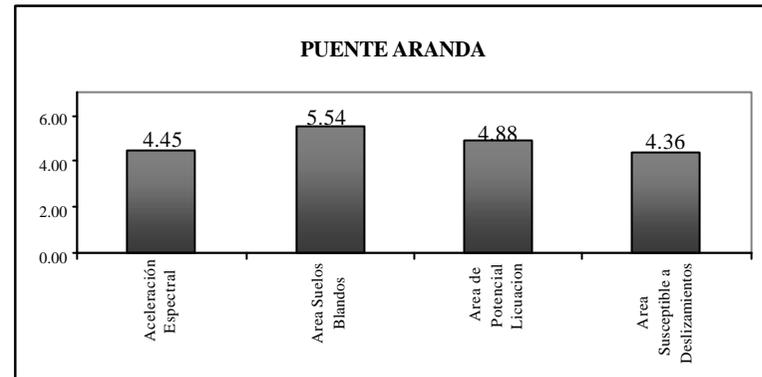
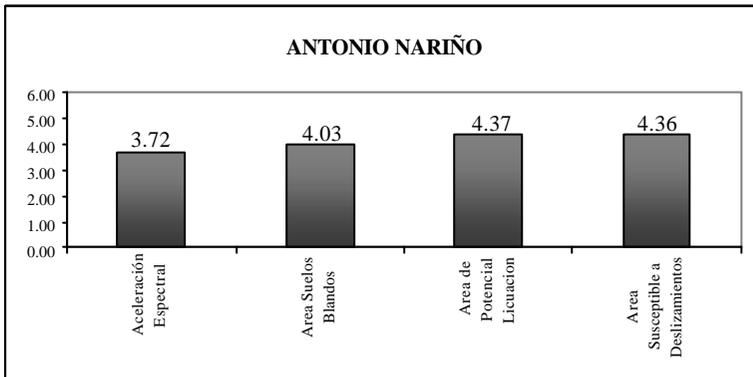
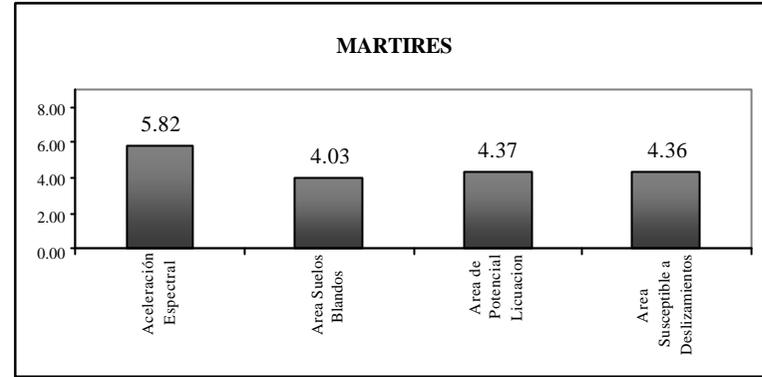
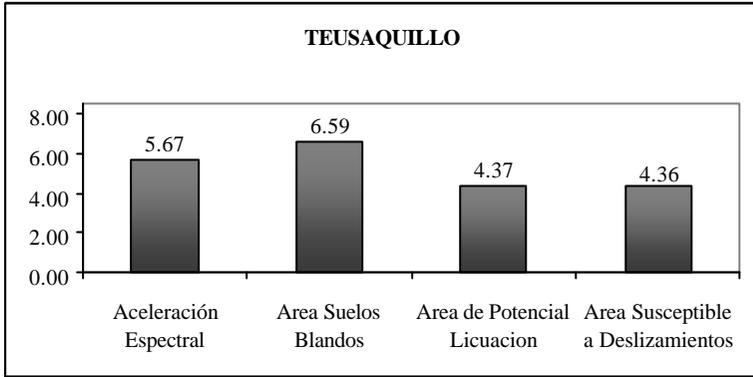


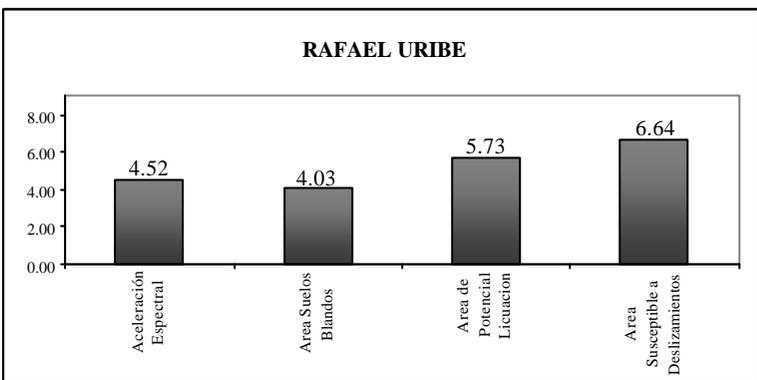


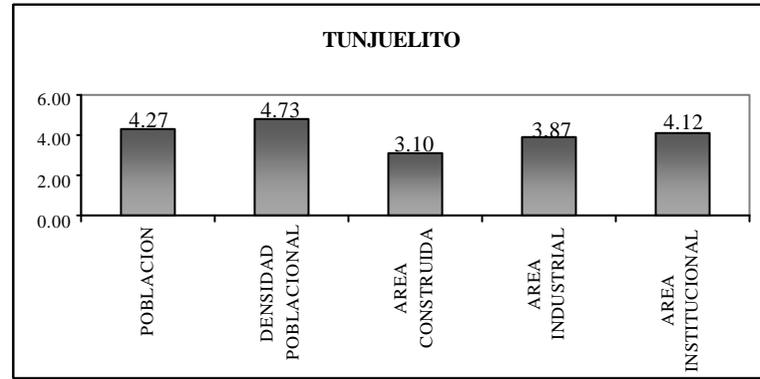
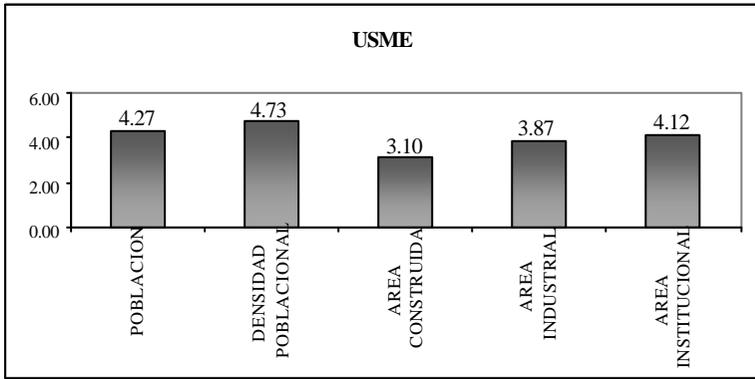
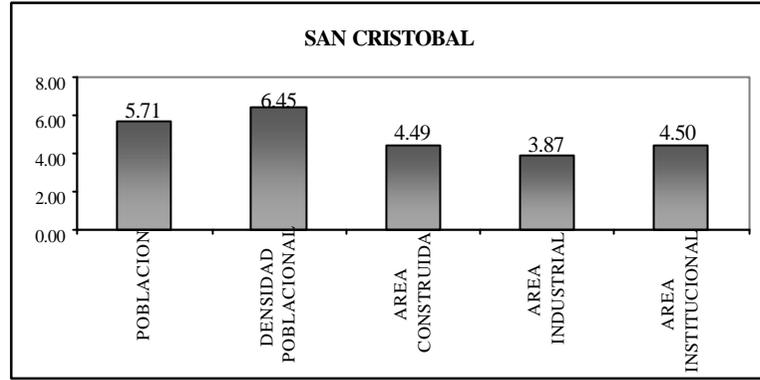
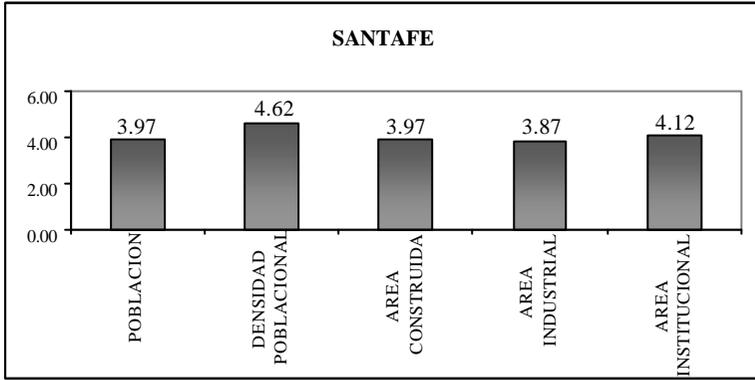
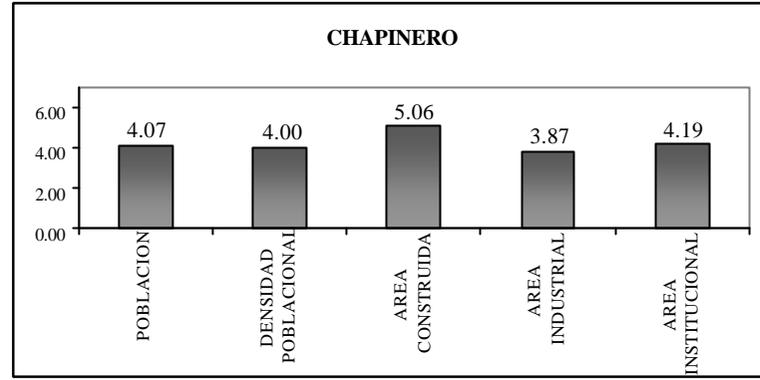
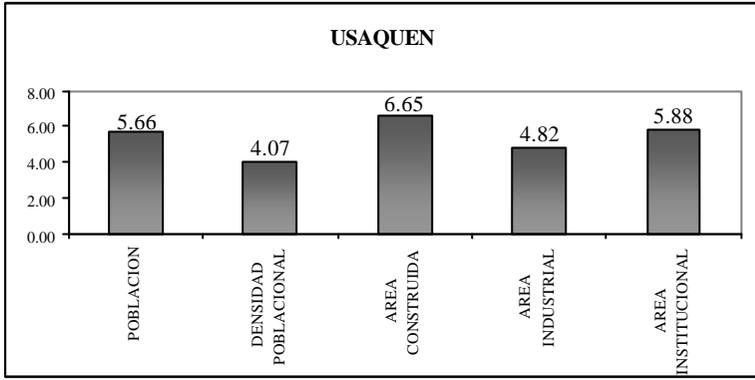


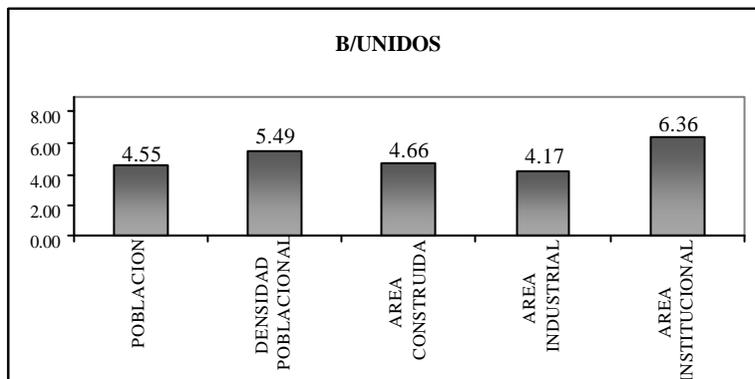
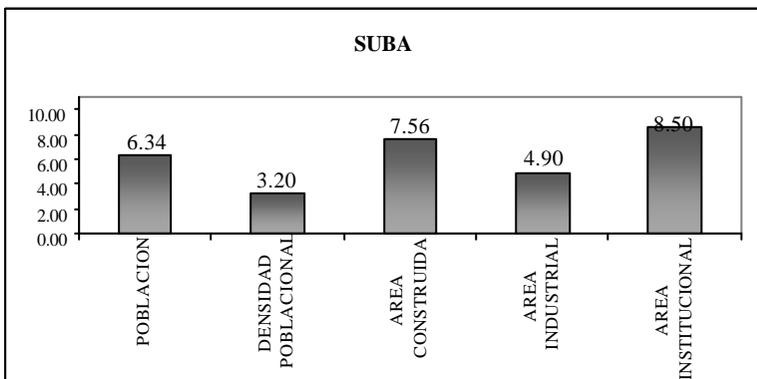
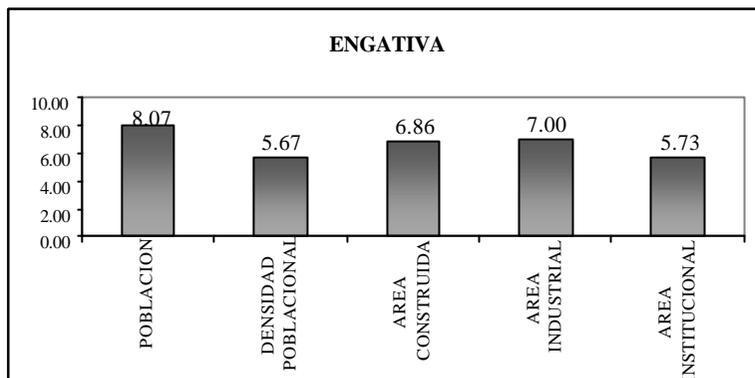
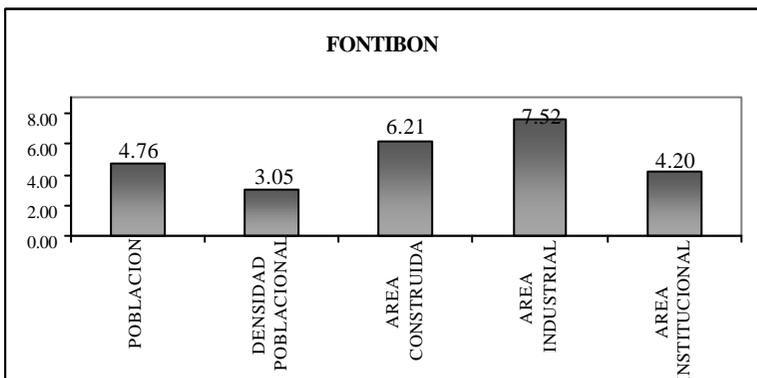
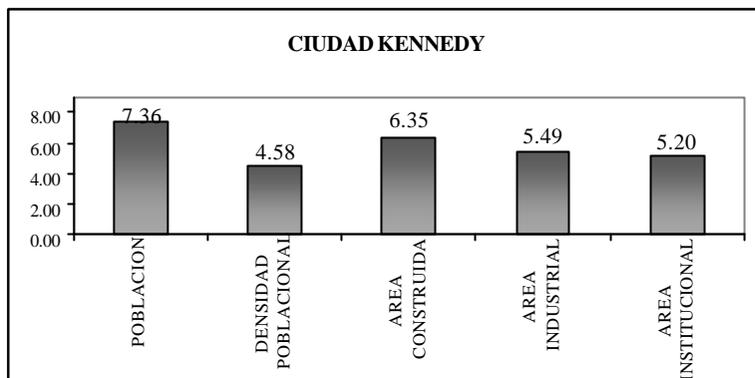
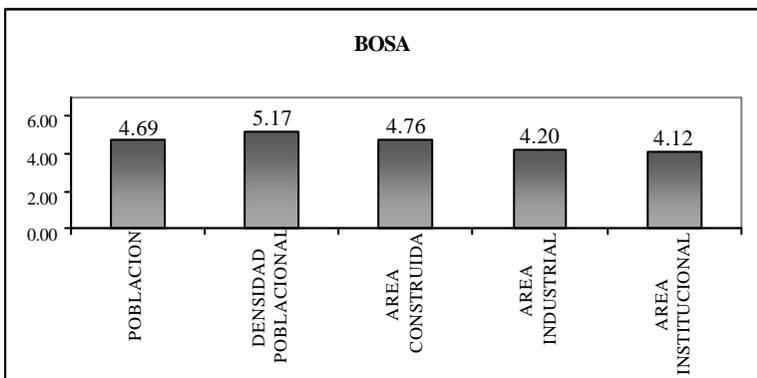


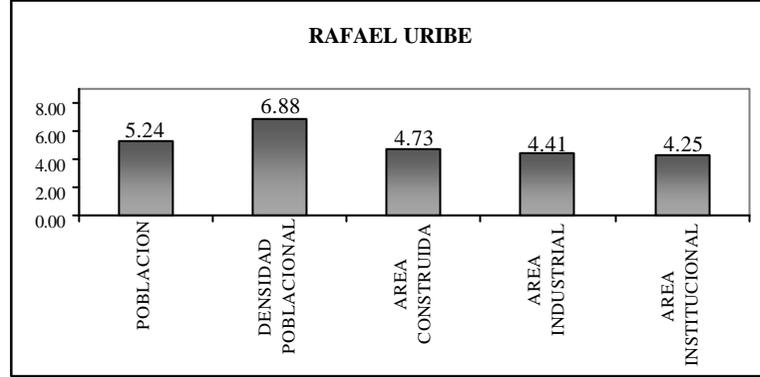
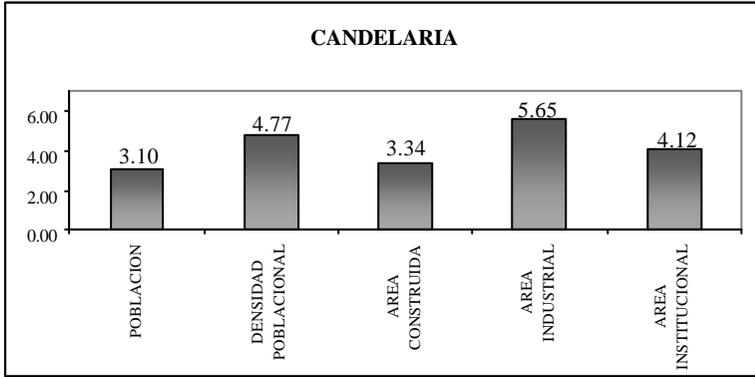
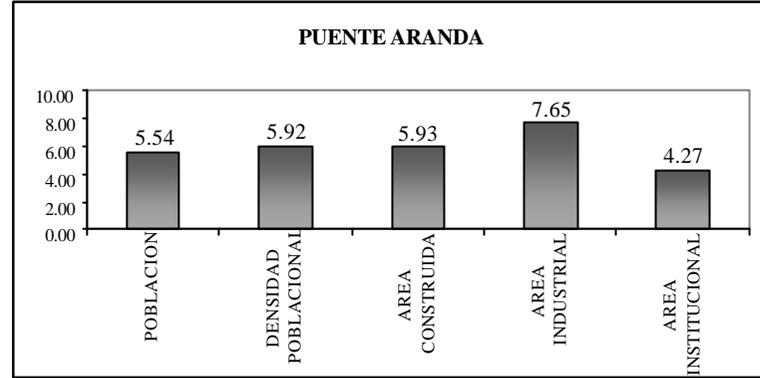
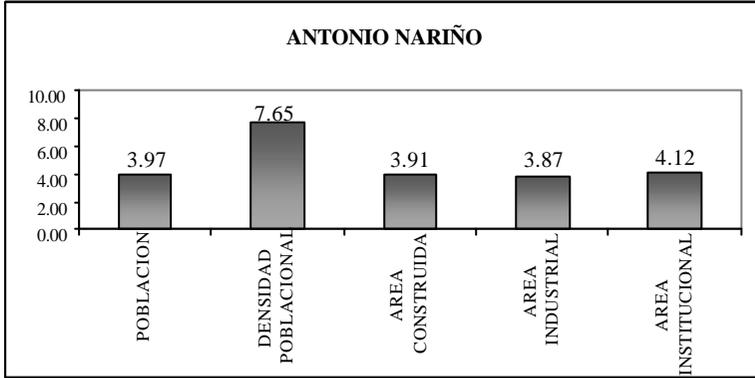
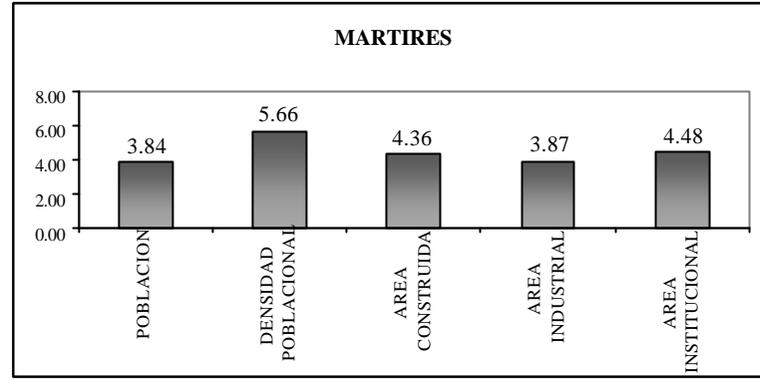
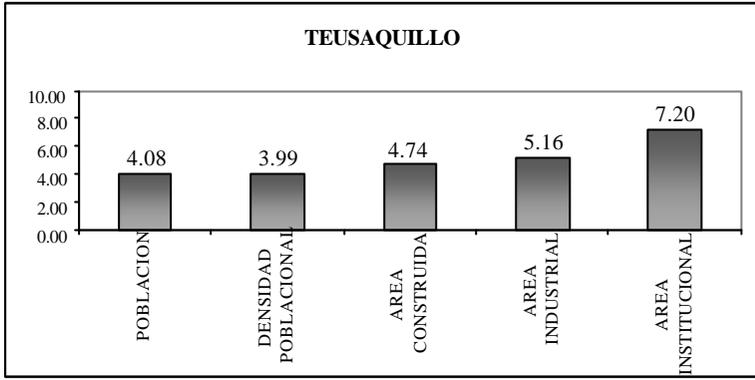


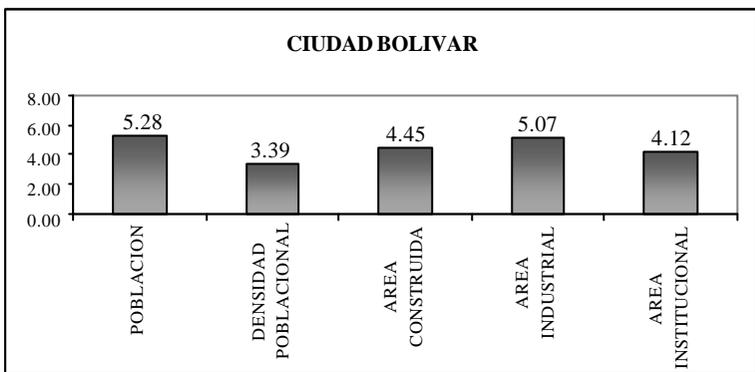


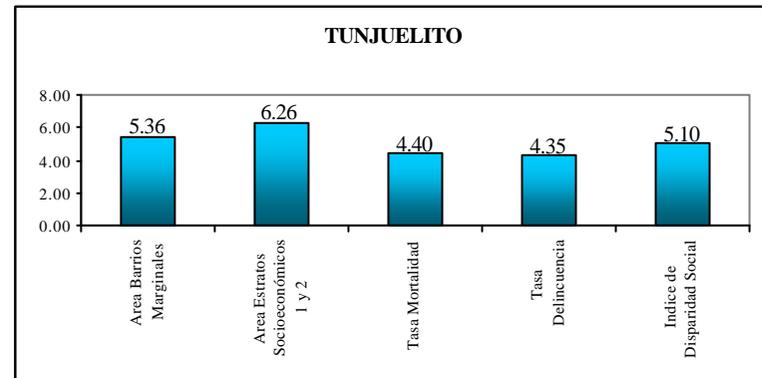
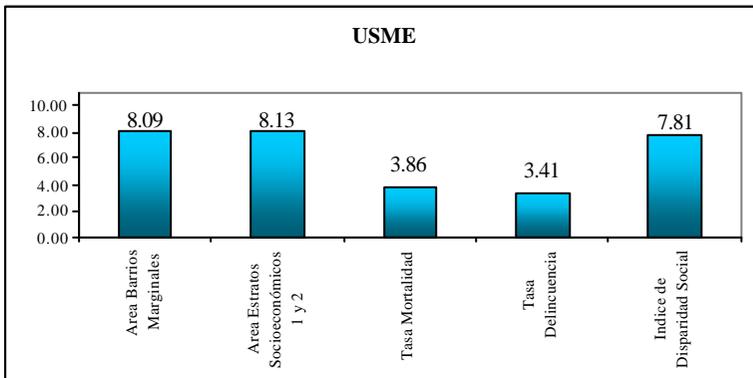
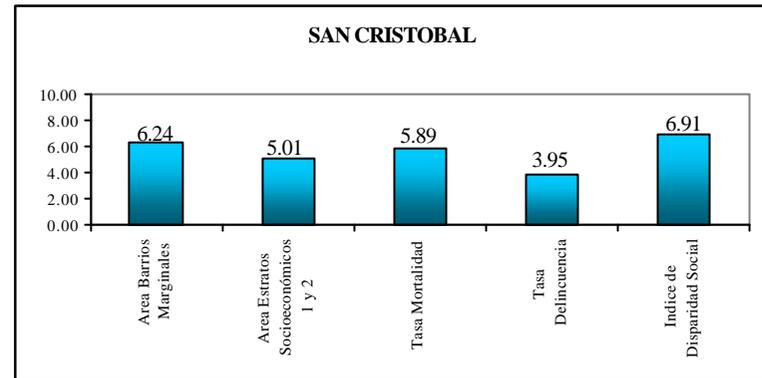
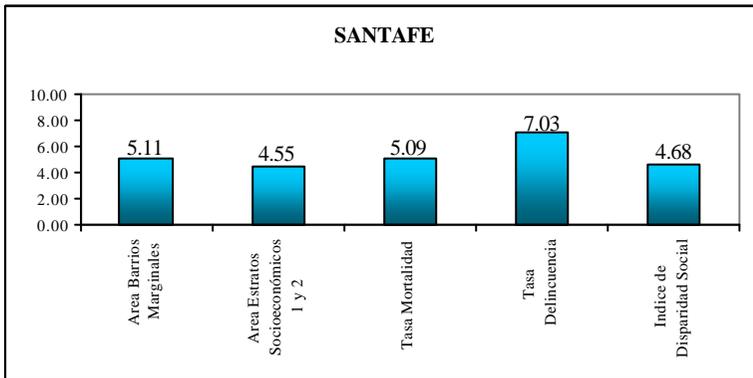
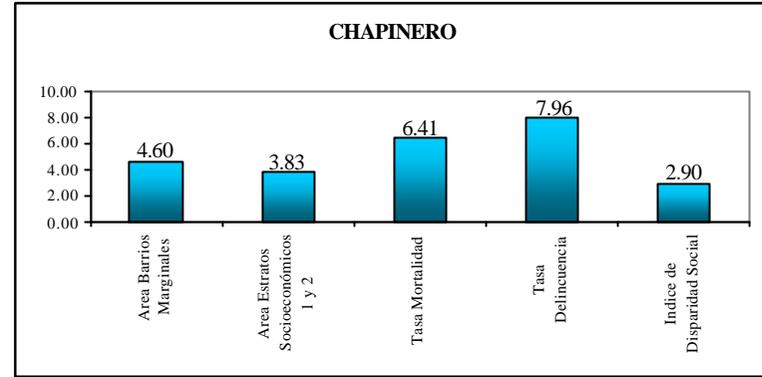
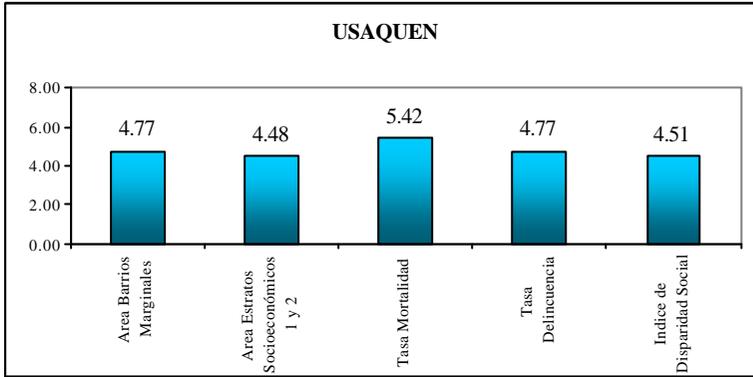


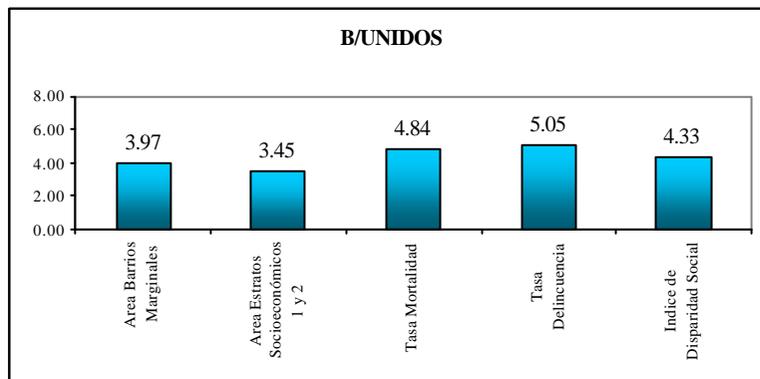
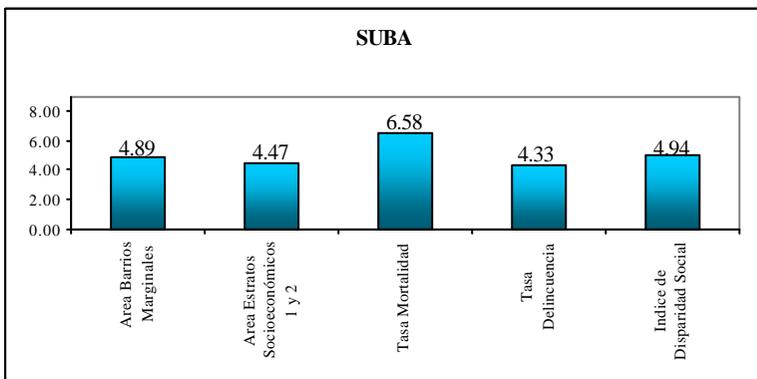
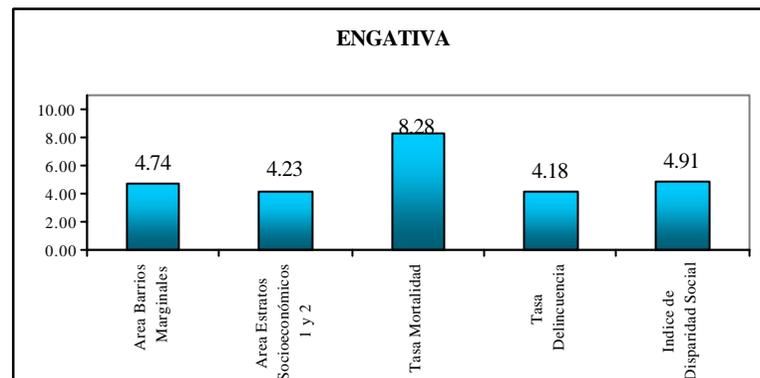
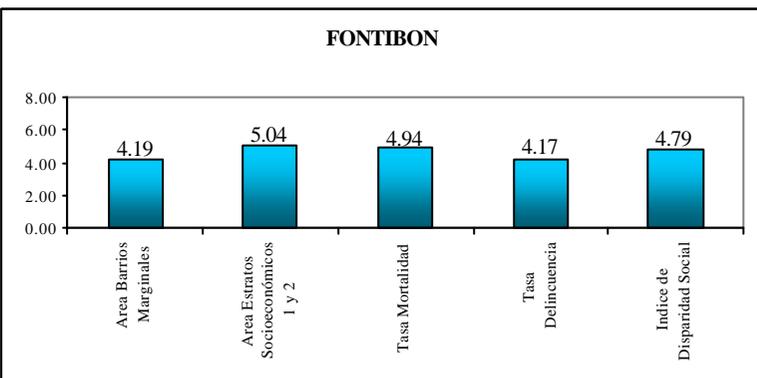
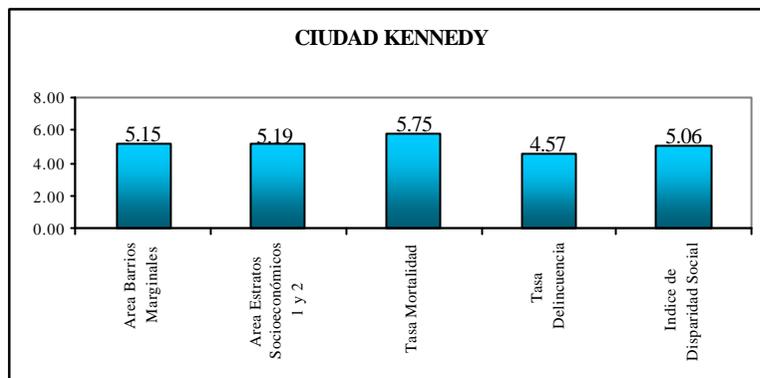
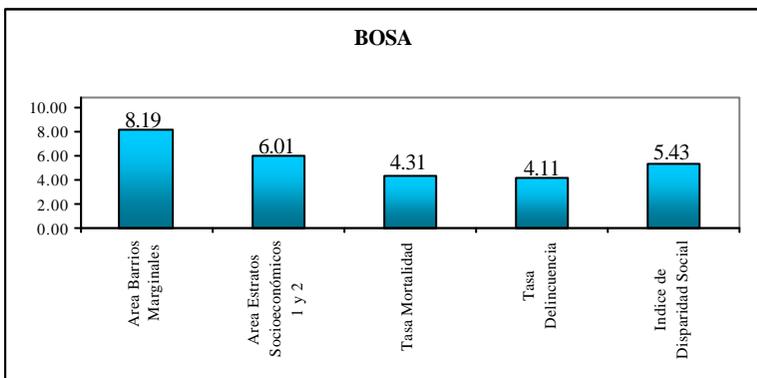


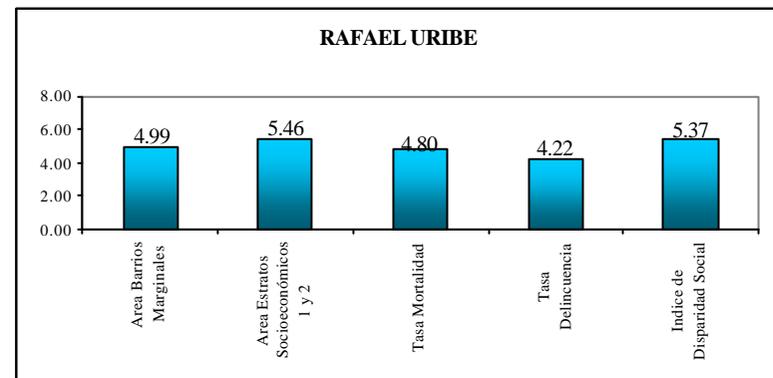
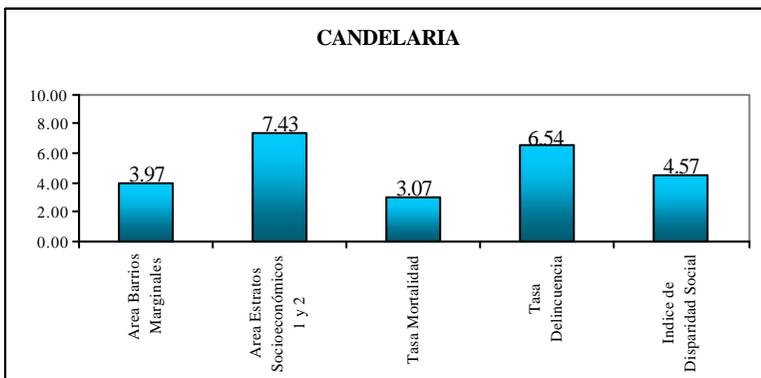
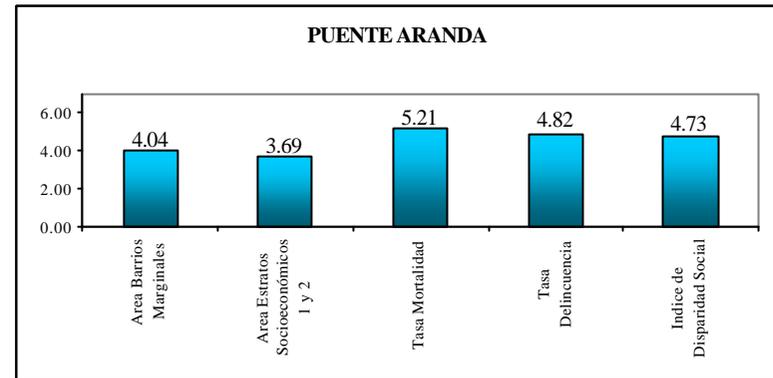
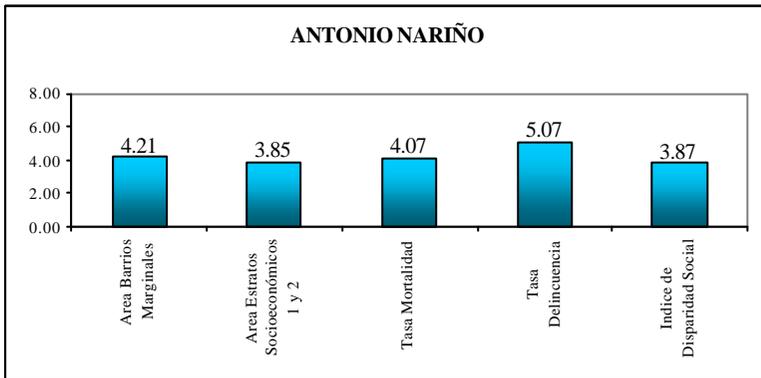
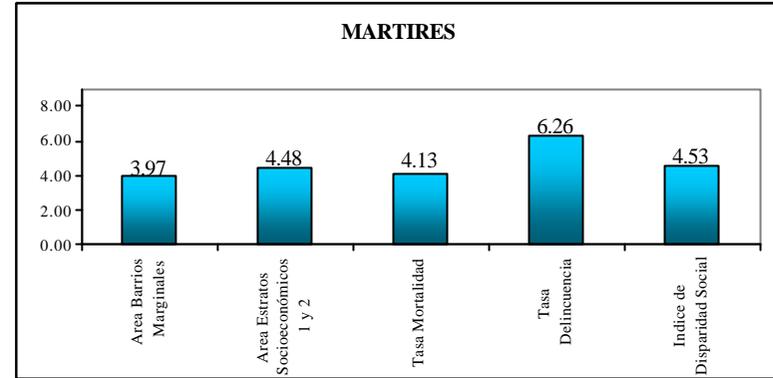
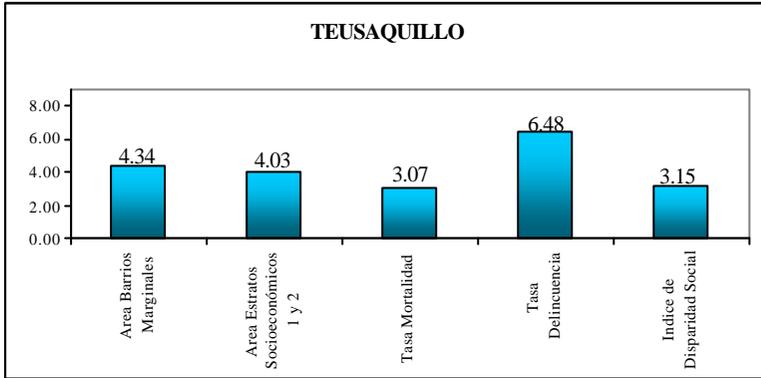


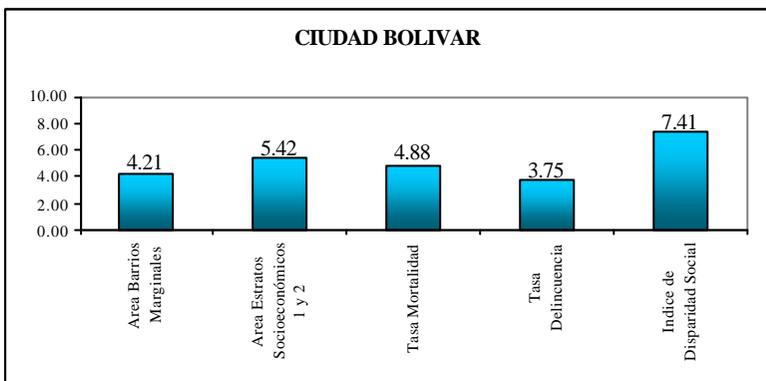


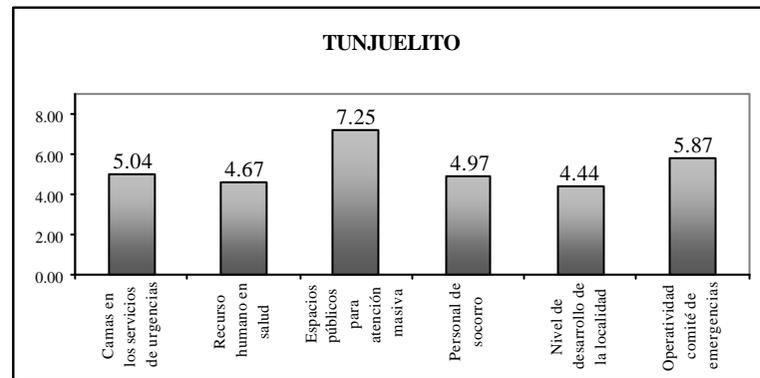
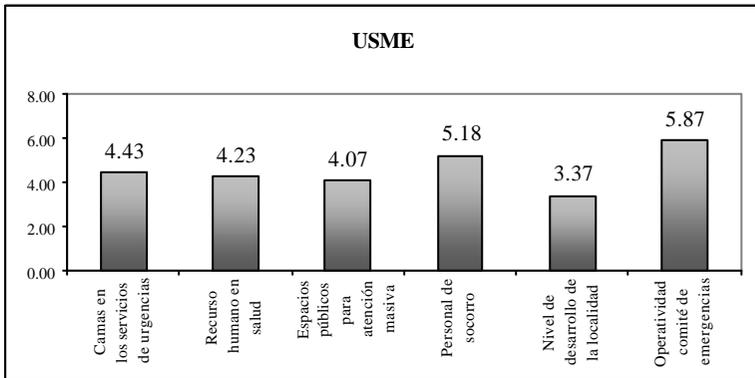
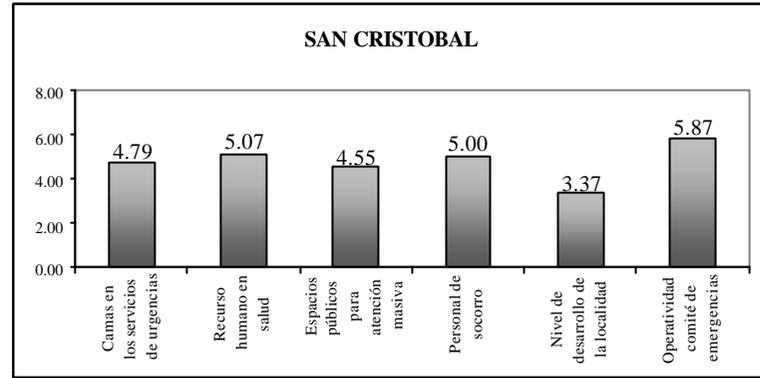
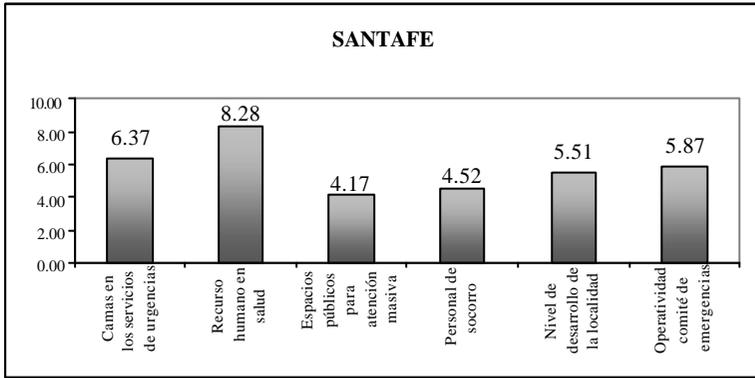
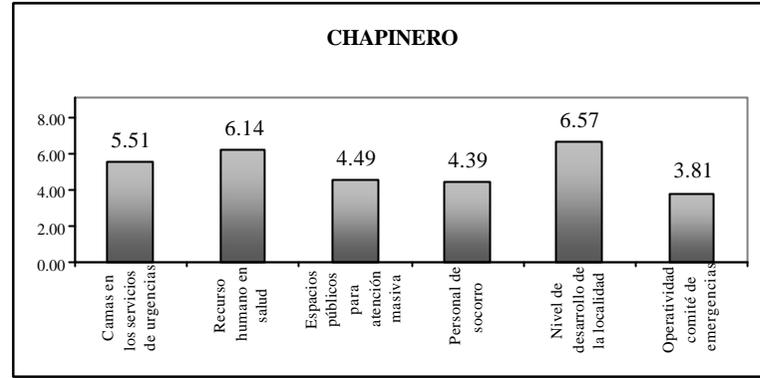
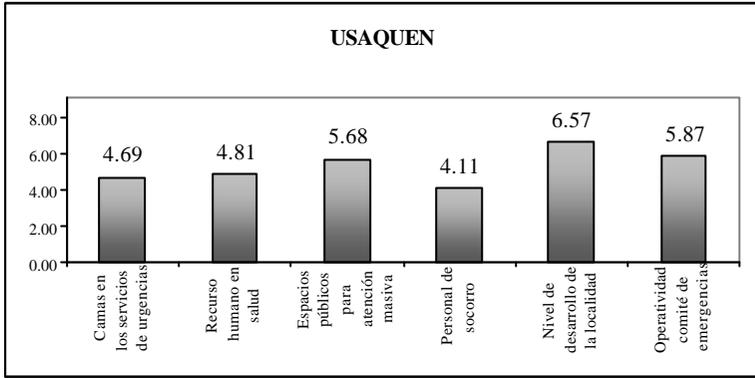


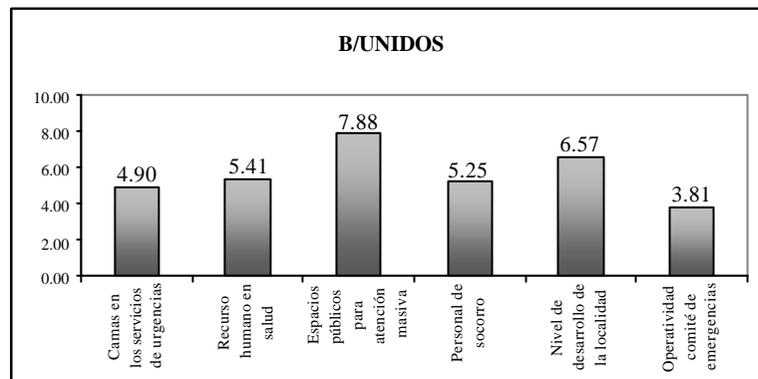
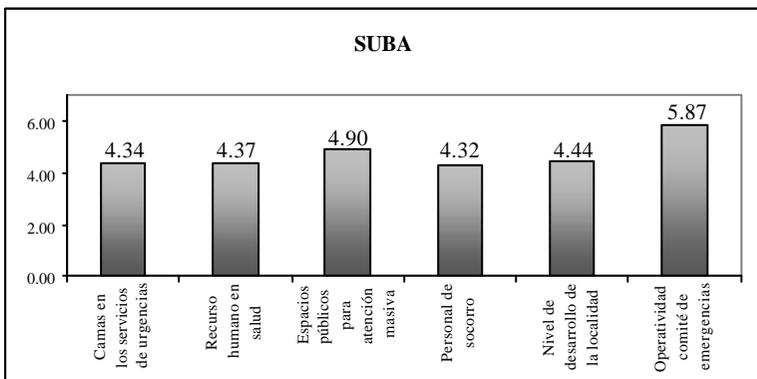
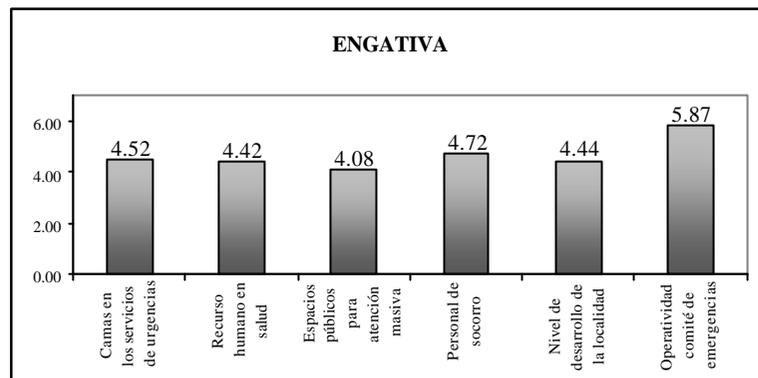
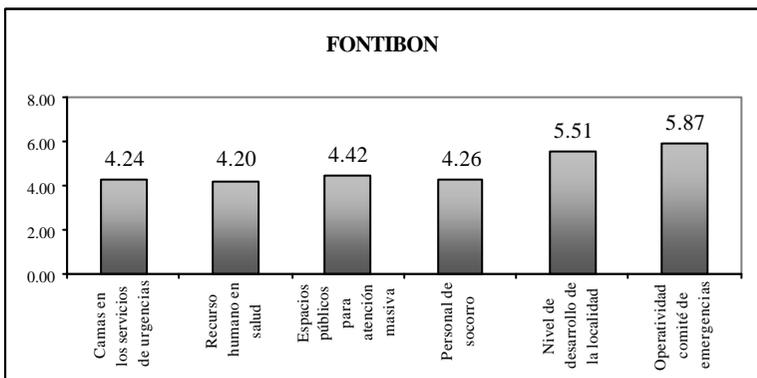
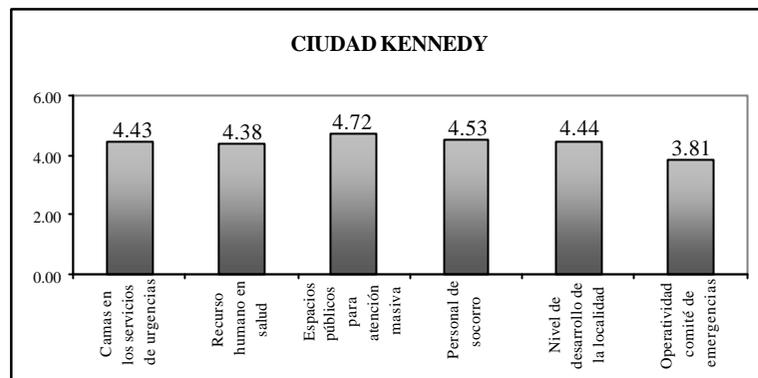
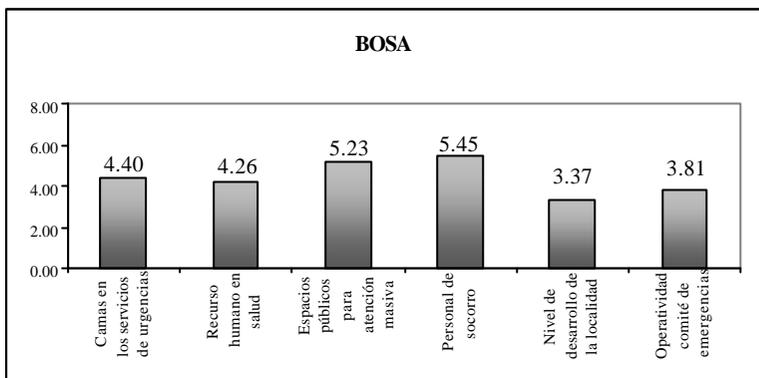


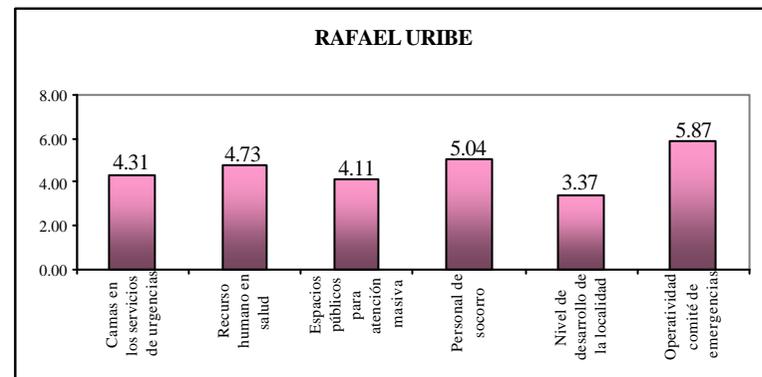
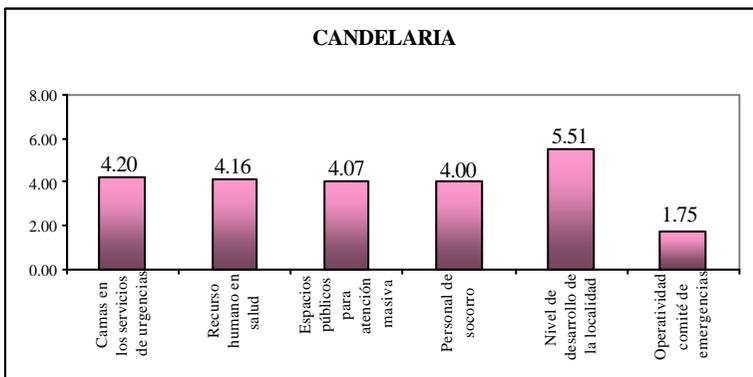
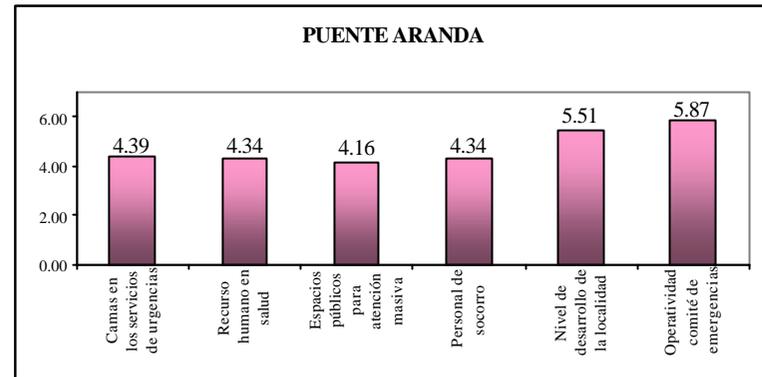
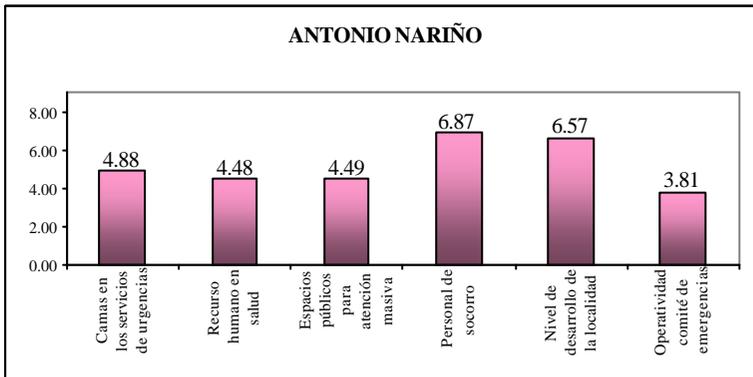
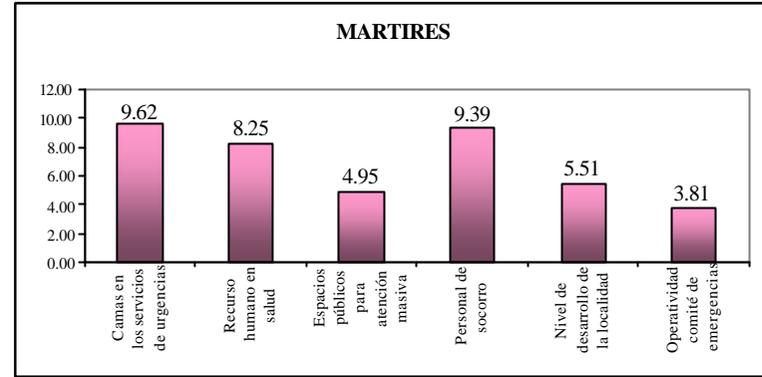
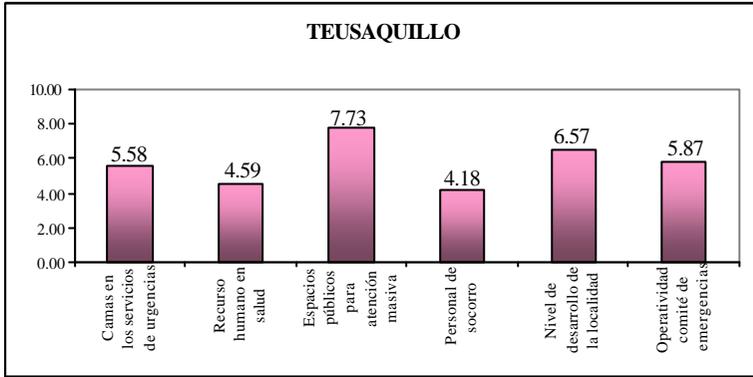


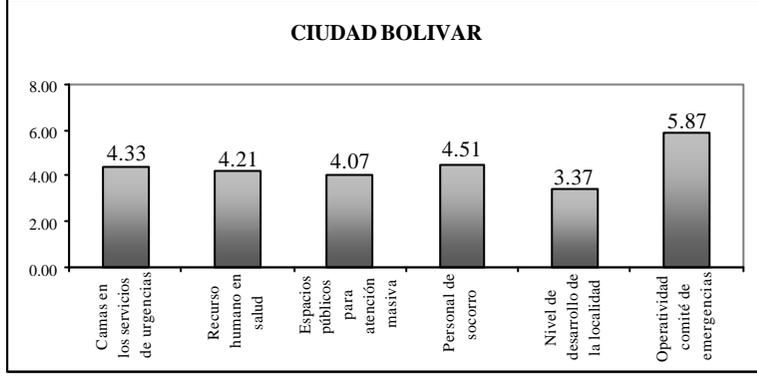












## Apéndice D

### Redes neuronales y teoría de los conjuntos difusos

Las redes neuronales artificiales y la lógica difusa o borrosa son dos de los avances científicos recientes más importantes del conocimiento. Mediante estas herramientas se ha intentado simular dos de las características más importantes con que cuenta el cerebro humano: la capacidad de aprendizaje y el poder procesar información incompleta o que no es precisa. Estas técnicas se han podido utilizar para la solución de problemas tanto científicos como de la vida diaria. Con una buena combinación de estas dos técnicas es posible un desarrollo tecnológico más amplio en diversos campos, desde la medicina hasta el mejoramiento de electrodomésticos.

#### D.1. Redes neuronales artificiales

Mediante esta técnica se intenta imitar el proceso de aprendizaje del cerebro humano. El cerebro está formado por miles de millones de neuronas conectadas entre sí. Utiliza información que es percibida, transmitida hasta las neuronas, y allí procesada por ellas para dar una respuesta a cada uno de los diferentes estímulos. Cada neurona tiene tres partes: un cuerpo celular, una estructura de entrada (*Dendrita*) y una de salida (*Axón*). La mayoría de las terminales de los axones se conectan con las dendritas de otras neuronas (*Sinápsis*). El comportamiento de una neurona es el siguiente: recibe una señal de entrada con una fuerza determinada, dependiendo de ellas la neurona emite una señal de respuesta, las *sinápsis* pueden variar en fuerza, algunas pueden dar una señal débil y otras una fuerte. A una neurona pueden llegar miles de señales de entrada, cada una con una fuerza o peso diferente. Matemáticamente el comportamiento de la neurona puede representarse por una lista de sus señales de entrada que son multiplicadas por sus pesos respectivos y posteriormente sumadas, el resultado es llamado nivel de activación de la neurona del cual depende la señal de salida que es enviada a cada una de las neuronas a las que está conectada a ella.

Una red neuronal artificial (RNA) es un sistema compuesto de muchos elementos procesadores simples conectados en paralelo, cuya función es determinada por la estructura de la red, la fuerza en las conexiones y el procesamiento realizado por los elementos en los nodos (Jang 1997). Las RNA, igual que las personas, aprenden de la experiencia.

Uno de los primeros modelos de redes neuronales fue el *Perceptrón* diseñado por Rosenblatt, el cual contaba con tres tipos de neuronas: sensoriales, asociativas y de respuesta. Las sensoriales tomaban entradas de fuera de la red, las unidades de respuesta llevaban señales fuera de la red al mundo externo y las asociativas eran exclusivamente internas. Estos tipos ahora son llamados unidades de entrada, de salida y ocultas. Rosenblatt desarrolló métodos para que la red alterara los niveles sinápticos de forma que la red aprendiera a reconocer niveles de entrada.

Después de los años 80 la inteligencia artificial se hizo más popular y aumento su campo de aplicación. Se han desarrollado algoritmos para modelar procesos mentales de alto nivel como la asociación de conceptos, deducción, inducción y razonamiento.

En 1986 Rumelhart y McClelland demostraron que algunos problemas imposibles para los Perceptrons simples pueden ser resueltos por redes multi-nivel con funciones de activación no lineales, utilizando procesos simples de entrenamiento (algoritmos *Back-propagation*).

### **D.1.1. Características generales**

*Pesos:* Las redes neuronales pueden tener factores de peso adaptable o fijo. Las que tienen pesos adaptables emplean leyes de aprendizaje para ajustar el valor de la fuerza de interconexión con otras neuronas. Si se utilizan pesos fijos, su tarea debe estar previamente definida. Los pesos son determinados a partir de una descripción completa del problema a tratar. Los pesos adaptables son muy importantes, ya que no se conoce de antemano su valor correcto.

*Aprendizaje:* Se utilizan dos tipos de aprendizaje: supervisado y no supervisado. En el primero se le proporciona a la red tanto la salida como la entrada correcta, y la red ajusta sus pesos para disminuir el error en la salida que ella calcula. Este tipo es utilizado principalmente en el conocimiento de patrones. En el aprendizaje no supervisado a la red se le proporcionan únicamente los estímulos, y la red ajusta los pesos de sus interconexiones utilizando solamente los estímulos y la salida calculada por la red. La forma de aprendizaje que se utiliza depende del tipo de problema que se intenta resolver.

*Fases de operación:* Se presentan dos fases en la operación de una red neuronal artificial: Entrenamiento y recuperación de lo aprendido. En la primera fase se le proporcionan estímulos de entrada y salida (según el caso), para que la red ajuste sus pesos de interconexión y minimice el error en la salida que calcula. En la segunda fase la red solamente calcula la respectiva salida. El aprendizaje de la red disminuye a medida que aumenta el número de veces que se usa.

*No son algorítmicas:* Las redes neuronales artificiales no se programan sólo para seguir una secuencia de instrucciones, sino que ellas mismas pueden generar sus propias reglas para aprender de su propia experiencia.

*Necesitan un patrón:* Las redes neuronales no son capaces de reconocer nada que no tenga algún tipo de patrón. Son muy buenas resolviendo problemas de asociación, evaluación y reconocimiento de patrones.

### **D.1.2. Tipos de redes**

Dependiendo de la estructura de la red neuronal existen varias tipologías, algunas de estas son: el *Perceptron*, *Backpropagation*, *Hopfield*, y *Kohonen* . A continuación se presenta una descripción resumida de cada una de estas tipologías:

### D.1.2.1. Perceptrón

En 1943 se desarrolló el primer modelo de neurona artificial por McCulloch y Pitts. El *perceptrón* intenta modelar el comportamiento de la neurona biológica, derivado del modelo hecho por McCulloch y Pitts (Looney 1997). Es la base de la arquitectura de las redes neuronales artificiales. El *perceptron* trabaja con funciones de activación. En la figura D.1 se observa el modelo de un *perceptrón* para reconocimiento de patrones. El cuerpo de la neurona es representado como un sumador lineal de estímulos  $z_j$ , seguida por una función no lineal  $f(z_j)$  que es la función de activación, esta utiliza la suma de estímulos para determinar la salida de la neurona. En el *perceptrón* cada entrada es multiplicada por un factor de peso  $W$  correspondiente, los resultados son sumados y luego evaluados contra el valor de umbral  $q$ , si el valor es mayor al máximo el *perceptrón* se activa.

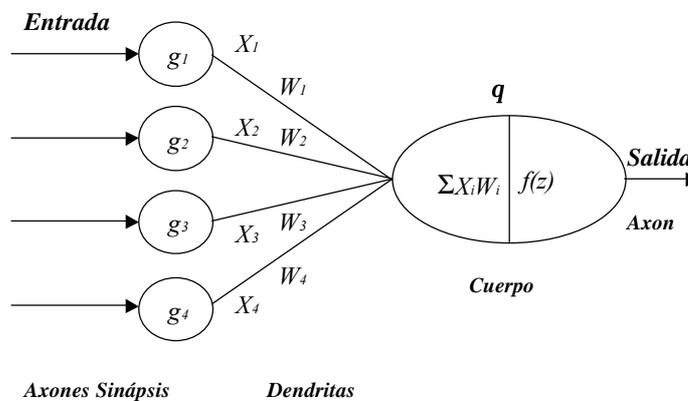


Figura B.1 Modelo de un *Perceptrón*

La primera capa actúa como un grupo de sensores que detectan una señal específica con la importancia correspondiente. La segunda capa toma las salidas de los detectores y clasifica el patrón de entrada dado. El aprendizaje empieza ajustando la fuerza en las conexiones (pesos  $W_i$ ) y el valor de umbral  $q$ . La función  $g_i$  es fija y está predeterminada.

El entrenamiento de un *perceptrón* se hace utilizando una función de aprendizaje. Si la respuesta dada por el *perceptrón* es incorrecta, se modifican todos los pesos de las conexiones de acuerdo a la función D.1.

$$\Delta w_i = h t_i x_i \tag{D.1}$$

donde  $h$  es la tasa de aprendizaje,  $t_i$  en la salida deseada, y  $x$  es la entrada del *perceptrón*.

La función anterior puede ser utilizada también para la actualización del valor de umbral  $q$ . El valor de  $h$  puede ser constante a lo largo del entrenamiento, o puede variar en forma proporcional al error. Un  $h$  proporcional al error lleva a una convergencia rápida, pero causa un aprendizaje variable.

El *perceptrón* es capaz tan sólo de resolver funciones definidas por un hiperplano (objeto de dimensión N-1 contenida en un espacio de dimensión N), que corte un

espacio de dimensión  $N$ . Es decir sólo puede resolver una función, si todos los posibles resultados del problema pueden separarse de forma que no se combinen entre sí.

Existen varios tipos de *perceptrones* dependiendo del número de capas que tenga. Un *perceptrón* simple o de dos capas, corresponde a una capa de entrada con neuronas lineales y una de salida con función de activación tipo escalón. Este sólo puede establecer dos regiones separadas por una frontera lineal en el espacio de patrones de entrada.

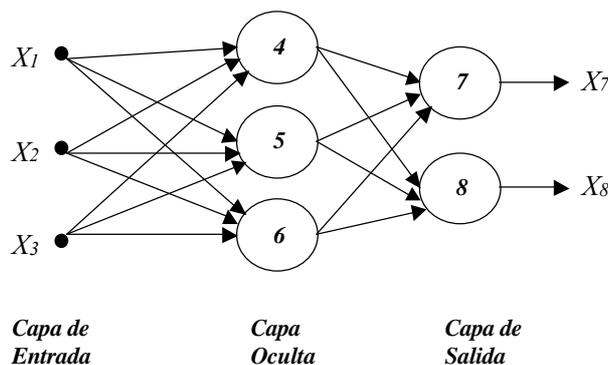
Un *perceptrón* de tres capas puede formar cualquier región convexa en este espacio. Cada elemento se comporta como un *perceptron* simple. Un *perceptrón* de cuatro capas puede generar regiones de decisión arbitrariamente complejas. Puede resolver una gran variedad de problemas cuyas entradas sean analógicas; la salida sea digital y sea linealmente separable. El rango de tareas que el *perceptrón* puede realizar es más amplio que simples decisiones y reconocimiento de patrones. El *perceptrón* multicapa puede ser usado para la predicción de una serie de datos en el tiempo, como cambios financieros.

### D.1.2.2. Backpropagation

Cuando se combinan varios *perceptrones* en una capa y los estímulos de entrada después son sumados, se tiene ya una red neuronal.

La falta de métodos de entrenamiento apropiados para los *perceptrones* multicapa (MLP) hizo que declinara el interés en las redes neuronales en los años 60 y 70. Esto no cambio hasta la reformulación del método de entrenamiento para MLP *backpropagation* a mediados de los años 80 por Rumelhart (1986).

En esta red, se interconectan varias unidades de procesamiento en capas, las neuronas de cada capa se conectan entre sí. Cada neurona de una capa proporciona una entrada a cada una de las neuronas de la siguiente capa. En la figura D.2 se observa la arquitectura de este tipo de red.



**Figura B.2:** Modelo de una red tipo *Backpropagation*

El término *backpropagation* se refiere al método para calcular el gradiente de error en una red *feed-forward* (de aprendizaje supervisado), que es una aplicación de la regla de la cadena de cálculo elemental (Jang 1997). Básicamente el entrenamiento de este tipo de red consiste en lo siguiente:

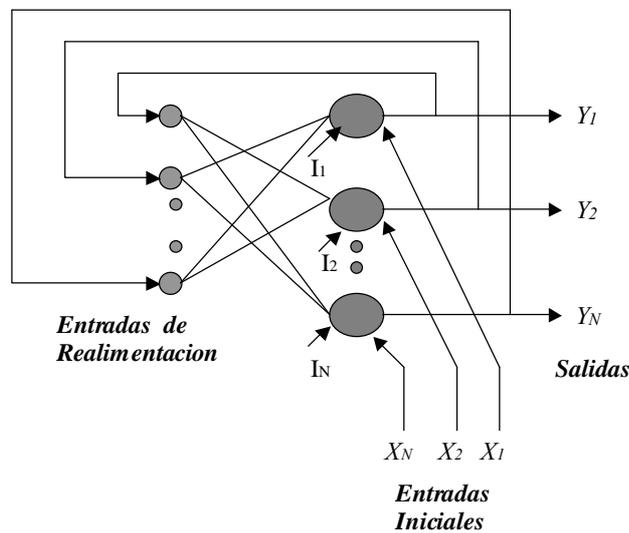
- a) Pasada hacia delante (*foward pass*): las salidas son calculadas y el error en las unidades de salida es calculado.
- b) Pasada hacia atrás (*backward pass*): el error de las salidas es utilizado para alterar los pesos de las unidades de salida. Luego el error en las neuronas de las capas ocultas es calculado mediante propagación hacia atrás del error en las unidades de salida), y los pesos en las capas ocultas son alterados usando esos valores.

**D.1.2.3. Modelo Hopfield**

Son redes de adaptación probabilística y recurrente. Funcionalmente entrarían en la categoría de las memorias autoasociativas, es decir que aprenden a reconstruir los patrones de entrada que memorizan durante el entrenamiento. Son monocapa con interconexión total y en la que el valor de salida de cada unidad es binario (solo puede tomar los valores 0 o 1) y siguen una regla de aprendizaje no supervisado.

Están formadas por N neuronas interconectadas que actualizan sus valores de activación en forma independiente, todas son a la vez de entrada y salida. Es buena para resolver problemas de optimización. Tiene siempre una restricción por simetría en cada conexión ( $W_{jk}=W_{kj}$ ). Cuando una neurona mantiene su valor de activación se dice que es estable. Se llega a un estado estable cuando todas las neuronas son estables (Looney 1997).

Ante la presentación de un estímulo nuevo se obtiene una configuración inicial más o menos parecida a la de alguno de los estímulos almacenados, el sistema hace iteraciones hasta quedar en una configuración estable. En la figura D.3 se observa la arquitectura del modelo de *Hopfield*.



**Figura D.3:** Modelo de *Hopfield*

Una característica importante de este modelo es que como se muestra en la figura D.3 una neurona nunca se realimenta a sí misma.

#### D.1.2.4. Modelo Kohonen

Esta red está basada en la capacidad que tiene el cerebro de formar mapas característicos de la información recibida del exterior. El objetivo de *Kohonen* era demostrar que un estímulo externo, suponiendo una estructura propia y una descripción funcional del comportamiento de la red, era suficiente para forzar la formación de mapas.

La red neuronal *Kohonen* contiene solamente una capa de neuronas y una capa de entrada, que se ramifica para todos los nodos. Pertenecen a la categoría de redes competitivas o mapas de auto organización, es decir tiene un aprendizaje no supervisado. Tiene también funciones de activación lineales y flujo de información unidireccional (red en cascada). La red cuenta con  $N$  neuronas de entrada y  $M$  de salida, cada una de las neuronas de entrada está conectada a todas las de salida.

Las unidades de entrada reciben datos continuos normalizados. La red clasifica los patrones de entrada en grupos de características similares, de tal manera que cada grupo activa siempre las mismas salidas.

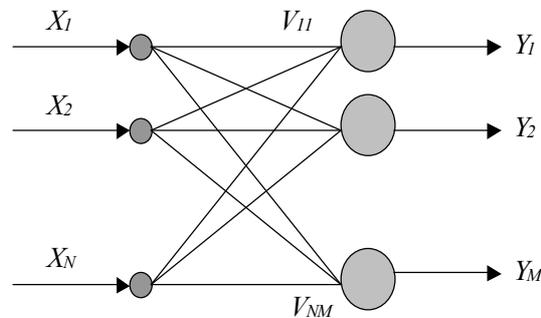


Figura D.4: Modelo de red neuronal *Kohonen*

Puede decirse que entre las neuronas de la capa de salida existen conexiones laterales de inhibición implícitas aunque no estén conectadas. La influencia que una neurona tiene sobre las demás es función de la distancia entre ellas, se hace muy pequeña cuando están muy alejadas.

Cada una de las  $M$  neuronas tiene un vector de pesos  $V^{(m)}$  de dimensión  $N$ , que es la misma dimensión del vector de entradas  $X^{(q)}$ . Al principio los vectores de pesos son inicializados aleatoriamente. Se calculan las distancias cuadradas entre  $X^{(q)}$  y cada  $V^{(m)}$ ,  $m=1, \dots, M$  así:

$$D_{qm} = D_{qm}(X^{(q)}, V^{(m)}) = \sum_{(n=1, N)} (x_n^{(q)} - v_n^{(m)})^2 \quad [D.2]$$

La distancia mínima  $D_{qm^*}$  determina la neurona  $m^*$  que es ganadora sobre las demás neuronas. Desde este punto es posible tomar diferentes estrategias, una de ellas es actualizar el vector de peso paramétrico de la neurona ganadora utilizando:

$$V^{(m^*)} = V^{(m^*)} + \mathbf{h}(X^{(q)} - V^{(m^*)}) \quad [D.3]$$

donde  $h$  es la tasa de aprendizaje, y las demás neuronas mantienen los valores anteriores. Otra estrategia que puede ser utilizada es actualizar positivamente (recompensar) todas las neuronas que son cercanas a la neurona ganadora, y actualizar negativamente (castigar) las neuronas que están a mayor distancia (Looney 1997).

Esta red una vez entrenada puede ser utilizada para clasificar patrones de entrada similares en el espacio N-dimensional.

### **D.1.3. Aplicaciones**

Las redes neuronales pueden ser de diferentes modelos de aprendizaje y tipologías dependiendo del uso que se espere darle a cada una. Pueden ser aplicadas a diferentes campos tales como: Control de eficiencia de máquinas, reconocimiento de firmas, reconocimiento de blancos mediante sonares, predicciones en el tiempo, decisiones, análisis de inversiones, monitoreo, mercadotecnia, planeación estratégica, diagnóstico, diseño, optimización y en aplicaciones (recientemente) de Ingeniería Civil como la valoración de efectos sísmicos, amplificación de onda, solución de problemas de gerencia de construcción, control activo estructural y diagnósticos de daño (Paolucci 2000). Una aplicación reciente ha sido en el pronóstico de caudales diarios y en el cálculo del nivel de agua en ciertos sitios en la época de crecida del río Iguazú. En el sector industrial las redes neuronales son ampliamente utilizadas empleando modelos de ingeniería que incluyen conocimiento científico y tecnológico en la industria cervecera, química, aérea, de alimentos, del acero, el vidrio, el cemento y las telecomunicaciones.

## D.2. Teoría de los conjuntos difusos

La lógica de conjuntos difusos o borrosos, como su nombre lo indica, trabaja con conjuntos que no tienen límites perfectamente definidos, es decir, la transición entre la pertenencia y no-pertenencia de una variable a un conjunto es gradual. Se caracteriza por las funciones de pertenencia, que dan flexibilidad a la modelación utilizando expresiones lingüísticas, tales como mucho, poco, leve, severo, escaso, suficiente, caliente, frío, joven, viejo, etc. Surgió de la necesidad de solucionar problemas complejos con información imprecisa, para los cuales la matemática y lógica tradicionales no son suficientes. La lógica difusa es un lenguaje que permite trasladar sentencias sofisticadas del lenguaje natural a un formalismo matemático.

La lógica difusa fue desarrollada a partir de 1960 por Lotfi Zadeh, guiado por el principio de que las matemáticas pueden ser usadas para encadenar el lenguaje con la inteligencia humana. Algunos conceptos pueden ser mejor definidos con palabras, los conjuntos difusos ayudan a construir mejores modelos de la realidad.

### D.2.1. Características generales de los conjuntos difusos

Conjunto Difuso: Un conjunto difuso expresa el grado de pertenencia al conjunto que tiene cada uno de los elementos. El conjunto difuso  $A$  en  $X$  puede definirse como el conjunto de los pares ordenados:

$$A = \{(x, \mathbf{m}_A(x)) | x \in X\} \quad [\text{D.4}]$$

donde  $\mathbf{m}_A(x)$  es la función de pertenencia al conjunto difuso.

Función de pertenencia: Esta función da para cada elemento de  $X$  un grado de membresía al conjunto  $A$ . El valor de esta función está en el intervalo entre 0 y 1, siendo 1 el valor para máxima pertenencia. Si el valor de esta función se restringiera solamente a 0 y 1, se tendría un conjunto clásico, o no-difuso. Esta función no es única. Las funciones utilizadas más frecuentemente son las de tipo trapezoidal, singleton, triangular, S, exponencial, tipo  $\Pi$  (forma de campana). En la figura D.5 se pueden presentar diferentes tipos de funciones de pertenencia.

Apoyo: El apoyo del conjunto difuso  $A$  es el conjunto de todos los puntos  $x$  para los cuales la función de pertenencia ( $\mathbf{m}_A(x)$ ) es mayor que cero.

Centro: El centro de un conjunto difuso  $A$  es el conjunto de todos los puntos para los cuales la función de pertenencia ( $\mathbf{m}_A(x)$ ) es igual a 1.

Normalidad: Un conjunto difuso es normal si siempre existe un punto para el cual la función de pertenencia es 1, es decir el *centro* no está vacío.

Puntos de Crossover: Son los puntos del conjunto difuso para los cuales  $\mathbf{m}_A(x)=0.5$

Difuso simple (Singleton): Es el conjunto difuso para el cual el *apoyo* es solamente un punto, en el cual el valor de la función de pertenencia es 1.

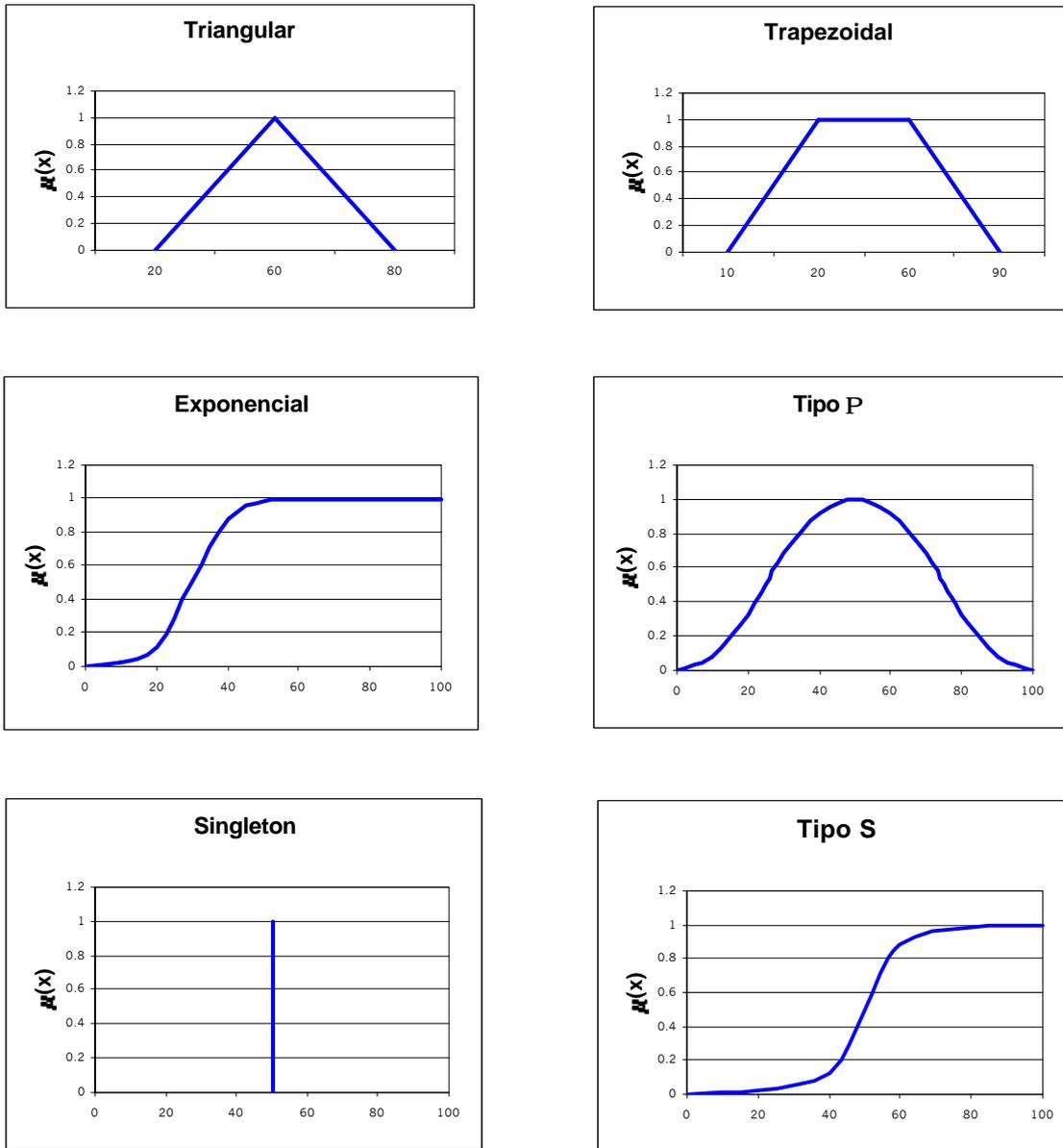


Figura D.5: Tipos de Funciones de Pertenencia

En la tabla D.1 se encuentran algunas características matemáticas de los conjuntos difusos.

**D.2.2. Operaciones entre conjuntos difusos**

En los conjuntos difusos son aplicables las tres operaciones básicas de los conjuntos clásicos (unión, intersección y complemento). En la tabla D.2 se encuentran algunas de las operaciones básicas de los conjuntos difusos.

**D.2.3. Desfusificación**

Los problemas basados en conjuntos difusos se originan de la utilización de calificaciones lingüísticas. Luego de formar los conjuntos difusos correspondientes a un determinado problema, es necesario obtener una respuesta de estos. En muchos casos es

importante que esta respuesta no sea difusa y se debe pasar de una respuesta difusa a una que no lo es. Para lograr esto se ha desarrollado el concepto de “desfusificación”. Se han propuesto varios métodos para lograr esta transformación; algunos de ellos se explican a continuación. El método de desfusificación debe ser escogido de acuerdo con la aplicación que se desea hacer (Jang 1997).

**Tabla D.1:** Características matemáticas de los Conjuntos Difusos

Característica Matemática	Definición
<b>a-corte</b>	$A_a = \{x   m_A(x) \geq a\}$
<b>a-corte marcado</b>	$A'_a = \{x   m_A(x) > a\}$
<b>Convexidad</b>	Un conjunto es convexo si y solo si para cualesquiera $x_1, x_2 \in X$ y cualquier $\lambda \in [0,1]$ se cumple que: $m_A(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \min\{m_A(x_1), m_A(x_2)\}$ Se dice que un conjunto es convexo si todos su conjuntos de nivel <b>a</b> son convexos.
<b>Números Difusos</b>	Es un conjunto difuso en la recta real ( $R$ ) que satisface las condiciones de normalidad y convexidad.
<b>Ancho de conjuntos difusos normales y convexos</b>	Esta definido como la distancia entre los dos únicos puntos de crossover $\text{Ancho}(A) =  x_2 - x_1 $ donde $m_A(x_1) = m_A(x_2) = 0.5$
<b>Simetría</b>	Un conjunto difuso es simétrico si alrededor de un punto $x=c$ se cumple $m_A(c+x) = m_A(c-x), \text{ para todo } x \in X$
<b>Conjunto Difuso abierto a la derecha</b>	Un conjunto difuso $A$ es abierto a la derecha si cumple que: $\lim_{x \rightarrow -\infty} m_A(x) = 1 \quad \text{y} \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} m_A(x) = 0$
<b>Conjunto difuso abierto a la izquierda</b>	Un conjunto difuso $A$ es abierto a la izquierda si cumple que: $\lim_{x \rightarrow -\infty} m_A(x) = 0 \quad \text{y} \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} m_A(x) = 1$
<b>Conjunto difuso cerrado</b>	Un conjunto difuso $A$ es cerrado si cumple que: $\lim_{x \rightarrow -\infty} m_A(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} m_A(x) = 0$

**Tabla D.2:** Operaciones entre conjuntos difusos

Operación	Definición
<b>Contención o Subconjunto</b>	$A$ es subconjunto de $B$ si y solo si $m_A(x) \leq m_B(x)$ , para todo $x$ . $A \subseteq B \Leftrightarrow m_A(x) \leq m_B(x)$
<b>Unión</b>	La unión de los conjuntos difusos $A$ y $B$ es el conjunto difuso $C$ , y se escribe como $C = A \cup B$ ó $C=A$ OR $B$ , su función de pertenencia está dada por $m_C(x) = \max(m_A(x), m_B(x)) = m_A(x) \vee m_B(x)$
<b>Intersección</b>	La intersección de los conjuntos difusos $A$ y $B$ es el conjunto difuso $C$ , y se escribe como $C = A \cap B$ ó $C=A$ AND $B$ , su función de pertenencia está dada por $m_C(x) = \min(m_A(x), m_B(x)) = m_A(x) \wedge m_B(x)$

**Tabla D.2:** Operaciones entre conjuntos difusos (**Continuación**)

Operación	Definición
<b>Complemento (negación)</b>	El complemento del conjunto difuso $A$ , denotado por $\hat{A}$ ( $\emptyset A$ , $NOT A$ ), se define como $\mathbf{m}_{\hat{A}}(x) = 1 - \mathbf{m}_A(x)$
<b>Producto Cartesiano</b>	Si $A$ y $B$ son conjuntos difusos en $X$ y $Y$ , el producto cartesiano de los conjuntos $A$ y $B$ $A \times B$ en el espacio $X \times Y$ tiene la función de pertenencia $\mathbf{m}_{A \times B}(x, y) = \min(\mathbf{m}_A(x), \mathbf{m}_B(y))$
<b>Co-producto Cartesiano</b>	$A + B$ en el espacio $X \times Y$ tiene la función de pertenencia $\mathbf{m}_{A+B}(x, y) = \max(\mathbf{m}_A(x), \mathbf{m}_B(y))$

**D.2.3.1. Centroide de área (COA)**

Este método consiste en hallar para cada conjunto difuso su área y la ubicación del centroide. Luego se hace el producto entre ellos y se suman, para posteriormente dividir este resultado por la sumatoria total de las áreas, como se muestra en la ecuación D.5.

$$\text{Valor desfusificado} = \bar{X} = \frac{\sum A_i \bar{x}_i}{\sum A_i} \tag{D.5}$$

$$\text{ó } COA = \frac{\int \mathbf{m}_A(x) x dx}{\int \mathbf{m}_A(x) dx}$$

**D.2.3.2. Procedimiento máximo**

Aquí se supone que la función de pertenencia tiene solamente un punto máximo simple, se toma el valor de *desfusificación* en este punto máximo, como se expresa en la ecuación D.6.

$$y_0(B) = \arg \max \{ \mathbf{m}_B(y) | y \in Y \} \tag{D.6}$$

En caso que la función de pertenencia de la salida tenga varios puntos máximos, se crea un grupo ( $B_{max}$ ) con estos puntos (soluciones optimas), ecuación B.7.

$$B_{max} = \left\{ y \in Y \mid \mathbf{m}(y) = \max_{z \in Y} \mathbf{m}_B(z) \right\} \tag{D.7}$$

De este grupo de máximos se debe obtener un único punto. Esto se puede hacer de varias formas. Un método es escoger aleatoriamente un punto optimo (supone que todas las soluciones son igualmente buenas), pero preferiblemente que sea un punto en la mitad del conjunto de soluciones. La solución puede escogerse también hallando el valor medio del conjunto, si este es un conjunto finito, ecuación D.8.

$$y_0(B) = \frac{1}{N} \sum_{y \in B_{\max}} y \quad [\text{D.8}]$$

donde  $N$  es el número de elementos en el conjunto.

### D.2.3.3. Centro de gravedad

Con este método se tiene en cuenta información relacionada con la función de pertenencia  $m_B$ . Se toma la media de todos los pesos como se indica en la ecuación B.9.

$$y_0(B) = \frac{1}{\sum m_B(y)} \sum_{y \in B_{\max}} y m_B(y) \quad [\text{D.9}]$$

### D.2.4 Reglas difusas si-entonces

En una regla difusa se asume como: Si  $x$  es  $A$  entonces  $y$  es  $B$ , donde  $A$  y  $B$  son valores lingüísticos definidos por conjuntos difusos dentro de los universos  $X$  y  $Y$ . Como en la lógica clásica a menudo “ $x$  es  $A$ ” es llamada *premisa* y “ $y$  es  $B$ ” es llamada la *conclusión o consecuencia*. Este tipo de reglas puede ser utilizado para modelar y analizar un sistema. Varios métodos para calcular la relación  $R = A \rightarrow B$  han sido propuestos.  $R$  puede ser visto como un conjunto difuso con una función de pertenencia en dos dimensiones, ecuación D.10.

$$m_R(x, y) = f(m_A(x), m_B(y)) = f(a, b) \quad [\text{D.10}]$$

### D.2.5. Razonamiento difuso

También llamado razonamiento aproximado es un procedimiento de inferencia que saca conclusiones con reglas *si-entonces* utilizando conjuntos difusos (Jang 1997).

Siendo  $A$ ,  $A'$ , y  $B$  conjuntos difusos que pertenecen a  $X$ ,  $X$ , y  $Y$  respectivamente. Asume que la implicación difusa  $A \rightarrow B$  es expresada como una relación  $R$  en  $X \times Y$ . El conjunto difuso  $B$  inducido por “ $x$  es  $A$ ” y la regla difusa “si  $x$  es  $A$  entonces  $y$  es  $B$ ” están definidos como se indica en la expresión D.11.

$$\begin{aligned} m_{B'}(y) &= \max_x \min[m_{A'}(x), m_R(x, y)] \\ &= \vee_x [m_{A'}(x) \wedge m_R(x)] \end{aligned} \quad [\text{D.11}]$$

De acuerdo al problema que se desea resolver se han desarrollado diferentes reglas para el razonamiento difuso, en estas puede variar el número de antecedentes y de consecuencias. Se emplea también diferentes operadores para relacionar los conjuntos difusos como  $Y$ ,  $O$ , *implicación*, *desfusificación*, entre otros.

### D.2.6. Aplicaciones

La teoría de conjuntos difusos ha sido amplia mente aplicada en campos como: la Medicina, Economía, Ecología y Biología. Se ha empleado en empresas de producción

de artículos eléctricos y electrónicos como una herramienta de control, se ha utilizado para el desarrollo de procesadores y computadoras.

Los conjuntos difusos son usados para toma de decisiones y estimaciones en Sistemas de Control como son: aire acondicionado, control de automoviles y controladores en sistemas industriales.

El país en el que se ha desarrollado más el uso de la lógica difusa es Japón, donde se encuentra aplicada a múltiple sistemas como son el Metro de la ciudad de Sendai (desde 1987), enfoque automático de cámaras fotográficas y filmadoras digitales, máquinas aspiradoras, máquinas de lavado que evalúan la carga y ajustan por si mismas la temperatura del agua, cantidad de detergente y el ciclo de lavado, televisores SONY que ajustan automáticamente el brillo, el contraste y las tonalidades de color. En tecnología automotriz, en los vehículos Nissan con transmisión automática. Así como también la industria Mitsubishi que la aplica en el control de ascensores. En los Estados Unidos, también, la compañía OTIS también esta desarrollando aplicaciones a esta industria.

En general la lógica difusa es aplicada en cualquier campo donde sea muy difícil o casi imposible crear un modelo, en sistemas controlados por expertos humanos, en sistemas donde se tienen entradas y salidas que son continuas y complejas, en sistemas que utilizan observaciones humanas como entradas o reglas básicas, y en cualquier sistema en el cual se trabaje con conceptos vagos o imprecisos.

En el campo de la Ingeniería Civil, en América Latina, la lógica difusa esta siendo aplicada también en control de cierre de compuertas en presas (Chile), control de tráfico (Puerto Rico), control de secaderos de hoja de tabaco (Cuba), control de balanceo en puentes grúa control de nivel de líquidos en contenedores y se espera que su aplicación se generalizará de manera muy notable en los próximos años.

### D.3. Referencias recomendadas

- Chapman, O.J.V., Crossland, A.D. (1995): Neural Network in Probabilistic Structural Mechanics, *Probabilistic Structural Engineering Handbook. Theory and Industrial Applications*, Sundararajan, C. (Ed.). Chapman and Hall, New York.
- Hadipriono, F.C. (1995): Fuzzy Sets in Probabilistic Structural Mechanics, *Probabilistic Structural Engineering Handbook. Theory and Industrial Applications*, Sundararajan, C. (Ed.). Chapman and Hall, New York.
- Hines, J.W. (1997): Fuzzy y Neural Approaches in Engineering, John Wiley & Sons. New York.
- Jang, J.-S.R., Sun, C.-T., Mizutani, E. (1999): Neuro-Fuzzy and Soft Computing. A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence. Prentice Hall, New York.
- Leondes C.T., (Ed.) (1998): *Fuzzy Logic And Expert Systems Applications* , Academic Press, San Diego, California.
- Looney, C.G. (1997): Pattern Recognition using Neural Networks. Theory and Algorithms for Engineers and Scientists.

- Maldonado R., E, Casas, J.R., Canas, J.A. (1999): Utilización de los Conjuntos Difusos en Modelos de Vulnerabilidad Sísmica. *Monografías de Ingeniería Sísmica*. A. H. Barbat (Ed.). Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, UPC, Barcelona.
- Peña, C.A. (2000): *Evolutionary Fuzzy Modeling*, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Logical Systems Laboratory, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Paolucci, R., Colli, P., Giacinto, G. (2000): Assessment of Seismic Site Effects in 2-D Alluvial Valleys Using Neural Networks. *Earthquake Spectra*. Earthquake Engineering Research Institute, EERI, Vol.16, No. 3,. August.

# Apéndice E

## Código fuente del sistema RSU

Se presenta a continuación el programa de ordenador Estimación Holística del Riesgo Sísmico en Centros Urbanos, RSU, que utiliza el modelo basado en una red neuronal y operaciones con conjuntos difusos. Esta aplicación se desarrolló mediante la técnica de *software* basado en objetos, en lenguaje Visual Basic 5.0

### FORM 1

```
Private Sub btnAceleracion_Click()
    variable = 18
    ContadorVariable = ContadorVariable + 1
    contador2 = ContadorVariable
    comprobacion (variable)
    btnAceleracion.FontBold = False
    If ncali = 1 Then
        Form6.lblTipo.Caption = "ACELERACIÓN ESPECTRAL EN PERIODOS CORTOS"
        Form6.Option1(0).Caption = "Muy Baja"
        Form6.Option1(1).Caption = "Baja"
        Form6.Option1(2).Caption = "Moderada"
        Form6.Option1(3).Caption = "Alta"
        Form6.Option1(4).Caption = "Muy Alta"
        Form6.Show 1
    End If
End Sub

Private Sub btnAcueducto_Click()
    variable = 23
    ContadorVariable = ContadorVariable + 1
    contador2 = ContadorVariable
    comprobacion (variable)
    btnAcueducto.FontBold = False
    If ncali = 1 Then
        Form6.lblTipo.Caption = "ROTURA RED DE ACUEDUCTO"
        Form6.Option1(0).Caption = "Muy Pocas"
        Form6.Option1(1).Caption = "Pocas"
        Form6.Option1(2).Caption = "Numerosas"
        Form6.Option1(3).Caption = "Muchas"
        Form6.Option1(4).Caption = "Excesivas"
        Form6.Show 1
    End If
End Sub

Private Sub btnAreaDestruida_Click()
    variable = 26
    ContadorVariable = ContadorVariable + 1
    contador2 = ContadorVariable
    comprobacion (variable)
    btnAreaDestruida.FontBold = False
    If ncali = 1 Then
        Form6.lblTipo.Caption = "AREA DESTRUIDA"
        Form6.Option1(0).Caption = "Muy Poca"
        Form6.Option1(1).Caption = "Poca"
        Form6.Option1(2).Caption = "Considerable"
        Form6.Option1(3).Caption = "Mucha"
        Form6.Option1(4).Caption = "Excesiva"
        Form6.Show 1
    End If
End Sub

Private Sub btnBlandos_Click()
    variable = 17
    ContadorVariable = ContadorVariable + 1
    contador2 = ContadorVariable
    comprobacion (variable)
    btnBlandos.FontBold = False
    If ncali = 1 Then
        Form6.lblTipo.Caption = "AREA DE SUELOS BLANDOS"
        Form6.Option1(0).Caption = "Mínima"
        Form6.Option1(1).Caption = "Escasa"
        Form6.Option1(2).Caption = "Considerable"
        Form6.Option1(3).Caption = "Extensa"
        Form6.Option1(4).Caption = "Total"
        Form6.Show 1
    End If
End Sub

Private Sub btnCamas_Click()
    variable = 5
    ContadorVariable = ContadorVariable + 1
    contador2 = ContadorVariable
    comprobacion (variable)
    btnCamas.FontBold = False
    If ncali = 1 Then
        Form6.lblTipo.Caption = "CAMAS HOSPITALARIAS"
        Form6.Option1(0).Caption = "Excesivas"
        Form6.Option1(1).Caption = "Muchas"
        Form6.Option1(2).Caption = "Considerables"
        Form6.Option1(3).Caption = "Pocas"
        Form6.Option1(4).Caption = "Insignificantes"
        Form6.Show 1
    End If
End Sub

Private Sub btnConstruida_Click()
    variable = 12
    ContadorVariable = ContadorVariable + 1
    contador2 = ContadorVariable
    comprobacion (variable)
    btnConstruida.FontBold = False
    If ncali = 1 Then
        Form6.lblTipo.Caption = "AREA CONSTRUIDA"
        Form6.Option1(0).Caption = "Mínima"
        Form6.Option1(1).Caption = "Escasa"
```

```

Form6.Option1(2).Caption = "Considerable"
Form6.Option1(3).Caption = "Extensa"
Form6.Option1(4).Caption = "Total"
Form6.Show 1
End If
End Sub

```

```

Private Sub btnDelincuencia_Click()
variable = 7
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnDelincuencia.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "TASA DE DELINCUENCIA"
Form6.Option1(0).Caption = "Mínima"
Form6.Option1(1).Caption = "Pequeña"
Form6.Option1(2).Caption = "Significativa"
Form6.Option1(3).Caption = "Alta"
Form6.Option1(4).Caption = "Muy Alta"
Form6.Show 1
End If
End Sub

```

```

Private Sub btnDensidad_Click()
variable = 13
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnDensidad.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "DENSIDAD POBLACIONAL"
Form6.Option1(0).Caption = "Mínima"
Form6.Option1(1).Caption = "Pequeña"
Form6.Option1(2).Caption = "Significativa"
Form6.Option1(3).Caption = "Alta"
Form6.Option1(4).Caption = "Muy Alta"
Form6.Show 1
End If
End Sub

```

```

Private Sub btnDesarrollo_Click()
variable = 1
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnDesarrollo.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "DESARROLLO Y ORGANIZACION
DE LA COMUNIDAD"
Form6.Option1(0).Caption = "Muy Alto"
Form6.Option1(1).Caption = "Alto"
Form6.Option1(2).Caption = "Significativo"
Form6.Option1(3).Caption = "Escaso"
Form6.Option1(4).Caption = "Mínimo"
Form6.Show 1
End If
End Sub

```

```

Private Sub btnDeslizamiento_Click()
variable = 15
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnDeslizamiento.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "AREA CON SUSCEPTIBILIDAD A
OTROS EFECTOS"
Form6.Option1(0).Caption = "Mínima"
Form6.Option1(1).Caption = "Poca"
Form6.Option1(2).Caption = "Importante"
Form6.Option1(3).Caption = "Amplia"
Form6.Option1(4).Caption = "Extensa"
Form6.Show 1
End If
End Sub

```

```

Private Sub btnDisparidad_Click()
variable = 6
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnDisparidad.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "INDICE DE DISPARIDAD SOCIAL"
Form6.Option1(0).Caption = "Mínimo"

```

```

Form6.Option1(1).Caption = "Pequeño"
Form6.Option1(2).Caption = "Significativo"
Form6.Option1(3).Caption = "Alto"
Form6.Option1(4).Caption = "Muy Alto"
Form6.Show 1
End If
End Sub

```

```

Private Sub btnElectricas_Click()
variable = 19
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnElectricas.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "SUBESTACIONES ELECTRICAS
AFECTADAS"
Form6.Option1(0).Caption = "Muy Pocas"
Form6.Option1(1).Caption = "Pocas"
Form6.Option1(2).Caption = "Numerosas"
Form6.Option1(3).Caption = "Muchas"
Form6.Option1(4).Caption = "Excesivas"
Form6.Show 1
End If
End Sub

```

```

Private Sub btnEspacioPublico_Click()
variable = 3
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnEspacioPublico.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "ESPACIO PUBLICO DISPONIBLE"
Form6.Option1(0).Caption = "Extenso"
Form6.Option1(1).Caption = "Amplio"
Form6.Option1(2).Caption = "Importante"
Form6.Option1(3).Caption = "Poco"
Form6.Option1(4).Caption = "Mínimo"
Form6.Show 1
End If
End Sub

```

```

Private Sub btnFallecidos_Click()
variable = 25
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnFallecidos.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "FALECIDOS"
Form6.Option1(0).Caption = "Muy Pocas"
Form6.Option1(1).Caption = "Pocas"
Form6.Option1(2).Caption = "Numerosas"
Form6.Option1(3).Caption = "Muchos"
Form6.Option1(4).Caption = "Excesivos"
Form6.Show 1
End If
End Sub

```

```

Private Sub btnGas_Click()
variable = 22
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnGas.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "ROTURA RED DE GAS"
Form6.Option1(0).Caption = "Muy Pocas"
Form6.Option1(1).Caption = "Pocas"
Form6.Option1(2).Caption = "Numerosas"
Form6.Option1(3).Caption = "Muchas"
Form6.Option1(4).Caption = "Excesivas"
Form6.Show 1
End If
End Sub

```

```

Private Sub btnHeridos_Click()
variable = 24
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnHeridos.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "HERIDOS"
Form6.Option1(0).Caption = "Muy Pocas"

```

```

Form6.Option1(1).Caption = "Pocos"
Form6.Option1(2).Caption = "Numerosos"
Form6.Option1(3).Caption = "Muchos"
Form6.Option1(4).Caption = "Excesivos"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnIndustrial_Click()
variable = 11
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnIndustrial.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "AREA INDUSTRIAL"
Form6.Option1(0).Caption = "Mínima"
Form6.Option1(1).Caption = "Poca"
Form6.Option1(2).Caption = "Importante"
Form6.Option1(3).Caption = "Amplia"
Form6.Option1(4).Caption = "Extensa"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnInstitucional_Click()
variable = 10
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnInstitucional.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "AREA INSTITUCIONAL"
Form6.Option1(0).Caption = "Mínima"
Form6.Option1(1).Caption = "Poca"
Form6.Option1(2).Caption = "Importante"
Form6.Option1(3).Caption = "Amplia"
Form6.Option1(4).Caption = "Extensa"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnLicuacion_Click()
variable = 16
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnLicuacion.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "AREA CON POTENCIAL DE
LICUACION"
Form6.Option1(0).Caption = "Mínima"
Form6.Option1(1).Caption = "Escasa"
Form6.Option1(2).Caption = "Considerable"
Form6.Option1(3).Caption = "Extensa"
Form6.Option1(4).Caption = "Total"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnMarginales_Click()
variable = 9
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
btnMarginales.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "AREA DE BARRIOS MARGINALES"
Form6.Option1(0).Caption = "Mínima"
Form6.Option1(1).Caption = "Escasa"
Form6.Option1(2).Caption = "Considerable"
Form6.Option1(3).Caption = "Extensa"
Form6.Option1(4).Caption = "Total"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnMenu_Click(Index As Integer)
'Declaracion de Variables temporales
Dim ap As Integer
Dim OPC As Integer
Dim acceso As String
Dim ubicacion As String
Dim vecinas As String
Dim I As Integer
n = 0

Loc = 0
If Index = 0 Then
'Boton Guardar
definidos 'ver si todos los pesos han sido ingresados
If n = 1 Then
MsgBox "Ingrese todos los pesos"
Else
'Desea guardar o corregir los datos
OPC = MsgBox("Todos los datos ingresados son correctos?",
vbYesNo, "Datos Ingresados")
If OPC = vbYes Then
'Determinacion del número del último registro
Form2.dtaResultados.Recordset.MoveLast
ultimoreg = Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(0).Value
ultimoreg = ultimoreg + 1
'Determinacion del número del último registro de pesos
Form2.DtaPesos.Recordset.MoveLast
ultimopesos = Form2.DtaPesos.Recordset.Fields(0).Value
ultimopesos = ultimopesos + 1
'llamado de funcion guardar
ap = guardarpesos(ultimopesos, vecentrada)
'Llamado a la funcion de evaluacion total
a = guardacalRiesgo(nimp)
b = guardacalAmenaza()
c = guardacalExposicion()
d = guardacalFragilidad()
e = guardacalResiliencia()
evaluototal (nimp)
'cargar formulario de resultados
Form7.Show 1
'Descargar formulario de Nueva Evaluacion
Unload Form1
End If
End If
Else
'Boton Cancelar
OPC = MsgBox("Está usted seguro que desea Salir ? Perdera la
información suministrada hasta ahora.", vbYesNo, "Datos
Ingresados")
If OPC = vbYes Then
Unload Form1
End If
End If
End Sub

Private Sub btnMortalidad_Click()
variable = 8
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
'Guardar numero de la variable
'vecentrada(contador2).variable = variable
btnMortalidad.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "TASA DE MORTALIDAD"
Form6.Option1(0).Caption = "Mínima"
Form6.Option1(1).Caption = "Pequeña"
Form6.Option1(2).Caption = "Significativa"
Form6.Option1(3).Caption = "Alta"
Form6.Option1(4).Caption = "Muy Alta"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnMovilidad_Click()
variable = 28
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
'Guardar numero de la variable
btnMovilidad.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "MOVILIDAD POR LA RED VIAL"
Form6.Option1(0).Caption = "Muy Baja"
Form6.Option1(1).Caption = "Baja"
Form6.Option1(2).Caption = "Moderada"
Form6.Option1(3).Caption = "Alta"
Form6.Option1(4).Caption = "Muy Alta"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnOperatividad_Click()
variable = 0
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable

```

```

comprobacion (variable)
'Guardar numero de la variable
btnOperatividad.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "CAPACIDAD OPERATIVA EN
EMERGENCIA"
Form6.Option1(0).Caption = "Muy Alta"
Form6.Option1(1).Caption = "Alta"
Form6.Option1(2).Caption = "Notable"
Form6.Option1(3).Caption = "Reducida"
Form6.Option1(4).Caption = "Mínima"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnPesAmenaza_Click()
Dim OPC As Integer
Dim I As Integer
btnPesAmenaza.FontBold = False
If ame = 0 Then
Form4.hsPesAceleracion.Value = 44
Form4.hsPesASueBlandos.Value = 24
Form4.hsPesAPotLicuacion.Value = 16
Form4.hsPesASuscOtrosEfectos.Value = 16
Form4.lblPesAceleracion.Caption =
Str$(Form4.hsPesAceleracion.Value)
Form4.lblPesAPotLicuacion.Caption =
Str$(Form4.hsPesAPotLicuacion.Value)
Form4.lblPesASueBlandos.Caption =
Str$(Form4.hsPesASueBlandos.Value)
Form4.lblPesASuscOtrosEfectos.Caption =
Str$(Form4.hsPesASuscOtrosEfectos.Value)
Form4.frmPesRiesgo.Visible = False
Form4.frmPesAmenaza.Visible = True
Form4.Show 1
Else
OPC = MsgBox("Ud. ya ha ingresado los pesos o influencias de las
variables de AMENAZA SÍSMICA, desea corregirlos?", vbYesNo)
If OPC = vbYes Then
For I = 0 To 28
If vecentrada(I).variable = 15 Then
Form4.hsPesASuscOtrosEfectos.Value = vecentrada(I).peso(3)
ElseIf vecentrada(I).variable = 16 Then
Form4.hsPesAPotLicuacion.Value = vecentrada(I).peso(3)
ElseIf vecentrada(I).variable = 17 Then
Form4.hsPesASueBlandos.Value = vecentrada(I).peso(3)
ElseIf vecentrada(I).variable = 18 Then
Form4.hsPesAceleracion.Value = vecentrada(I).peso(3)
End If
Next I
Form4.lblPesAceleracion.Caption =
Str$(Form4.hsPesAceleracion.Value)
Form4.lblPesAPotLicuacion.Caption =
Str$(Form4.hsPesAPotLicuacion.Value)
Form4.lblPesASueBlandos.Caption =
Str$(Form4.hsPesASueBlandos.Value)
Form4.lblPesASuscOtrosEfectos.Caption =
Str$(Form4.hsPesASuscOtrosEfectos.Value)
Form4.frmPesRiesgo.Visible = False
Form4.frmPesAmenaza.Visible = True
Form4.Show 1
End If
End If
End Sub

Private Sub btnPesExposicion_Click()
Dim OPC As Integer
Dim I As Integer
btnPesExposicion.FontBold = False
If expo = 0 Then
Form9.hsPesPoblacion.Value = 25
Form9.hsPesDensPoblacional.Value = 20
Form9.hsPesAreaIndustrial.Value = 25
Form9.hsPesAreaConstruida.Value = 15
Form9.hsPesAreaInstitucional.Value = 15
Form9.lblPesPoblacion.Caption =
Str$(Form9.hsPesPoblacion.Value)
Form9.lblPesDensPoblacional.Caption =
Str$(Form9.hsPesDensPoblacional.Value)
Form9.lblPesAreaIndustrial.Caption =
Str$(Form9.hsPesAreaIndustrial.Value)
Form9.lblPesAreaConstruida.Caption =
Str$(Form9.hsPesAreaConstruida.Value)
Form9.lblPesAreaInstitucional.Caption =
Str$(Form9.hsPesAreaInstitucional.Value)
Form9.Show 1
Else
OPC = MsgBox("Ud. ya ha ingresado los pesos o influencias de las
variables de EXPOSICIÓN DEL CONTEXTO, desea corregirlos?", vbYesNo)
If OPC = vbYes Then
For I = 0 To 28
If vecentrada(I).variable = 10 Then
Form9.hsPesAreaInstitucional.Value = vecentrada(I).peso(2)
ElseIf vecentrada(I).variable = 11 Then
Form9.hsPesAreaConstruida.Value = vecentrada(I).peso(2)
ElseIf vecentrada(I).variable = 12 Then
Form9.hsPesAreaIndustrial.Value = vecentrada(I).peso(2)
ElseIf vecentrada(I).variable = 13 Then
Form9.hsPesDensPoblacional.Value = vecentrada(I).peso(2)
ElseIf vecentrada(I).variable = 14 Then
Form9.hsPesPoblacion.Value = vecentrada(I).peso(2)
End If
Next I
Form9.lblPesPoblacion.Caption =
Str$(Form9.hsPesPoblacion.Value)
Form9.lblPesDensPoblacional.Caption =
Str$(Form9.hsPesDensPoblacional.Value)
Form9.lblPesAreaIndustrial.Caption =
Str$(Form9.hsPesAreaIndustrial.Value)
Form9.lblPesAreaConstruida.Caption =
Str$(Form9.hsPesAreaConstruida.Value)
Form9.lblPesAreaInstitucional.Caption =
Str$(Form9.hsPesAreaInstitucional.Value)
Form9.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnPesFragilidad_Click()
Dim OPC As Integer
Dim I As Integer
btnPesFragilidad.FontBold = False
If frag = 0 Then
Form5.hsPesABarrMargin.Value = 40
Form5.hsPesTasaMortalidad.Value = 10
Form5.hsPesTasDelincuencia.Value = 10
Form5.hsPesIndDisparidad.Value = 40
Form5.lblPesABarrMargin.Caption =
Str$(Form5.hsPesABarrMargin.Value)
Form5.lblPesTasaMortalidad.Caption =
Str$(Form5.hsPesTasaMortalidad.Value)
Form5.lblPesTasDelincuencia.Caption =
Str$(Form5.hsPesTasDelincuencia.Value)
Form5.lblPesIndDisparidad.Caption =
Str$(Form5.hsPesIndDisparidad.Value)
Form5.frmPesResiliencia.Visible = False
Form5.frmFragilidad.Visible = True
Form5.Show 1
Else
OPC = MsgBox("Ud. ya ha ingresado los pesos o influencias de las
variables de FRAGILIDAD SOCIAL, desea corregirlos?", vbYesNo)
If OPC = vbYes Then
For I = 0 To 28
If vecentrada(I).variable = 6 Then
Form5.hsPesIndDisparidad.Value = vecentrada(I).peso(1)
ElseIf vecentrada(I).variable = 7 Then
Form5.hsPesTasDelincuencia.Value = vecentrada(I).peso(1)
ElseIf vecentrada(I).variable = 8 Then
Form5.hsPesTasaMortalidad.Value = vecentrada(I).peso(1)
ElseIf vecentrada(I).variable = 9 Then
Form5.hsPesABarrMargin.Value = vecentrada(I).peso(1)
End If
Next I
Form5.lblPesABarrMargin.Caption =
Str$(Form5.hsPesABarrMargin.Value)
Form5.lblPesTasaMortalidad.Caption =
Str$(Form5.hsPesTasaMortalidad.Value)
Form5.lblPesTasDelincuencia.Caption =
Str$(Form5.hsPesTasDelincuencia.Value)
Form5.lblPesIndDisparidad.Caption =
Str$(Form5.hsPesIndDisparidad.Value)
Form5.frmPesResiliencia.Visible = False
Form5.frmFragilidad.Visible = True
Form5.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnPesResiliencia_Click()
Dim OPC As Integer
Dim I As Integer

```

```

btnPesResiliencia.FontBold = False
If res = 0 Then
Form5.hsPesCamHospit.Value = 30
Form5.hsPesRecHumanos.Value = 10
Form5.hsPesEspPublico.Value = 10
Form5.hsPesPersRescate.Value = 15
Form5.hsPesDesarrOrga.Value = 10
Form5.hsPesCapOperat.Value = 5
Form5.hsPesMovVial.Value = 5
Form5.lblPesCamHospit.Caption =
Str$(Form5.hsPesCamHospit.Value)
Form5.lblPesRecHumanos.Caption =
Str$(Form5.hsPesRecHumanos.Value)
Form5.lblPesEspPublico.Caption =
Str$(Form5.hsPesEspPublico.Value)
Form5.lblPesPersRescate.Caption =
Str$(Form5.hsPesPersRescate.Value)
Form5.lblPesDesarrOrga.Caption =
Str$(Form5.hsPesDesarrOrga.Value)
Form5.lblPesCapOperat.Caption =
Str$(Form5.hsPesCapOperat.Value)
Form5.lblPesMovVial.Caption = Str$(Form5.hsPesMovVial.Value)
Form5.frmPesResiliencia.Visible = True
Form5.frmFragilidad.Visible = False
Form5.Show 1
Else
OPC = MsgBox("Ud. ya ha ingresado los pesos o influencias de las
variables de RESILIENCIA, desea corregirlos?", vbYesNo)
If OPC = vbYes Then
For I = 0 To 28
If vecentrada(I).variable = 0 Then
Form5.hsPesCapOperat.Value = vecentrada(I).peso(0)
ElseIf vecentrada(I).variable = 1 Then
Form5.hsPesDesarrOrga.Value = vecentrada(I).peso(0)
ElseIf vecentrada(I).variable = 2 Then
Form5.hsPesPersRescate.Value = vecentrada(I).peso(0)
ElseIf vecentrada(I).variable = 3 Then
Form5.hsPesEspPublico.Value = vecentrada(I).peso(0)
ElseIf vecentrada(I).variable = 4 Then
Form5.hsPesRecHumanos.Value = vecentrada(I).peso(0)
ElseIf vecentrada(I).variable = 5 Then
Form5.hsPesCamHospit.Value = vecentrada(I).peso(0)
ElseIf vecentrada(I).variable = 28 Then
Form5.hsPesMovVial.Value = vecentrada(I).peso(0)
End If
Next I
Form5.lblPesCamHospit.Caption =
Str$(Form5.hsPesCamHospit.Value)
Form5.lblPesRecHumanos.Caption =
Str$(Form5.hsPesRecHumanos.Value)
Form5.lblPesEspPublico.Caption =
Str$(Form5.hsPesEspPublico.Value)
Form5.lblPesPersRescate.Caption =
Str$(Form5.hsPesPersRescate.Value)
Form5.lblPesDesarrOrga.Caption =
Str$(Form5.hsPesDesarrOrga.Value)
Form5.lblPesCapOperat.Caption =
Str$(Form5.hsPesCapOperat.Value)
Form5.lblPesMovVial.Caption = Str$(Form5.hsPesMovVial.Value)
Form5.frmPesResiliencia.Visible = True
Form5.frmFragilidad.Visible = False
Form5.Show 1
End If
End If
End Sub

Private Sub btnPesRiesgo_Click()
Dim OPC As Integer
Dim I As Integer
btnPesRiesgo.FontBold = False
If rie = 0 Then
Form4.hsPesArDestruida.Value = 30
Form4.hsPesFallecidos.Value = 10
Form4.hsPesHeridos.Value = 10
Form4.hsPesRotRedAcueducto.Value = 15
Form4.hsPesRotRedGas.Value = 10
Form4.hsPesLonRedElect.Value = 5
Form4.hsPesCentrTelef.Value = 5
Form4.hsPesSubestElectri.Value = 5
Form4.hsPesPuentesAveriadados.Value = 10
Form4.lblPesArDestruida.Caption =
Str$(Form4.hsPesArDestruida.Value)
Form4.lblPesFallecidos.Caption =
Str$(Form4.hsPesFallecidos.Value)
Form4.lblPesHeridos.Caption = Str$(Form4.hsPesHeridos.Value)
Form4.lblPesRotRedAcueducto.Caption =
Str$(Form4.hsPesRotRedAcueducto.Value)
Form4.lblPesRotRedGas.Caption =
Str$(Form4.hsPesRotRedGas.Value)
Form4.lblPesLonRedElect.Caption =
Str$(Form4.hsPesLonRedElect.Value)
Form4.lblPesCentrTelef.Caption =
Str$(Form4.hsPesCentrTelef.Value)
Form4.lblPesSubestElectri.Caption =
Str$(Form4.hsPesSubestElectri.Value)
Form4.lblPesPuentesAveriadados.Caption =
Str$(Form4.hsPesPuentesAveriadados.Value)
End If
Next I
Form4.frmPesRiesgo.Visible = True
Form4.frmPesAmenaza.Visible = False
Form4.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnPoblacion_Click()
variable = 14
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
'Guardar numero de la variable
vecentrada(contador2).variable = variable
btnPoblacion.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "POBLACION"
Form6.Option1(0).Caption = "Escasa"
Form6.Option1(1).Caption = "Reducida"
Form6.Option1(2).Caption = "Notable"
Form6.Option1(3).Caption = "Mucha"
Form6.Option1(4).Caption = "Excesiva"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnPuentes_Click()
variable = 27
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
Form4.lblPesRotRedAcueducto.Caption =
Str$(Form4.hsPesRotRedAcueducto.Value)
Form4.lblPesRotRedGas.Caption =
Str$(Form4.hsPesRotRedGas.Value)
Form4.lblPesLonRedElect.Caption =
Str$(Form4.hsPesLonRedElect.Value)
Form4.lblPesCentrTelef.Caption =
Str$(Form4.hsPesCentrTelef.Value)
Form4.lblPesSubestElectri.Caption =
Str$(Form4.hsPesSubestElectri.Value)
Form4.lblPesPuentesAveriadados.Caption =
Str$(Form4.hsPesPuentesAveriadados.Value)
Form4.frmPesRiesgo.Visible = True
Form4.frmPesAmenaza.Visible = False
Form4.Show 1
Else
OPC = MsgBox("Ud. ya ha ingresado los pesos o influencias de las
variables de RIESGO SÍSMICO, desea corregirlos?", vbYesNo)
If OPC = vbYes Then
For I = 0 To 28
If vecentrada(I).variable = 19 Then
Form4.hsPesSubestElectri.Value = vecentrada(I).peso(4)
Form4.lblPesSubestElectri.Caption =
Str$(Form4.hsPesSubestElectri.Value)
ElseIf vecentrada(I).variable = 20 Then
Form4.hsPesCentrTelef.Value = vecentrada(I).peso(4)
Form4.lblPesCentrTelef.Caption =
Str$(Form4.hsPesCentrTelef.Value)
ElseIf vecentrada(I).variable = 21 Then
Form4.hsPesLonRedElect.Value = vecentrada(I).peso(4)
Form4.lblPesLonRedElect.Caption =
Str$(Form4.hsPesLonRedElect.Value)
ElseIf vecentrada(I).variable = 22 Then
Form4.hsPesRotRedGas.Value = vecentrada(I).peso(4)
Form4.lblPesRotRedGas.Caption =
Str$(Form4.hsPesRotRedGas.Value)
ElseIf vecentrada(I).variable = 23 Then
Form4.hsPesRotRedAcueducto.Value = vecentrada(I).peso(4)
Form4.lblPesRotRedAcueducto.Caption =
Str$(Form4.hsPesRotRedAcueducto.Value)
ElseIf vecentrada(I).variable = 24 Then
Form4.hsPesHeridos.Value = vecentrada(I).peso(4)
Form4.lblPesHeridos.Caption = Str$(Form4.hsPesHeridos.Value)
ElseIf vecentrada(I).variable = 25 Then
Form4.hsPesFallecidos.Value = vecentrada(I).peso(4)
Form4.lblPesFallecidos.Caption =
Str$(Form4.hsPesFallecidos.Value)
ElseIf vecentrada(I).variable = 26 Then
Form4.hsPesArDestruida.Value = vecentrada(I).peso(4)
Form4.lblPesArDestruida.Caption =
Str$(Form4.hsPesArDestruida.Value)
ElseIf vecentrada(I).variable = 27 Then
Form4.hsPesPuentesAveriadados.Value = vecentrada(I).peso(4)
Form4.lblPesPuentesAveriadados.Caption =
Str$(Form4.hsPesPuentesAveriadados.Value)
End If
Next I
Form4.frmPesRiesgo.Visible = True
Form4.frmPesAmenaza.Visible = False
Form4.Show 1
End If
End Sub

```

```

contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
'Guardar numero de la variable
'vecentrada(contador2).variable = variable
btnPuentes.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "PUENTES AVERIADOS"
Form6.Option1(0).Caption = "Muy Pocos"
Form6.Option1(1).Caption = "Pocos"
Form6.Option1(2).Caption = "Numerosos"
Form6.Option1(3).Caption = "Muchos"
Form6.Option1(4).Caption = "Excesivos"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnRedesElectricas_Click()
variable = 21
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
'Guardar numero de la variable
'vecentrada(contador2).variable = variable
btnRedesElectricas.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "LONGITUD DE REDES ELECTRICAS
CAIDAS"
Form6.Option1(0).Caption = "Muy Poca"
Form6.Option1(1).Caption = "Poca"
Form6.Option1(2).Caption = "Considerable"
Form6.Option1(3).Caption = "Mucha"
Form6.Option1(4).Caption = "Excesiva"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnRescate_Click()
variable = 2
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
'Guardar numero de la variable
'vecentrada(contador2).variable = variable
btnRescate.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "PERSONAL DE RESCATE"
Form6.Option1(0).Caption = "Mucho"
Form6.Option1(1).Caption = "Notable"
Form6.Option1(2).Caption = "Reducido"
Form6.Option1(3).Caption = "Escaso"
Form6.Option1(4).Caption = "Mínimo"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnSalud_Click()
variable = 4
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
'Guardar numero de la variable
'vecentrada(contador2).variable = variable
btnSalud.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "RECURSO HUMANO EN SALUD"
Form6.Option1(0).Caption = "Mucho"
Form6.Option1(1).Caption = "Notable"
Form6.Option1(2).Caption = "Reducido"
Form6.Option1(3).Caption = "Escaso"
Form6.Option1(4).Caption = "Mínimo"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub btnTelefonicas_Click()
variable = 20
ContadorVariable = ContadorVariable + 1
contador2 = ContadorVariable
comprobacion (variable)
'Guardar numero de la variable
'vecentrada(contador2).variable = variable
btnTelefonicas.FontBold = False
If ncali = 1 Then
Form6.lblTipo.Caption = "CENTRALES TELEFONICAS
AFECTADAS"
Form6.Option1(0).Caption = "Muy Pocas"
Form6.Option1(1).Caption = "Pocas"
Form6.Option1(2).Caption = "Numerosas"
Form6.Option1(3).Caption = "Muchas"
Form6.Option1(4).Caption = "Excesivas"
Form6.Show 1
End If
End Sub

Private Sub Command1_Click()
Dim OPC As Integer
If amenaza = 4 And ame = 1 Then
MPNuevo.Tab = 1
ElseIf amenaza <> 4 And ame <> 1 Then
OPC = MsgBox("No ha calificado todas las variables de
AMENAZA SÍSMICA, ni ha introducido sus pesos o importancias
relativas.", vbOKOnly)
ElseIf amenaza = 4 And ame <> 1 Then
OPC = MsgBox("Introduzca los pesos o importancias relativas de
las variables de AMENAZA SÍSMICA", vbOKOnly)
ElseIf amenaza <> 4 And ame = 1 Then
OPC = MsgBox("No ha calificado todas las variables de
AMENAZA SÍSMICA", vbOKOnly)
End If
End Sub

Private Sub Command2_Click()
Dim OPC As Integer
MPNuevo.Tab = 3
End Sub

Private Sub Command3_Click()
Dim OPC As Integer
If resiliencia = 7 And res = 1 Then
MPNuevo.Tab = 4
ElseIf resiliencia <> 7 And res <> 1 Then
OPC = MsgBox("No ha calificado todas las variables de
RESILIENCIA, ni ha introducido sus pesos o importancias
relativas.", vbOKOnly)
ElseIf resiliencia = 7 And res <> 1 Then
OPC = MsgBox("Introduzca los pesos o importancias relativas de
las variables de RESILIENCIA", vbOKOnly)
ElseIf resiliencia <> 7 And res = 1 Then
OPC = MsgBox("No ha calificado todas las variables de
RESILIENCIA", vbOKOnly)
End If
End Sub

Private Sub Command4_Click()
Dim OPC As Integer
If exposicion = 5 And expo = 1 Then
MPNuevo.Tab = 2
ElseIf exposicion <> 5 And expo <> 1 Then
OPC = MsgBox("No ha calificado todas las variables de
EXPOSICIÓN DEL CONTEXTO, ni ha introducido sus pesos o
importancias relativas.", vbOKOnly)
ElseIf exposicion = 5 And expo <> 1 Then
OPC = MsgBox("Introduzca los pesos o importancias relativas de
las variables de EXPOSICIÓN DEL CONTEXTO", vbOKOnly)
ElseIf exposicion <> 5 And expo = 1 Then
OPC = MsgBox("No ha calificado todas las variables de
EXPOSICIÓN DEL CONTEXTO", vbOKOnly)
End If
End Sub

Private Sub Command5_Click()
MPNuevo.Tab = 0
End Sub

Private Sub Command6_Click()
Dim OPC As Integer
If fragilidad = 4 And frag = 1 Then
MPNuevo.Tab = 3
ElseIf fragilidad <> 4 And frag <> 1 Then
OPC = MsgBox("No ha calificado todas las variables de
FRAGILIDAD SOCIAL, ni ha introducido sus pesos o importancias
relativas.", vbOKOnly)
ElseIf fragilidad = 4 And expo <> 1 Then
OPC = MsgBox("Introduzca los pesos o importancias relativas de
las variables de FRAGILIDAD SOCIAL", vbOKOnly)
ElseIf fragilidad <> 4 And frag = 1 Then
OPC = MsgBox("No ha calificado todas las variables de
FRAGILIDAD SOCIAL", vbOKOnly)
End If
End Sub

Private Sub Command7_Click()
MPNuevo.Tab = 1
End Sub

```

```
Private Sub Command9_Click()
MPNuevo.Tab = 2
End Sub
```

```
Private Sub ChkRiesgo_Click()
If ChkRiesgo.Value = 1 Then
nimp = 1
btnAreaDestruida.Enabled = False
btnFallecidos.Enabled = False
btnHeridos.Enabled = False
btnAcueducto.Enabled = False
btnPuentes.Enabled = False
btnGas.Enabled = False
btnRedesElectricas.Enabled = False
btnTelefonicas.Enabled = False
btnElectricas.Enabled = False
btnPesRiesgo.Enabled = False
ElseIf ChkRiesgo.Value = 0 Then
btnAreaDestruida.Enabled = True
btnFallecidos.Enabled = True
btnHeridos.Enabled = True
btnAcueducto.Enabled = True
btnPuentes.Enabled = True
btnGas.Enabled = True
btnRedesElectricas.Enabled = True
btnTelefonicas.Enabled = True
btnElectricas.Enabled = True
btnPesRiesgo.Enabled = True
nimp = 0
End If
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
ncali = 1
mu = 1
vectoraceros
ContadorVariable = -1
MPNuevo.Tab = 0
variable = 0
riesgo = 0
amenaza = 0
exposicion = 0
fragilidad = 0
resiliencia = 0
rie = 0
ame = 0
expo = 0
frag = 0
res = 0
nimp = 0
End Sub
```

**FORM 2**

```
Private Sub Form_Load()
Form10.Show 0
End Sub
```

```
Private Sub mnuArcNuevo_Click()
Form1.Show 1
End Sub
```

```
Private Sub mnuContador_Click()
Dim OPC As Integer
OPC = MsgBox("Esta seguro de querer reiniciar los contadores de calibración ?", vbYesNo)
If OPC = vbYes Then
dtaContador.Recordset.MoveFirst
dtaContador.Recordset.Edit
For x = 0 To 4
dtaContador.Recordset.Fields(x).Value = 0
Next x
dtaContador.Recordset.Update
dtaContador.Recordset.MoveNext
dtaContador.Recordset.Edit
For x = 0 To 4
dtaContador.Recordset.Fields(x).Value = 0
Next x
dtaContador.Recordset.Update
End If
End Sub
```

```
Private Sub mnuMatriz_Click()
Dim OPC As Integer
Dim x As Integer
```

```
OPC = MsgBox("Esta seguro de querer reiniciar las matrices de vulnerabilidad y riesgo ?", vbYesNo)
If OPC = vbYes Then
'REINICIANDO MATRIZ DE RIESGO
dtaDano.Recordset.MoveFirst
dtaDano.Recordset.Edit
For x = 0 To 1
dtaDano.Recordset.Fields(x + 1).Value = 0.1
Next x
dtaDano.Recordset.Update
dtaDano.Recordset.MoveNext
dtaDano.Recordset.Edit
For x = 0 To 1
dtaDano.Recordset.Fields(x + 1).Value = 0.2
Next x
dtaDano.Recordset.Update
dtaDano.Recordset.MoveNext
dtaDano.Recordset.Edit
For x = 0 To 1
dtaDano.Recordset.Fields(x + 1).Value = 0.35
Next x
dtaDano.Recordset.Update
dtaDano.Recordset.MoveNext
dtaDano.Recordset.Edit
For x = 0 To 1
dtaDano.Recordset.Fields(x + 1).Value = 0.6
Next x
dtaDano.Recordset.Update
dtaDano.Recordset.MoveNext
dtaDano.Recordset.Edit
For x = 0 To 1
dtaDano.Recordset.Fields(x + 1).Value = 0.9
Next x
dtaDano.Recordset.Update
'REINICIANDO MATRIZ DE VULNERABILIDAD
dtaDanno2.Recordset.MoveFirst
dtaDanno2.Recordset.Edit
For x = 0 To 2
dtaDanno2.Recordset.Fields(x + 1).Value = 0.1
Next x
dtaDanno2.Recordset.Update
dtaDanno2.Recordset.MoveNext
dtaDanno2.Recordset.Edit
For x = 0 To 2
dtaDanno2.Recordset.Fields(x + 1).Value = 0.2
Next x
dtaDanno2.Recordset.Update
dtaDanno2.Recordset.MoveNext
dtaDanno2.Recordset.Edit
For x = 0 To 2
dtaDanno2.Recordset.Fields(x + 1).Value = 0.35
Next x
dtaDanno2.Recordset.Update
dtaDanno2.Recordset.MoveNext
dtaDanno2.Recordset.Edit
For x = 0 To 2
dtaDanno2.Recordset.Fields(x + 1).Value = 0.6
Next x
dtaDanno2.Recordset.Update
dtaDanno2.Recordset.MoveNext
dtaDanno2.Recordset.Edit
For x = 0 To 2
dtaDanno2.Recordset.Fields(x + 1).Value = 0.9
Next x
dtaDanno2.Recordset.Update
End If
End Sub
```

```
Private Sub Salir_Click()
Unload Form2
End Sub
```

**FORM 4**

```
Private Sub btnAcepPesAmenaza_Click()
Dim I As Integer
Dim OPC As Integer
OPC = MsgBox("Todos los pesos ingresados son correctos?", vbYesNo)
If OPC = vbYes Then
'Guardando pesos en vector
For I = 0 To 28
If vecentrada(I).variable = 15 Then
vecentrada(I).peso(0) = 0
vecentrada(I).peso(1) = 0
```

```

    vecentrada(I).peso(2) = 0
    vecentrada(I).peso(3) = val(lblPesASuscOtrosEfectos.Caption)
    vecentrada(I).peso(4) = 0
    ElseIf vecentrada(I).variable = 16 Then
    vecentrada(I).peso(0) = 0
    vecentrada(I).peso(1) = 0
    vecentrada(I).peso(2) = 0
    vecentrada(I).peso(3) = val(lblPesAPotLicuacion.Caption)
    vecentrada(I).peso(4) = 0
    ElseIf vecentrada(I).variable = 17 Then
    vecentrada(I).peso(0) = 0
    vecentrada(I).peso(1) = 0
    vecentrada(I).peso(2) = 0
    vecentrada(I).peso(3) = val(lblPesASueBlandos.Caption)
    vecentrada(I).peso(4) = 0
    ElseIf vecentrada(I).variable = 18 Then
    vecentrada(I).peso(0) = 0
    vecentrada(I).peso(1) = 0
    vecentrada(I).peso(2) = 0
    vecentrada(I).peso(3) = val(lblPesAceleracion.Caption)
    vecentrada(I).peso(4) = 0
    End If
    Next I
    ame = 1
    Unload Form4
    Y = calpesoAmenaza(vecentrada())
    evaluaamenaza
    End If
End Sub

Private Sub btnAceptPesRiesgo_Click()
Dim I As Integer
Dim OPC As Integer
OPC = MsgBox("Todos los pesos ingresados son correctos?",
vbYesNo)
If OPC = vbYes Then
'Guardando pesos en vector
For I = 0 To 28
If vecentrada(I).variable = 19 Then
vecentrada(I).peso(0) = 0
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = val(lblPesSubestElectri.Caption)
ElseIf vecentrada(I).variable = 20 Then
vecentrada(I).peso(0) = 0
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = val(lblPesCentrTelef.Caption)
ElseIf vecentrada(I).variable = 21 Then
vecentrada(I).peso(0) = 0
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = val(lblPesLonRedElect.Caption)
ElseIf vecentrada(I).variable = 22 Then
vecentrada(I).peso(0) = 0
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = val(lblPesRotRedGas.Caption)
ElseIf vecentrada(I).variable = 23 Then
vecentrada(I).peso(0) = 0
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = val(lblPesRotRedAcueducto.Caption)
ElseIf vecentrada(I).variable = 24 Then
vecentrada(I).peso(0) = 0
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = val(lblPesHeridos.Caption)
ElseIf vecentrada(I).variable = 25 Then
vecentrada(I).peso(0) = 0
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = val(lblPesFallecidos.Caption)
ElseIf vecentrada(I).variable = 26 Then
vecentrada(I).peso(0) = 0
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = val(lblPesArDestruida.Caption)
ElseIf vecentrada(I).variable = 27 Then
vecentrada(I).peso(0) = 0
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = val(lblPesPuentesAveriadados.Caption)
End If
Next I
rie = 1
Unload Form4
r = calpesoRiesgo(vecentrada(), nimp)
evaluarriesgo
End If
End Sub

Private Sub hsPesAceleracion_Change()
lblPesAceleracion.Caption = Str$(hsPesAceleracion.Value)
End Sub

Private Sub hsPesAPotLicuacion_Change()
lblPesAPotLicuacion.Caption = Str$(hsPesAPotLicuacion.Value)
End Sub

Private Sub hsPesArDestruida_Change()
lblPesArDestruida.Caption = Str$(hsPesArDestruida.Value)
End Sub

Private Sub hsPesASueBlandos_Change()
lblPesASueBlandos.Caption = Str$(hsPesASueBlandos.Value)
End Sub

Private Sub hsPesASuscOtrosEfectos_Change()
lblPesASuscOtrosEfectos.Caption = Str$(hsPesASuscOtrosEfectos.Value)
End Sub

Private Sub hsPesCentrTelef_Change()
lblPesCentrTelef.Caption = Str$(hsPesCentrTelef.Value)
End Sub

Private Sub hsPesFallecidos_Change()
lblPesFallecidos.Caption = Str$(hsPesFallecidos.Value)
End Sub

Private Sub hsPesHeridos_Change()
lblPesHeridos.Caption = Str$(hsPesHeridos.Value)
End Sub

Private Sub hsPesLonRedElect_Change()
lblPesLonRedElect.Caption = Str$(hsPesLonRedElect.Value)
End Sub

Private Sub hsPesPuentesAveriadados_Change()
lblPesPuentesAveriadados.Caption = Str$(hsPesPuentesAveriadados.Value)
End Sub

Private Sub hsPesRotRedAcueducto_Change()
lblPesRotRedAcueducto.Caption = Str$(hsPesRotRedAcueducto.Value)
End Sub

Private Sub hsPesRotRedGas_Change()
lblPesRotRedGas.Caption = Str$(hsPesRotRedGas.Value)
End Sub

Private Sub hsPesSubestElectri_Change()
lblPesSubestElectri.Caption = Str$(hsPesSubestElectri.Value)
End Sub

```

#### FORM 5

```

Private Sub btnAcepPFragilidad_Click()
Dim I As Integer
Dim OPC As Integer
OPC = MsgBox("Todos los pesos ingresados son correctos?",
vbYesNo)
If OPC = vbYes Then
'Guardando pesos en vector
For I = 0 To 28
If vecentrada(I).variable = 6 Then
vecentrada(I).peso(0) = 0
vecentrada(I).peso(1) = val(lblPesIndDisparidad.Caption)
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0

```

```

    vecentrada(I).peso(4) = 0
    ElseIf vecentrada(I).variable = 7 Then
    vecentrada(I).peso(0) = 0
    vecentrada(I).peso(1) = val(lblPesTasDelincuencia.Caption)
    vecentrada(I).peso(2) = 0
    vecentrada(I).peso(3) = 0
    vecentrada(I).peso(4) = 0
    ElseIf vecentrada(I).variable = 8 Then
    vecentrada(I).peso(0) = 0
    vecentrada(I).peso(1) = val(lblPesTasaMortalidad.Caption)
    vecentrada(I).peso(2) = 0
    vecentrada(I).peso(3) = 0
    vecentrada(I).peso(4) = 0
    ElseIf vecentrada(I).variable = 9 Then
    vecentrada(I).peso(0) = 0
    vecentrada(I).peso(1) = val(lblPesABarrMargin.Caption)
    vecentrada(I).peso(2) = 0
    vecentrada(I).peso(3) = 0
    vecentrada(I).peso(4) = 0
    End If
    Next I
    frag = 1
    Unload Form5
    Y = calpesosFragilidad(vecentrada())
    evaluafragilidad
    End If
End Sub

Private Sub btnAcepPResiliencia_Click()
Dim I As Integer
Dim OPC As Integer
OPC = MsgBox("Todos los pesos ingresados son correctos?",
vbYesNo)
If OPC = vbYes Then
'Guardando pesos en vector
For I = 0 To 28
If vecentrada(I).variable = 0 Then
vecentrada(I).peso(0) = val(lblPesCapOperat.Caption)
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = 0
ElseIf vecentrada(I).variable = 1 Then
vecentrada(I).peso(0) = val(lblPesDesarrOrga.Caption)
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = 0
ElseIf vecentrada(I).variable = 2 Then
vecentrada(I).peso(0) = val(lblPesPersRescate.Caption)
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = 0
ElseIf vecentrada(I).variable = 3 Then
vecentrada(I).peso(0) = val(lblPesEspPublico.Caption)
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = 0
ElseIf vecentrada(I).variable = 4 Then
vecentrada(I).peso(0) = val(lblPesRecHumanos.Caption)
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = 0
ElseIf vecentrada(I).variable = 5 Then
vecentrada(I).peso(0) = val(lblPesCamHospit.Caption)
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = 0
ElseIf vecentrada(I).variable = 28 Then
vecentrada(I).peso(0) = val(lblPesMovVial.Caption)
vecentrada(I).peso(1) = 0
vecentrada(I).peso(2) = 0
vecentrada(I).peso(3) = 0
vecentrada(I).peso(4) = 0
End If
Next I
res = 1
Unload Form5
re = calpesosResiliencia(vecentrada())
evaluaresiliencia
End If
End Sub

Private Sub hsPesABarrMargin_Change()
lblPesABarrMargin.Caption = Str$(hsPesABarrMargin.Value)
End Sub

Private Sub hsPesCamHospit_Change()
lblPesCamHospit.Caption = Str$(hsPesCamHospit.Value)
End Sub

Private Sub hsPesCapOperat_Change()
lblPesCapOperat.Caption = Str$(hsPesCapOperat.Value)
End Sub

Private Sub hsPesDesarrOrga_Change()
lblPesDesarrOrga.Caption = Str$(hsPesDesarrOrga.Value)
End Sub

Private Sub hsPesEspPublico_Change()
lblPesEspPublico.Caption = Str$(hsPesEspPublico.Value)
End Sub

Private Sub hsPesIndDisparidad_Change()
lblPesIndDisparidad.Caption = Str$(hsPesIndDisparidad.Value)
End Sub

Private Sub hsPesMovVial_Change()
lblPesMovVial.Caption = Str$(hsPesMovVial.Value)
End Sub

Private Sub hsPesPersRescate_Change()
lblPesPersRescate.Caption = Str$(hsPesPersRescate.Value)
End Sub

Private Sub hsPesRecHumanos_Change()
lblPesRecHumanos.Caption = Str$(hsPesRecHumanos.Value)
End Sub

Private Sub hsPesTasaMortalidad_Change()
lblPesTasaMortalidad.Caption = Str$(hsPesTasaMortalidad.Value)
End Sub

Private Sub hsPesTasDelincuencia_Change()
lblPesTasDelincuencia.Caption = Str$(hsPesTasDelincuencia.Value)
End Sub
=

FORM 6

Private Sub btnAceptar_Click()
Dim I As Integer
'Guardar numero de la variable
vecentrada(contador2).variable = variable
'Guardando Calificacion
If Option1(0).Value = True Then
vecentrada(contador2).Calificacion = 0
ElseIf Option1(1).Value = True Then
vecentrada(contador2).Calificacion = 1
ElseIf Option1(2).Value = True Then
vecentrada(contador2).Calificacion = 2
ElseIf Option1(3).Value = True Then
vecentrada(contador2).Calificacion = 3
ElseIf Option1(4).Value = True Then
vecentrada(contador2).Calificacion = 4
End If
'descarga formulario de tipos de datos
Unload Form6
End Sub

Private Sub btnAyuda_Click()
If variable = 0 Then
Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 1 Then
Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 2 Then
Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 3 Then
Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 4 Then
Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 5 Then
Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 6 Then
Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 7 Then
Form3.lblAyuda = ""

```

```

ElseIf variable = 8 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 9 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 10 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 11 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 12 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 13 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 14 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 15 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 16 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 17 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 18 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 19 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 20 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 21 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 22 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 23 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 24 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 25 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 26 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 27 Then
  Form3.lblAyuda = ""
ElseIf variable = 28 Then
  Form3.lblAyuda = ""
End If
Form3.Show 1
End Sub

FORM 7

Private Sub btnAceptar_Click()
  Dim opt As Integer
  opt = MsgBox("Descargará los resultados de la presente
  evaluación", vbOKCancel)
  If opt = vbOK Then
    Unload Form7
  End If
End Sub

Private Sub Command1_Click()
  SSRes.Tab = 1
End Sub

Private Sub Command2_Click()
  SSRes.Tab = 2
End Sub

Private Sub Command3_Click()
  SSRes.Tab = 0
End Sub

Private Sub Command4_Click()
  SSRes.Tab = 1
End Sub

Private Sub Form_Load()
  SSRes.Tab = 0
End Sub

FORM 9

Private Sub btnAcepPExposicion_Click()
  Dim I As Integer
  Dim OPC As Integer
  OPC = MsgBox("Todos los pesos ingresados son correctos?",
  vbYesNo)

  If OPC = vbYes Then
    'Guardando pesos en vector
    For I = 0 To 28
      If vecentrada(I).variable = 10 Then
        vecentrada(I).peso(0) = 0
        vecentrada(I).peso(1) = 0
        vecentrada(I).peso(2) = val(lblPesAreaInstitucional.Caption)
        vecentrada(I).peso(3) = 0
        vecentrada(I).peso(4) = 0
      ElseIf vecentrada(I).variable = 11 Then
        vecentrada(I).peso(0) = 0
        vecentrada(I).peso(1) = 0
        vecentrada(I).peso(2) = val(lblPesAreaIndustrial.Caption)
        vecentrada(I).peso(3) = 0
        vecentrada(I).peso(4) = 0
      ElseIf vecentrada(I).variable = 12 Then
        vecentrada(I).peso(0) = 0
        vecentrada(I).peso(1) = 0
        vecentrada(I).peso(2) = val(lblPesAreaConstruida.Caption)
        vecentrada(I).peso(3) = 0
        vecentrada(I).peso(4) = 0
      ElseIf vecentrada(I).variable = 13 Then
        vecentrada(I).peso(0) = 0
        vecentrada(I).peso(1) = 0
        vecentrada(I).peso(2) = val(lblPesDensPoblacional.Caption)
        vecentrada(I).peso(3) = 0
        vecentrada(I).peso(4) = 0
      ElseIf vecentrada(I).variable = 14 Then
        vecentrada(I).peso(0) = 0
        vecentrada(I).peso(1) = 0
        vecentrada(I).peso(2) = val(lblPesPoblacion.Caption)
        vecentrada(I).peso(3) = 0
        vecentrada(I).peso(4) = 0
      End If
    Next I
    expo = 1
    Unload Form9
    Y = calpesosExposicion(vecentrada())
    evaluaexposicion
  End If
End Sub

Private Sub hsPesAreaConstruida_Change()
  lblPesAreaConstruida.Caption = Str$(hsPesAreaConstruida.Value)
End Sub

Private Sub hsPesAreaIndustrial_Change()
  lblPesAreaIndustrial.Caption = Str$(hsPesAreaIndustrial.Value)
End Sub

Private Sub hsPesAreaInstitucional_Change()
  lblPesAreaInstitucional.Caption = Str$(hsPesAreaInstitucional.Value)
End Sub

Private Sub hsPesDensPoblacional_Change()
  lblPesDensPoblacional.Caption = Str$(hsPesDensPoblacional.Value)
End Sub

Private Sub hsPesPoblacion_Change()
  lblPesPoblacion.Caption = Str$(hsPesPoblacion.Value)
End Sub

Private Sub Form_Load()
  Dim I As Integer
  If expo = 0 Then
    hsPesPoblacion.Value = 20
    hsPesDensPoblacional.Value = 20
    hsPesAreaConstruida.Value = 20
    hsPesAreaIndustrial.Value = 20
    hsPesAreaInstitucional.Value = 20
    lblPesAreaConstruida.Caption = Str$(hsPesAreaConstruida.Value)
    lblPesAreaIndustrial.Caption = Str$(hsPesAreaIndustrial.Value)
    lblPesAreaInstitucional.Caption = Str$(hsPesAreaInstitucional.Value)
    lblPesDensPoblacional.Caption = Str$(hsPesDensPoblacional.Value)
    lblPesPoblacion.Caption = Str$(hsPesPoblacion.Value)
  Else
    For I = 0 To 28
      If vecentrada(I).variable = 10 Then
        hsPesAreaInstitucional.Value = vecentrada(I).peso(2)
        lblPesAreaInstitucional.Caption = Str$(hsPesAreaInstitucional.Value)
      ElseIf vecentrada(I).variable = 11 Then
        hsPesAreaIndustrial.Value = vecentrada(I).peso(2)
        lblPesAreaIndustrial.Caption = Str$(hsPesAreaIndustrial.Value)
      End If
    Next I
  End If
End Sub

```

```

ElseIf vecentrada(I).variable = 12 Then
  hsPesAreaConstruida.Value = vecentrada(I).peso(2)
  lblPesAreaConstruida.Caption =
Str$(hsPesAreaConstruida.Value)
ElseIf vecentrada(I).variable = 13 Then
  hsPesDensPoblacional.Value = vecentrada(I).peso(2)
  lblPesDensPoblacional.Caption =
Str$(hsPesDensPoblacional.Value)
ElseIf vecentrada(I).variable = 14 Then
  hsPesPoblacion.Value = vecentrada(I).peso(2)
  lblPesPoblacion.Caption = Str$(hsPesPoblacion.Value)
End If
Next I
End If
End Sub

```

**MODULO 2: EVALUACIÓN**

```

Function normalizar()
  Funcion para normalizar los pesos de las variables
  'Declaracion de variables temporales
  Dim W As Integer, f As Integer
  Dim sumas(4) As Double
  For f = 0 To 4
    sumas(f) = 0
  Next f
  For f = 0 To 4 Step 1
    mayResiliencia(f) = 0
    mayFragilidad(f) = 0
    mayExposicion(f) = 0
    mayAmenaza(f) = 0
    mayRiesgo(f) = 0
  Next f

  For W = 0 To 28 Step 1
    sumas(0) = sumas(0) + vecentrada(W).peso(0)
    sumas(1) = sumas(1) + vecentrada(W).peso(1)
    sumas(2) = sumas(2) + vecentrada(W).peso(2)
    sumas(3) = sumas(3) + vecentrada(W).peso(3)
    sumas(4) = sumas(4) + vecentrada(W).peso(4)

    If (mayResiliencia(vecentrada(W).Calificacion)
vecentrada(W).peso(0)) Then
      mayResiliencia(vecentrada(W).Calificacion)
vecentrada(W).peso(0)
      End If
      If (mayFragilidad(vecentrada(W).Calificacion)
vecentrada(W).peso(1)) Then
        mayFragilidad(vecentrada(W).Calificacion)
vecentrada(W).peso(1)
        End If
        If (mayExposicion(vecentrada(W).Calificacion)
vecentrada(W).peso(2)) Then
          mayExposicion(vecentrada(W).Calificacion)
vecentrada(W).peso(2)
          End If
          If (mayAmenaza(vecentrada(W).Calificacion)
vecentrada(W).peso(3)) Then
            mayAmenaza(vecentrada(W).Calificacion)
vecentrada(W).peso(3)
            End If
            If (mayRiesgo(vecentrada(W).Calificacion)
vecentrada(W).peso(4)) Then
              mayRiesgo(vecentrada(W).Calificacion)
vecentrada(W).peso(4)
              End If
              Next W

  For W = 0 To 4 Step 1
    If sumas(0) <> 0 Then
      mayResiliencia(W) = mayResiliencia(W) / sumas(0)
    End If
    If sumas(1) <> 0 Then
      mayFragilidad(W) = mayFragilidad(W) / sumas(1)
    End If
    If sumas(2) <> 0 Then
      mayExposicion(W) = mayExposicion(W) / sumas(2)
    End If
    If sumas(3) <> 0 Then
      mayAmenaza(W) = mayAmenaza(W) / sumas(3)
    End If
    If sumas(4) <> 0 Then
      mayRiesgo(W) = mayRiesgo(W) / sumas(4)
    End If
  Next W
End Function

Function pendiente(x1 As Double, y1 As Double, x2 As Double, y2
As Double) As Double
  pendiente = (y2 - y1) / (x2 - x1)
End Function

Function corte(x1 As Double, y1 As Double, x2 As Double, y2 As
Double) As Double
  corte = y1 - ((y2 - y1) / (x2 - x1)) * x1
End Function

Function coordx(m1 As Double, b1 As Double, m2 As Double, b2
As Double) As Double
  If m1 <> m2 Then
    coordx = (b2 - b1) / (m1 - m2)
  Else
    coordx = 0
  End If
End Function

Function coordy(m1 As Double, b1 As Double, m2 As Double, b2
As Double) As Double
  If m1 <> m2 Then
    coordy = m1 * ((b2 - b1) / (m1 - m2)) + b1
  Else
    coordy = 0
  End If
End Function

Function analisis(peso() As Double, val As Integer) As Double
  analisis = 0
  Dim sumaarea As Double
  Dim m(7) As Double
  Dim b(7) As Double
  Dim xp(3) As Double
  Dim yp(3) As Double
  Dim a(13) As Double
  Dim xa(13) As Double
  Dim W As Integer
  Dim valor As Double
  sumaarea = 0
  m(0) = pendiente(0.17, 0, 0.03, peso(0))
  b(0) = corte(0.17, 0, 0.03, peso(0))
  m(1) = pendiente(0.03, 0, 0.17, peso(1))
  b(1) = corte(0.03, 0, 0.17, peso(1))
  m(2) = pendiente(0.33, 0, 0.17, peso(1))
  b(2) = corte(0.33, 0, 0.17, peso(1))
  m(3) = pendiente(0.17, 0, 0.33, peso(2))
  b(3) = corte(0.17, 0, 0.33, peso(2))
  m(4) = pendiente(0.55, 0, 0.33, peso(2))
  b(4) = corte(0.55, 0, 0.33, peso(2))
  m(5) = pendiente(0.33, 0, 0.55, peso(3))
  b(5) = corte(0.33, 0, 0.55, peso(3))
  m(6) = pendiente(0.78, 0, 0.55, peso(3))
  b(6) = corte(0.78, 0, 0.55, peso(3))
  m(7) = pendiente(0.55, 0, 0.78, peso(4))
  b(7) = corte(0.55, 0, 0.78, peso(4))
  For W = 0 To 6 Step 2
    xp(W / 2) = coordx(m(W), b(W), m(W + 1), b(W + 1))
    yp(W / 2) = coordy(m(W), b(W), m(W + 1), b(W + 1))
  Next W
  Form8.FlpGrf1.DataInit = 6
  Form8.FlpGrf1.GraphType = 0
  Form8.FlpGrf1.FontOpen = "Times New Roman"
  Form8.FlpGrf1.FontCurrent = 1
  Form8.FlpGrf1.FontSize = 18
  Form8.FlpGrf1.FontBold = True
  Form8.FlpGrf1.GraphTitleFont = 1
  Form8.FlpGrf1.GraphTitle = ""

  'GRAFICAR EL CONJUNTO BORROSO ESCALADO
  Form8.FlpGrf1.DataValue(1, 0) = 0
  Form8.FlpGrf1.DataValue(1, 1) = 0
  Form8.FlpGrf1.DataValue(1, 2) = 0
  Form8.FlpGrf1.DataValue(1, 3) = 0
  Form8.FlpGrf1.DataValue(1, 4) = 0
  Form8.FlpGrf1.DataValue(1, 5) = 0

  Form8.FlpGrf1.DataValue(2, 0) = 0
  Form8.FlpGrf1.DataValue(2, 1) = peso(0)
  Form8.FlpGrf1.DataValue(2, 2) = 0
  Form8.FlpGrf1.DataValue(2, 3) = 0
  Form8.FlpGrf1.DataValue(2, 4) = 0
  Form8.FlpGrf1.DataValue(2, 5) = 0

```

```

Form8.FlpGrf1.Data Value(3, 0) = 0.07
Form8.FlpGrf1.Data Value(3, 1) = peso(0)
Form8.FlpGrf1.Data Value(3, 2) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(3, 3) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(3, 4) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(3, 5) = 0

Form8.FlpGrf1.Data Value(4, 0) = 0.17
Form8.FlpGrf1.Data Value(4, 1) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(4, 2) = peso(1)
Form8.FlpGrf1.Data Value(4, 3) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(4, 4) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(4, 5) = 0

valor = m(3) * 0.33 + b(3)
Form8.FlpGrf1.Data Value(5, 0) = 0.33
Form8.FlpGrf1.Data Value(5, 1) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(5, 2) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(5, 3) = valor
Form8.FlpGrf1.Data Value(5, 4) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(5, 5) = 0

valor = m(5) * 0.33 + b(5)
Form8.FlpGrf1.Data Value(6, 0) = 0.33
Form8.FlpGrf1.Data Value(6, 1) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(6, 2) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(6, 3) = peso(2)
Form8.FlpGrf1.Data Value(6, 4) = valor
Form8.FlpGrf1.Data Value(6, 5) = 0

valor = m(5) * 0.55 + b(5)
Form8.FlpGrf1.Data Value(7, 0) = 0.55
Form8.FlpGrf1.Data Value(7, 1) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(7, 2) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(7, 3) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(7, 4) = valor
Form8.FlpGrf1.Data Value(7, 5) = 0

Form8.FlpGrf1.Data Value(8, 0) = 0.55
Form8.FlpGrf1.Data Value(8, 1) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(8, 2) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(8, 3) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(8, 4) = peso(3)
Form8.FlpGrf1.Data Value(8, 5) = 0

Form8.FlpGrf1.Data Value(9, 0) = 0.78
Form8.FlpGrf1.Data Value(9, 1) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(9, 2) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(9, 3) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(9, 4) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(9, 5) = peso(4)

Form8.FlpGrf1.Data Value(10, 0) = 1
Form8.FlpGrf1.Data Value(10, 1) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(10, 2) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(10, 3) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(10, 4) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(10, 5) = peso(4)

Form8.FlpGrf1.Data Value(11, 0) = 1
Form8.FlpGrf1.Data Value(11, 1) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(11, 2) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(11, 3) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(11, 4) = 0
Form8.FlpGrf1.Data Value(11, 5) = 0

Form8.FlpGrf1.Column = 0
Form8.FlpGrf1.ColumnAxis = 0

Form8.FlpGrf1.Column = 1
Form8.FlpGrf1.ColumnAxis = 1
Form8.FlpGrf1.ColumnType = 1
Form8.FlpGrf1.ColumnStyle = 1
Form8.FlpGrf1.GraphAreaFrame True, 22, 1
Form8.FlpGrf1.ColumnColor = RGB(0, 0, 255)

Form8.FlpGrf1.Column = 0
Form8.FlpGrf1.ColumnAxis = 0

Form8.FlpGrf1.Column = 2
Form8.FlpGrf1.ColumnAxis = 1
Form8.FlpGrf1.ColumnType = 1
Form8.FlpGrf1.ColumnStyle = 1
Form8.FlpGrf1.GraphAreaFrame True, 22, 1
Form8.FlpGrf1.ColumnColor = RGB(0, 255, 0)

Form8.FlpGrf1.Column = 0
Form8.FlpGrf1.ColumnAxis = 0

Form8.FlpGrf1.Column = 3
Form8.FlpGrf1.ColumnAxis = 1
Form8.FlpGrf1.ColumnType = 1
Form8.FlpGrf1.ColumnStyle = 1
Form8.FlpGrf1.GraphAreaFrame True, 22, 1
Form8.FlpGrf1.ColumnColor = RGB(255, 0, 0)

Form8.FlpGrf1.Column = 0
Form8.FlpGrf1.ColumnAxis = 0

Form8.FlpGrf1.Column = 4
Form8.FlpGrf1.ColumnAxis = 1
Form8.FlpGrf1.ColumnType = 1
Form8.FlpGrf1.ColumnStyle = 1
Form8.FlpGrf1.GraphAreaFrame True, 22, 1
Form8.FlpGrf1.ColumnColor = RGB(255, 0, 255)

Form8.FlpGrf1.Column = 0
Form8.FlpGrf1.ColumnAxis = 0

Form8.FlpGrf1.Column = 5
Form8.FlpGrf1.ColumnAxis = 1
Form8.FlpGrf1.ColumnType = 1
Form8.FlpGrf1.ColumnStyle = 1
Form8.FlpGrf1.GraphAreaFrame True, 22, 1
Form8.FlpGrf1.ColumnColor = RGB(100, 50, 255)

a(0) = (peso(0) - yp(0)) * 0.03
xa(0) = 0.0015
a(1) = yp(0) * 0.17
xa(1) = 0.085
a(2) = yp(1) * 0.16
xa(2) = 0.25
a(3) = yp(2) * 0.22
xa(3) = 0.44
a(4) = yp(3) * 0.45
xa(4) = 0.775
a(5) = (peso(4) - yp(3)) * 0.22
xa(5) = 0.89
a(6) = (xp(0) - 0.1) * (peso(0) - yp(0)) / 2
xa(6) = 1 / 3 * (xp(0) - 0.03) + 0.03
a(7) = (0.17 - xp(0)) * (peso(1) - yp(0)) / 2
xa(7) = 2 / 3 * (0.17 - xp(0)) + xp(0)
a(8) = (xp(1) - 0.17) * (peso(1) - yp(1)) / 2
xa(8) = 1 / 3 * (xp(1) - 0.17) + 0.17
a(9) = (0.33 - xp(1)) * (peso(2) - yp(1)) / 2
xa(9) = 2 / 3 * (0.33 - xp(1)) + xp(1)
a(10) = (xp(2) - 0.33) * (peso(2) - yp(2)) / 2
xa(10) = 1 / 3 * (xp(2) - 0.33) + 0.33
a(11) = (0.55 - xp(2)) * (peso(3) - yp(2)) / 2
xa(11) = 2 / 3 * (0.55 - xp(2)) + xp(2)
a(12) = (xp(3) - 0.55) * (peso(3) - yp(3)) / 2
xa(12) = 1 / 3 * (xp(3) - 0.55) + 0.55
a(13) = (0.78 - xp(3)) * (peso(4) - yp(3)) / 2
xa(13) = 2 / 3 * (0.78 - xp(3)) + xp(3)
For W = 0 To 13 Step 1
  analisis = a(W) * xa(W) + analisis
  sumaarea = sumaarea + a(W)
Next W
If sumaarea <> 0 Then
  analisis = analisis / sumaarea
  Form8.IblIndice.Caption = CCur(analisis)
End If
Form8.Show 1
End Function

Function calif(res()) As Double, c1() As Double, c2() As Double, c3() As Double, c4() As Double, c5() As Double, riesgo As Double, nimp As Integer) As Integer
Dim calculareerror As Double
If nimp = 0 Then
  err(0) = Sqr(riesgo - c1(0)) ^ 2 + (res(4) - c1(1)) ^ 2
  err(1) = Sqr(riesgo - c2(0)) ^ 2 + (res(4) - c2(1)) ^ 2
  err(2) = Sqr(riesgo - c3(0)) ^ 2 + (res(4) - c3(1)) ^ 2
  err(3) = Sqr(riesgo - c4(0)) ^ 2 + (res(4) - c4(1)) ^ 2
  err(4) = Sqr(riesgo - c5(0)) ^ 2 + (res(4) - c5(1)) ^ 2
ElseIf nimp = 1 Then
  err(0) = Sqr(riesgo - c1(0)) ^ 2
  err(1) = Sqr(riesgo - c2(0)) ^ 2
  err(2) = Sqr(riesgo - c3(0)) ^ 2
  err(3) = Sqr(riesgo - c4(0)) ^ 2
  err(4) = Sqr(riesgo - c5(0)) ^ 2
End If

```

```

calif = 0
calcularerror = err(0)
If err(1) < calcularerror Then
  calcularerror = err(1)
  calif = 1
End If
If err(2) < calcularerror Then
  calcularerror = err(2)
  calif = 2
End If
If err(3) < calcularerror Then
  calcularerror = err(3)
  calif = 3
End If
If err(4) < calcularerror Then
  calcularerror = err(4)
  calif = 4
End If
End Function

Function calif2(res() As Double, c21() As Double, c22() As Double,
c23() As Double, c24() As Double, c25() As Double) As Integer
  Dim calcularerror As Double
  err(0) = Sqr(res(0) - c21(0)) ^ 2 + (res(1) - c21(1)) ^ 2 + (res(2) -
c21(2)) ^ 2
  err(1) = Sqr(res(0) - c22(0)) ^ 2 + (res(1) - c22(1)) ^ 2 + (res(2) -
c22(2)) ^ 2
  err(2) = Sqr(res(0) - c23(0)) ^ 2 + (res(1) - c23(1)) ^ 2 + (res(2) -
c23(2)) ^ 2
  err(3) = Sqr(res(0) - c24(0)) ^ 2 + (res(1) - c24(1)) ^ 2 + (res(2) -
c24(2)) ^ 2
  err(4) = Sqr(res(0) - c25(0)) ^ 2 + (res(1) - c25(1)) ^ 2 + (res(2) -
c25(2)) ^ 2
  calif2 = 0
  calcularerror = err(0)
  If err(1) < calcularerror Then
    calcularerror = err(1)
    calif2 = 1
  End If
  If err(2) < calcularerror Then
    calcularerror = err(2)
    calif2 = 2
  End If
  If err(3) < calcularerror Then
    calcularerror = err(3)
    calif2 = 3
  End If
  If err(4) < calcularerror Then
    calcularerror = err(4)
    calif2 = 4
  End If
End Function

Function red1(res() As Double, c() As Double, califi As Integer,
riesgo As Double, nimp As Integer) As Double
  Dim t1 As Integer
  Dim I As Integer
  'Valor de t
  Form2.dtaContador.Recordset.MoveFirst
  If nimp = 0 Then
    For I = 0 To 4
      If califi = I Then
        t1 = Form2.dtaContador.Recordset.Fields(I).Value
      End If
    Next I
  ElseIf nimp = 1 Then
    Form2.dtaContador.Recordset.MoveNext
    For I = 0 To 4
      If califi = I Then
        t1 = Form2.dtaContador.Recordset.Fields(I).Value
      End If
    Next I
  End If
  If nimp = 0 Then
    c(0) = c(0) - 0.1 * Exp(-0.1 * t1) * (c(0) - riesgo)
    c(1) = c(1) - 0.1 * Exp(-0.1 * t1) * (c(1) - res(4))
    t1 = t1 + 1
  ElseIf nimp = 1 Then
    c(0) = c(0) - 0.1 * Exp(-0.1 * t1) * (c(0) - riesgo)
    t1 = t1 + 1
  End If
  Form2.dtaContador.Recordset.Edit
  For I = 0 To 4
    If califi = I Then
      Form2.dtaContador.Recordset.Fields(I).Value = t1
    End If
  End If

```

```

Next I
  Form2.dtaContador.Recordset.Update
  red1 = 0.1 * (Exp(-0.1 * t1))
End Function

Function red2(res() As Double, c() As Double, califi As Integer) As
Double
  Dim t1 As Integer
  Dim I As Integer
  'Valor de t
  Form2.dtaContador.Recordset.MoveFirst
  Form2.dtaContador.Recordset.MoveNext
  For I = 0 To 4
    If califi = I Then
      t1 = Form2.dtaContador.Recordset.Fields(I).Value
    End If
  Next I
  c(0) = c(0) - 0.1 * Exp(-0.1 * t1) * (c(0) - res(0))
  c(1) = c(1) - 0.1 * Exp(-0.1 * t1) * (c(1) - res(1))
  c(2) = c(2) - 0.1 * Exp(-0.1 * t1) * (c(2) - res(2))
  t1 = t1 + 1
  Form2.dtaContador.Recordset.Edit
  For I = 0 To 4
    If califi = I Then
      Form2.dtaContador.Recordset.Fields(I).Value = t1
    End If
  Next I
  Form2.dtaContador.Recordset.Update
  red2 = 0.1 * (Exp(-0.1 * t1))
End Function

Function evaluatotal(nimp As Integer)
  Dim a As Integer
  Dim c1(1) As Double, c2(1) As Double, c3(1) As Double
  Dim c4(1) As Double, c5(1) As Double
  Dim c21(2) As Double, c22(2) As Double, c23(2) As Double
  Dim c24(2) As Double, c25(2) As Double
  Dim cal As Integer, cal2 As Integer
  Dim vul As Double
  Dim riesgo As Double
  'Llamados de funciones de evaluación
  'Normalizar pesos
  normalizar
  'Función analisis (índices de daño de la edificación)
  Form8.frmConjuntos.Caption = "CONJUNTO BORROSO DE
EXPOSICION DEL CONTEXTO"
  an(2) = analisis(mayExposicion, 2)
  Form8.frmConjuntos.Caption = "CONJUNTO BORROSO DE
FRAGILIDAD SOCIAL"
  an(1) = analisis(mayFragilidad, 1)
  Form8.frmConjuntos.Caption = "CONJUNTO BORROSO DE
RESILENCIA"
  an(0) = analisis(mayResistencia, 0)
  Form8.frmConjuntos.Caption = "CONJUNTO BORROSO DE
AMENAZA SISMICA CONTEXTO"
  an(3) = analisis(mayAmenaza, 3)
  Form8.frmConjuntos.Caption = "CONJUNTO BORROSO DE
ESCEN.DAÑOS FISICOS POTENC."
  an(4) = analisis(mayRiesgo, 4)

  'Resultados en el formulario de resultados
  Form7.lblIndiceResistencia.Caption = CCur(an(0))
  Form7.lblIndiceFragilidad.Caption = CCur(an(1))
  Form7.lblIndiceExposicion.Caption = CCur(an(2))
  Form7.lblIndiceAmenaza.Caption = CCur(an(3))
  Form7.lblIndiceSismico.Caption = CCur(an(4))

  'obtener indices actuales de las matrices de daño
  a = vermatrizdanno(c1, c2, c3, c4, c5) 'Indice final
  b = vermatrizdanno2(c21, c22, c23, c24, c25) 'Vulnerabilidad del
contexto

  cal2 = calif2(an, c21, c22, c23, c24, c25)

  Form2.dtaDanno2.Recordset.MoveFirst
  Form2.dtaDanno2.Recordset.Edit

  If cal2 = 0 Then
    Form7.lblCalifVulnerabilidad.Caption = "Muy Baja"
    Form7.lblIndiceVulnerabilidad(0).Caption = CCur(0.07)
    Form7.lblIndiceVulnerabilidad(1).Caption = CCur(0.07)
    p1 = red2(an, c21, 0)
    Form2.dtaDanno2.Recordset.Edit
    For g = 0 To 2 Step 1
      Form2.dtaDanno2.Recordset.Fields(g + 1).Value = c21(g)
    Next g
  End If

```

```

Form2.dtaDanno2.Recordset.Update
End If
Form2.dtaDanno2.Recordset.MoveNext
If cal2 = 1 Then
Form7.lblCalifVulnerabilidad.Caption = "Baja"
Form7.lblIndiceVulnerabilidad(0).Caption = CCur(0.17)
Form7.lblIndiceVulnerabilidad(1).Caption = CCur(0.17)
p1 = red2(an, c22, 1)
Form2.dtaDanno2.Recordset.Edit
For g = 0 To 2 Step 1
Form2.dtaDanno2.Recordset.Fields(g + 1).Value = c22(g)
Next g
Form2.dtaDanno2.Recordset.Update
End If
Form2.dtaDanno2.Recordset.MoveNext
If cal2 = 2 Then
Form7.lblCalifVulnerabilidad.Caption = "Moderada"
Form7.lblIndiceVulnerabilidad(0).Caption = CCur(0.33)
Form7.lblIndiceVulnerabilidad(1).Caption = CCur(0.33)
p1 = red2(an, c23, 2)
Form2.dtaDanno2.Recordset.Edit
For g = 0 To 2 Step 1
Form2.dtaDanno2.Recordset.Fields(g + 1).Value = c23(g)
Next g
Form2.dtaDanno2.Recordset.Update
End If
Form2.dtaDanno2.Recordset.MoveNext
If cal2 = 3 Then
Form7.lblCalifVulnerabilidad.Caption = "Alta"
Form7.lblIndiceVulnerabilidad(0).Caption = CCur(0.55)
Form7.lblIndiceVulnerabilidad(1).Caption = CCur(0.55)
p1 = red2(an, c24, 3)
Form2.dtaDanno2.Recordset.Edit
For g = 0 To 2 Step 1
Form2.dtaDanno2.Recordset.Fields(g + 1).Value = c24(g)
Next g
Form2.dtaDanno2.Recordset.Update
End If
Form2.dtaDanno2.Recordset.MoveNext
If cal2 = 4 Then
Form7.lblCalifVulnerabilidad.Caption = "Muy Alta"
Form7.lblIndiceVulnerabilidad(0).Caption = CCur(0.76)
Form7.lblIndiceVulnerabilidad(1).Caption = CCur(0.76)
p1 = red2(an, c25, 4)
Form2.dtaDanno2.Recordset.Edit
For g = 0 To 2 Step 1
Form2.dtaDanno2.Recordset.Fields(g + 1).Value = c25(g)
Next g
Form2.dtaDanno2.Recordset.Update
End If

vul = val(Form7.lblIndiceVulnerabilidad(0).Caption)
riesgo = vul * an(3)
Form7.lblIndiceContexto(0).Caption = CCur(riesgo)
Form7.lblIndiceContexto(1).Caption = CCur(riesgo)

cal = calif(an, c1, c2, c3, c4, c5, riesgo, nimp)

Form2.dtaDano.Recordset.MoveFirst
Form2.dtaDano.Recordset.Edit

If cal = 0 Then
Form7.lblRiesgoFinal.Caption = "Muy Bajo"
Form7.lblFinal.Caption = CCur(0.07)
p1 = red1(an, c1, 0, riesgo, nimp)
Form2.dtaDano.Recordset.Edit
For g = 0 To 1 Step 1
Form2.dtaDano.Recordset.Fields(g + 1).Value = c1(g)
Next g
Form2.dtaDano.Recordset.Update
End If
Form2.dtaDano.Recordset.MoveNext
If cal = 1 Then
Form7.lblRiesgoFinal.Caption = "Bajo"
Form7.lblFinal.Caption = CCur(0.17)
p1 = red1(an, c2, 1, riesgo, nimp)
Form2.dtaDano.Recordset.Edit
For g = 0 To 1 Step 1
Form2.dtaDano.Recordset.Fields(g + 1).Value = c2(g)
Next g
Form2.dtaDano.Recordset.Update
End If
Form2.dtaDano.Recordset.MoveNext
If cal = 2 Then
Form7.lblRiesgoFinal.Caption = "Moderado"
Form7.lblFinal.Caption = CCur(0.33)
p1 = red1(an, c3, 2, riesgo, nimp)
Form2.dtaDano.Recordset.Edit
Next g
Form2.dtaDano.Recordset.Update
End If
Form2.dtaDano.Recordset.MoveNext
If cal = 3 Then
Form7.lblRiesgoFinal.Caption = "Alto"
Form7.lblFinal.Caption = CCur(0.55)
p1 = red1(an, c4, 3, riesgo, nimp)
Form2.dtaDano.Recordset.Edit
For g = 0 To 1 Step 1
Form2.dtaDano.Recordset.Fields(g + 1).Value = c4(g)
Next g
Form2.dtaDano.Recordset.Update
End If
Form2.dtaDano.Recordset.MoveNext
If cal = 4 Then
Form7.lblRiesgoFinal.Caption = "Muy Alto"
Form7.lblFinal.Caption = CCur(0.76)
p1 = red1(an, c5, 4, riesgo, nimp)
Form2.dtaDano.Recordset.Edit
For g = 0 To 1 Step 1
Form2.dtaDano.Recordset.Fields(g + 1).Value = c5(g)
Next g
Form2.dtaDano.Recordset.Update
End If

If Loc = 0 Then
Form2.dtaResultados.Recordset.AddNew
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(0).Value = ultimoreg
Else
'Moverse al primer registro
Form2.dtaResultados.Recordset.MoveFirst
'Moverse registro de la edificación
Do While ultimoreg <>
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(0).Value
Form2.dtaResultados.Recordset.MoveNext
Loop
Form2.dtaResultados.Recordset.Edit
End If
'Guardar resultados
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(0).Value = ultimoreg
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(1).Value = an(0)
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(2).Value = an(1)
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(3).Value = an(2)
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(4).Value = an(3)
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(5).Value = an(4)
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(6).Value = cal
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(7).Value = p1
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(8).Value = err(0)
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(9).Value = err(1)
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(10).Value = err(2)
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(11).Value = err(3)
Form2.dtaResultados.Recordset.Fields(12).Value = err(4)
Form2.dtaResultados.Recordset.Update
End Function

Function vermatrizdanno(c1() As Double, c2() As Double, c3() As Double, c4() As Double, c5() As Double)
'obtener índices actuales de la matriz de daño
Dim g As Integer
Form2.dtaDano.Recordset.MoveFirst
For g = 0 To 1
c1(g) = Form2.dtaDano.Recordset.Fields(g + 1).Value
Next g
Form2.dtaDano.Recordset.MoveNext
For g = 0 To 1
c2(g) = Form2.dtaDano.Recordset.Fields(g + 1).Value
Next g
Form2.dtaDano.Recordset.MoveNext
For g = 0 To 1
c3(g) = Form2.dtaDano.Recordset.Fields(g + 1).Value
Next g
Form2.dtaDano.Recordset.MoveNext
For g = 0 To 1
c4(g) = Form2.dtaDano.Recordset.Fields(g + 1).Value
Next g
Form2.dtaDano.Recordset.MoveNext
For g = 0 To 1
c5(g) = Form2.dtaDano.Recordset.Fields(g + 1).Value
Next g
Form2.dtaDano.Recordset.MoveNext

```

```

End Function

Function vermatrizdanno2(c21() As Double, c22() As Double, c23()
As Double, c24() As Double, c25() As Double)
'obtener indices actuales de la matriz de daño
Dim g As Integer
Form2.dtaDanno2.Recordset.MoveFirst
For g = 0 To 2
c21(g) = Form2.dtaDanno2.Recordset.Fields(g + 1).Value
Next g
Form2.dtaDanno2.Recordset.MoveNext
For g = 0 To 2
c22(g) = Form2.dtaDanno2.Recordset.Fields(g + 1).Value
Next g
Form2.dtaDanno2.Recordset.MoveNext
For g = 0 To 2
c23(g) = Form2.dtaDanno2.Recordset.Fields(g + 1).Value
Next g
Form2.dtaDanno2.Recordset.MoveNext
For g = 0 To 2
c24(g) = Form2.dtaDanno2.Recordset.Fields(g + 1).Value
Next g
Form2.dtaDanno2.Recordset.MoveNext
For g = 0 To 2
c25(g) = Form2.dtaDanno2.Recordset.Fields(g + 1).Value
Next g
Form2.dtaDanno2.Recordset.MoveNext
End Function

Function normriesgo()
'Funcion para normalizar los pesos de las variables estructurales
'Declaracion de variables temporales
Dim W As Integer, f As Integer
sumas(0) = 0
For f = 0 To 4 Step 1
mayRiesgo(f) = 0
Next f
For W = 0 To 28 Step 1
If vecentrada(W).Calificacion < -1 Then
sumas(4) = sumas(4) + vecentrada(W).peso(4)
If (mayRiesgo(vecentrada(W).Calificacion) <
vecentrada(W).peso(4)) Then
mayRiesgo(vecentrada(W).Calificacion) =
vecentrada(W).peso(4)
End If
End If
Next W
For W = 0 To 4 Step 1
If sumas(4) < 0 Then
mayRiesgo(W) = mayRiesgo(W) / sumas(4)
End If
Next W
End Function

Function normamenaza()
'Funcion para normalizar los pesos de las variables
'Declaracion de variables temporales
Dim W As Integer, f As Integer
sumas(4) = 0
For f = 0 To 4 Step 1
mayAmenaza(f) = 0
Next f
For W = 0 To 28 Step 1
sumas(3) = sumas(3) + vecentrada(W).peso(3)

If (mayAmenaza(vecentrada(W).Calificacion) <
vecentrada(W).peso(3)) Then
mayAmenaza(vecentrada(W).Calificacion) =
vecentrada(W).peso(3)
End If
Next W

For W = 0 To 4 Step 1
If sumas(3) < 0 Then
mayAmenaza(W) = mayAmenaza(W) / sumas(3)
End If
Next W
End Function

Function normexposicion()
'Funcion para normalizar los pesos de las variables
'Declaracion de variables temporales
Dim W As Integer, f As Integer
sumas(2) = 0
For f = 0 To 4 Step 1
mayExposicion(f) = 0
Next f
For W = 0 To 28 Step 1
sumas(2) = sumas(2) + vecentrada(W).peso(2)
If (mayExposicion(vecentrada(W).Calificacion) <
vecentrada(W).peso(2)) Then
mayExposicion(vecentrada(W).Calificacion) =
vecentrada(W).peso(2)
End If
Next W
For W = 0 To 4 Step 1
If sumas(2) < 0 Then
mayExposicion(W) = mayExposicion(W) / sumas(2)
End If
Next W
End Function

Function normfragil()
'Funcion para normalizar los pesos de las variables
'Declaracion de variables temporales
Dim W As Integer, f As Integer
sumas(1) = 0
For f = 0 To 4 Step 1
mayFragilidad(f) = 0
Next f
For W = 0 To 28 Step 1
sumas(1) = sumas(1) + vecentrada(W).peso(1)
If (mayFragilidad(vecentrada(W).Calificacion) <
vecentrada(W).peso(1)) Then
mayFragilidad(vecentrada(W).Calificacion) =
vecentrada(W).peso(1)
End If
Next W
For W = 0 To 4 Step 1
If sumas(1) < 0 Then
mayFragilidad(W) = mayFragilidad(W) / sumas(1)
End If
Next W
End Function

Function normresili()
'Funcion para normalizar los pesos de las variables
'Declaracion de variables temporales
Dim W As Integer, f As Integer
Dim sumas(4) As Double
sumas(0) = 0
For f = 0 To 4 Step 1
mayResiliencia(f) = 0
Next f
For W = 0 To 28 Step 1
sumas(0) = sumas(0) + vecentrada(W).peso(0)
If (mayResiliencia(vecentrada(W).Calificacion) <
vecentrada(W).peso(0)) Then
mayResiliencia(vecentrada(W).Calificacion) =
vecentrada(W).peso(0)
End If
Next W
For W = 0 To 4 Step 1
If sumas(0) < 0 Then
mayResiliencia(W) = mayResiliencia(W) / sumas(0)
End If
Next W
End Function

Function evaluariesgo()
Dim Y As Integer
'Llamados de funciones de evaluación
'Normalizar pesos
normriesgo
'Función analisis (indices de daño de la edificacion)
Form8.frmConjuntos.Caption = "CONJUNTO BORROSO DE
ESCEN.DAÑOS FISICOS POTENC."
an(4) = analisis(mayRiesgo, 4)
Y = MsgBox("HA INGRESADO TODAS LAS
CALIFICACIONES Y PESOS DE LAS VARIABLES DE RIESGO
SISMICO." & Chr(10) & "DESEA VER LOS CONJUNTOS
BORROSOS ESCALADOS CORRESPONDIENTES ? ", vbYesNo)
If Y = vbYes Then
Form8.Show 1
End If
'Resultados en el formulario de resultados por centroide de area
'Form7.lblIndiceSismico.Caption = CCur(an(4))
End Function

Function evaluaamenaza()
Dim Y As Integer
'Llamados de funciones de evaluación
'Normalizar pesos

```

```

normamenaza
'Función análisis (índices de daño de la edificación)
Form8.frmConjuntos.Caption = "CONJUNTO BORROSO DE
AMENAZA SISMICA CONTEXTO"
an(3) = analisis(mayAmenaza, 3)
Y = MsgBox("HA INGRESADO TODAS LAS
CALIFICACIONES Y PESOS DE LAS VARIABLES DE
AMENAZA SISMICA DEL CONTEXTO." & Chr(10) & "DESEA
VER LOS CONJUNTOS BORROSOS ESCALADOS
CORRESPONDIENTES ? ", vbYesNo)
If Y = vbYes Then
Form8.Show 1
End If
'Resultados en el formulario de resultados por centroide de area
'Form7.lblIndiceAmenaza.Caption = CCur(an(3))
End Function

Function evaluaexposicion()
Dim Y As Integer
'Llamados de funciones de evaluación
'Normalizar pesos
normexposicion
'Función análisis (índices de daño de la edificación)
Form8.frmConjuntos.Caption = "CONJUNTO BORROSO DE
EXPOSICION DEL CONTEXTO"
an(2) = analisis(mayExposicion, 2)
Y = MsgBox("HA INGRESADO TODAS LAS
CALIFICACIONES Y PESOS DE LAS VARIABLES DE
EXPOSICION DEL CONTEXTO." & Chr(10) & "DESEA VER
LOS CONJUNTOS BORROSOS ESCALADOS
CORRESPONDIENTES ? ", vbYesNo)
If Y = vbYes Then
Form8.Show 1
End If
'Resultados en el formulario de resultados por centroide de area
'Form7.lblIndiceExposicion.Caption = CCur(an(2))
End Function

Function evaluafragilidad()
Dim Y As Integer
'Llamados de funciones de evaluación
'Normalizar pesos
normfragil
'Función análisis (índices de daño de la edificación)
Form8.frmConjuntos.Caption = "CONJUNTO BORROSO DE
FRAGILIDAD SOCIAL"
an(1) = analisis(mayFragilidad, 1)
Y = MsgBox("HA INGRESADO TODAS LAS
CALIFICACIONES Y PESOS DE LAS VARIABLES DE
FRAGILIDAD SOCIAL" & Chr(10) & "DESEA VER LOS
CONJUNTOS BORROSOS ESCALADOS
CORRESPONDIENTES ? ", vbYesNo)
If Y = vbYes Then
Form8.Show 1
End If
'Resultados en el formulario de resultados por centroide de area
'Form7.lblIndiceFragilidad.Caption = CCur(an(1))
End Function

Function evaluaresiliencia()
Dim Y As Integer
'Llamados de funciones de evaluación
'Normalizar pesos
normresili
'Función análisis (índices de daño de la edificación)
Form8.frmConjuntos.Caption = "CONJUNTO BORROSO DE
RESILIENCIA"
an(0) = analisis(mayResiliencia, 0)
Y = MsgBox("HA INGRESADO TODAS LAS
CALIFICACIONES Y PESOS DE LAS VARIABLES DE
RESILIENCIA." & Chr(10) & "DESEA VER LOS CONJUNTOS
BORROSOS ESCALADOS CORRESPONDIENTES ? ", vbYesNo)
If Y = vbYes Then
Form8.Show 1
End If
'Resultados en el formulario de resultados por centroide de area
'Form7.lblIndiceResiliencia.Caption = CCur(an(0))
End Function

Function calpesosRiesgo(vecentrada() As EntradaDatos, nimp As
Integer)
Dim I As Integer
Dim j As Integer
Dim conta(8) As Integer
Dim Pesos(8) As Integer 'Base de datos
Dim PUsua(8) As Integer 'Ingresados por el usuarios
Dim suriesgo As Integer
Dim suriesgoca As Integer
suriesgo = 0
suriesgoca = 0
For j = 0 To 8
Pesos(j) = 0
Next j
For j = 0 To 8
conta(j) = 0
Next j
For j = 0 To 8
PUsua(j) = 0
Next j
'Obtener pesos de la base de datos
Form2.dtaPesoRiesgo.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 8
Pesos(j) = Form2.dtaPesoRiesgo.Recordset.Fields(j).Value
Next j
'Obtener contadores de la base de datos
Form2.dtaContRiesgo.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 8
conta(j) = Form2.dtaContRiesgo.Recordset.Fields(j).Value
Next j
If nimp = 0 Then
'Ordenar pesos dados por el usuario
For j = 0 To 28
suriesgo = suriesgo + vecentrada(j).peso(4)
Next j
For j = 0 To 28
If suriesgo <> 0 Then
vecentrada(j).peso(4) = (vecentrada(j).peso(4) / suriesgo) * 100
End If
Next j
For j = 0 To 28
If vecentrada(j).variable = 19 Then
PUsua(0) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 20 Then
PUsua(1) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 21 Then
PUsua(2) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 22 Then
PUsua(3) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 23 Then
PUsua(4) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 24 Then
PUsua(5) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 25 Then
PUsua(6) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 26 Then
PUsua(7) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 27 Then
PUsua(8) = vecentrada(j).peso(4)
End If
Next j
'Calculo de nuevos pesos
For I = 0 To 8
Pesos(I) = Pesos(I) - 0.1 * Exp(-0.1 * conta(I)) * (Pesos(I) -
PUsua(I))
Next I

'Guarda pesos corregidos
For I = 0 To 8
suriesgoca = suriesgoca + Pesos(I)
Next I
For I = 0 To 8
If suriesgoca <> 0 Then
Pesos(I) = (Pesos(I) / suriesgoca) * 100
End If
Next I

For j = 0 To 28
If vecentrada(j).variable = 19 Then
vecentrada(j).peso(4) = Pesos(0)
ElseIf vecentrada(j).variable = 20 Then
vecentrada(j).peso(4) = Pesos(1)
ElseIf vecentrada(j).variable = 21 Then
vecentrada(j).peso(4) = Pesos(2)
ElseIf vecentrada(j).variable = 22 Then
vecentrada(j).peso(4) = Pesos(3)
ElseIf vecentrada(j).variable = 23 Then
vecentrada(j).peso(4) = Pesos(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 24 Then
vecentrada(j).peso(4) = Pesos(5)
ElseIf vecentrada(j).variable = 25 Then
vecentrada(j).peso(4) = Pesos(6)
ElseIf vecentrada(j).variable = 26 Then

```

```

    vecentrada(j).peso(4) = Pesos(7)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 27 Then
    vecentrada(j).peso(4) = Pesos(8)
    End If
    Next j
End If
End Function

Function guardacaRiesgo(nimp As Integer)
Dim I As Integer
Dim j As Integer
Dim conta(8) As Integer
Dim Pesos(8) As Integer 'Base de datos
Dim PUsua(8) As Integer 'Ingresados por el usuarios
Dim suriesgo As Integer
suriesgo = 0
If nimp = 0 Then
'Guarda los pesos calibrados en la base de datos
Form2.dtaPesoRiesgo.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 28
If vecentrada(j).variable = 19 Then
Pesos(0) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 20 Then
Pesos(1) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 21 Then
Pesos(2) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 22 Then
Pesos(3) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 23 Then
Pesos(4) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 24 Then
Pesos(5) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 25 Then
Pesos(6) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 26 Then
Pesos(7) = vecentrada(j).peso(4)
ElseIf vecentrada(j).variable = 27 Then
Pesos(8) = vecentrada(j).peso(4)
End If
Next j
For I = 0 To 8
Form2.dtaPesoRiesgo.Recordset.Edit
Form2.dtaPesoRiesgo.Recordset.Fields(I).Value = Pesos(I)
Form2.dtaPesoRiesgo.Recordset.Update
Next I
'Obtener contadores de la base de datos
Form2.dtaContRiesgo.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 8
conta(j) = Form2.dtaContRiesgo.Recordset.Fields(j).Value
Next j
'Aumenta contador variables exposicion y guarda en la base de
datos
Form2.dtaContRiesgo.Recordset.MoveFirst
For I = 0 To 8
Form2.dtaContRiesgo.Recordset.Edit
Form2.dtaContRiesgo.Recordset.Fields(I).Value = conta(I) + 1
Form2.dtaContRiesgo.Recordset.Update
Next I
End If
End Function

Function calpesosAmenaza(vecentrada() As EntradaDatos)
Dim I As Integer
Dim j As Integer
Dim conta(3) As Integer
Dim Pesos(3) As Integer 'Base de datos
Dim PUsua(3) As Integer 'Ingresados por el usuarios
Dim suamenaza As Integer
Dim suamenazaca As Integer
suamenaza = 0
suamenazaca = 0
For j = 0 To 3
Pesos(j) = 0
Next j
For j = 0 To 3
conta(j) = 0
Next j
For j = 0 To 3
PUsua(j) = 0
Next j
'Obtener pesos de la base de datos
Form2.dtaPesoAmenaza.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 3
Pesos(j) = Form2.dtaPesoAmenaza.Recordset.Fields(j).Value
Next j
'Obtener contadores de la base de datos

```

```

Form2.dtaContAmenaza.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 3
conta(j) = Form2.dtaContAmenaza.Recordset.Fields(j).Value
Next j

'Ordenar pesos dados por el usuario
For j = 0 To 28
suamenaza = suamenaza + vecentrada(j).peso(3)
Next j
For j = 0 To 28
If suamenaza <> 0 Then
vecentrada(j).peso(3) = (vecentrada(j).peso(3) / suamenaza) * 100
End If
Next j
For j = 0 To 28
If vecentrada(j).variable = 15 Then
PUsua(0) = vecentrada(j).peso(3)
ElseIf vecentrada(j).variable = 16 Then
PUsua(1) = vecentrada(j).peso(3)
ElseIf vecentrada(j).variable = 17 Then
PUsua(2) = vecentrada(j).peso(3)
ElseIf vecentrada(j).variable = 18 Then
PUsua(3) = vecentrada(j).peso(3)
End If
Next j
'Calculo de nuevos pesos
For I = 0 To 3
Pesos(I) = Pesos(I) - 0.1 * Exp(-0.1 * conta(I)) * (Pesos(I) -
PUsua(I))
Next I

'Guarda pesos corregidos
For I = 0 To 3
suamenazaca = suamenazaca + Pesos(I)
Next I
For I = 0 To 3
If suamenazaca <> 0 Then
Pesos(I) = (Pesos(I) / suamenazaca) * 100
End If
Next I

For j = 0 To 28
If vecentrada(j).variable = 15 Then
vecentrada(j).peso(3) = Pesos(0)
ElseIf vecentrada(j).variable = 16 Then
vecentrada(j).peso(3) = Pesos(1)
ElseIf vecentrada(j).variable = 17 Then
vecentrada(j).peso(3) = Pesos(2)
ElseIf vecentrada(j).variable = 18 Then
vecentrada(j).peso(3) = Pesos(3)
End If
Next j
End Function

Function guardacaAmenaza()
Dim I As Integer
Dim j As Integer
Dim conta(3) As Integer
Dim Pesos(3) As Integer 'Base de datos
Dim PUsua(3) As Integer 'Ingresados por el usuarios
Dim suamenaza As Integer
suamenaza = 0
'Guarda los pesos calibrados en la base de datos
Form2.dtaPesoAmenaza.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 28
If vecentrada(j).variable = 15 Then
Pesos(0) = vecentrada(j).peso(3)
ElseIf vecentrada(j).variable = 16 Then
Pesos(1) = vecentrada(j).peso(3)
ElseIf vecentrada(j).variable = 17 Then
Pesos(2) = vecentrada(j).peso(3)
ElseIf vecentrada(j).variable = 18 Then
Pesos(3) = vecentrada(j).peso(3)
End If
Next j
For I = 0 To 3
Form2.dtaPesoAmenaza.Recordset.Edit
Form2.dtaPesoAmenaza.Recordset.Fields(I).Value = Pesos(I)
Form2.dtaPesoAmenaza.Recordset.Update
Next I
'Obtener contadores de la base de datos
Form2.dtaContAmenaza.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 3
conta(j) = Form2.dtaContAmenaza.Recordset.Fields(j).Value
Next j
'Aumenta contador variables exposicion y guarda en la base de datos

```

```

Form2.dtaContAmenaza.Recordset.MoveFirst
For I = 0 To 3
  Form2.dtaContAmenaza.Recordset.Edit
  Form2.dtaContAmenaza.Recordset.Fields(I).Value = conta(I) + 1
  Form2.dtaContAmenaza.Recordset.Update
Next I
End Function

Function calpesosExposicion(vecentrada() As EntradaDatos)
Dim I As Integer
Dim j As Integer
Dim conta(4) As Integer
Dim Pesos(4) As Integer 'Base de datos
Dim PUsua(4) As Integer 'Ingresados por el usuarios
Dim suexposicion As Integer
Dim suexposicionca As Integer
suexposicion = 0
suexposicionca = 0
For j = 0 To 4
  Pesos(j) = 0
Next j
For j = 0 To 4
  conta(j) = 0
Next j
For j = 0 To 4
  PUsua(j) = 0
Next j
'Obtener pesos de la base de datos
Form2.dtaPesoExposicion.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 4
  Pesos(j) = Form2.dtaPesoExposicion.Recordset.Fields(j).Value
Next j
'Obtener contadores de la base de datos
Form2.dtaContExposicion.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 4
  conta(j) = Form2.dtaContExposicion.Recordset.Fields(j).Value
Next j
'Ordenar pesos dados por el usuario
For j = 0 To 28
  suexposicion = suexposicion + vecentrada(j).peso(2)
Next j
For j = 0 To 28
  If suexposicion <> 0 Then
    vecentrada(j).peso(2) = (vecentrada(j).peso(2) / suexposicion) *
100
  End If
Next j
For j = 0 To 28
  If vecentrada(j).variable = 10 Then
    PUsua(0) = vecentrada(j).peso(2)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 11 Then
    PUsua(1) = vecentrada(j).peso(2)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 12 Then
    PUsua(2) = vecentrada(j).peso(2)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 13 Then
    PUsua(3) = vecentrada(j).peso(2)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 14 Then
    PUsua(4) = vecentrada(j).peso(2)
  End If
Next j
'Calculo de nuevos pesos
For I = 0 To 4
  Pesos(I) = Pesos(I) - 0.1 * Exp(-0.1 * conta(I)) * (Pesos(I) -
PUsua(I))
Next I
'Guarda pesos corregidos
For I = 0 To 4
  suexposicionca = suexposicionca + Pesos(I)
Next I
For I = 0 To 4
  If suexposicionca <> 0 Then
    Pesos(I) = (Pesos(I) / suexposicionca) * 100
  End If
Next I
For j = 0 To 28
  If vecentrada(j).variable = 10 Then
    vecentrada(j).peso(2) = Pesos(0)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 11 Then
    vecentrada(j).peso(2) = Pesos(1)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 12 Then
    vecentrada(j).peso(2) = Pesos(2)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 13 Then
    vecentrada(j).peso(2) = Pesos(3)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 14 Then
    vecentrada(j).peso(2) = Pesos(4)
  End If
Next j

Next j
End Function

Function guardacalExposicion()
Dim I As Integer
Dim j As Integer
Dim conta(4) As Integer
Dim Pesos(4) As Integer 'Base de datos
Dim PUsua(4) As Integer 'Ingresados por el usuarios
Dim suriesposicion As Integer
suriesposicion = 0
'Guarda los pesos calibrados en la base de datos
Form2.dtaPesoExposicion.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 28
  If vecentrada(j).variable = 10 Then
    Pesos(0) = vecentrada(j).peso(2)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 11 Then
    Pesos(1) = vecentrada(j).peso(2)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 12 Then
    Pesos(2) = vecentrada(j).peso(2)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 13 Then
    Pesos(3) = vecentrada(j).peso(2)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 14 Then
    Pesos(4) = vecentrada(j).peso(2)
  End If
Next j
For I = 0 To 4
  Form2.dtaPesoExposicion.Recordset.Edit
  Form2.dtaPesoExposicion.Recordset.Fields(I).Value = Pesos(I)
  Form2.dtaPesoExposicion.Recordset.Update
Next I
'Obtener contadores de la base de datos
Form2.dtaContExposicion.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 4
  conta(j) = Form2.dtaContExposicion.Recordset.Fields(j).Value
Next j
'Aumenta contador variables exposicion y guarda en la base de datos
Form2.dtaContExposicion.Recordset.MoveFirst
For I = 0 To 4
  Form2.dtaContExposicion.Recordset.Edit
  Form2.dtaContExposicion.Recordset.Fields(I).Value = conta(I) + 1
  Form2.dtaContExposicion.Recordset.Update
Next I
End Function

Function calpesosFragilidad(vecentrada() As EntradaDatos)
Dim I As Integer
Dim j As Integer
Dim conta(3) As Integer
Dim Pesos(3) As Integer 'Base de datos
Dim PUsua(3) As Integer 'Ingresados por el usuarios
Dim sufragilidad As Integer
Dim sufragilidadadca As Integer
sufragilidad = 0
sufragilidadadca = 0
For j = 0 To 3
  Pesos(j) = 0
Next j
For j = 0 To 3
  conta(j) = 0
Next j
For j = 0 To 3
  PUsua(j) = 0
Next j
'Obtener pesos de la base de datos
Form2.dtaPesoFragilidad.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 3
  Pesos(j) = Form2.dtaPesoFragilidad.Recordset.Fields(j).Value
Next j
'Obtener contadores de la base de datos
Form2.DtaContFragilidad.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 3
  conta(j) = Form2.DtaContFragilidad.Recordset.Fields(j).Value
Next j
'Ordenar pesos dados por el usuario
For j = 0 To 28
  sufragilidad = sufragilidad + vecentrada(j).peso(1)
Next j
For j = 0 To 28
  If sufragilidad <> 0 Then
    vecentrada(j).peso(1) = (vecentrada(j).peso(1) / sufragilidad) * 100
  End If
Next j
For j = 0 To 28
  If vecentrada(j).variable = 6 Then
    PUsua(0) = vecentrada(j).peso(1)
  End If
Next j

```

```

ElseIf vecentrada(j).variable = 7 Then
  PUsua(1) = vecentrada(j).peso(1)
ElseIf vecentrada(j).variable = 8 Then
  PUsua(2) = vecentrada(j).peso(1)
ElseIf vecentrada(j).variable = 9 Then
  PUsua(3) = vecentrada(j).peso(1)
End If
Next j
'Calculo de nuevos pesos
For I = 0 To 3
  Pesos(I) = Pesos(I) - 0.1 * Exp(-0.1 * conta(I)) * (Pesos(I) -
PUsua(I))
Next I
Next I
'Guarda pesos corregidos
For I = 0 To 3
  sufragilidadca = sufragilidadca + Pesos(I)
Next I
For I = 0 To 3
  If sufragilidadca <> 0 Then
    Pesos(I) = (Pesos(I) / sufragilidadca) * 100
  End If
Next I
For j = 0 To 28
  If vecentrada(j).variable = 6 Then
    vecentrada(j).peso(1) = Pesos(0)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 7 Then
    vecentrada(j).peso(1) = Pesos(1)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 8 Then
    vecentrada(j).peso(1) = Pesos(2)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 9 Then
    vecentrada(j).peso(1) = Pesos(3)
  End If
Next j
End Function

Function guardacalFragilidad()
  Dim I As Integer
  Dim j As Integer
  Dim conta(3) As Integer
  Dim Pesos(3) As Integer 'Base de datos
  Dim PUsua(3) As Integer 'Ingresados por el usuarios
  Dim sufragilidad As Integer
  sufragilidad = 0
  'Guarda los pesos calibrados en la base de datos
  Form2.dtaPesoFragilidad.Recordset.MoveFirst
  For j = 0 To 28
    If vecentrada(j).variable = 6 Then
      Pesos(0) = vecentrada(j).peso(1)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 7 Then
      Pesos(1) = vecentrada(j).peso(1)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 8 Then
      Pesos(2) = vecentrada(j).peso(1)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 9 Then
      Pesos(3) = vecentrada(j).peso(1)
    End If
  Next j
  For I = 0 To 3
    Form2.dtaPesoFragilidad.Recordset.Edit
    Form2.dtaPesoFragilidad.Recordset.Fields(I).Value = Pesos(I)
    Form2.dtaPesoFragilidad.Recordset.Update
  Next I
  'Obtener contadores de la base de datos
  Form2.DtaContFragilidad.Recordset.MoveFirst
  For j = 0 To 3
    conta(j) = Form2.DtaContFragilidad.Recordset.Fields(j).Value
  Next j
  'Aumenta contador variables no estructurales y guarda en la base de
  datos
  Form2.DtaContFragilidad.Recordset.MoveFirst
  'Dependiendo del sistema estructural
  For I = 0 To 3
    Form2.DtaContFragilidad.Recordset.Edit
    Form2.DtaContFragilidad.Recordset.Fields(I).Value = conta(I) + 1
    Form2.DtaContFragilidad.Recordset.Update
  Next I
End Function

Function calpesosResiliencia(vecentrada() As EntradaDatos)
  Dim I As Integer
  Dim j As Integer
  Dim conta(6) As Integer
  Dim Pesos(6) As Integer 'Base de datos
  Dim PUsua(6) As Integer 'Ingresados por el usuarios
  Dim suresiliencia As Integer
  Dim suresilienciaca As Integer
  suresiliencia = 0
  suresilienciaca = 0
  For j = 0 To 6
    Pesos(j) = 0
  Next j
  For j = 0 To 6
    conta(j) = 0
  Next j
  For j = 0 To 6
    PUsua(j) = 0
  Next j
  'Obtener pesos de la base de datos
  Form2.dtaPesoResiliencia.Recordset.MoveFirst
  For j = 0 To 6
    Pesos(j) = Form2.dtaPesoResiliencia.Recordset.Fields(j).Value
  Next j
  'Obtener contadores de la base de datos
  Form2.dtaContResiliencia.Recordset.MoveFirst
  For j = 0 To 6
    conta(j) = Form2.dtaContResiliencia.Recordset.Fields(j).Value
  Next j
  'Ordenar pesos dados por el usuario
  For j = 0 To 28
    suresiliencia = suresiliencia + vecentrada(j).peso(0)
  Next j
  For j = 0 To 28
    If suresiliencia <> 0 Then
      vecentrada(j).peso(0) = (vecentrada(j).peso(0) / suresiliencia) *
100
    End If
  Next j
  For j = 0 To 28
    If vecentrada(j).variable = 0 Then
      PUsua(0) = vecentrada(j).peso(0)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 1 Then
      PUsua(1) = vecentrada(j).peso(0)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 2 Then
      PUsua(2) = vecentrada(j).peso(0)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 3 Then
      PUsua(3) = vecentrada(j).peso(0)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 4 Then
      PUsua(4) = vecentrada(j).peso(0)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 5 Then
      PUsua(5) = vecentrada(j).peso(0)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 28 Then
      PUsua(6) = vecentrada(j).peso(0)
    End If
  Next j
  'Calculo de nuevos pesos
  For I = 0 To 6
    Pesos(I) = Pesos(I) - 0.1 * Exp(-0.1 * conta(I)) * (Pesos(I) -
PUsua(I))
  Next I
  'Guarda pesos corregidos
  For I = 0 To 6
    suresilienciaca = suresilienciaca + Pesos(I)
  Next I
  For I = 0 To 6
    If suresilienciaca <> 0 Then
      Pesos(I) = (Pesos(I) / suresilienciaca) * 100
    End If
  Next I
  For j = 0 To 28
    If vecentrada(j).variable = 0 Then
      vecentrada(j).peso(0) = Pesos(0)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 1 Then
      vecentrada(j).peso(0) = Pesos(1)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 2 Then
      vecentrada(j).peso(0) = Pesos(2)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 3 Then
      vecentrada(j).peso(0) = Pesos(3)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 4 Then
      vecentrada(j).peso(0) = Pesos(4)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 5 Then
      vecentrada(j).peso(0) = Pesos(5)
    ElseIf vecentrada(j).variable = 28 Then
      vecentrada(j).peso(0) = Pesos(6)
    End If
  Next j
End Function

Function guardacalResiliencia()
  Dim I As Integer
  Dim j As Integer
  Dim conta(6) As Integer
  Dim Pesos(6) As Integer 'Base de datos
  Dim PUsua(6) As Integer 'Ingresados por el usuarios

```

```

Dim suresiliencia As Integer
suresiliencia = 0
'Guarda los pesos calibrados en la base de datos
Form2.dtaPesoResiliencia.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 28
  If vecentrada(j).variable = 0 Then
    Pesos(0) = vecentrada(j).peso(0)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 1 Then
    Pesos(1) = vecentrada(j).peso(0)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 2 Then
    Pesos(2) = vecentrada(j).peso(0)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 3 Then
    Pesos(3) = vecentrada(j).peso(0)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 4 Then
    Pesos(4) = vecentrada(j).peso(0)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 5 Then
    Pesos(5) = vecentrada(j).peso(0)
  ElseIf vecentrada(j).variable = 28 Then
    Pesos(6) = vecentrada(j).peso(0)
  End If
Next j
For I = 0 To 6
  Form2.dtaPesoResiliencia.Recordset.Edit
  Form2.dtaPesoResiliencia.Recordset.Fields(I).Value = Pesos(I)
  Form2.dtaPesoResiliencia.Recordset.Update
Next I
'Obtener contadores de la base de datos
Form2.dtaContResiliencia.Recordset.MoveFirst
For j = 0 To 6
  conta(j) = Form2.dtaContResiliencia.Recordset.Fields(j).Value
Next j
'Aumenta contador variables no estructurales y guarda en la base de
datos
Form2.dtaContResiliencia.Recordset.MoveFirst
For I = 0 To 6
  Form2.dtaContResiliencia.Recordset.Edit
  Form2.dtaContResiliencia.Recordset.Fields(I).Value = conta(I) + 1
  Form2.dtaContResiliencia.Recordset.Update
Next I
End Function

```

#### MODULO 4: DATOS

##### MODULO DE DECLARACION DE VARIABLES GLOBALES

```

Global variable As Integer
Global ncali As Integer
Global mu As Integer
Type EntradaDatos
  peso(4) As Integer
  variable As Integer
  Calificacion As Integer
End Type

```

```

'Definición del vector tipo EntradaDatos
Global vecentrada(28) As EntradaDatos

```

```

Global ContadorVariable As Integer
Global contador2 As Integer
Global n As Integer
Global ultimoreg As Integer
Global ultimopesos As Integer
Global Loc As Integer
Global sumas(4) As Double
Global mayResiliencia(4) As Double
Global mayFragilidad(4) As Double
Global mayExposicion(4) As Double
Global mayAmenaza(4) As Double
Global mayRiesgo(4) As Double
Global an(4) As Double
Global err(4) As Double
Global riesgo As Integer
Global amenaza As Integer
Global exposicion As Integer
Global fragilidad As Integer
Global resiliencia As Integer
Global rie As Integer
Global ame As Integer
Global expo As Integer
Global frag As Integer
Global res As Integer
Global nimp As Integer

```

```

Function guardarpesos(ultimopesos As Integer, vecentrada() As
EntradaDatos)
  Dim h As Integer

```

```

'Guardando pesos y calificacion
For h = 0 To 28 Step 1
  If Loc = 0 Then
    Form2.DtaPesos.Recordset.AddNew
    Form2.DtaPesos.Recordset.Fields(0).Value = ultimopesos + h
  Else
    Form2.DtaPesos.Recordset.Edit
  End If
  Form2.DtaPesos.Recordset.Fields(1).Value =
vecentrada(h).variable
  Form2.DtaPesos.Recordset.Fields(2).Value = ultimoreg
  Form2.DtaPesos.Recordset.Fields(3).Value =
vecentrada(h).Calificacion
  Form2.DtaPesos.Recordset.Fields(4).Value =
vecentrada(h).peso(0)
  Form2.DtaPesos.Recordset.Fields(5).Value =
vecentrada(h).peso(1)
  Form2.DtaPesos.Recordset.Fields(6).Value =
vecentrada(h).peso(2)
  Form2.DtaPesos.Recordset.Fields(7).Value =
vecentrada(h).peso(3)
  Form2.DtaPesos.Recordset.Fields(8).Value =
vecentrada(h).peso(4)
  Form2.DtaPesos.Recordset.Update
  If Loc <> 0 Then
    Form2.DtaPesos.Recordset.MoveNext
  End If
Next h
End Function
Function vectoraceros()
'Función para establecer todos los campos del vector vacios
'o en ceros Y VARIABLE EN -1
'Variable temporal
Dim m As Integer

```

```

For m = 0 To 28 Step 1
  vecentrada(m).peso(0) = 0
  vecentrada(m).peso(1) = 0
  vecentrada(m).peso(2) = 0
  vecentrada(m).peso(3) = 0
  vecentrada(m).peso(4) = 0
  vecentrada(m).Calificacion = 0
  vecentrada(m).variable = -1
Next m
End Function
Function definidos()
'funcion para ver si los pesos fueron ingresados
Dim m As Integer
For m = 0 To 28 Step 1
  If vecentrada(m).variable = -1 Then
    n = 1
  End If
Next m
End Function

```

#### MODULO 1: COMPROBACIÓN

```

Function comprobacion(variable As Integer)
  Dim I As Integer
  Dim valor As Integer
  Dim opt As Integer
  Dim mu As Integer
  Dim controstrar As Integer
  valor = ContadorVariable - 1
  ncali = 1
  controstrar = 1
  For I = 0 To valor
    If vecentrada(I).variable = variable Then
      controstrar = 0
      opt = MsgBox("Ud ya ingresó la calificación de esta variable.
Desea calificarla nuevamente ?", vbYesNo)
      If opt = vbNo Then
        mu = 0
        ncali = 0
        ContadorVariable = ContadorVariable - 1
        contador2 = I
        controstrar = 0
      Else
        mu = 1
        ncali = 1
        contador2 = I
        ContadorVariable = ContadorVariable - 1
        controstrar = 0
      End If
    End If
  End Function

```

```

Next I
If contmostrar = 1 Then
  If variable = 19 Then
    riesgo = riesgo + 1
  ElseIf variable = 20 Then
    riesgo = riesgo + 1
  ElseIf variable = 21 Then
    riesgo = riesgo + 1
  ElseIf variable = 22 Then
    riesgo = riesgo + 1
  ElseIf variable = 23 Then
    riesgo = riesgo + 1
  ElseIf variable = 24 Then
    riesgo = riesgo + 1
  ElseIf variable = 25 Then
    riesgo = riesgo + 1
  ElseIf variable = 26 Then
    riesgo = riesgo + 1
  ElseIf variable = 27 Then
    riesgo = riesgo + 1
  ElseIf variable = 15 Then
    amenaza = amenaza + 1
  ElseIf variable = 16 Then
    amenaza = amenaza + 1
  ElseIf variable = 17 Then
    amenaza = amenaza + 1
  ElseIf variable = 18 Then
    amenaza = amenaza + 1
  ElseIf variable = 10 Then
    exposicion = exposicion + 1
  ElseIf variable = 11 Then
    exposicion = exposicion + 1
  ElseIf variable = 12 Then
    exposicion = exposicion + 1
  ElseIf variable = 13 Then
    exposicion = exposicion + 1
  ElseIf variable = 14 Then
    exposicion = exposicion + 1
  ElseIf variable = 6 Then
    fragilidad = fragilidad + 1
  ElseIf variable = 7 Then
    fragilidad = fragilidad + 1
  ElseIf variable = 8 Then
    fragilidad = fragilidad + 1
  ElseIf variable = 9 Then
    fragilidad = fragilidad + 1
  ElseIf variable = 0 Then
    resiliencia = resiliencia + 1
  ElseIf variable = 1 Then
    resiliencia = resiliencia + 1
  ElseIf variable = 2 Then
    resiliencia = resiliencia + 1
  ElseIf variable = 3 Then
    resiliencia = resiliencia + 1
  ElseIf variable = 4 Then
    resiliencia = resiliencia + 1
  ElseIf variable = 5 Then
    resiliencia = resiliencia + 1
  ElseIf variable = 28 Then
    resiliencia = resiliencia + 1
  End If
End If
End Function

Function vectorpesos(nimp As Integer)
'Función para establecer todos los campos del vector
'de pesos con los valores necesarios
'Variables temporales
Dim m As Integer
Dim cont As Integer
Dim vingres(28) As Integer
m = 0
cont = ContadorVariable
For m = 0 To 28
  vingres(m) = 0
Next m

For m = 0 To cont
  If nimp = 1 Then
    If vecentrada(m).variable = 19 Then
      vingres(19) = 1
      vecentrada(m).Calificacion = 0
      vecentrada(m).peso(0) = 0
      vecentrada(m).peso(1) = 0
      vecentrada(m).peso(2) = 0
      vecentrada(m).peso(3) = 0
    End If
    If vecentrada(m).variable = 20 Then
      vingres(20) = 1
      vecentrada(m).Calificacion = 0
      vecentrada(m).peso(0) = 0
      vecentrada(m).peso(1) = 0
      vecentrada(m).peso(2) = 0
      vecentrada(m).peso(3) = 0
    End If
    If vecentrada(m).variable = 21 Then
      vingres(21) = 1
      vecentrada(m).Calificacion = 0
      vecentrada(m).peso(0) = 0
      vecentrada(m).peso(1) = 0
      vecentrada(m).peso(2) = 0
      vecentrada(m).peso(3) = 0
    End If
    If vecentrada(m).variable = 22 Then
      vingres(22) = 1
      vecentrada(m).Calificacion = 0
      vecentrada(m).peso(0) = 0
      vecentrada(m).peso(1) = 0
      vecentrada(m).peso(2) = 0
      vecentrada(m).peso(3) = 0
    End If
    If vecentrada(m).variable = 23 Then
      vingres(23) = 1
      vecentrada(m).Calificacion = 0
      vecentrada(m).peso(0) = 0
      vecentrada(m).peso(1) = 0
      vecentrada(m).peso(2) = 0
      vecentrada(m).peso(3) = 0
    End If
    If vecentrada(m).variable = 24 Then
      vingres(24) = 1
      vecentrada(m).Calificacion = 0
      vecentrada(m).peso(0) = 0
      vecentrada(m).peso(1) = 0
      vecentrada(m).peso(2) = 0
      vecentrada(m).peso(3) = 0
    End If
    If vecentrada(m).variable = 25 Then
      vingres(25) = 1
      vecentrada(m).Calificacion = 0
      vecentrada(m).peso(0) = 0
      vecentrada(m).peso(1) = 0
      vecentrada(m).peso(2) = 0
      vecentrada(m).peso(3) = 0
    End If
    If vecentrada(m).variable = 26 Then
      vingres(26) = 1
      vecentrada(m).Calificacion = 0
      vecentrada(m).peso(0) = 0
      vecentrada(m).peso(1) = 0
      vecentrada(m).peso(2) = 0
      vecentrada(m).peso(3) = 0
    End If
    If vecentrada(m).variable = 27 Then
      vingres(27) = 1
      vecentrada(m).Calificacion = 0
      vecentrada(m).peso(0) = 0
      vecentrada(m).peso(1) = 0
      vecentrada(m).peso(2) = 0
      vecentrada(m).peso(3) = 0
    End If
    If vecentrada(m).variable = 28 Then
      vingres(28) = 1
      vecentrada(m).Calificacion = 0
      vecentrada(m).peso(0) = 0
      vecentrada(m).peso(1) = 0
      vecentrada(m).peso(2) = 0
      vecentrada(m).peso(3) = 0
    End If
  End If
  Next m
  'COMPLETAR VECTOR DE PESOS CON PESOS IGUALES A 0
  DE
  'VARIABLES NO IMPORTANTES
  cont = cont + 1
  If nimp = 1 Then
    If vingres(19) = 0 Then
      vecentrada(cont).variable = 19
      vecentrada(cont).Calificacion = 0
      vecentrada(cont).peso(0) = 0
      vecentrada(cont).peso(1) = 0
      vecentrada(cont).peso(2) = 0
      vecentrada(cont).peso(3) = 0
      cont = cont + 1
    End If
    If vingres(20) = 0 Then
      vecentrada(cont).variable = 20
      vecentrada(cont).Calificacion = 0
      vecentrada(cont).peso(0) = 0
      vecentrada(cont).peso(1) = 0
    End If
  End If
End Function

```

```
vecentrada(cont).peso(2) = 0
vecentrada(cont).peso(3) = 0
cont = cont + 1
End If
If vINGRES(21) = 0 Then
vecentrada(cont).variable = 21
vecentrada(cont).Calificacion = 0
vecentrada(cont).peso(0) = 0
vecentrada(cont).peso(1) = 0
vecentrada(cont).peso(2) = 0
vecentrada(cont).peso(3) = 0
cont = cont + 1
End If
If vINGRES(22) = 0 Then
vecentrada(cont).variable = 22
vecentrada(cont).Calificacion = 0
vecentrada(cont).peso(0) = 0
vecentrada(cont).peso(1) = 0
vecentrada(cont).peso(2) = 0
vecentrada(cont).peso(3) = 0
cont = cont + 1
End If
If vINGRES(23) = 0 Then
vecentrada(cont).variable = 23
vecentrada(cont).Calificacion = 0
vecentrada(cont).peso(0) = 0
vecentrada(cont).peso(1) = 0
vecentrada(cont).peso(2) = 0
vecentrada(cont).peso(3) = 0
cont = cont + 1
End If
If vINGRES(24) = 0 Then
vecentrada(cont).variable = 24
vecentrada(cont).Calificacion = 0
vecentrada(cont).peso(0) = 0
vecentrada(cont).peso(1) = 0
vecentrada(cont).peso(2) = 0
vecentrada(cont).peso(3) = 0
cont = cont + 1
End If
If vINGRES(25) = 0 Then
vecentrada(cont).variable = 25
vecentrada(cont).Calificacion = 0
vecentrada(cont).peso(0) = 0
vecentrada(cont).peso(1) = 0
vecentrada(cont).peso(2) = 0
vecentrada(cont).peso(3) = 0
cont = cont + 1
End If
If vINGRES(26) = 0 Then
vecentrada(cont).variable = 26
vecentrada(cont).Calificacion = 0
vecentrada(cont).peso(0) = 0
vecentrada(cont).peso(1) = 0
vecentrada(cont).peso(2) = 0
vecentrada(cont).peso(3) = 0
cont = cont + 1
End If
If vINGRES(27) = 0 Then
vecentrada(cont).variable = 27
vecentrada(cont).Calificacion = 0
vecentrada(cont).peso(0) = 0
vecentrada(cont).peso(1) = 0
vecentrada(cont).peso(2) = 0
vecentrada(cont).peso(3) = 0
cont = cont + 1
End If
End Function
```