

## **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 Ruíz 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>	1
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>	5
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>	21
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 transversal.
- 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.*