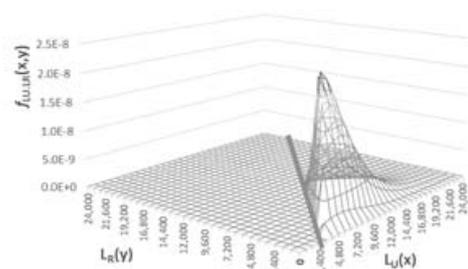
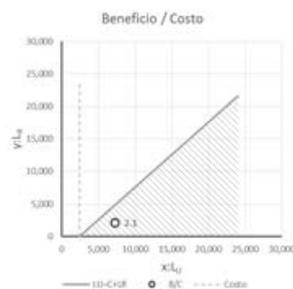
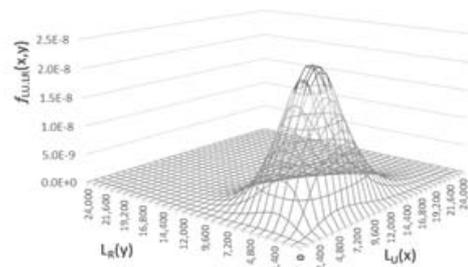
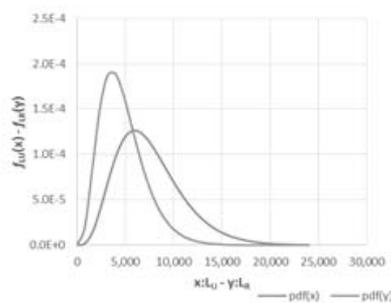


# ANÁLISIS BENEFICIO COSTO PROBABILISTA DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO POR SISMO



Noviembre  
2015

*Miguel G. Mora*



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE  
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE**  
**CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE**  
**CAMINS, CANALS I PORTS**



**DEPARTAMENTO DE RESISTENCIA DE MATERIALES**  
**Y ESTRUCTURAS EN LA INGENIERÍA**

**ANÁLISIS BENEFICIO COSTO PROBABILISTA**  
**DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO POR SISMO**

Trabajo de tesis doctoral  
como requisito de grado en el programa

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL**

Autor:

**MIGUEL GENARO MORA CUEVAS**

Directores:

**Alex H. Barbat**

**Omar D. Cardona**

**Martha L. Carreño**

Noviembre de 2015

*A la Monita y mi familia.*

## Agradecimientos

A los profesores Omar D Cardona y Mario Ordaz por su enseñanza y guía en estos años y por su contribución a este trabajo. A los profesores Alex H. Barbat y Martha L. Carreño por su dirección, acompañamiento y consejo en su desarrollo.

A la Monita, Jairo, Daniel, Alicia y Londoño por no dejar desfallecer, por su apoyo en la distancia y en los momentos difíciles.

A mis colegas Luis Y., Gabriel B., Cesar V., Diana G., Claudia V., Juan Pablo F., Daniela Z, Sergio F, Mario S. por su apoyo, presión, entusiasmo, ánimo, aporte, ideas, amistad y conflicto, sentimientos y acciones con las que contribuyeron de forma profesional y personal a este autor en los últimos 11 años.

El autor agradece en particular a “*Florida International University*” – FIU, por el apoyo para la realización de esta investigación con el soporte del programa de gestión del riesgo “*Paul C. Bell Jr.*”, financiado por la “*U.S. Agency for International Development*” – USAID- También a Juan Pablo Sarmiento, Richard Olson y Ligia Perez, por su disposición, confianza y apoyo.

Octubre de 2015

## Resumen

En la situación de tomar decisiones sobre qué medida de mitigación de riesgo sísmico implementar y del nivel de riesgo o desempeño que se requiere, surge la necesidad de realizar un análisis cuantitativo tanto de los beneficios que se puedan obtener, como de los costos necesarios para la implementación de dichas medidas, para de forma sistemática realizar una comparación de entre alternativas con el objeto de tomar decisiones informadas.

En este trabajo se desarrolla y describe una metodología cuantitativa para la evaluación probabilista de tanto los beneficios como de los costos del reforzamiento sísmico de estructuras y de las alternativas de implementación de medidas de mitigación de riesgo sísmico en edificaciones. Este enfoque innovador, en el marco de la evaluación probabilista, toma en cuenta las incertidumbres asociadas a la estimación de dichos beneficios, evaluado como la reducción de pérdidas económicas mediante el refuerzo sísmico estructural y los costos asociados con su implementación considerados de una forma probabilista apropiada.

La metodología aquí desarrollada es aplicada sobre un grupo de edificaciones públicas de la ciudad de Manizales, Colombia, con información real derivada del proyecto de gestión del riesgo de Manizales, donde se generó la información necesaria de amenaza, exposición y vulnerabilidad, a partir de donde en el presente trabajo se realizan los análisis de los costos y la evaluación del beneficio-costos probabilista de las medidas de mitigación del riesgo.

## Abstract

In the situation to make decisions about of which seismic risk mitigation measures to implement, and the risk level or performance level required, arises the need of a quantitative analysis for both the benefits that may be obtained as the necessary costs from the implementation of these measures, to systematically compare between alternatives in order to make informed decisions.

This work develops and describes a quantitative methodology for probabilistic assessment of both the benefits and costs of the seismic reinforcement of structures and the implementation alternatives of measures to mitigate seismic risk in buildings. This innovative approach, within the framework of the probabilistic assessment, taking into account the uncertainties associated with the estimation of these benefits, evaluated as the reduction of economic losses through structural seismic reinforcement and the costs associated with its implementation considered in an appropriate probabilistic way.

The methodology developed here is applied to a group of public buildings in Manizales city, Colombia, with actual information derived from the risk management project for Manizales, where necessary information on hazard, exposure and vulnerability was generated, from which the present work develops the cost analysis and probabilistic benefit-cost assessment of risk mitigation measures.

## Tabla Contenido

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1	ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.3	ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	4
<b>2</b>	<b>ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....</b>	<b>7</b>
2.1	EVALUACIÓN DE AMENAZA SÍSMICA.....	7
2.1.1	Distribución espacial y tasa de ocurrencia, (paso i).....	7
2.1.2	Cantidad de movimiento, (paso ii).....	9
2.1.3	Calculo de la amenaza, (paso iii).....	10
2.2	INFORMACIÓN DE ELEMENTOS EXPUESTOS.....	13
2.2.1	Niveles de resolución y fuentes de información.....	15
2.3	VULNERABILIDAD.....	16
2.3.1	Demanda sísmica.....	17
2.3.2	Comportamiento de las edificaciones.....	19
2.3.3	Daño de las edificaciones.....	30
2.3.4	Refuerzo estructural.....	34
2.4	EVALUACIÓN DEL RIESGO.....	38
2.4.1	Metodologías regionales de análisis de riesgo.....	43
2.5	RELACIÓN PROBABILISTA DE BENEFICIO COSTO.....	49
2.5.1	Evaluación beneficio-costo para gestión de riesgo.....	52
2.5.2	Toma de decisiones/Evaluación de proyectos de inversión.....	54
<b>3</b>	<b>ENFOQUE ANALÍTICO PROPUESTO.....</b>	<b>55</b>
3.1	EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL BENEFICIO-COSTO.....	55
3.2	EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE RECURSOS.....	57
3.3	MODELO EXTENDIDO DE EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL BENEFICIO-COSTO.....	60
3.3.1	Discusión.....	63
<b>4</b>	<b>APLICACIÓN DEL MODELO A LA CIUDAD DE MANIZALES.....</b>	<b>67</b>
4.1	EDIFICACIONES PÚBLICAS DE LA CIUDAD DE MANIZALES.....	67
4.1.1	Amenaza sísmica.....	68
4.1.2	Exposición: base de datos de edificaciones.....	77
4.1.3	Estrategia de reforzamiento de edificaciones públicas.....	80
4.1.4	Análisis probabilista de riesgo - APR.....	83
4.1.5	Análisis de Beneficio de obras de mitigación.....	84
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>95</b>
5.1	ESTUDIOS FUTUROS.....	97
5.1.1	Base de datos de costos de reforzamiento.....	97
5.1.2	Pérdidas y costos consecuenciales.....	98
<b>6</b>	<b>PUBLICACIONES Y PROYECTOS.....</b>	<b>99</b>

6.1	ARTÍCULOS EN REVISTAS INDEXADAS.....	99
6.2	OTRAS REVISTAS.....	100
6.3	CONTRIBUCIÓN EN LIBROS.....	100
6.4	PONENCIAS.....	100
6.5	PARTICIPACIÓN EN PROYECTOS.....	101
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>103</b>
	<b>ANEXO 1 EVALUACIÓN PROBABILISTA DE COSTOS DE REFORZAMIENTO SÍSMICO.....</b>	<b>111</b>
A1.1	AJUSTE DE DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD PARA LOS COSTOS DE REFORZAMIENTO POR SISTEMA ESTRUCTURAL.....	146
	<b>ANEXO 2 CLASIFICACIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS.....</b>	<b>151</b>
A2.1	EMS 98 CLASIFICACIÓN DE TIPOS ESTRUCTURALES.....	152
A2.2	PAGER-STR TIPOS CONSTRUCTIVOS.....	157
A2.3	RISK-UE MATRIZ DE TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES.....	162
	<b>ANEXO 3 RELACIONES ENTRE CURVAS DE FRAGILIDAD, MATRICES DE PROBABILIDAD Y FUNCIONES DE VULNERABILIDAD.....</b>	<b>165</b>
	<b>ANEXO 4 RESULTADOS ANÁLISIS PROBABILISTA DE RIESGO SÍSMICO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE LA CIUDAD DE MANIZALES.....</b>	<b>175</b>
A4.1	ESTADO ACTUAL: SIN OBRAS DE MITIGACIÓN.....	176
A4.2	ESTADO REFORZADO: EJECUCIÓN DE OBRAS DE MITIGACIÓN.....	179
A4.3	PÉRDIDA DE PRODUCTIVIDAD POR MUERTES SÚBITAS EN COLAPSO DE EDIFICACIONES.....	183

## Índice de figuras

FIGURA 2-1: MEDICIÓN DE DISTANCIAS AL EVENTO.....	9
FIGURA 2-2: REPRESENTACIÓN DE UNA LEY DE ATENUACIÓN .....	10
FIGURA 2-3: CURVA DE AMENAZA SÍSMICA .....	11
FIGURA 2-4: MAPAS DE AMENAZA UNIFORME .....	12
FIGURA 2-5: ESPECTROS DE AMENAZA UNIFORME .....	13
FIGURA 2-6 ESQUEMA CÁLCULO DEL ESPECTRO ELÁSTICO DE RESPUESTA DE NEWMARK Y HALL (ADAPTADO DE (GARCÍA, 2000)).....	18
FIGURA 2-7 ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICA.....	19
FIGURA 2-8 CURVA DE CAPACIDAD.....	19
FIGURA 2-9 CURVA DE CAPACIDAD Y CURVA EN FORMATO SA-Sd .....	21
FIGURA 2-10 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESPERADO DE LA ESTRUCTURA, ATC 40 .....	22
FIGURA 2-11 ESTIMACIÓN DEL PUNTO DE COMPORTAMIENTO, PROCEDIMIENTO A - ATC 40 .....	22
FIGURA 2-12 ESPECTRO DE DEMANDA MODIFICADO POR EL FACTOR DE REDUCCIÓN $R_m$ .....	23
FIGURA 2-13 ESTIMACIÓN DEL PUNTO DE COMPORTAMIENTO, PROCEDIMIENTO FAJFAR (1999).....	24
FIGURA 2-14 ESPECTRO MADRS – FEMA 440 (TOMADO DE FEMA-440) .....	26
FIGURA 2-15 ESTIMACIÓN DEL PUNTO DE COMPORTAMIENTO - FEMA 440 (TOMADO DE FEMA-440) .....	28
FIGURA 2-16 CURVAS DE FRAGILIDAD PARA DIFERENTES ESTADOS DE DAÑO $D_s$ .....	31
FIGURA 2-17 REPRESENTACIÓN DE UNA FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD.....	32
FIGURA 2-18 CURVAS DE RIESGO PARA FRECUENCIA ANUAL DE VÍCTIMAS POR FUENTES ANTRÓPICAS FRENTE A LAS CAUSADAS POR PLANTAS NUCLEARES, RESULTADOS ESTUDIO RASMUSEEN (1975) Y VÍCTIMAS ESTIMADAS POR SISMO PARA COLOMBIA Y MÉXICO (ERN-AL, 2011), ADAPTADO DE KAPLAN & GARRICK (1981) .....	40
FIGURA 2-19 ENFOQUE PEER DEL PBEE (ADAPTADO DE PORTER, 2003) .....	42
FIGURA 2-20: ESQUEMA DE ACTIVIDADES PRINCIPALES PARA EL ANÁLISIS DEL RIESGO DE LA INICIATIVA CAPRA. .	48
FIGURA 2-21 COMPARACIÓN ENTRE EXPRESIONES DE CÁLCULO, $F_1()$ Y $F_2()$ DE LA RELACIÓN B/C .....	51
FIGURA 2-22 PROCESO SIMPLIFICADO PARA LA EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN B/C COMPARATIVA ENTRE ALTERNATIVAS. ADAPTADO DE (KUNREUTHER ET AL., 2001; SMYTH, ALTAY, DEODATIS, ERDIK, FRANCO, GÜLKAN, ET AL., 2004) .....	52
FIGURA 2-23 ESQUEMA DE EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO ENFOCADO EN LA ESTIMACIÓN DE BENEFICIOS Y COSTOS ASOCIADOS A LA IMPLEMENTACIÓN .....	53
FIGURA 3-1 COMPARACIÓN ENTRE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD ANALÍTICA Y SIMULADA DEL $VPN(\beta)$ , L.....	57
FIGURA 3-2 DISTRIBUCIÓN DE SISTEMAS ESTRUCTURALES.....	58
FIGURA 3-3 RESULTADOS EVALUACIÓN (A) RELACIÓN B/C VS PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (B) VALOR ESPERADO B/C - $E(Q)$ VS. VALOR POSITIVO B/C - $P(Q>1)$ .....	59
FIGURA 3-4 FUNCIONES MARGINALES DE PROBABILIDAD DE $L_U$ Y $L_R$ .....	61
FIGURA 3-5 REGIÓN DE CÁLCULO DE PROBABILIDAD QUE SATISFACE $L_U > C + L_R$ .....	61
FIGURA 3-6: FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD PARA EL COSTO DE OBRAS DE REFORZAMIENTO. ....	64
FIGURA 4-1: MODELO ESPACIAL DE FUENTES EN EL TERRITORIO COLOMBIANO .....	69
FIGURA 4-2: MAPA DE AMENAZA UNIFORME PARA LA ZONA DE ESTUDIO, $PGA[GAL]$ .....	72
FIGURA 4-3: ESPECTROS DE AMENAZA UNIFORME PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO Y PARA DIFERENTES CIUDADES PRINCIPALES (INTENSIDAD $PGA$ ) .....	73
FIGURA 4-4: CURVAS DE EXCEDENCIA DE INTENSIDAD POR FUENTE Y TOTAL .....	74
FIGURA 4-5: PARTICIPACIÓN EN LA AMENAZA TOTAL POR FUENTE (10 MÁS IMPORTANTES).....	75
FIGURA 4-6: MAPA DE PERIODOS DEL SUELO PARA LA CIUDAD DE MANIZALES .....	76

## Índice de figuras

---

FIGURA 4-7: FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA ALGUNAS LOCALIZACIONES EN EL PERÍMETRO URBANO DE MAIZALES .....	77
FIGURA 4-8: ALGORITMO DE CRITERIOS PARA LA APLICACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE REFORZAMIENTO DE LAS EDIFICACIONES.....	82
FIGURA 4-9: DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DEL VALOR PRESENTE NETO DE PÉRDIDAS EN LOS ESTADOS ACTUAL Y REFORZADO, Y DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE LOS COSTOS DE REFORZAMIENTO DEL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS .....	85
FIGURA 4-10: DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DEL VALOR PRESENTE NETO DE PÉRDIDAS EN LOS ESTADOS ACTUAL Y REFORZADO, Y DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE LOS COSTOS DE OBRAS DEL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS BAJO LA ESTRATEGIA DE REFORZAMIENTO .....	86
FIGURA 4-11: DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DEL VALOR PRESENTE NETO DE PÉRDIDAS EN LOS ESTADOS ACTUAL Y REFORZADO, Y DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE LOS COSTOS DE REFORZAMIENTO DEL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE SALUD .....	87
FIGURA 4-12: DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DEL VALOR PRESENTE NETO DE PÉRDIDAS EN LOS ESTADOS ACTUAL Y REFORZADO, Y DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE LOS COSTOS DE REFORZAMIENTO DEL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE EDUCACIÓN.....	89
FIGURA 4-13: DISTRIBUCIÓN DE LA RELACIÓN B/C Y PROBABILIDAD DE B>C CON EL CAMBIO EN LA TASA DE RETORNO PARA LAS EDIFICACIONES PÚBLICAS .....	93
FIGURA 4-14: DISTRIBUCIÓN DE LA RELACIÓN B/C Y PROBABILIDAD DE B>C CON EL CAMBIO EN LA TASA DE RETORNO PARA LAS EDIFICACIONES DE SERVICIOS DE SALUD .....	93
FIGURA 4-15: DISTRIBUCIÓN DE LA RELACIÓN B/C Y PROBABILIDAD DE B>C CON EL CAMBIO EN LA TASA DE RETORNO PARA LAS EDIFICACIONES DE SERVICIOS EDUCATIVOS.....	94
FIGURA A1-1: MODELO DE VIVIENDA UNIFAMILIAR, TOMADO DE PÉREZ PLAZAS & PRIETO OSORIO (2004).....	112
FIGURA A1-2: MODELO DE VIVIENDA TIPO 1, TOMADO DE CUSGÜEN GARZÓN & ORRANTÍA HERRERA (2006).....	114
FIGURA A1-3: MODELO DE VIVIENDA TIPO 2, TOMADO DE CUSGÜEN GARZÓN & ORRANTÍA HERRERA (2006).....	116
FIGURA A1-4: MODELO DE VIVIENDA TIPO 3, TOMADO DE CUSGÜEN GARZÓN & ORRANTÍA HERRERA (2006).....	118
FIGURA A1-5: MODELO DE VIVIENDA TIPO 4, TOMADO DE CUSGÜEN GARZÓN & ORRANTÍA HERRERA (2006).....	120
FIGURA A1-6: MODELO DE VIVIENDA TIPO 5, TOMADO DE CUSGÜEN GARZÓN & ORRANTÍA HERRERA (2006).....	122
FIGURA A1-7: MODELO DE VIVIENDA TIPO 6, TOMADO DE CUSGÜEN GARZÓN & ORRANTÍA HERRERA (2006).....	124
FIGURA A1-8: MODELO DE EDIFICACIÓN EN ALTURA, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009).....	126
FIGURA A1-9: MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILIAR PISO 1, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009) .....	128
FIGURA A1-10: MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILIAR PISO 2, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009).....	130
FIGURA A1-11: MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILIAR PISO 3, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009).....	132
FIGURA A1-12: MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILIAR PISO 4, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009).....	134
FIGURA A1-13: MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILIAR TIPO A, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009).....	136
FIGURA A1-14: MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILIAR TIPO B, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009).....	138
FIGURA A1-15: MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILIAR TIPO C, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009).....	140

FIGURA A1-16: MODELO DE EDIFICACIÓN EJEMPLO 1, TOMADO DE RINCÓN LOBO & CORREAL DAZA (2010).....	142
FIGURA A1-17: MODELO DE EDIFICACIÓN EJEMPLO 2, TOMADO DE RINCÓN LOBO & CORREAL DAZA (2010).....	144
FIGURA A1-18: CDF - MUROS DE MAMPOSTERÍA SIMPLE (LADRILLOS DE CONCRETO) CON DIAFRAGMA. ....	146
FIGURA A1-19: CDF - MUROS DE MAMPOSTERÍA SIMPLE (LADRILLOS DE CONCRETO).....	146
FIGURA A1-20: CDF - MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA (LADRILLOS DE CONCRETO) CON DIAFRAGMA .....	146
FIGURA A1-21: CDF - MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA (LADRILLOS DE CONCRETO).....	146
FIGURA A1-22: CDF - MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA CON DIAFRAGMA .....	147
FIGURA A1-23: CDF - MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA.....	147
FIGURA A1-24: CDF - MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA REFORZADA.....	147
FIGURA A1-25: CDF - PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO.....	147
FIGURA A1-26: CDF - PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO Y MUROS DE MAMPOSTERÍA (LADRILLOS DE CONCRETO) .....	148
FIGURA A1-27: CDF - PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO ARRIOSTRADOS .....	148
FIGURA A2-1: CLASES DE VULNERABILIDAD POR TIPO CONSTRUCTIVO.....	152
FIGURA A3-1: CURVAS DE FRAGILIDAD DEL EJEMPLO DE VIELMA ET AL (2007).....	168
FIGURA A3-2: ESPERANZA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA PÉRDIDA IMPLÍCITAS EN LAS FUNCIONES DE FRAGILIDAD DESCRITAS POR LA ECUACIÓN 4 Y LA TABLA 2, EN CONJUNTO CON LAS RELACIONES ESTADO DE DAÑO – PÉRDIDA DADAS EN LA TABLA 3. ....	169
FIGURA A3-3: DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE LA PÉRDIDA DADO QUE LA DEMANDA SÍSMICA FUE IGUAL A 0.162 M. .....	171
FIGURA A3-4: PROBABILIDADES DE ESTAR EN CIERTO ESTADO DE DAÑO CALCULADAS CON CURVAS DE FRAGILIDAD Y FUNCIONES DE VULNERABILIDAD.....	172
FIGURA A4-1: CURVA DE PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS, ESTADO ACTUAL .....	176
FIGURA A4-2: CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS, ESTADO ACTUAL .....	176
FIGURA A4-3: CURVA DE PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE SALUD, ESTADO ACTUAL .....	177
FIGURA A4-4: CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE SALUD, ESTADO ACTUAL.....	177
FIGURA A4-5: CURVA DE PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE EDUCACIÓN, ESTADO ACTUAL .....	178
FIGURA A4-6: CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE EDUCACIÓN, ESTADO ACTUAL .....	178
FIGURA A4-7: CURVA DE PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS, ESTADO REFORZADO.....	179
FIGURA A4-8: CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS, ESTADO REFORZADO.....	179
FIGURA A4-9: CURVA DE PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS BAJO LA ESTRATEGIA DE REFORZAMIENTO.....	180
FIGURA A4-10: CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS BAJO LA ESTRATEGIA DE REFORZAMIENTO.....	180
FIGURA A4-11: CURVA DE PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE SALUD, ESTADO REFORZADO.....	181
FIGURA A4-12: CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE SALUD, ESTADO ACTUAL .....	181

## Índice de figuras

---

FIGURA A4-13: CURVA DE PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE EDUCACIÓN, ESTADO REFORZADO .....	182
FIGURA A4-14: CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS PARA EL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE EDUCACIÓN, ESTADO ACTUAL .....	182

## Índice de tablas

TABLA 2-1 ASOCIACIÓN DE ESTADOS DE DAÑO .....	30
TABLA 2-2 DEFINICIÓN DE UMBRALES PARA ESTADOS DE DAÑO .....	31
TABLA 2-3: NIVELES DE DESEMPEÑO (FEMA, 1997).....	35
TABLA 2-4: OBJETIVOS DE DESEMPEÑO. ADAPTADO DE (FEMA, 1997).....	36
TABLA 3-1 RESULTADOS EVALUACIÓN BENEFICIO-COSTO .....	58
TABLA 4-1: PARÁMETROS DEL MODELO DE FUENTE PARA EL TERRITORIO COLOMBIANO.....	70
TABLA 4-2: DISTRIBUCIÓN DEL NÚMERO Y VALOR EXPUESTO DE EDIFICACIONES DE LA CIUDAD POR USO Y SECTOR	78
TABLA 4-3: DISTRIBUCIÓN DEL NÚMERO Y VALOR EXPUESTO DE EDIFICACIONES DE LA CIUDAD POR SISTEMA ESTRUCTURAL .....	79
TABLA 4-4: DISTRIBUCIÓN DEL NÚMERO Y VALOR EXPUESTO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS POR USO .....	79
TABLA 4-5: DISTRIBUCIÓN DEL NÚMERO Y VALOR EXPUESTO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS POR SISTEMA ESTRUCTURAL .....	80
TABLA 4-6: VALORES DE REFORZAMIENTO DE EDIFICACIONES POR SISTEMA ESTRUCTURAL, VALOR ESPERADO Y DESVIACIÓN .....	81
TABLA 4-7: COSTOS DE REFORZAMIENTO DE LAS EDIFICACIONES PÚBLICAS REFORZADAS POR SISTEMA ESTRUCTURAL .....	83
TABLA 4-8: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE BENEFICIO – COSTO PARA LA ESTRATEGIA DE REFORZAMIENTO DEL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS .....	84
TABLA 4-9: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE BENEFICIO – COSTO PARA LA ESTRATEGIA DE REFORZAMIENTO DEL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS BAJO LA ESTRATEGIA DE REFORZAMIENTO .....	85
TABLA 4-10: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE BENEFICIO – COSTO PARA LA ESTRATEGIA DE REFORZAMIENTO DEL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE SALUD .....	87
TABLA 4-11: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE BENEFICIO – COSTO PARA LA ESTRATEGIA DE REFORZAMIENTO DEL GRUPO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE EDUCACIÓN .....	88
TABLA 4-12: RESUMEN DE RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO. ....	90
TABLA 4-13: VÍCTIMAS ANUALES ESPERADAS .....	92
TABLA 4-14: RESULTADOS DE LA RELACIÓN B/C INCLUYENDO PAP.....	92
TABLA A1-1: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE VIVIENDA UNIFAMILIAR, TOMADO DE PÉREZ PLAZAS & PRIETO OSORIO (2004).....	113
TABLA A1-2: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE VIVIENDA TIPO 1, TOMADO DE CUSGÜEN GARZÓN & ORRANTÍA HERRERA (2006) .....	115
TABLA A1-3: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE VIVIENDA TIPO 2, TOMADO DE CUSGÜEN GARZÓN & ORRANTÍA HERRERA (2006) .....	117
TABLA A1-4: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE VIVIENDA TIPO 3, TOMADO DE CUSGÜEN GARZÓN & ORRANTÍA HERRERA (2006) .....	119
TABLA A1-5: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE VIVIENDA TIPO 4, TOMADO DE CUSGÜEN GARZÓN & ORRANTÍA HERRERA (2006) .....	121
TABLA A1-6: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE VIVIENDA TIPO 5, TOMADO DE CUSGÜEN GARZÓN & ORRANTÍA HERRERA (2006) .....	123
TABLA A1-7: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE VIVIENDA TIPO 6, TOMADO DE CUSGÜEN GARZÓN & ORRANTÍA HERRERA (2006) .....	125

## Índice de tablas

---

TABLA A1-8: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE EDIFICACIÓN EN ALTURA, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009) .....	127
TABLA A1-9: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILAR PISO 1, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009) .....	129
TABLA A1-10: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILAR PISO 2, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009) .....	131
TABLA A1-11: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILAR PISO 3, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009) .....	133
TABLA A1-12: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILAR PISO 4, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009) .....	135
TABLA A1-13: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILAR TIPO A, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009) .....	137
TABLA A1-14: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILAR TIPO B, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009) .....	139
TABLA A1-15: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE EDIFICACIÓN MULTIFAMILAR TIPO C, TOMADO DE MONSALVE RUIZ, PINILLA ACEVEDO, & DE LA CARRERA RUAN (2009) .....	141
TABLA A1-16: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE EDIFICACIÓN EJEMPLO 1, TOMADO DE RINCÓN LOBO & CORREAL DAZA (2010) .....	143
TABLA A1-17: COSTOS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA DIFERENTES SISTEMAS DE RESISTENCIA SÍSMICA. MODELO DE EDIFICACIÓN EJEMPLO 2, TOMADO DE RINCÓN LOBO & CORREAL DAZA (2010) .....	145
TABLA A2-1: CLASIFICACIÓN DE DAÑOS EN EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA. ....	153
TABLA A2-2: CLASIFICACIÓN DE DAÑOS EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO .....	153
TABLA A2-3: GRADOS DE INTENSIDAD Y DESCRIPCIÓN DE LA ESCALA EMS-98: .....	154
TABLA A2-4: TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DEFINIDAS EN LE PAGER-STR (EN INGLÉS).....	157
TABLA A2-5: MATRIZ DE TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES BTM.....	162
TABLA A3-1: MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑOS .....	167
TABLA A3-2: PARÁMETROS QUE DEFINEN LAS CURVAS DE FRAGILIDAD EN EL EJEMPLO DE VIELMA ET AL (2007) .....	168
TABLA A3-3: PROBABILIDAD DE ESTAR EXACTAMENTE EN EL ESTADO DE DAÑO, DADO QUE.....	169
TABLA A3-4: PÉRDIDA ESPERADA ASOCIADA A CADA ESTADO DE DAÑO .....	169
TABLA A3-5: RANGOS DE PÉRDIDA QUE DEFINEN LOS ESTADOS DE DAÑO .....	172
TABLA A4-1: RESULTADOS DE RIESGO DE LAS EDIFICACIONES PÚBLICAS, ESTADO ACTUAL .....	176
TABLA A4-2: RESULTADOS DE RIESGO DE LAS EDIFICACIONES PÚBLICAS DE SALUD, ESTADO ACTUAL .....	177
TABLA A4-3: RESULTADOS DE RIESGO DE LAS EDIFICACIONES PÚBLICAS DE EDUCACIÓN, ESTADO ACTUAL .....	178
TABLA A4-4: RESULTADOS DE RIESGO DE LAS EDIFICACIONES PÚBLICAS, ESTADO REFORZADO .....	179
TABLA A4-5: RESULTADOS DE RIESGO DE LAS EDIFICACIONES PÚBLICAS BAJO LA ESTRATEGIA DE REFORZAMIENTO .....	180
TABLA A4-6: RESULTADOS DE RIESGO DE LAS EDIFICACIONES PÚBLICAS DE SALUD, ESTADO REFORZADO.....	181

Análisis beneficio-costo probabilista  
de medidas de mitigación del riesgo por sismo

---

TABLA A4-7: RESULTADOS DE RIESGO DE LAS EDIFICACIONES PÚBLICAS DE EDUCACIÓN, ESTADO REFORZADO.....	182
TABLA A4-8: EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DE PRODUCTIVIDAD DEBIDO A LAS MUERTES PREMATURAS POR SISMO EN LAS EDIFICACIONES PÚBLICAS.....	183
TABLA A4-9: EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DE PRODUCTIVIDAD DEBIDO A LAS MUERTES PREMATURAS POR SISMO EN LAS EDIFICACIONES PÚBLICAS DE SERVICIOS DE SALUD.....	184
TABLA A4-10: EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DE PRODUCTIVIDAD DEBIDO A LAS MUERTES PREMATURAS POR SISMO EN LAS EDIFICACIONES PÚBLICAS DE SERVICIOS EDUCATIVOS.....	185



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes y motivación

*“No somos capaces en la vida de evitar el riesgo, pero sí de seleccionar entre riesgos. La toma de decisiones racional requiere por lo tanto una forma clara y cuantitativa de expresar el riesgo, de modo que este pueda ser ponderado junto con todos los costos y beneficios, en el proceso de decisión” (Kaplan & Garrick, 1981)*

Un Análisis de Beneficio-Costo – ABC de medidas de mitigación de riesgo por sismo se desarrolla comparando el estado actual<sup>1</sup> de riesgo de los activos de interés y el riesgo de una vez implementadas las Medidas de Mitigación del Riesgo<sup>2</sup> - MMR, del mismo modo es posible desarrollar el análisis beneficio-costo de múltiples alternativas de mitigación comparándolas para decidir cuál será la mejor.

Múltiples autores (Blank, 1991; Claycamp, 2006; FEMA, 1997d; Ganderton, 2002; Kull, Mechler, & Hochrainer-Stigler, 2013; Kunreuther, Cyr, Grossi, & Tao, 2001; Mechler, 2005; Smyth et al., 2004; Sugden & Williams, 1978) coinciden en el uso del análisis beneficio-costo como una herramienta apropiada para evaluar diferentes alternativas o proyectos de inversión en activos públicos o que tengan impacto en la sociedad. Esta herramienta de decisión puede incorporar múltiples variables económicas tales como costos de mercado, precios de referencia, y la distribución de beneficios para diferentes partes interesadas.

Las medidas de mitigación del riesgo se definen como acciones de intervención realizadas con el fin de minimizar, o incluso en casos particulares eliminar el riesgo<sup>3</sup>. La evaluación de cada una de las alternativas para la reducción del riesgo implica una difícil tarea, pues están sujetas a múltiples variables tales como; el tipo de activo (edificaciones de vivienda, indispensables, de atención), la población expuesta, nivel de amenaza, los efectos en el caso de la ocurrencia de un evento de

---

<sup>1</sup> La alternativa de no hacer nada para mitigar el riesgo, status quo, riesgo inherente, estimación de pérdidas en el estado actual.

<sup>2</sup> Riesgo mitigado, implementación de medidas de mitigación, estimación de pérdidas en el estado mitigado.

<sup>3</sup> Por definición el riesgo es imposible de eliminar, los efectivos efectos de la mitigación de riesgo por lo general son perceptibles a largo plazo y solo cuando a las consecuencias directas se suman los efectos secundarios por la implementación de medidas de mitigación.

amenaza, los beneficios y costos asociados a la implementación de las medidas de mitigación del riesgo, y los recursos de inversión disponibles.

Adicionalmente a la dificultad en la evaluación de las anteriores variables, se suma la incertidumbre asociada a su estimación (Grossi, 1999; Mechler, 2005; Smyth et al., 2004). En general no se tiene certeza de cuándo pueden ocurrir los eventos en el futuro, cuál será el valor real de las pérdidas cuando ellas ocurran y cuanto serán los costos de rehabilitación, reparación y reemplazo. En otras palabras, las técnicas convencionales de evaluación de la relación beneficio-costos no son apropiadas por ser deterministas tanto en las pérdidas como en los costos.

Como resultado de los avances realizados en el análisis beneficio-costos por parte del autor y fruto de las inquietudes y necesidades de generar más y mejores herramientas para el proceso de toma de decisiones, con esta tesis se pretende desarrollar una metodología para la evaluación probabilista en forma completa de medidas de mitigación del riesgo ante amenazas naturales basada en un análisis beneficio-costos. Se pretende obtener una metodología extendida probabilista del análisis beneficio-costos en un proceso sistemático que incorpore la incertidumbre en los parámetros de entrada, tomando como punto de partida lo propuesto en Smyth et al. (2004).

Dicha metodología para la evaluación de alternativas de medidas de mitigación del riesgo se desarrollara entonces en el marco del análisis probabilista de riesgo - APR por amenaza sísmica donde se incluyan la multiplicidad de variables descritas sobre un portafolio de activos de condiciones particulares de localización, distribución geográfica, características físicas y administrativas, propiedad patrimonial.

La metodología desarrollada se aplica en un caso real que correspondiente a un grupo de edificaciones en el territorio colombiano; específicamente al grupo de edificaciones públicas del municipio de Manizales.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es desarrollar una metodología de análisis beneficio costo - ABC para la evaluación de medidas de mitigación de riesgo - MMR ante amenazas naturales, que determine si los beneficios esperados exceden los costos asociados a la implementación de las medidas de mitigación del riesgo. Se pretende obtener una metodología extendida del análisis beneficio-costo probabilista - ABCP que incorpore tanto la incertidumbre en los beneficios, ya tratada en los trabajos anteriores del autor, así como la nueva incorporación del tratamiento de la incertidumbre en los costos de implementación. De igual manera una revisión de cómo dicha incertidumbre influye o afecta la decisión de mitigar o no mitigar el riesgo. Todo lo anterior con base en las herramientas de la iniciativa de enfoque integral para la evaluación probabilista de riesgo CAPRA<sup>4</sup>.

El desarrollo de este trabajo se propone alrededor de los siguientes objetivos específicos:

- i. Realizar una investigación del estado del conocimiento en lo referente al análisis probabilista del riesgo y análisis beneficio-costo, y los análisis derivados de amenaza sísmica, vulnerabilidad sísmica, e identificación de elementos expuestos.
- ii. Realizar un desarrollo analítico de una expresión para la estimación de la probabilidad que la relación beneficio-costo por reforzamiento estructural sea positiva tomando en cuenta tanto la incertidumbre en la estimación de los beneficios como en los costos de reforzamiento.
- iii. Evaluar la sensibilidad del análisis beneficio-costo probabilista según la información disponible sobre los edificios expuestos y la incertidumbre en la evaluación de su vulnerabilidad y costos de las obras de reforzamiento.
- iv. Realizar un análisis beneficio-costo probabilista a un grupo de edificaciones de la ciudad e Manizales, Colombia, que incluyan múltiples sistemas estructurales y condiciones locales.

La aplicación de la metodología desarrollada se realizará con la información de estudio de amenaza sísmica de Colombia (Comité AIS-300, 2009), las funciones de vulnerabilidad desarrolladas en el marco del proyecto de gestión del riesgo para la ciudad de Manizales<sup>5</sup> y la plataforma CAPRA<sup>4</sup> para la evaluación del riesgo.

---

<sup>4</sup> El enfoque integral para la evaluación probabilista de riesgo. [www.ecapra.org](http://www.ecapra.org)

<sup>5</sup> [www.gestiondelriesgomanizales.com](http://www.gestiondelriesgomanizales.com)

### **1.3 Estructura de la tesis**

Este documento tiene tres componentes principales: una primera sección referente al estado del conocimiento en relación con la evaluación del riesgo como técnica para llevar a cabo y análisis beneficio-costos de la implementación de medidas de mitigación. Se expone la evaluación de la amenaza sísmica, la caracterización de los elementos expuestos, la evaluación de la vulnerabilidad estructural y sísmica y la evaluación del riesgo en forma probabilista como herramienta de un análisis de beneficio-costos de la reducción del riesgo. La segunda sección presenta por fases el desarrollo conceptual, analítico y metodológico para la evaluación probabilista del beneficio-costos, lo que corresponde a la propuesta de la investigación. La tercera sección corresponde a la aplicación en un portafolio real de edificaciones, en la ciudad de Manizales en Colombia,

De esta manera, el capítulo 2 trata acerca de los fundamentos y evaluación de la amenaza sísmica, de la información definición e información necesaria para la implementación de un modelo de exposición, y las bases y métodos para la evaluación del comportamiento de las estructuras frente a la ocurrencia de sismos. También se presentan las bases e información para necesaria para realizar un análisis de riesgo, así como se exponen las principales herramientas y desarrollos regionales para la evaluación del riesgo. Finalmente se exponen los componentes de la relación beneficio costo y la evaluación en el caso de riesgo sísmico.

El Capítulo 3 describe los avances en este tema en los que se ha involucrado el autor. Este capítulo corresponde al desarrollo metodológico desde el punto de vista probabilista para incluir la incertidumbre en los costos de implementación de las medidas de mitigación del riesgo a partir de los avances realizados a la fecha en este tema por el autor, considerando las contribuciones en el desarrollo analítico del valor presente neto de pérdidas.

El Capítulo 4 presenta la aplicación en el caso de estudio en la ciudad e Manizales, donde se realiza el análisis con la metodología planteada y se evalúa la relación beneficio-costos de rehabilitación sísmica para las edificaciones públicas de la ciudad y para dos subconjuntos de edificaciones indispensables y de atención a la comunidad; a saber, las edificaciones de salud y educación. El Capítulo 5 presenta las conclusiones sobre la evaluación beneficio-costos de la rehabilitación sísmica y los posibles trabajos futuros que se derivan.

El Capítulo 6 corresponde a las publicaciones y proyectos asociados con el desarrollo de este trabajo de investigación y el Capítulo 7 son las referencias. Finalmente se incluyen una serie de anexos acerca de la evaluación probabilista de costos de rehabilitación sísmica y tipologías estructurales publicadas en estudios relevantes.



## 2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

### 2.1 Evaluación de amenaza sísmica

Tanto para la estimación de los beneficios como de los costos en el análisis beneficio-costos, es necesario realizar una evaluación de amenaza sísmica en las localizaciones del grupo de edificaciones de interés. Esto con el fin de estimar las demandas sísmicas sobre las estructuras como para establecer las características necesarias para alcanzar el nivel de comportamiento sismorresistente deseado. Para ello y con el objetivo de realizar una evaluación en términos probabilistas, en este caso de amenaza sísmica, existe el procedimiento denominado análisis probabilista de amenaza sísmica (PSHA por sus siglas en inglés) cuyo objeto es realizar estimaciones sobre la tasa de excedencia o probabilidad de ocurrencia de diferentes niveles de intensidad sísmica (p.e. aceleración pico del terreno o aceleración espectral) por la ocurrencia de todos los eventos sísmicos posibles (Field, 2005).

La evaluación probabilista de amenaza se desarrolla en tres fases: i) la determinación del modelo de fuentes sísmicas; que da cuenta de la frecuencia media anual de eventos de diferentes magnitudes -dichos eventos son considerados como aleatorios y no correlacionados en el marco de un proceso de Poisson- y la frecuencia media de eventos respecto de localización espacial; ii) la determinación del modelo de movimiento del terreno o leyes de atenuación de ondas sísmicas, que da cuenta de los diferentes niveles de intensidad respecto de la magnitud y distancia al evento; y iii) el cálculo probabilista de los diferentes niveles de intensidad sísmica (Field, 2005; Lee et al., 2003).

#### 2.1.1 Distribución espacial y tasa de ocurrencia, (paso i)

El modelo de fuentes sísmicas describe la localización  $l_n$ , la magnitud  $m_n$ , y la frecuencia anual  $F_n$  con la que ocurren los eventos sísmicos  $E_n$ . Dicha información conforma un listado de escenarios sísmicos alineados con las definiciones de escenarios de riesgo expuesta por Kaplan & Garrick (1981), definición que se extenderá en el capítulo correspondiente al análisis probabilista de riesgo del presente documento.

La magnitud  $m_n$  de los eventos sísmicos  $E_n$  puede definirse como un valor característico de una fuente particular generadora de eventos (modelo característico de distribución de magnitudes), o como un valor de referencia

(diferencial de magnitud) para una fuente con una distribución continua de eventos (p.e. modelo Gutenberg-Richter).

### 2.1.1.1 Modelo característico

Corresponde al modelo específico de una falla o fuente sísmica, en donde un segmento dado genera sismos de tamaño y mecanismo determinado por la geometría del segmento, en una localización específica a lo largo de la falla donde el desplazamiento o ruptura es la misma en eventos sucesivos. En la aplicación al análisis de amenaza sísmica, se refiere a un sismo tamaño específico conocido o inferido que ocurra en el mismo sitio, usualmente con un frecuencia mayor que la extrapolada de la relación magnitud frecuencia de los eventos más pequeños (Lee et al., 2003, p. 1800).

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{\Phi \left[ \frac{M_u - EM}{s} \right] - \Phi \left[ \frac{M - EM}{s} \right]}{\Phi \left[ \frac{M_u - EM}{s} \right] - \Phi \left[ \frac{M_0 - EM}{s} \right]}, M_0 < M < M_u \quad (1)$$

Tomada del programa CRISIS (M. Ordaz et al., 2007)

Donde  $M_0$  corresponden a la magnitud mínima,  $M_u$  a la magnitud última, y  $\lambda_0$  a la frecuencia mínima de ocurrencia.

### 2.1.1.2 Modelo Gutenberg-Richter

Este modelo corresponde a una relación empírica obtenida por (Gutenberg & Richter, 1954, 1941) que expresa la distribución de frecuencias de magnitudes de eventos sísmicos que ocurren en un área e intervalo de tiempo (Lee et al., 2003, p. 1815).

$$\log_{10} N = a - bm \quad (2)$$

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}}, M_0 < M < M_u \quad (3)$$

Tomada del programa CRISIS (M. Ordaz et al., 2007)

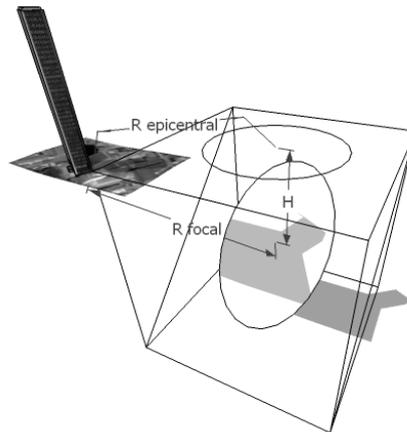
donde  $N$  corresponde al número de eventos con magnitud mayor o igual que  $m$ , siendo  $m$  es el valor de la magnitud, y  $a$  y  $b$  constantes.

La localización de los eventos sísmicos  $l_n$  puede ser representada por un punto, región o superficie y en la mayoría de los casos está definida en función a la localización de las fuentes generadoras de eventos a partir de estudios geológicos y observaciones del terreno.

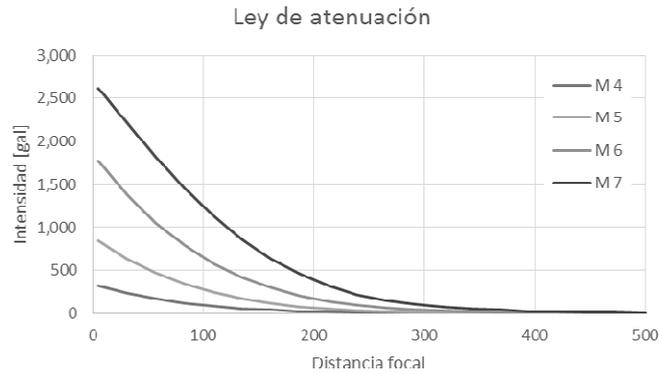
La ocurrencia en el tiempo de los eventos es expresada en términos de la tasa anual o la probabilidad que dichos eventos ocurran en una ventana de tiempo dada, generalmente en este proceso se implementa un modelo Poisson (generación de eventos independiente del tiempo) como se mencionó anteriormente.

### 2.1.2 Cantidad de movimiento, (paso ii)

El modelo de movimiento del terreno (ley de atenuación sísmica)  $f(g(I_s|E_n(m_n, D_n)), \sigma_n)$  describe básicamente la intensidad del movimiento  $I_s$  en un sitio particular  $S_s(lat_s, long_s)$  como función de la magnitud  $m_n$  del evento y la distancia  $D_n(l_n, S_s)$  (p.e. focal, epicentro, distancia al plano de falla), dicha intensidad de movimiento  $I_s$  tiene asociada una medida de incertidumbre  $\sigma_n$ . Muchos modelos están definidos no solamente como función de  $m_n, D_n$  sino además con la inclusión de parámetros que dan cuenta por ejemplo del tipo de suelo, el contenido frecuencial de la señal sísmica, el tipo de ruptura, entorno tectónico, entre otros. Dicha intensidad de movimiento está usualmente caracterizada con una distribución log-normal



**Figura 2-1: Medición de distancias al evento**



**Figura 2-2: Representación de una ley de atenuación**

### 2.1.3 Cálculo de la amenaza, (paso iii)

El cálculo probabilista de amenaza (intensidad sísmica) es una aplicación específica del teorema de probabilidad total como sigue:

$$P(I_s) = P(I_s|E_1)P(E_1) + P(I_s|E_2)P(E_2) + \dots + P(I_s|E_n)P(E_n)$$

$$P(I_s) = \iint P(I_s|E_n(m_n, D_n)) f_M(m_n) f_D(D_n) dm dr \quad (4)$$

donde la expresión  $P(I_s|m_n, D_n)$  representa la probabilidad que una intensidad  $I_s$  sea alcanzada o excedida por la ocurrencia de un evento  $E_n(m_n, D_n)$ , y  $f(m_n)$  y  $f(D_n)$  son las probabilidades de  $m_n$  y  $D_n$  respectivamente.

De lo anterior, el cálculo de amenaza para un sitio  $l_n(lat_n, long_n)$  de interés se realiza entonces partiendo del modelo (geométrico y estadístico)  $E_n(m_n, D_n)$  de fuentes sísmicas y de las leyes de atenuación  $p(I_s|E_n)$ : que a partir de la definición de la distancia  $D_n(l_n)$  del sitio de interés al evento, dan una estimación de la intensidad de movimiento para un escenario particular  $E_n$ . Por tanto la distribución del valor de intensidad sísmica  $I_s$ , se define como sigue:

$$p(I_s|E_n) = f(g(I_s|E_n(m_n, D_n)), \sigma_n) \quad (5)$$

donde  $g(I_s|E_n)$  es el valor esperado y  $\sigma_n$  la medida de incertidumbre de intensidad sísmica  $I_s$ .

Dado que el interés es conocer la probabilidad que cierta intensidad sísmica  $I_s$  sea excedida, es necesario estimar entonces la integral de la distribución como sigue:

$$P(I_s > a|E_n) = \int_a^\infty f(g(a|E_n), \sigma_n) da \quad (6)$$

y multiplicando dicha probabilidad de excedencia  $P(I_s > a|E_n)$  por la frecuencia anual  $F_n$  se tiene la tasa anual de excedencia  $\nu_n(I_s|E_n)$  de dicho valor de intensidad  $I_s$  por la ocurrencia del evento  $E_n$

$$\nu_n(I_s|E_n) = P(I_s > a|E_n) * F_n \quad (7)$$

Ahora, si se hace la misma operación para todos los escenarios  $N$  se obtendría la tasa anual de excedencia  $\nu_n(I_s)$  para la intensidad  $I_s$

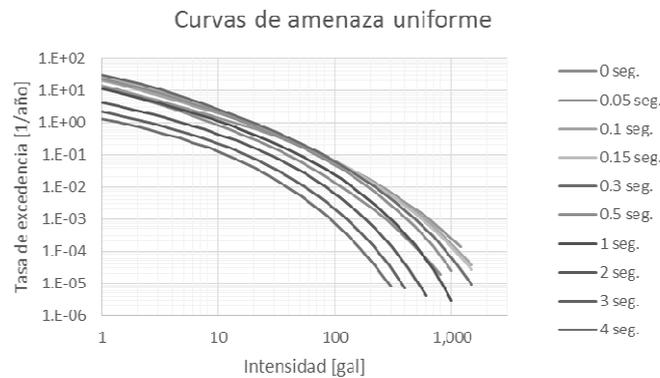
$$F(m, D) = \int E_n(m_n, D_n(l_n)) dm dl \quad (8)$$

$$\nu_n(I_s) = \iint P(I_s > a|E_n) * E_n(m_n, D_n(l_n)) dm dl \quad (9)$$

Con base en la distribución de Poisson y la tasa de excedencia  $\nu_n(I_s)$  es posible calcular la probabilidad que el valor de intensidad  $I_s$  sea excedido en un tiempo de exposición  $t_{exp}$  particular.

$$P(I_s) = 1 - e^{-\nu_n(I_s)*t_{exp}} \quad (10)$$

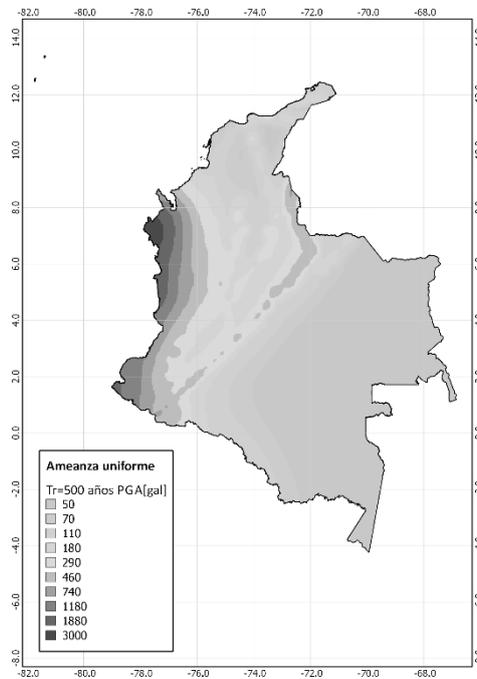
Los resultados de (9) y (10) se conocen como la curva de amenaza sísmica. Pues se contabiliza la influencia de todas las magnitudes que pueden afectar un sitio de interés.



**Figura 2-3: Curva de amenaza sísmica**

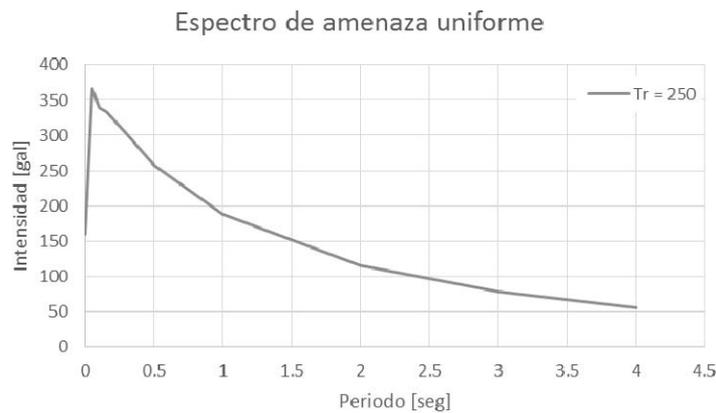
Es de notar que la curva de amenaza sísmica es calculada para una localización  $l_n$  ( $lat_n, long_n$ ) de particular interés (p.e. el diseño basado en comportamiento de una planta industrial, de saneamiento básico, o edificación de vivienda, servicios de salud o educación). Si se calcula dicha curva de amenaza para múltiples localizaciones en una región, es posible obtener un mapa de distribución de probabilidad para un valor fijo de intensidad  $P(I_s|D_n)$  o de distribución de intensidades para un valor fijo de probabilidad  $f(I_s|P(I_s))$  denominado como

“*mapa de amenaza uniforme*”. Este último mapa de distribución de intensidad sísmica es apropiado presentarlo en términos del periodo de retorno  $T_{ret}$  [años] (Cornell, 1968) más que en valores de probabilidad de excedencia [0-1] y se calcula de (9) dado que el inverso de la tasa anual de excedencia  $1/\nu_n(I_s)$  es precisamente el periodo de retorno.



**Figura 2-4: Mapas de amenaza uniforme**

Derivado de los resultados de este análisis probabilista de amenaza, es posible obtener para una localización particular múltiples valores de intensidad para un valor de probabilidad fijo, a este último se le denomina como “*espectro de amenaza uniforme*” y es uno de los principales inputs para la definición de valores de intensidad sísmica de diseño de edificaciones en los códigos de construcción sismorresistente.



**Figura 2-5: Espectros de amenaza uniforme**

## 2.2 Información de elementos expuestos

Por exposición se hace referencia en el análisis probabilista del riesgo al grupo de edificaciones en riesgo, o expuestas a la materialización de pérdidas potenciales por la ocurrencia de un evento amenazante. En la realización de un análisis probabilista del riesgo es frecuente la falta de información de las edificaciones potencialmente afectadas (construcciones, edificaciones indispensables y obras de infraestructura, entre otros), de sus características estructurales (sistema de resistencia sísmica), destino económico o uso, tipo de contenidos, número de ocupantes y localización geográfica. La información corresponde al inventario de bienes inmuebles e infraestructura que puede verse afectada términos de monetarios y de población. Esta es un componente fundamental del análisis probabilista del riesgo pues objetos principales de la evaluación, y de su resolución y detalle depende la precisión de los resultados. La Información puede levantarse y construirse un modelo con diferentes niveles de resolución, y cuando no se cuenta con ella o es tiene incompleta es necesario realizar estimaciones aproximadas que den cuenta de dicho inventario de elementos expuesto de la forma más ajustada a la realidad.

Lo anterior deriva en la ejecución de un proceso de identificación y caracterización y valoración de elementos expuestos donde es necesario contestar o tratar a estos tres (3) aspectos básicos (De Bono & Mora, 2014) como sigue:

a) ¿Qué son?

Para cada elemento expuesto es necesario conocer sus características constructivas y el tipo actividades o población que las ocupa, con el objeto de caracterizar su comportamiento en términos del modelo o características de comportamiento que el elemento expuesto pueda tener frente a la ocurrencia de un evento sísmico. De aquí se desprende información primordial como:

- i. material de construcción de la edificación
- ii. número de pisos
- iii. sistema de resistencia sísmico
- iv. año de construcción
- v. si cumple o no con el código de construcción sismo resistente
- vi. uso, destino

E información secundaria como el tipo de acabados, fachadas, contenidos, nivel socioeconómico de la población que la habita u ocupa. A partir de esta información es posible asignar un modelo de comportamiento o función de vulnerabilidad ajustada a cada uno de los elementos expuestos.

b) ¿Dónde están?

De la localización del elemento expuesto dependerá la frecuencia e intensidad sísmica esperada sobre la edificación. Que se deriva en los niveles de amenaza a los que será sometida bajo la influencia de los múltiples eventos sísmicos posibles calculados en la evaluación de amenaza sísmica regional y local (microzonificación) para dicha localización.

c) ¿Cuánto valen?

El valor asignado a cada elemento expuesto dependerá en gran medida del tipo de análisis de pérdida que se quiera obtener, del propietario, y del uso establecido para el elemento expuesto. En la realización de análisis regionales o nacionales de riesgo es frecuente que la valoración de los elementos expuestos sea un valor derivado del uso y la ciudad en la que se localice el elemento expuesto, mientras que en análisis locales dicha información sea extraída directamente de bases de datos catastrales o avalúos puntuales con fines de aseguramiento. Además del valor físico de las edificaciones, es necesario en muchas ocasiones, dependiendo de los resultados esperados (p.e. cobertura de seguros por terremoto, rehabilitación sísmica de edificaciones de atención a la comunidad) realizar estimaciones de pérdidas no sólo sobre el valor físico de la estructura sino sobre los contenidos y la

pérdida o interrupción de funcionalidad. Pues este último factor es de vital importancia en la continuidad de los negocios y la prestación de servicios públicos (salud, energía, agua, atención de la emergencia).

### **2.2.1 Niveles de resolución y fuentes de información**

En el caso en el que la información de exposición no sea suficiente, o no exista, es necesario el desarrollo de modelos o bases de datos georeferenciadas de elementos expuestos construidas a partir de fotografías satelitales, estadísticas regionales, de censos de vivienda y población, así como de indicadores sociales disponibles (De Bono & Chatenoux, 2014; De Bono & Mora, 2014; Gamba et al, 2012).

Los modelos de exposición pueden entonces desarrollarse a diferentes niveles de resolución a partir de la información disponible y resolución espacial esperada de los resultados de riesgo. Es un ejemplo de esto los niveles de resolución propuestos en el proyecto GED4GEM, en el marco de la iniciativa del Global Earthquake Model, como sigue:

- Nivel 0 (nacional): construido a partir de información de carácter nacional como los censos de vivienda y población a este nivel. Que al final arrojará información de la distribución a nivel país del número de edificaciones discretizadas por uso y tipo estructural con información económica derivada de indicadores nacionales de precios de construcción por metro cuadrado.
- Nivel 1 (subnacional): Similar al nivel 0 pero con información subnacional puntual.
- Nivel 2 (local): Construido a partir de información de levantamiento de información uno a uno de los elementos, pero con resolución agregada a nivel local y por tipos de edificio.
- Nivel 4 (uno a uno): Construida edificación por edificación con la información proveniente de levantamiento en campo y bases de datos catastrales y de impuestos. Es el tipo de modelo de exposición utilizado por evaluación de riesgo para el aseguramiento de coberturas por terremoto en la industria aseguradora.

Más allá de los sistemas desarrollados para una región o país particular como es el caso de los alcances de iniciativas como el HAZUS, los sistemas para la evaluación de riesgo no invierten esfuerzos en la conformación de bases de datos de activos expuestos. En su lugar se preocupan por implementar las metodologías ampliamente difundidas y procedimientos actuales de cálculo de la demanda sísmica y del comportamiento de edificaciones, dejando al usuario experto incluir

la información de activos expuestos de que dispongan para la evaluación del comportamiento estructural y el impacto en sus ocupantes. De esta manera se relega la estimación económica de pérdidas físicas sobre los activos y se enfocan en la estimación del impacto en la población (víctimas y heridos) con base en correlaciones basadas en información histórica. La vida es la primera preocupación ante un evento sísmico, razón por lo cual la información histórica de afectación a la población es menos escasa y de fácil consecución que la información de pérdidas económicas por tipo de edificación y nivel de demanda sísmica, además del nivel de recursos, no sólo económicos sino logísticos, necesarios para obtenerla.

Para la realización de evaluaciones de riesgo como las realizadas para los informes del GAR<sup>6</sup>, y por proyectos como el GEM<sup>7</sup> y el CAPRA<sup>8</sup> ha sido necesario contar con un modelo o base de datos de activos expuestos que contenga estimaciones del área construida, el valor económico expuesto y de enfoque actuarial (como lo hace la industria aseguradora) (Jaiswal et al., 2010). Este tipo de inventarios de elementos solamente desde hace poco ha sido de acceso abierto, de libre uso y de cobertura global y con un nivel de resolución aceptable por país, o incluso con un nivel de resolución más elevado, por ciudad. Sin embargo en la mayoría de los casos esta información general es aún insuficiente para estudios detallados (Trendafiloski et al., 2009).

### **2.3 Vulnerabilidad**

Para la evaluación del riesgo es necesario identificar y clasificar cada elemento expuesto de acuerdo con sus características físicas particulares (tipo o clase estructural) con el fin de establecer una clasificación de la vulnerabilidad o respuesta del tipo de estructura ante la acción sísmica. En otras palabras es necesario tipificar el comportamiento ante las cargas sísmicas de los elementos expuestos y de esta manera reducir el número de evaluaciones de vulnerabilidad necesarias para el análisis del riesgo.

La taxonomía de tipologías estructurales se ha venido haciendo, de manera más generalizada, desde los años 80. Una de las primeras publicaciones ampliamente difundida fue el ATC-13 (ATC, 1985), en la cual se incluyeron relaciones de daño de edificaciones derivadas de la opinión de expertos. En el año 1997 se publicó el más reconocido proyecto para proveer información para la mitigación del riesgo,

---

<sup>6</sup> <http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/>

<sup>7</sup> <http://www.globalquakemodel.org/>

<sup>8</sup> <http://www.ecapra.org/>

planes de atención y manejo de emergencia y políticas para la respuesta y reconstrucción ante cualquier evento sísmico. Dicho proyecto fue realizado con el apoyo del *Instituto Nacional de Ciencias de la Construcción* - NIBS y la *Agencia Federal para el Manejo de Emergencias* - FEMA de los Estados Unidos, con el fin de divulgar una metodología para la evaluación del riesgo enfocada a Norteamérica. Este proyecto se le denominó HAZUS97 (Whitman et al., 1997) luego con nuevos aportes se desarrolló el HAZUS99. En primera instancia esta iniciativa se ocupó por la amenaza sísmica y luego para versión 2004 se añadieron las amenazas de viento e inundación. Esta versión multi-amenaza se le denominó HAZUS-MH (FEMA, 2004). En el mismo ámbito norteamericano se han desarrollado otras taxonomías como la PAGER-STR (ver A2.2) para el *Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response* - PAGER como una mejora al proceso de difusión de información para la atención de emergencias del *National Earthquake Information Center* - NEIC del USGS.

Al igual que para Norteamérica, en Europa el EMS-98 (Grünthal, 1998) define una taxonomía para la región, la cual fue actualizada posteriormente por la metodología implementada en el marco del proyecto RISK-UE (Yves, 2004), donde se referencia como la *Building Type Matrix* (BTM, ver A2.3).

### **2.3.1 Demanda sísmica**

#### *2.3.1.1 Escala de intensidad sísmica*

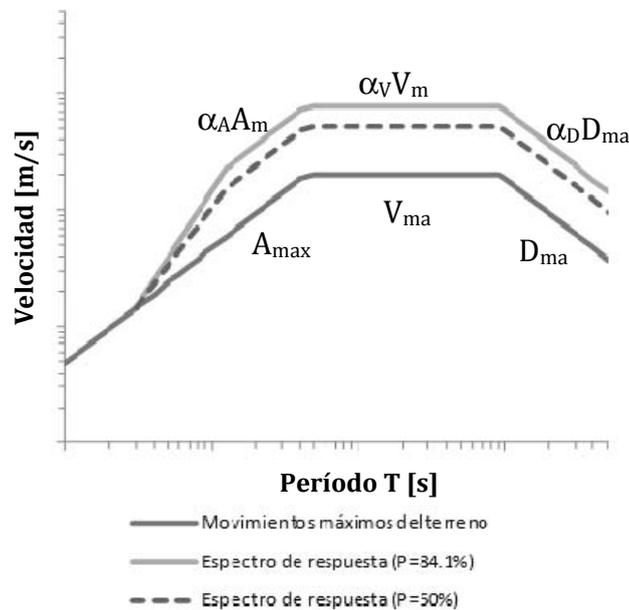
Inicialmente la intensidad sísmica fue estimada a partir de la evaluación de la ocurrencia de daños en la superficie del territorio afectado, las edificaciones y la población (p.e. EMS-98). Dicha evaluación de la intensidad sísmica se ha realizado sobre la base que las edificaciones ubicadas en un lugar próximo son exigidas de igual manera y sobre la base de tener en cuenta la resistencia de los tipos estructurales ante diferentes niveles de demanda del fenómeno sísmico. Es allí donde surge la necesidad de clasificar las edificaciones en grupos relevantes de acuerdo con el tipo de materiales y el cumplimiento de los códigos de construcción.

De las escalas de intensidad la EMS-98 define 5 niveles de vulnerabilidad/daño para cada tipo estructural con lo cual es posible determinar la demanda/intensidad sísmica de acuerdo con la definición de daños en edificaciones para cada grado de intensidad de los 12 definidos en dicha escala. Las descripciones de daños esperados para cada escala de intensidad sísmica junto con las distribuciones de edificaciones por tipo de vulnerabilidad/daño se presentan en el numeral A2.1 de los anexos.

### 2.3.1.2 Espectro de respuesta elástica

El espectro de respuesta corresponde a la representación gráfica de la demanda sísmica (p.e. aceleraciones esperadas), para una localización y diferentes periodos de vibración de estructuras. Allí se representa la máxima respuesta de un edificio representado como un sistema de un grado de libertad (SDOF).

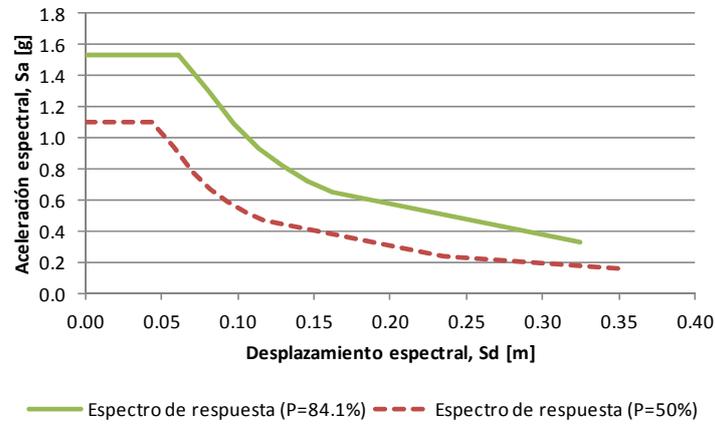
El enfoque del espectro de respuesta elástica de diseño es uno de los más ampliamente difundidos (Newmark y Hall, (1982). En este método a partir de las medidas de intensidad de aceleración, velocidad y desplazamiento máximo del terreno ( $A_{max}$ ,  $V_{max}$ ,  $D_{max}$ ) y factores de amplificación ( $\alpha_A$ ,  $\alpha_V$ ,  $\alpha_D$ ) es posible construir un espectro de diseño para un nivel de amortiguamiento seleccionado.



**Figura 2-6 Esquema cálculo del espectro elástico de respuesta de Newmark y Hall (adaptado de (García, 2000))**

Cada punto del espectro de respuesta corresponde a un único valor de aceleración, velocidad y desplazamiento para un valor de frecuencia de vibración (dominio de la frecuencia) de los edificios representados. En los códigos de construcción es frecuente encontrar los espectros de respuesta en términos de la aceleración espectral y el periodo de vibración y en vista del objetivo de estimar el comportamiento de edificaciones, es conveniente transformar dicho espectro de respuesta en términos de la aceleración versus el desplazamiento (ADRS por sus siglas en inglés), pues la evaluación de este último es el interés del comportamiento estructural. Para la conversión del espectro de respuesta al formato ADRS se utiliza la siguiente expresión.

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad S_a = \omega^2 S_d \quad (11)$$



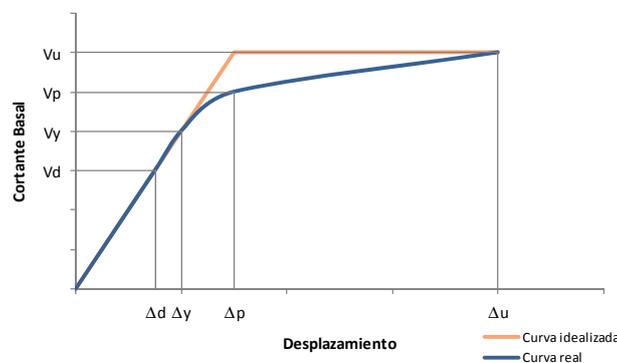
**Figura 2-7 Espectros de respuesta elástica**

### 2.3.2 Comportamiento de las edificaciones

#### 2.3.2.1 Representación de la capacidad de edificaciones

Como capacidad sísmica de una edificación se define la relación entre la fuerza lateral demanda y la deformación inducida sobre la estructura. La fuerza lateral demandada en el caso del sismo proviene de la excitación en la base (p.e. aceleración) por la ocurrencia de un evento sísmico y la masa de la edificación. Por otro lado, la deformación inducida (desplazamiento) proviene del tipo de estructural de la edificación, o la disposición de elementos estructurales para resistir movimientos laterales y los materiales de construcción.

La capacidad de una edificación entonces se presenta como en la Figura 2-8 donde en el eje de las abscisas se presenta el desplazamiento del techo,  $d$ , de la edificación y en el eje de las ordenadas,  $V$ , la fuerza en la base correspondiente.



**Figura 2-8 Curva de capacidad**

### 2.3.2.2 Espectro de capacidad – ATC 40

Es posible modificar la anterior curva de capacidad y expresarla en términos de la aceleración vs desplazamiento, similar que en el ADRS, pero ahora en función de la respuesta espectral de la edificación, formato  $S_a$ - $S_d$  (ATC, 1996), por lo cual el eje de las abscisas se reescribe como el desplazamiento espectral,  $S_d$ , mientras que el eje de las ordenadas se reescribe como la aceleración espectral,  $S_a$ , de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$S_a = \frac{V/M}{\alpha_1} \quad S_d = \Delta * \alpha_1 \quad (12)$$

$$\alpha_1 = \frac{(\sum m_i \phi_i)^2}{\sum m_i \phi_i^2} \quad \alpha_2 = \frac{1}{FPM} \quad FPM = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2} \quad (13)$$

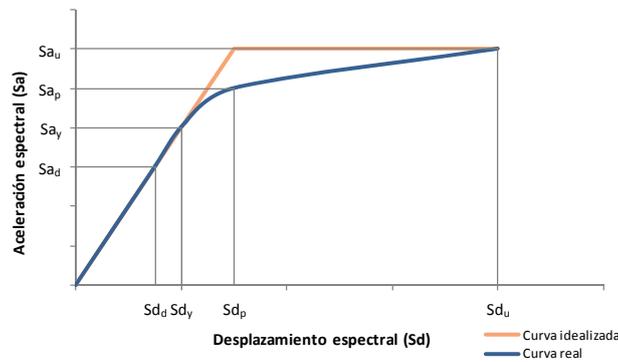
Los factores  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  corresponden al factor de participación de masa, o fracción del peso del edificio en el primer modo de vibración, y al inverso del factor de participación modal  $FPM$ , o fracción de la altura del edificio para el punto de observación del desplazamiento respectivamente. Los términos  $m_i$  y  $\phi_i$  corresponden a la masa total y desplazamiento en cada uno de los niveles de la edificación para el primer modo de vibración.

En estudios de evaluación de riesgo previamente mencionados se incluyen espectros de capacidad para diferentes tipos estructurales como: estructuras de madera, mamposterías, pórticos de concreto reforzado o de acero, y en general para cada taxonomía definida dentro de dichos estudios. Los espectros en su mayoría son presentados para diferentes niveles de diseño, donde sea posible construir con dicha taxonomía de acuerdo al nivel de comportamiento requerido, y para diferentes alturas de edificación.

Las curvas de capacidad en formato  $S_a$ - $S_d$  pueden representarse de manera conveniente utilizando una serie de coeficientes y unas funciones características que dependen de los siguientes factores:

- $C_s$ , Coeficiente de esfuerzo sísmico
- $T_e$ , periodo estructural elástico
- $\alpha_1$ , fracción del peso efectivo en el “pushover”
- $\alpha_2$ , fracción de la altura total en el punto de observación del desplazamiento
- $\gamma$ , relación entre el esfuerzo de fluencia y el de diseño
- $\lambda$ , relación entre el esfuerzo último y el de fluencia
- $\mu$ , relación entre el desplazamiento último y  $\lambda$  veces el desplazamiento de fluencia

La Figura 2-9 ilustra la curva de capacidad a partir de los anteriores parámetros.



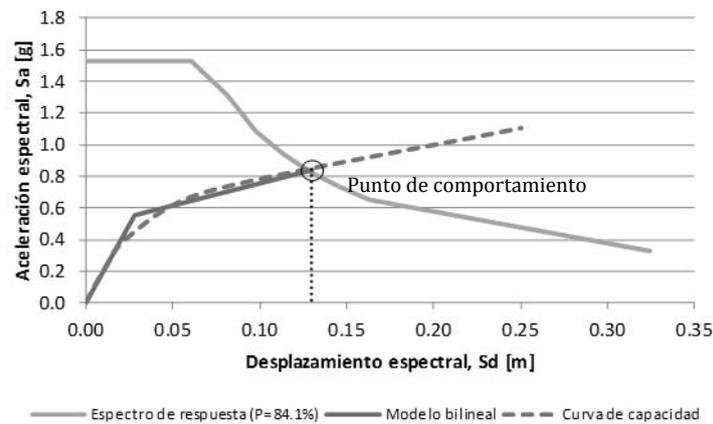
**Figura 2-9 Curva de capacidad y curva en formato Sa-Sd**

La estimación del desplazamiento y aceleración espectral esperado de la estructura “*punto de comportamiento*” se lleva a cabo superponiendo el espectro de capacidad de la estructura sobre el espectro de respuesta reducido por la degradación de la estructura a causa del amortiguamiento histerético (carga y descarga cíclica sobre la estructura por la acción de las fuerzas sísmicas inducidas) en función de un amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$ :

$$\beta_{eff} = \kappa\beta_0 + 5 = \frac{63.7\kappa(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \quad (14)$$

Donde  $\kappa$  es modificador de amortiguamiento derivado tres modelos de comportamiento estructural. La reducción del espectro de respuesta se evalúa de acuerdo a las siguientes expresiones:

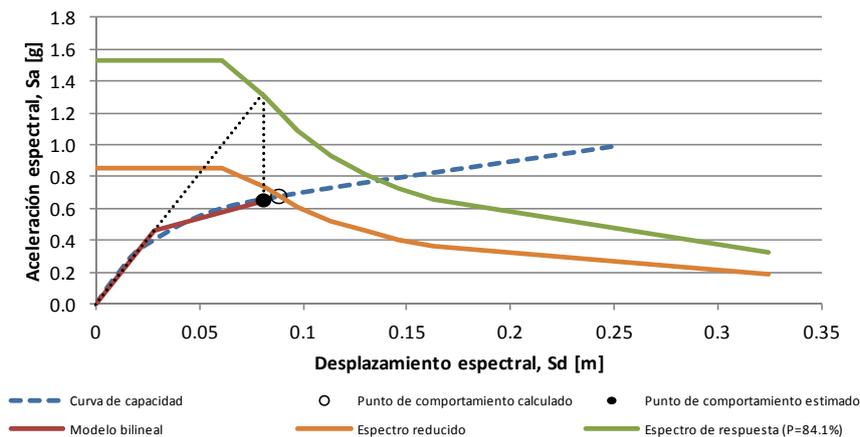
$$SR_A = \frac{3.12 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \quad SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \quad (15)$$



**Figura 2-10 Evaluación del comportamiento esperado de la estructura, ATC 40**

El reporte ATC 40 propone 3 métodos para estimar el punto de comportamiento. A continuación se describen los pasos de uno de ellos (procedimiento A).

Procedimiento A:

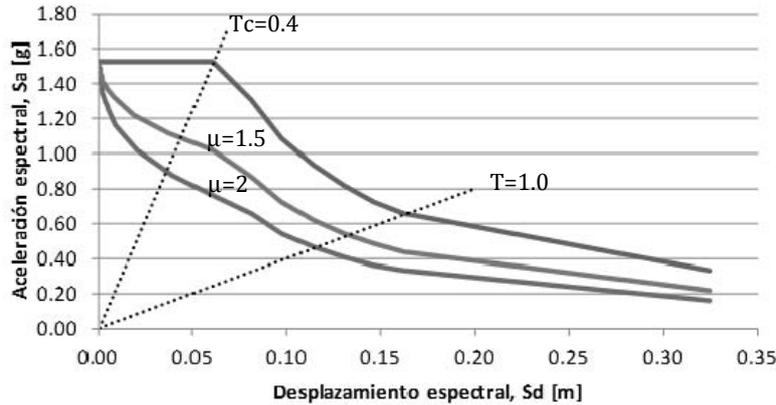


**Figura 2-11 Estimación del punto de comportamiento, procedimiento A - ATC 40**

1. Calcular el espectro elástico de respuesta para la localización de interés en el formato ADRS
2. Convertir la curva de capacidad al espectro de capacidad según las ecuaciones (12) y (13)
3. Seleccionar un punto de comportamiento arbitrario  $S_{ai}$ ,  $S_{di}$  (juicio de ingeniero)
4. Con base el modelo bilineal representado en la Figura 2-9, calcular los factores de reducción según las ecuaciones (15)
5. Superponer el espectro de demanda reducido al espectro de capacidad del paso 2

6. Determine el punto de comportamiento donde se cruzan los espectros de demanda y capacidad
7. Si la diferencia entre el punto de comportamiento obtenido en el paso 6 y el seleccionado en el paso 3 no es aceptable, se ha de hacer el proceso desde el paso 4.

### 2.3.2.3 Método de Factor de reducción RISK-UE



**Figura 2-12 Espectro de demanda modificado por el factor de reducción  $R\mu$**

El método de factor de reducción utilizado en el RISK-UE se obtiene el espectro inelástico de demanda sobre las edificaciones aplicando un factor de reducción,  $R\mu$ , al espectro de respuesta elástico para tomar en cuenta el comportamiento inelástico (Fajfar, 1999). El factor de reducción se calcula según las siguientes expresiones:

$$R_{\mu} = (\mu - 1) \frac{T}{T_o} + 1 \quad T < T_o \qquad R_{\mu} = \mu \quad T \geq T_o \qquad (16)$$

donde  $\mu$  corresponde al factor de ductilidad definido como el radio entre el desplazamiento máximo del SDOF y el desplazamiento de fluencia, y  $T_o$  es el periodo característico del terreno.

En base a un SDOF representado como en la Figura 2-7 la aceleración,  $S_{ai}$ , y desplazamiento,  $S_{di}$ , inelásticos espectrales se pueden calcular a partir de las siguientes expresiones:

$$S_{ai} = \frac{S_{ae}}{R_{\mu}} \qquad (17)$$

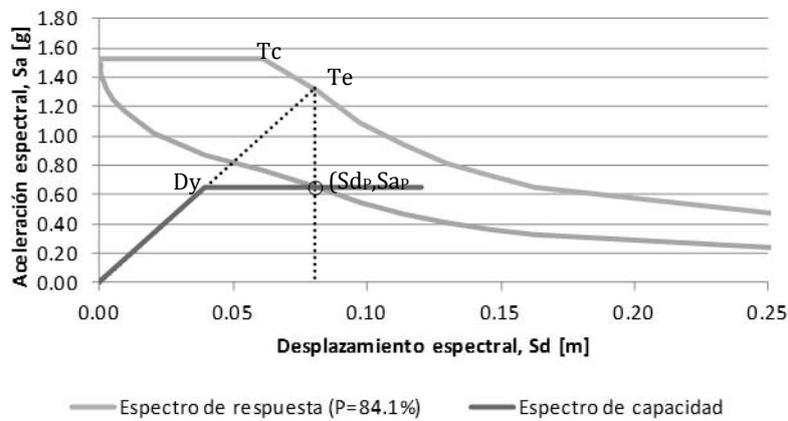
$$S_{di} = \frac{\mu}{R_{\mu}} S_{de} = \frac{\mu}{R_{\mu}} \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} = \mu \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ai} \qquad (18)$$

En este método para estimar el punto de comportamiento se proponen dos procedimientos de los cuales se presenta el propuesto en Fajfar (1999) en base a las siguientes ecuaciones y pasos:

$$\mu_p = (R_\mu - 1) \frac{T_c}{T_e} + 1 \quad T_e < T_c \quad (19)$$

$$\mu_p = \frac{S_d}{D_y} = \frac{S_{ae}(T_e)}{S_{ay}} = R_\mu \quad T_e \geq T_c$$

$$S_{dp} = D_y \mu = \frac{S_{de}}{R_\mu} \mu_p \quad S_{ap} = S_{ay} \quad (20)$$



**Figura 2-13 Estimación del punto de comportamiento, procedimiento Fajfar (1999)**

1. Definir la aceleración y desplazamiento espectral de fluencia  $S_{ay}$   $S_{dy}$
2. Evaluar el periodo elástico  $T_e$
3. Para el periodo del paso 2 calcular las aceleraciones espectrales en los espectros elástico de respuesta y de capacidad.
4. Evaluar el valor de reducción según la ecuación (17)
5. Dependiendo del valor de  $T_e$  respecto de  $T_c$  calcular la demanda de ductilidad  $\mu_p$  según las ecuaciones (19)
6. Evaluar los valores de aceleración y desplazamiento del punto de comportamiento según la ecuaciones (20)

#### 2.3.2.4 Método del espectro de respuesta modificado MADRS - FEMA 440

El método utilizado en el reporte FEMA 440 se basa en el cálculo del espectro de capacidad del ATC 40 como la reducción del espectro elástico de respuesta de un SDOF amortiguado modificado (FEMA, (2005), "Espectro de respuesta aceleración-desplazamiento modificado" - MADRS por sus siglas en inglés, donde se estima la máxima deformación de un sistema no lineal con un sistema lineal equivalente con un periodo de vibración  $T_{eff}$  y amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$ . Los anteriores parámetros son función del espectro de capacidad, el periodo, amortiguamiento y ductilidad.

El espectro modificado MADRS se obtiene por la multiplicación del ADRS, correspondiente al amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$ , por un factor de reducción  $M$  definido como en la siguiente expresión:

$$M = \frac{a_{max}}{a_{eff}} = \left(\frac{T_{eff}}{T_{es}}\right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T_s}\right)^2 \quad \left(\frac{T_0}{T_s}\right)^2 = \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu} \quad (21)$$

Siendo  $T_s$  el periodo secante, que corresponde al periodo para el desplazamiento máximo de la curva de capacidad.

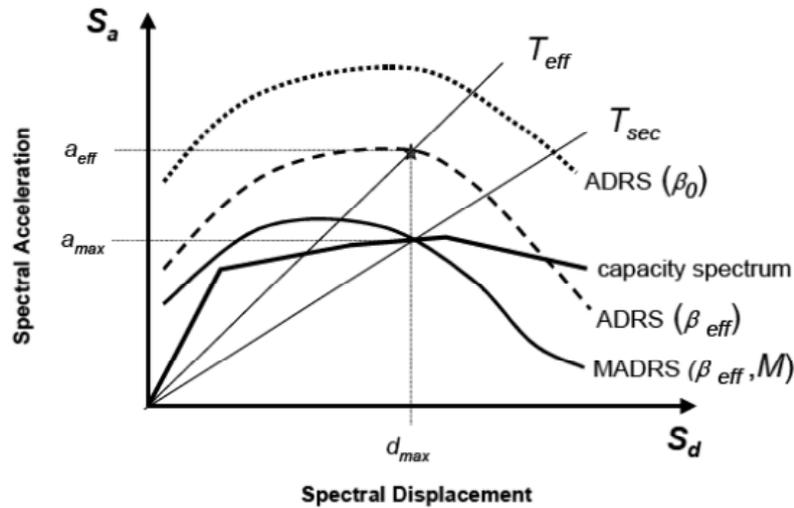
$$\alpha = \left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right) / \frac{a_y}{d_y} \quad \mu = \frac{d_{pi}}{d_y} \quad (22)$$

donde  $\alpha$  es post-elástico y  $\mu$  es la demanda de ductilidad.

El amortiguamiento  $\beta_{eff}$  y periodo  $T_{eff}$  efectivos se definen como las siguientes ecuaciones cuyas constantes han sido optimizadas para la evaluación de cualquier la curva de capacidad.

$$\begin{aligned} \beta_{eff} &= 4.9(\mu - 1)^2 - 1.1(\mu - 1)^3 + \beta_0 & 1.0 < \mu < 4.0 \\ \beta_{eff} &= 14.0 - 0.32(\mu - 1) + \beta_0 & 4.0 < \mu < 6.5 \\ \beta_{eff} &= 19 \left[ \frac{0.64(\mu - 1) - 1}{[0.64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 + \beta_0 & \mu > 6.5 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
 T_{\text{eff}} &= (0.20(\mu - 1)^2 - 0.038(\mu - 1)^3 + 1)T_0 & 1.0 < \mu < 4.0 \\
 T_{\text{eff}} &= (0.28 + 0.13(\mu - 1) + 1)T_0 & 4.0 \leq \mu \leq 6.5 \\
 T_{\text{eff}} &= \left( 0.89 \left[ \sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0.05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right) T_0 & \mu > 6.5
 \end{aligned}
 \tag{24}$$



**Figura 2-14 Espectro MADRS – FEMA 440  
(tomado de FEMA-440)**

Un factor de reducción por el amortiguamiento efectivo  $B(\beta_{\text{eff}})$ , o coeficiente de amortiguamiento  $\beta_{\text{eff}}$  se aplicará para ajustar el espectro de demanda inicial según las siguientes expresiones:

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{\text{eff}})} \quad B = \frac{4}{5.6 - \ln(\beta_{\text{eff}})}
 \tag{25}$$

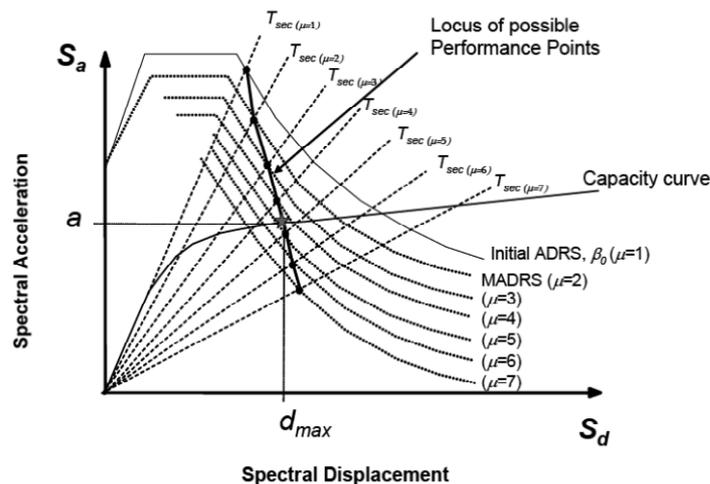
Para la estimación del periodo y amortiguamiento efectivo es necesario establecer el tipo de comportamiento histerético de la estructura para seleccionar las ecuaciones adecuadas.

Para la estimación del punto de comportamiento de la estructura en esta metodología se presentan tres procedimientos los que incluyen una iteración directa, la intersección con el MADRS y la localización de posibles puntos de comportamiento a partir del MADRS. Sea el procedimiento que se utilice, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Determinar el espectro elástico de respuesta para la localización de interés sea determinista o su equivalente espectro probabilista de amenaza.
2. Modificar el espectro anterior por los efectos de amortiguamiento de la cimentación
3. Convertir el espectro anterior al formato ADRS de acuerdo al procedimiento descrito en el ATC 40
4. Evaluar el espectro de capacidad de acuerdo al procedimiento descrito en el ATC 40
5. Seleccionar un punto de comportamiento inicial  $a_{pi}$ ,  $d_{pi}$  aproximado.
6. Evaluar el modelo bilineal del espectro de capacidad de acuerdo al procedimiento descrito en el ATC 40
7. Evaluar a partir del modelo del paso 6 los valores de la rigidez post-elástica  $\alpha$  y ductilidad  $\mu$  según las ecuaciones (22)
8. Evaluar con los parámetros del paso 7 los valores del amortiguamiento  $\beta_{eff}$  y periodo efectivos  $T_{eff}$  según las ecuaciones (23) y (24)

En adelante se presentan los pasos de acuerdo al procedimiento C:

9. Modificar el ADRS por el amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$  según las ecuaciones (25)
10. Calcular el MADRS con el factor  $M$  en base al periodo efectivo  $\beta_{eff}$  según las ecuaciones (21)
11. La intersección del periodo secante  $T_s$  con el MADRS es un punto de comportamiento posible
12. Repetir el procedimiento desde el paso 5 para múltiples puntos de comportamiento
13. El punto de comportamiento esperado para la estructura es el que resulta de la línea que une los posibles puntos de comportamiento del paso 11 y la intersección con el espectro de capacidad.



**Figura 2-15 Estimación del punto de comportamiento - FEMA 440  
(tomado de FEMA-440)**

#### 2.3.2.5 Método de coeficiente - FEMA 356

En este otro método, el desplazamiento demandado  $S_{dp}$  se calcula por la multiplicación del desplazamiento espectral elástico  $S_{de}$  por tres coeficientes  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  donde  $C_0$  es el modificador que relaciona el desplazamiento del SDOF equivalente respecto del desplazamiento de techo del MDOF, o lo que es igual al primer modo de participación modal a nivel de techo;  $C_1$  es el modificador que relaciona el desplazamiento inelástico máximo respecto del desplazamiento de respuesta elástico;  $C_2$  es el modificador que representa el efecto de degradación de rigidez de la estructura (FEMA, 2000b). Este método ha sido reevaluado en el FEMA 440 (2005).

#### 2.3.2.6 Método de la demanda deformación inelástica (Miranda, 1999)

Otra forma apropiada de realizar la evaluación estructural es la estimación de la demanda inelástica de la edificación, calculando bien ya sea la deformación horizontal piso a piso, la deriva máxima piso a piso o bien la aceleración máxima horizontal de respuesta de la edificación. De igual manera existe un número importante de estudios que concluyen que la deriva de entrepiso, la razón entre el desplazamiento relativo entre dos niveles contiguos y la altura de entrepiso, como parámetro de la respuesta estructural presenta la mejor correlación con el daño estructural registrado (Bertero et al., 1991; Priestley, 1997; Sözen, 1997). A continuación se presenta la metodología propuesta por Miranda (1999).

A partir de la aceleración espectral es posible determinar la máxima distorsión de entrepiso (demanda inelástica) con la siguiente expresión:

$$\gamma_i = \frac{\beta_1 \beta_1 \beta_1 \beta_1 (\eta N^\rho)^2}{4\pi^2 N h} S_a(T) \quad T = \eta N^\rho \quad (26)$$

$\beta_1$  representa la relación entre el *máximo desplazamiento lateral en la azotea* y el *desplazamiento espectral*  $S_d$  del modelo elástico lineal. Este factor depende del tipo estructural y del número de pisos  $N$  de la estructura. Se calcula a partir de la solución de la ecuación diferencial que describe el comportamiento de un sistema acoplado, compuesto por una viga continua de cortante y otra de flexión, sometido a carga lateral que varía con la altura. El grado de participación de las *deformaciones laterales de corte y de flexión* en el sistema es función de un parámetro  $\alpha$  que depende del sistema estructural, p.e. en un edificio flexible de pórticos de concreto (sin muros estructurales ni arriostramiento) dominan las deformaciones laterales de corte, mientras que en uno con muros de concreto reforzado, las deformaciones de flexión son las predominantes.

$\beta_2$  representa la relación entre la *máxima distorsión de entrepiso* y la *distorsión global de la estructura*, este último se define como el radio entre el máximo desplazamiento lateral en la azotea y la altura total. Tiene en cuenta el hecho que en general las deformaciones laterales durante un sismo intenso no se distribuyen uniformemente con la altura de la edificación y que hay una concentración de deformaciones en algunos niveles.

$\beta_3$  representa la relación entre el *máximo desplazamiento lateral inelástico* y el *máximo desplazamiento elástico*. Este factor depende de la demanda de ductilidad al desplazamiento, el periodo fundamental de vibración  $T$  de la estructura y del tipo de suelo donde se localiza la edificación. Para estructuras sobre suelos blandos,  $\beta_3$  no sólo depende del periodo fundamental de vibración de la estructura sino también del periodo de vibración del suelo.

$\beta_4$  representa la relación entre los factores  $\beta_2$  elástico e inelástico. Este factor tiene en cuenta que la distribución de la carga lateral con la altura es diferente en el modelo elástico y en el inelástico. En el caso de comportamiento inelástico se produce una gran concentración de fuerza. Este factor depende del número de pisos y del nivel de deformación inelástica de la estructura, que se mide en términos de la demanda de ductilidad al desplazamiento.

$h$  es la altura de entrepiso de la estructura;  $\eta$  y  $\rho$  son factores para estimar el periodo fundamental de la estructura a partir del número de pisos,  $N$ :

Estos factores dependen de la ubicación de la estructura, el tipo estructural, el tipo de suelo y el año de construcción. Tienen en cuenta el hecho de que la rigidez lateral de las estructuras localizadas en zonas de alta sismicidad es mayor que el de

estructuras ubicadas en zonas de baja sismicidad. También consideran que las estructuras construidas sobre suelos blandos son más flexibles que las construidas en suelos firmes debido a la flexibilidad de la cimentación.

$Sa(T)$  es la aceleración espectral, que depende del periodo fundamental de vibración, el amortiguamiento de la estructura y la amenaza sísmica en el sitio.

### 2.3.3 Daño de las edificaciones

El daño en las edificaciones ha sido identificado en la literatura como las condiciones de la misma después de la ocurrencia de un evento. En publicaciones como el ATC 13 (ATC, 1985) y EMS98 (Grünthal, 1998) han sido definidos múltiples estados que van con categorías desde *no daño* hasta la *total destrucción* de la edificación pasando por etapas intermedias que intentan medir la magnitud de los daños, y si debe haber o no acciones de reparación de los mismos.

A las categorías que describen los daños se les conoce como *estados de daño*  $D_s$ , donde a cada estado es asignado un nivel de daño dependiendo de una definición acorde con el sistema estructural (*valor de demanda esperada*). Esa demanda es expresada en diferentes medidas de intensidad tales como intensidad macrosísmica.

A través de las diferentes publicaciones, los estados de daño se han ido decantando hasta llegar a los expresados en HAZUS y retomados por RISK-UE. Dichos estados de daño se enumeran como Leve, Moderado, Extensivo y Completo cuyas descripciones pueden asociarse a lo descrito en el EMS98 de la siguiente forma:

**Tabla 2-1 Asociación de estados de daño**

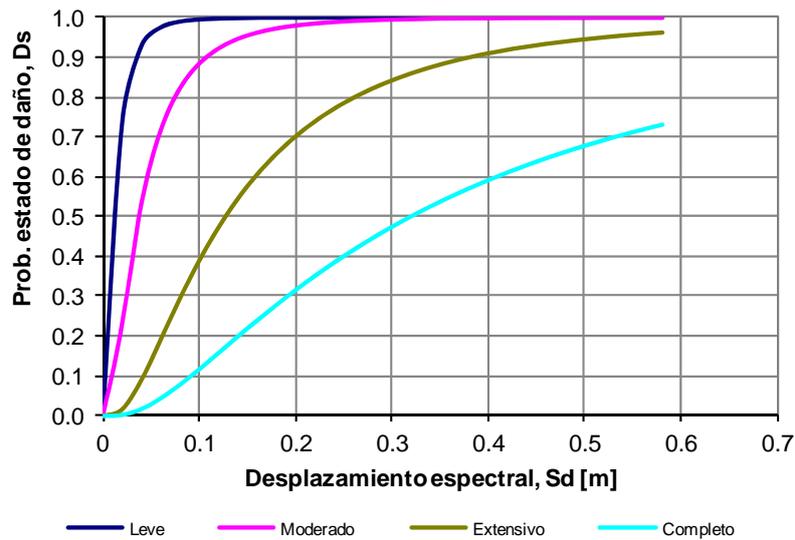
DS	HAZUS	EMS98
D <sub>1</sub>	Leve	Leve
D <sub>2</sub>	Moderado	Moderado
D <sub>3</sub>	Extensivo	Intenso
D <sub>4</sub>	Completo	Muy intenso - Destrucción

Las anteriores descripciones del EMS98 se incluyen en el A2.1 para los dos tipos estructurales.

La representación probabilista del estado de daño  $D_s$  se realiza mediante una función llamada *curva de fragilidad* que se define la distribución de probabilidad condicional de alcanzar o exceder un estado de daño  $D_s$  como sigue:

$$P(\text{daño} \geq D_s | S_{dp}) = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left( \frac{S_{dp}}{S_{ds}} \right) \right] \quad (27)$$

donde  $\Phi$  es la distribución normal estándar,  $S_{ds}$  es el valor esperado de la demanda para alcanzar el estado de daño  $D_s$ ,  $\beta_{ds}$  es la desviación estándar del logaritmo natural de  $S_{ds}$ , y  $S_{dp}$  es el punto de comportamiento de la estructura.



**Figura 2-16 Curvas de fragilidad para diferentes estados de daño  $D_s$**

Existen varias propuestas para la definición de los umbrales de demanda para cada estado de daño. A continuación se presentan algunas propuestas para la evaluación de los umbrales de demanda para cada estado de daño.

**Tabla 2-2 Definición de umbrales para estados de daño**

Estado de daño	Umbrales		
	desplazamiento (A <sub>U</sub> Th)	Desplazamiento espectral	
		UNIGE-CIMNE (Risk-UE)	Lagomarsino & Giovinazzi (2006)
No daño	< 0.7Δy		
D <sub>1</sub>	< 0.7Δy+0.05*Δuy	0.7 S <sub>dy</sub>	0.7S <sub>dy</sub>
D <sub>2</sub>	< 0.7Δy+0.20*Δuy	1.0 S <sub>dy</sub>	1.5 S <sub>dy</sub>
D <sub>3</sub>	< 0.7Δy+0.50*Δuy	S <sub>dy</sub> +D <sub>uy</sub>	0.5(S <sub>dy</sub> +S <sub>du</sub> )
D <sub>4</sub>	< 0.7Δy+1.00*Δuy	S <sub>du</sub>	S <sub>du</sub>
	Δuy = 0.9Δu-0.7Δy	Duy = 0.25*(Du-Dy)	

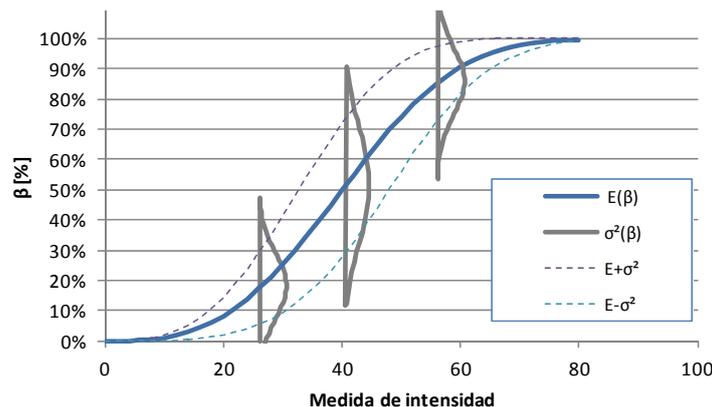
Los valores de desplazamiento espectral pueden expresarse en términos de la deriva de entrepiso de acuerdo a la siguiente expresión:

$$S_{dp} = \delta_i \alpha_2 H \quad (28)$$

donde  $\alpha_2$  corresponde a la porción de la altura del edificio donde se evalúa el desplazamiento en el modelo de capacidad (pushover), y  $H$  a la altura del edificio.

En el Anexo 3 se presenta una metodología para transformar las funciones de probabilidad de daño o de fragilidad a una función de vulnerabilidad.

La función de vulnerabilidad representa la forma como determinado elemento expuesto se comporta ante la amenaza en consideración. La función de vulnerabilidad se presenta en la Figura 2-17 donde la línea continua (línea azul) representa el *valor esperado* del pérdida  $E(\beta/\gamma_i)$ , y las líneas verticales representan la dispersión  $E^2(\beta/\gamma_i)$  para cada valor esperado de pérdida  $\beta$  (línea gris).



**Figura 2-17 Representación de una función de vulnerabilidad**

Las funciones de vulnerabilidad tienen características básicas, como por ejemplo: (i) son ascendentes, pues naturalmente en la razón que la medida de intensidad  $\gamma_i$  aumenta, así lo harán el valor esperado de pérdidas  $E(\beta/\gamma_i)$ , aunque no en el mismo grado, por lo cual frecuentemente la relación entre pérdida  $\beta$  e intensidad  $\gamma_i$  no es una relación constante; (ii) son acotadas, pues naturalmente la pérdida directa no es posible que sea superior al valor expuesto del elemento expuesto.

### 2.3.3.1 Valor esperado del daño

La estimación del valor esperado del daño para cada elemento expuesto  $E(\beta/\gamma_i)$  depende del modelo de comportamiento o evaluación de a los efectos causados sobre los elementos expuestos (edificaciones), como se ha expuesto en los numerales inmediatamente anteriores. Evaluado el comportamiento de la

edificación, es posible estimar el valor esperado desde el daño nulo hasta el daño total, en un rango de 0 a 1 respectivamente, según la siguiente expresión (Navarro, 2005; M. G. Ordaz, 2000):

$$E(\beta|\gamma_i) = 1 - \exp\left[\ln 0.5 \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right)^\varepsilon\right] \quad (29)$$

donde  $\beta$  corresponde al valor de daño,  $\gamma_i$  al valor de intensidad de la amenaza,  $\gamma_0$  intensidad base para un daño equivalente al 50% y  $\varepsilon$  es una constante que define el incremento del daño. Los anteriores parámetros han de ser ajustados de acuerdo al modelo de comportamiento según la amenaza de interés.

### 2.3.3.2 Incertidumbre del daño

En forma complementaria a la estimación del *valor esperado de pérdida*  $E(\beta|\gamma_i)$  como función de la medida de intensidad de la amenaza, se debe evaluar la varianza  $\sigma^2(\beta|\gamma_i)$ . Para tal efecto en el ATC-13 (1985) la densidad de probabilidades de la pérdida se considera de tipo Beta y está dada por la siguiente ecuación:

$$p_{\beta|\gamma_i}(\beta) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \beta^{a-1} (1-\beta)^{b-1} \quad (30)$$

donde  $a$  y  $b$  son parámetros que pueden calcularse a partir de la media y el coeficiente de variación del daño,  $C^2(\beta)$ , de la siguiente manera

$$a = \frac{1 - E(\beta|\gamma_i) - E(\beta|\gamma_i)C^2(\beta)}{C^2(\beta)} \quad b = a \left[ \frac{1 - E(\beta|\gamma_i)}{E(\beta|\gamma_i)} \right] \quad C^2(\beta) = \frac{\sigma_{\beta}^2(\beta|\gamma_i)}{E(\beta|\gamma_i)} \quad (31)$$

La información relevante para estimar la dispersión  $\sigma^2(\beta|\gamma_i)$  es escasa. Aunque los límites de dicha dispersión son nulos vistos como  $\sigma^2(\beta=0|\gamma_i) = 0$ ,  $\sigma^2(\beta=1|\gamma_i) = 0$  en el caso de pérdida nula y máxima respectivamente. Lo anterior corresponde a las condiciones de frontera para la evaluación de la función de distribución de probabilidad de la pérdida.

Para fijar la variación de la dispersión o varianza de la pérdida, se ha utilizado la expresión de la distribución de probabilidad también usada en ATC-13 (1985) cuya varianza es de la siguiente forma:

$$\sigma_{\beta}^2(\beta|\gamma_i) = Q(E(\beta|\gamma_i))^{r-1} (1 - E(\beta|\gamma_i))^{s-1} \quad (32)$$

$$Q = \frac{V_{max}}{D_0^{r-1} (1 - D_0)^{s-1}} \quad s = \frac{r-1}{D_0} - r + 2 \quad (33)$$

$V_{max}$ ,  $D_0$  y  $r$  son parámetros que dependen del tipo estructural.  $V_{max}$  es la varianza máxima,  $D_0$  es la pérdida para la cual ocurre la varianza máxima, y  $r$  ha sido tomado igual a tres.

### **2.3.4 Refuerzo estructural**

El reforzamiento sísmico de estructuras se lleva a cabo para mejorar el comportamiento (p.e. hacerlas más resistentes) a las demandas de fuerza y deformación derivadas de la ocurrencia de eventos sísmicos. Su importancia ha sido reconocida y aceptada generalmente a raíz de experiencias recopiladas en sismos fuertes recientes (So, 2014) y en el aumento y desarrollo del conocimiento alrededor de la ingeniería sísmica (Cardona et al., 2010; Silva et al., 2012; Wald et al., 2008) y estructural. Esta última es la disciplina que principalmente contribuye a la publicación de códigos de diseño sismorresistente, los cuales han surgido desde los años 60 con lo cual muchas de edificaciones previas a la disposición de estos códigos no fueron diseñadas bajo estándares de resistencia y protección sísmica adecuados, razón por la cual la rehabilitación sísmica de edificaciones cobra importancia.

Alrededor del tema se han realizado múltiples trabajos de investigación (FEMA, 1997a, 1997b, 2000b, 2006, 2010) que contienen el estado del conocimiento sobre el comportamiento sísmico y técnicas de reforzamiento, aunque no se limitan exclusivamente al comportamiento estructural sino que se extiende a la reducción de daños en elementos no estructurales, que frecuentemente son más valiosos que la estructura que los alberga. Es de anotar que no existe una estructura completamente invulnerable a la que no le suceda ningún daño por la ocurrencia de sismos, sin embargo un óptimo comportamiento estructural se determina desde el momento del diseño (es el caso de las edificaciones nuevas) y puede ser mejorado por intervenciones posteriores (en el caso de edificaciones antiguas o que no cumplen con los estándares actuales de comportamiento estructural).

#### *2.3.4.1 Estrategias de reforzamiento*

Cuando se hace referencia de reforzamiento de estructuras se debe hacer diferencia en la definición de dos términos comúnmente usados: estrategias de reforzamiento y técnicas de reforzamiento. Estos dos aun cuando se refieren a la rehabilitación de estructuras para mejorar su comportamiento sísmico tratan temas particulares, el primero trata con los objetivos de desempeño (ocupación inmediata, salvaguardar la vida, prevención del colapso) que se esperan obtener tras la implementación del reforzamiento, mientras que el segundo trata de la

forma como se va a alcanzar dicho desempeño (confinamiento, restricciones de movimiento, aislamiento de la base).

Los niveles de desempeño se definen en tres (3) estados (ocupación inmediata, salvaguardar la vida y prevención del colapso, ver Tabla 2-3) (FEMA, 1997b) de acuerdo al nivel de control de daños en la estructura y seguridad de la vida (ver Tabla 2-3), estos niveles de desempeño se derivan de los tres (3) grupos de uso definidos en la requisitos de diseño de edificaciones nuevas , donde a las edificaciones esenciales y de ocupación primordial se les define con mayores niveles de desempeño que edificaciones comunes (FEMA, 1995, 1997c, 2000a, 2003). Históricamente, previo al establecimiento de estos objetivos de desempeño, las rehabilitaciones sísmicas eran realizadas para salvaguardar la vida y la prevención del colapso (seguridad limitada), bajo criterios económicos (criterio siempre vigente), de voluntad política y con base soluciones de ingeniería vigentes.

**Tabla 2-3: Niveles de desempeño (FEMA, 1997)**

	Objetivo	Descripción
Control de daños	<b>Prevención del colapso</b>	La estructura no colapsa y los ocupantes pueden evacuar aunque durante el evento la vida es muy amenazada por el alto daño de los elementos no estructurales. Después del evento sísmico la estructura debe ser demolida y reemplazada.
	<b>Salvaguardar la vida</b>	La estructura permite la evacuación de sus ocupantes después del evento tras sufrir daños importantes, así como los elementos no estructurales. Los daños es necesario repararlos para una ocupación segura.
Seguridad limitada	<b>Ocupación inmediata</b>	La estructura no sufre daños considerables y puede ser ocupada inmediatamente. Los elementos no estructurales sufren daños y algunos sistemas no esenciales pueden fallar. Es el mínimo nivel de desempeño para edificaciones indispensables y de atención a la comunidad (Mora, 2005; Uniandes - CEDERI, 2005b).
	<b>Operacional</b>	Ocurren daños imperceptibles en la estructura. Los elementos no estructurales permanecen operacionales. Mínimas reparaciones son necesarias.

En la ejecución de una estrategia de reforzamiento (objetivos de desempeño, ver Tabla 2-4) se debe definir las características de los eventos sísmicos y daños esperados en términos del *nivel de amenaza* bajo el cual se espera un *nivel de desempeño* de la estructura y sus contenidos. De la selección de uno u otro objetivo se deriva la realización de un balance entre los daños esperados y los costos por la implementación de obras de reforzamiento para controlar los daños, pues la

selección de protección para niveles bajos de amenaza (eventos de baja frecuencia de ocurrencia) no incluirá grandes costos pero si se incurrirá en pérdidas cuantiosas para eventos sísmicos importantes, lo que resulta en un equilibrio entre los costos de las obras y los niveles de pérdida que se puedan soportar los tomadores del riesgo (propietarios, comunidad). En la Tabla 2-4 se presentan diferentes objetivos de desempeño de acuerdo a los niveles de amenaza para los cuales se quiere proteger la edificación y niveles de desempeño esperados de la estructura.

**Tabla 2-4: Objetivos de desempeño. Adaptado de (FEMA, 1997)**

Nivel de amenaza	Probabilidad de excedencia	Tiempo de exposición [años]	Periodo de retorno [años]	Nivel de desempeño					
				Operacional	Ocupación inmediata	Salvaguardar la vida	Prevención del Colapso		
								Rangos de desempeño	
								Control de daños	Seguridad limitada
50%	50	72	(2)	(2)	(4)	(4)			
20%		225	(2)	(2)	(4)	(4)			
10%		475	(2)	(2)	(1)	(4)			
2%		2,475	(3)	(2,3)	(3)	(1)			

#### 2.3.4.2 Técnicas de reforzamiento

Para alcanzar dichos niveles de comportamiento en edificaciones objeto de reforzamiento sísmico es necesario adoptar alguna técnica que permita obtener cambiar los estados de rigidez o deformación de las estructuras de acuerdo al sistema de resistencia sísmica y materiales de construcción de las edificaciones en cuestión. A continuación se describen brevemente algunas de las técnicas de reforzamiento más usadas.

**Postensión externa:** En esta técnica son utilizados cables de acero, de alta resistencia, adosados a la estructura y postensados para dar mayor resistencia de momento a los elementos estructurales que se les instalan. Esta técnica es usada típicamente tanto en la construcción de puentes vehiculares nuevos como principal sistema de resistencia de cargas de servicio y sísmicas, y como técnica de aumento de capacidad de las vigas en el

caso del reforzamiento sísmico. Así mismo se usa en unión viga-columna y comúnmente usada para en el reforzamiento de sistemas sin resistencia de fuerzas laterales (carga por gravedad).

***Aislamiento de la base:*** El aislamiento sísmico de las edificaciones pretende desligar o aislar la estructura de los cimientos, para proteger a esta primera de las acciones del movimiento del terreno (reducir las acciones sísmicas) y mejorar su nivel de desempeño. Esta técnica puede ser usada tanto en edificaciones nuevas como para la rehabilitación sísmica de edificaciones existentes, instalando aisladores sísmicos en el punto de contacto entre la estructura los cimientos, por medio de los cuales se restringe la transmisión de los movimientos del terreno.

***Amortiguamiento:*** Esta técnica busca realizar una disipación controlada de energía por medio de dispositivos denominados amortiguadores que reducen tanto la cantidad de movimiento y aceleración demandada a la estructura en movimientos periódicos inducidos por los eventos sísmicos. Al igual que estos amortiguadores disipadores de energía existen los amortiguadores de masa que buscan romper ciclos de vibración de edificaciones esbeltas en regiones de amenaza sísmica alta o expuestas a eventos sísmicos destructivos, este tipo de dispositivos es también usado para contrarrestar las acciones cíclicas de las ráfagas de vientos fuertes en edificaciones y frecuentemente son controlados por computador en respuesta a las acciones impuestas, estos últimos denominados como sistemas activos.

***Adición de elementos estructurales:*** Esta es la técnica más usada en la rehabilitación de estructuras de baja y mediana altura, y que consiste en conectar elementos existentes de la estructura, p.e. la instalación de riostras, o la adición de nuevos elementos a la estructura, p.e. muros de cortante. (i) en el caso de las edificaciones de mampostería simple o confinada se recomienda la instalación de elementos adosados a los muros y los cimientos que restrinjan el movimiento y desprendimiento de piezas de mampostería en el sentido perpendicular al plano del muro, (ii) en los pórticos de concreto con sistemas de disipación de energía deficientes se recomienda la instalación de: riostras, muros de mampostería reforzada, o muros de concreto; en los vanos de los pórticos para restringir las deformaciones laterales y trasladar las cargas sísmicas a la cimentación.

## 2.4 Evaluación del riesgo

En la literatura relacionada con el análisis del riesgo, se le define como la estimación del potencial o posibilidad de materialización de pérdidas o lesiones que puedan suceder a causa de actividades naturales o antrópicas (actividad humana). Dichas pérdidas, están asociadas a múltiples actores y pueden ser de orden monetario (redes, sistemas de control, edificaciones, obras de infraestructura), o en unidades de exposición (heridos, vidas humanas, hectáreas de cultivo, edificaciones destruidas). El análisis de riesgo se puede entender en términos de frecuencias o probabilidad de ocurrencia de eventos en combinación con las consecuencias causadas por los mismos (Kaplan & Garrick, 1981; Modarres, 2006).

Kaplan & Garrick (1981) definen el análisis del riesgo como un proceso en el cual se contestan tres preguntas: *¿Qué puede pasar? (¿qué puede salir mal?)*; *¿Que tan posible es que esto ocurra?*; y si esto pasa, *¿Cuáles son las consecuencias?*. Las anteriores incógnitas hacen referencia, en su orden a la identificación de los posibles eventos o la tipificación de las fuentes de amenaza, a la estimación de la frecuencia o probabilidad de ocurrencia; y a la medida de las consecuencias o daños esperados.

El análisis del riesgo es la estimación de las posibles consecuencias por la ocurrencia de uno u otro evento destructivo sobre la población, el ambiente y el capital. Esta estimación puede ser realizada idealmente a partir de la información histórica de la ocurrencia de eventos.

La información histórica que contenga datos concernientes a la totalidad de eventos es inexistente, incluso cuando cierta cantidad de información se encuentre disponible, esta hace precisamente referencia al pasado, impidiendo que el análisis de riesgo sea predictivo sobre las consecuencias futuras. Así, la estimación de consecuencias quedara reducida a un análisis histórico de eventos como es el caso de la mayoría de modelos de análisis del riesgo de muchas de las coberturas ofrecidas en la industria aseguradora.

En consecuencia, los análisis de riesgo se deben realizar sobre modelos complejos que intentan representar de la mejor manera posible la realidad, dichos modelos en parte se basan en información histórica no disponible o inexistente, especialmente acerca de eventos poco frecuentes y de altas consecuencias, comúnmente llamados eventos catastróficos.

En Kaplan & Garrick (1981) sugieren que dicha información sea ordenada en una lista evento por evento así:

$$\langle s_i, p_i, x_i \rangle \tag{34}$$

donde  $s_i$  corresponde a la identificación del tipo de escenario,  $p_i$  la probabilidad de ocurrencia del escenario  $s_i$ , y  $x_i$  las consecuencias dada la ocurrencia el escenario  $s_i$ .

La probabilidad de ocurrencia de un evento representa el grado de verosimilitud de que el evento ocurra. Es un asunto subjetivo, y usualmente es calibrado tomando como punto de referencia la frecuencia de ocurrencia estimada a partir de información de eventos históricos (Kaplan & Garrick, 1981; Sugden & Williams, 1978). Por lo anterior, la adquisición de datos e información histórica cobra un valor importante como insumo para el análisis de riesgo, esta actividad es costosa en tiempo y recursos, y no ha de esperarse que los tomadores de decisiones hagan elecciones completamente informados sobre las consecuencias de las opciones disponibles.

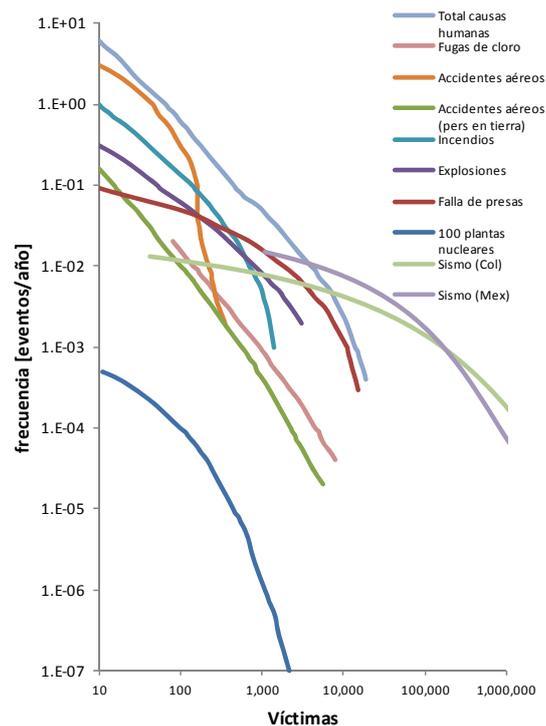
La representación matemática para el cálculo del riesgo más sencilla y ampliamente difundida en la literatura relativa al análisis probabilista del riesgo es como sigue (Ayyub, 2003; Modarres, 1999, 2006):

$$\text{Riesgo} \left( \frac{\text{consecuencias}}{\text{und. tiempo o espacio}} \right) = \text{frecuencia} \left( \frac{\text{escenario}}{\text{und. tiempo o espacio}} \right) \times \text{magnitud} \left( \frac{\text{consecuencias}}{\text{escenario}} \right) \tag{35}$$

y su generalización en el caso de múltiples escenarios:

$$R = \sum_i f_i c_i \tag{36}$$

donde  $f_i$  es la frecuencia del escenario  $i$ , y  $c_i$  son las consecuencias debidas a la ocurrencia del escenario  $i$



**Figura 2-18 Curvas de riesgo para frecuencia anual de víctimas por fuentes antrópicas frente a las causadas por plantas nucleares, resultados estudio Rasmuseen (1975) y víctimas estimadas por sismo para Colombia y México (ERN-AL, 2011), adaptado de Kaplan & Garrick (1981)**

Las anteriores expresiones son consistentes con la definición de riesgo e información de entrada descrita previamente. La expresión (36) es ampliamente conocida en el análisis y cálculo de riesgo y se usa para estimar el valor esperado de pérdidas por unidad de tiempo para un conjunto de eventos posibles. Dado que la expresión anterior estima el valor esperado, no es apropiada cuando se usa como índice de comparación, pues la estimación de riesgo en ese caso se haría sin tener en cuenta la contribución o importancia relativa de cada evento en el resultado de riesgo total.

Un método útil en la representación del riesgo es esquematizar una curva en la que se presente la magnitud de las consecuencias versus la frecuencia acumulada de ocurrencia (tasa de excedencia). Esta forma de representación es conocida como la curva de Framer (1967). La Figura 2-18 presenta una comparación entre *curvas de riesgo* de fatalidad por causa de diferentes amenazas presentada en el estudio de Rasmuseen (1975).

La medida de riesgo puede ser simplificada al valor esperado del daño, o el promedio de la curva de riesgo, ecuación (36), no obstante, un valor no es en gran

medida un indicador completo para representar, comunicar y evaluar el riesgo, “*es la curva misma de riesgo la que mejor lo representa*”(Kaplan & Garrick, 1981). Esta representación incorpora el estado de confianza con el que el analista trata la incertidumbre asociada a las variables (manejo de la falta de información) que intervienen en la evaluación.

Si bien de (36) sabemos que el término  $f_i$  hace referencia a la frecuencia anual de ocurrencia del evento, el término  $c_i$  cobra vital importancia en la evaluación, pues toma en cuenta el comportamiento del sistema frente al evento en consideración.  $c_i$  se interpreta como la posibilidad de materialización de consecuencias (pérdidas) por la ocurrencia de un evento, corresponde así a la estimación del comportamiento del elemento expuesto, que en el análisis probabilista del riesgo se entiende como la probabilidad de falla del elemento o análisis de desempeño.

Por su lado, el análisis de desempeño se refiere a la habilidad o capacidad de realizar una función bajo la demanda impuesta por todos los eventos posibles. Se refiere entonces a la estimación de la razón entre la capacidad, del sistema o elemento expuesto y la demanda. Dado que hay incertidumbres tanto en la capacidad como en la demanda, el tratamiento de dicha incertidumbre se sugiere como sigue (Modarres, 2006):

$$\text{Desempeño} = \Pr(\text{Capacidad} > \text{demanda} | \text{todos los eventos}) \quad (37)$$

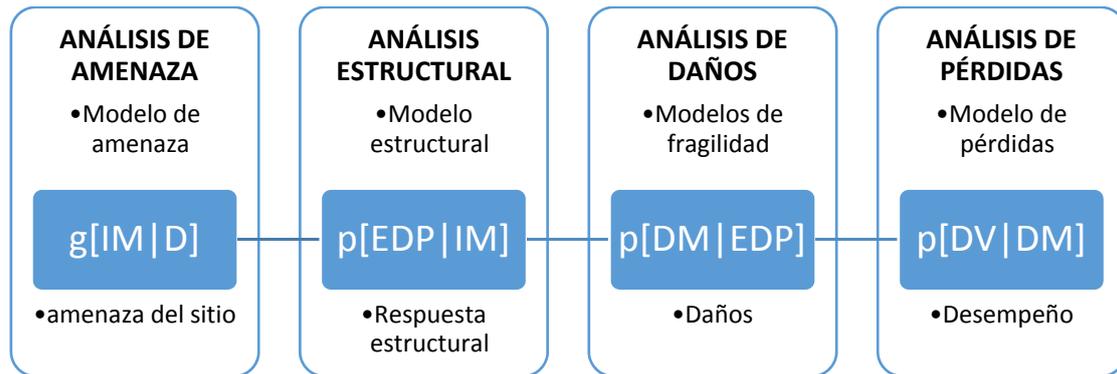
Definida la medida de las consecuencias (evaluación de desempeño) para todos los eventos y la frecuencia anual de ocurrencia de los eventos, se tiene una evaluación de riesgo para el caso generalizado de la forma presentada por la ecuación (36).

La expresión (4) se desarrolla en el marco del diseño por desempeño el cual pretende por medio de un análisis de incertidumbre de los múltiples factores que intervienen en un sistema, determinar la probabilidad de falla u ocurrencia de cierto límite de operación. Inicialmente este tipo de análisis surge en la evaluación de seguridad de la industria de energía nuclear y posteriormente se extendió a otras actividades como la industria espacial e ingeniería civil e infraestructura (Lupoi et al., 2008; Modarres, 2006).

La metodología Performance-based Earthquake Engineering - PBEE en el marco de la toma de decisiones para manejo de riesgo se basa en el análisis de frecuencia de excedencia de una variable de decisión en los términos que interesa al tomador del riesgo; p.e. analizando dos alternativas de diseño o rehabilitación, o dos localizaciones geográficas, o la reposición completa del activo para determinar bajo qué condiciones es satisfactoria la construcción o rehabilitación (niveles de amenaza esperados, dimensiones de elementos y cantidades de obra, costos inicial

de construcción, costos de reparación por futuros sismos, reducción de pérdidas esperadas) (Porter, 2003).

El Pacific Earthquake Engineering Research Center – PEER se desarrolla un enfoque en cuatro etapas: (i) un análisis de amenaza, (ii) de comportamiento estructural, (iii) de estimación de daños y (iv) de evaluación de pérdidas. El enfoque metodológico descrito matemáticamente se expresa en la ecuación (38) mientras que conceptualmente en la Figura 2-19.



**Figura 2-19 Enfoque PEER del PBEE (adaptado de Porter, 2003)**

$$g[DV|D]= \iiint p[DV|DM,D] p[DM|EDP,D] p[EDP|IM,D] g[IM|D] dIM dEDP dDM \quad (38)$$

Las etapas que describen el análisis estructural y de daños frecuentemente se expresan mediante una función denominada como *función de vulnerabilidad* de donde se deriva la siguiente ecuación (Lupoi et al., 2008) y expresiones como (40) y (41) (Navarro, 2005; M. G. Ordaz, 2000) descritas más adelante.

$$\lambda(dv)= \int P(DV>dv|IM)d\lambda(IM) \quad (39)$$

donde  $DV$  es la variable de decisión  $IM$  es la medida de intensidad del evento sísmico.

De la ecuación (39)  $dv$  se destaca corresponde al valor esperado del comportamiento o desempeño de una edificación o activo en términos que interesa al tomador de riesgo (dinero, población afectada, tiempo de interrupción de actividades, etc.) (Porter, 2003).  $P(DV>dv|IM)$ , es la probabilidad de exceder cierto valor  $dv$  dada una intensidad sísmica  $IM$  o *función de vulnerabilidad*, y  $\lambda(IM)$ , como la tasa de excedencia de intensidades  $IM$ , o *curva de amenaza*.

El riesgo se obtiene por la convolución<sup>9</sup> de la vulnerabilidad y la amenaza como variables aleatorias. La primera se evalúa como el comportamiento de una estructura frente a la intensidad de una amenaza, que a su vez se trata como la intensidad esperada dada la frecuencia de ocurrencia de un evento amenazante.

#### **2.4.1 Metodologías regionales de análisis de riesgo**

En las últimas décadas han surgido metodologías/sistemas para la estimación de pérdidas y manejo de riesgo por eventos sísmicos. Todas se han desarrollado de acuerdo con objetivos particulares destacándose entre estos la i) estimación rápida de pérdidas y de evaluaciones en tiempo real para alertas tempranas dirigidas a labores de rescate y manejo de la emergencia realizando cálculos sobre un único escenario (análisis determinista), y ii) la estimación de pérdidas potenciales tomando en cuenta la incertidumbre (análisis probabilista) en la estimación asociada a la información de entrada (incertidumbre aleatoria) y la incertidumbre de implementar una u otra metodología en la evaluación (incertidumbre epistémica), p.e. estimación de la demanda sísmica y comportamiento estructural.

Entre el primer grupo se encuentran sistemas como el PAGER (Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response), QLARM (Earthquake Loss Assessment for Response and Mitigation) (Trendafiloski et al., 2011) y ELER (Earthquake Loss Estimation Routine) (Hancilar et al., 2010) , que al igual que las del segundo tipo hacen uso de metodologías científicamente reconocidas para la estimación tanto del nivel de demanda sísmica, como de la estimación del comportamiento estructural de las edificaciones. Como ya se ha mencionado, desde 1997 en la Federal Emergency Management Agency (FEMA) se ha desarrollado el sistema Hazards-United States (HAZUS) de referencia en la comunidad científica para la estimación de pérdidas por sismo, proponiendo metodologías estándar en cada uno de los pasos de la evaluación, en las últimas versiones el sistema se ha ampliado a amenazas hidrometeorológicas (FEMA, 2004). Cada uno de los anteriores sistemas se especializa particularmente en el desarrollo de alguno de los pasos para la estimación de pérdidas.

En el caso del USGS National Earthquake Information Center (NEIC) se enfoca en monitoreo de la ocurrencia de eventos sísmicos, principalmente en la localización del epicentro y propiedades del evento; p.e. magnitud, profundidad, para la estimación de la distribución espacial de intensidades sísmicas en tiempo real, este producto es objeto de difusión a agencias y gobiernos locales para la atención de

---

<sup>9</sup> Procedimiento para hallar la distribución de probabilidad de la operación entre dos o más variables aleatorias.

emergencias. Como parte del proceso y para mejorar la información de difusión, se crea el PAGER (Wald et al., 2008) como el sistema para cuantificar el impacto de eventos sísmicos, ampliando el detalle de la información entregada a una cuantificación de la población afectada, el tipo de edificios ubicados en la región del evento, y una estimación rápida del número de personas afectadas para las intensidades sísmicas por NEIC. Para realizar dichas estimaciones del impacto sobre la población de una forma más detallada, en PAGER se tuvo que desarrollar o implementar metodologías; p.e para estimar el comportamiento de los edificios ante la demanda sísmica y bases de datos de exposición; p.e. la distribución de población y de edificaciones por tipo estructural, enfocadas en primera instancia al territorio de Estados Unidos.

Por su parte QLARM, desarrollado en el World Agency of Planetary Monitoring and Earthquake Risk Reduction (WAPMERR) (Trendafiloski et al., 2009), realiza la estimación de la demanda sísmica de manera similar al NEIC, por medio de leyes de atenuación particulares a la zona de estudio a partir de la magnitud, profundidad y localización del epicentro del evento, e información disponible de los efectos de sitio. Específicamente QLARM enfoca sus esfuerzos en la implementación de información de la distribución de población por tipo de vulnerabilidad estructural, en una base de datos de cobertura global a un nivel de resolución sub-nacional por asentamiento urbano y rural. La distribución por tipo de vulnerabilidad se desarrolla en base a la Escala Europea Macrosísmica (EMS-98) (Grünthal, 1998) con la particularidad de desagregar la información respecto del tamaños del asentamiento y de la región en la que se encuentra. Para la base de datos de distribución de tipos de vulnerabilidad incorporada en QLARM, se toman como principales fuentes de información la de censos nacionales de vivienda disponible libremente, el World Housing Encyclopedia (WHE) y la base de datos del su sistema predecesor QUAKELOSS desarrollado por Extreme situations Research Centre en Moscú (Erdik et al., 2010). El QLARM realiza la estimación del impacto sobre la población en base censos nacionales de población, disponibles libremente, y las tasas de fatalidad del HAZUS para los tipos de vulnerabilidad EMS-98 ajustadas con información observada para la región de análisis si esta existe.

HAZUS se desarrolló como los demás sistemas, para la estimación de pérdidas, para definición de planes y respuesta a emergencias y para la asistencia en la mitigación y reducción de pérdidas futuras a causa de eventos sísmicos (Whitman et al., 1997). Este programa se enfoca en la conformación de bases de datos de infraestructura, edificaciones comunes y edificaciones esenciales dentro del territorio de Estados Unidos. HAZUS desde el inicio de su desarrollo, a diferencia de los sistemas anteriores a este, realiza la estimación cuantitativa del daño en

términos de la respuesta espectral y el movimiento máximo del suelo (PGA, PGV) más allá de usar la Modified Mercalli Intensity, por lo que enfoca también esfuerzos en el estudio de Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) para el territorio de Estados Unidos.

De parte de los sistemas open source se encuentra el SELENA desarrollado por NORSAR (Molina et al., 2010) que implementa en su totalidad las metodologías desarrolladas dentro de HAZUS pero en lenguaje de MATLAB a diferencia de HAZUS desarrollado como un toolbox de ArcGis /ESRI, desligando así la estimación de riesgo del sistema de información geográfica licenciados. Este sistema se enfoca en la inclusión de una metodología para el tratamiento adecuado de la incertidumbre por medio de la implementación de árboles lógicos (logic tree) para la ponderación de los parámetros de entrada. De las experiencias recopiladas en este sistema, en el KOERLOSS desarrollado por la Universidad Boğaziçi, y otros participantes, surge el sistema ELER (Hancilar et al., 2010) que implementa el estado del arte de múltiples metodologías para la estimación del comportamiento de edificios, utiliza curvas fragilidad para la evaluación de daño físico, y conformando una base de datos tanto de modelos de comportamiento de edificaciones como de curvas de fragilidad para la estimación de daños, la estimación de muertes se realiza a partir de la metodología también implementada en HAZUS. El análisis de riesgo se realiza dependiendo el nivel de resolución de la información de entrada disponible, pero sin incorporar bases de datos de activos expuestos.

#### *2.4.1.1 Norteamérica*

Se ha mencionado anteriormente que para el año 1997 con el apoyo del Instituto Nacional de Ciencias de la Construcción (NIBS), la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) divulgó una metodología para la evaluación de riesgo enfocada en Norteamérica (HAZUS97 luego HAZUS99) que en primera instancia se ocupó por la amenaza sísmica y luego para el año 2004 añadió las amenazas de viento e inundación (HAZUS-MH).

La metodología HAZUS está enfocada en proveer información para la mitigación, planes de atención y políticas para la respuesta y reconstrucción ante cualquier evento sísmico, de viento o inundación; mediante la estimación de las pérdidas potenciales que puedan suceder en edificios e infraestructura. Esta metodología no solo está dirigida a la estimación de pérdidas físicas directas; sino también a las pérdidas económicas por interrupción de actividades, reparación y reconstrucción, y el impacto social; como la necesidad de albergues, población afectada y familias desplazadas.

La evaluación de riesgo sísmico se puede realizar tanto desde la perspectiva probabilista como determinista. Para esta última es posible seleccionar un evento específico desde una base de datos de fuentes sísmicas incorporada al sistema; seleccionar un evento sísmico histórico; o hacer una selección arbitraria de la localización y magnitud del evento. La metodología incluye mapas de amenaza probabilista, para la evaluación de riesgo desde dicha perspectiva, con 3 ordenadas espectrales (PGA, 0.3 y 1.0 segundos) y para 8 periodos de retorno (desde 100 hasta 2500 años). A partir de esta información se construyen espectros de respuesta elásticos ( $S_a$ - $S_d$ ) que serán modificados posteriormente según el tipo de edificación a evaluar.

La amplificación debida a las condiciones de sitio se realiza de acuerdo con el documento 1997 NEHRP Provisions donde se definen varios tipos de suelo (5 tipos, del A al E) con perfiles geológicos característicos y factores de amplificación, este esquema está basado en la velocidad media de onda de corte para los primeros 30 metros del perfil geológico del sitio.

El daño sobre los edificios es evaluado a través de 5 estados de daño (Ninguno, Leve, Moderado, Extensivo y Colapso), estos estados de daño son representados mediante curvas de fragilidad que ejemplifican la probabilidad acumulada de alcanzar o exceder cierto estado de daño a causa de la demanda sísmica sobre la edificación. La demanda sísmica se estima por la evaluación del punto de desempeño con base en la curva de capacidad (pushover) de la edificación y el espectro de respuesta modificado.

Las curvas de fragilidad para los diferentes estados de daño y la curva de capacidad son estimadas para cada uno de los 36 tipos estructurales incluidos en el modelo, estas fueron estimadas a partir de ensayos, información de eventos sísmicos pasados y de la opinión de expertos. En la estimación de la variabilidad se toman en cuenta la incertidumbre en el umbral del estado de daño, la incertidumbre en las propiedades del modelo típico del edificio, y la incertidumbre espacial de la amenaza.

#### *2.4.1.2 Europa*

Entre el año 2001 y 2004 el proyecto europeo RISK-UE desarrolló una metodología modular de evaluación de riesgo por posibles eventos sísmicos en zonas urbanas; aplicada a 7 ciudades. La evaluación de riesgo tiene en cuenta la estimación de la amenaza sísmica y un inventario de las tipologías de los elementos expuestos. El objeto del proyecto es alertar y proveer de información apropiada a los centros de emergencia y de gobierno para la implementación de planes de emergencia y de mitigación de riesgo.

La modularidad desarrollada en el proyecto RISK-UE es similar a la desarrollada en la metodología HAZUS, donde en primera instancia a partir de información recopilada de elementos expuestos y clasificación del tipo de ocupación, se agrupan los diferentes tipos estructurales en tipologías con similares características de comportamiento ante eventos sísmicos. Las tipologías identificadas son 23 entre mamposterías reforzadas y no reforzadas, pórticos de concreto, y pórticos de acero, todas en 3 diferentes configuraciones de altura y niveles de diseño (códigos sísmicos de diseño).

En cuanto a la zonificación sísmica la metodología se propone en dos vías, con base en la información disponible para el área urbana de estudio. Se destaca una *zonificación geotécnica* donde a partir de información recopilada de múltiples fuentes (privadas o públicas) se obtienen los resultados de investigaciones geotécnicas o ensayos de laboratorio de sondeos que hayan alcanzado una profundidad suficiente (profundidad de roca,  $V_s > 800\text{m/s}$ ). A partir de esta información se definen unidades geotécnicas (condiciones similares de comportamiento dinámico) y se clasifican los tipos de suelo de acuerdo a las clases del Eurocódigo 8. De no contar con los estudios y datos descritos anteriormente se debería optar por una *zonificación geológica*, en donde a partir de mapas y parámetros geológicos, o mediante algunas medidas de respuesta dinámica y correlaciones, sea posible la aproximación a unidades geotécnicas.

La evaluación de amenaza sísmica se propone de igual manera en dos vías: la primera por la estimación de la severidad del movimiento del terreno, a través de diferentes leyes de atenuación, (evaluación deterministas) por un evento de magnitud específica asociado a una fuente caracterizada y con efectos de amplificación del suelo igualmente conocidos (zonificación geotécnica), o por estimación de intensidades macrosísmicas locales generadas con información de eventos históricos consistentes para la zona de estudio (zonificación geotécnica). La segunda vía de evaluación de amenaza sísmica es por la estimación del movimiento del terreno que pueda ocurrir durante un tiempo de exposición con cierta probabilidad de ser excedido (evaluación probabilista, o amenaza uniforme); p.e. la intensidad esperada de movimiento sísmico para en un tiempo de exposición de 50 años con el 10% de probabilidad de ser excedida, corresponde a la intensidad esperada con un periodo de retorno de 475 años.

Para la evaluación de la amenaza uniforme el proyecto RISK-UE adopta la herramienta de computo CRISIS99 que realiza la estimación de amenaza sísmica (concretamente la tasa anual de excedencia de la intensidad seleccionada) sobre un modelo probabilista; tomando en cuenta el proceso de los tiempos de

ocurrencia; y la distribución espacial de eventos, a partir de la información histórica (catálogo sísmico) y la caracterización de fuentes sísmicas.

La evaluación de vulnerabilidad se plantea de igual forma en dos vías: la primera por el desarrollo de matrices de probabilidad de daño - DPM (por sus siglas en inglés), desarrolladas a partir de DPM del EMS-98 (probabilidad de estados de daño) y de funciones de vulnerabilidad semi-empíricas (valor medio de daño para cierta intensidad macrosísmica), por otro lado, la segunda vía tiene el mismo enfoque metodológico adoptado en HAZUS, en donde a partir de modelos de capacidad (punto de comportamiento) y curvas de fragilidad (probabilidad de estados de daño) es cuantificado el grado de daño sobre las diferentes tipologías por la acción del movimiento del terreno.

#### 2.4.1.3 América Latina

En el año 2006, con el apoyo de organismos multilaterales se puso en marcha una iniciativa de enfoque integral para el análisis probabilista de riesgo por amenaza naturales (O. D. Cardona et al., 2008; ERN-AL, 2006b). Esta iniciativa, además de múltiples herramientas para el manejo de información y cálculo de riesgo, incluye el desarrollo de una metodología para un análisis probabilista del riesgo que sigue los lineamientos descritos anteriormente.



**Figura 2-20: Esquema de actividades principales para el análisis del riesgo de la iniciativa CAPRA.**

La metodología incorpora entre otras actividades, el análisis estadístico de eventos históricos de amenazas naturales para la evaluación del conjunto de todos los eventos posibles, el comportamiento de los elementos expuestos ante las amenazas indicadas, y un proceso sistemático orientado al manejo de la incertidumbre en las variables que intervienen en el análisis probabilista del riesgo. La metodología propuesta para el análisis probabilista del riesgo dentro de esta iniciativa tiene como principal resultado la *curva de riesgo* o *curva de excedencia de pérdidas* descrita anteriormente. La curva relaciona diferentes niveles de pérdida económica, y la frecuencia anual de excedencia de dicho valor esperado de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también

como *tasa de excedencia de pérdidas*, y se calcula mediante la siguiente ecuación, derivada del teorema de la probabilidad total (Navarro, 2005; M. G. Ordaz, 2000):

$$v(p) = \sum_{i=1}^{\text{Eventos}} Pr(P > p | \text{Evento}_i) F_A(\text{Evento}_i) \quad (40)$$

Donde  $v(p)$  es la tasa de excedencia de la pérdida  $p$ ,  $Pr(P > p | \text{Evento}_i)$  es probabilidad que la pérdida exceda un valor  $p$  dado que ocurrió el evento  $i$ , y  $F_A(\text{Evento}_i)$  es la frecuencia anual de ocurrencia del evento  $i$ .

Como se observa en (40), y como se comentó anteriormente en el cálculo y representación de riesgo, la pérdida que se pueda presentar en un grupo de bienes expuestos por la ocurrencia de un evento, es una cantidad incierta y debe ser tratada como variable aleatoria (Navarro, 2005; M. G. Ordaz, 2000).

$$Pr(P > p | \text{Evento}_i) = \int_1 Pr(P > p | I) f(I | \text{Evento}_i) dI \quad (41)$$

Donde  $Pr(P > p | I)$  es probabilidad que la pérdida exceda un valor  $p$  dado que la intensidad fue  $I$ , y  $f(I | \text{Evento}_i)$  es la densidad de probabilidad de la intensidad

Para el análisis probabilista del riesgo se ha desarrollado un estándar para el almacenamiento de la información referente a todos los posibles eventos de amenaza de acuerdo con lo expuesto en (34). Esta colección de eventos se considerada en la metodología bajo dos axiomas; es el conjunto que representa la totalidad de eventos posibles (eventos exhaustivos); y la ocurrencia de uno u otro no sucede simultáneamente (eventos mutuamente excluyentes).

## 2.5 Relación probabilista de beneficio costo

Un análisis beneficio-costo se desarrolla comparando el estado actual; la alternativa de no hacer nada para mitigar el riesgo (riesgo inherente o estimación de pérdidas en el estado actual), y el estado una vez implementadas las medidas de mitigación del riesgo (riesgo mitigado, estimación de pérdidas en el estado mitigado). Del mismo modo es posible desarrollar un análisis beneficio-costo de múltiples alternativas de mitigación comparando unas frente a las otras para identificar la mejor o la óptima.

Cada medida de mitigación puede tener un impacto simultáneo sobre diferentes actores, tales como propietarios particulares u organizaciones privadas o públicas. Por tanto, es necesario realizar estimaciones pertinentes a cada una de las partes (enfoque de evaluación múltiple), identificando quiénes son los beneficiarios, y quiénes pagaran o se harán cargo de los costos relacionados de la aplicación o

adopción de cada una de las medidas de mitigación del riesgo (Campbell & Brown, 2005; Kunreuther et al., 2001; Smyth, Altay, Deodatis, Erdik, Franco, Gülkan, et al., 2004).

Inicialmente en la evaluación de la relación beneficio-costo – B/C, la estimación de los beneficios corresponde a la reducción de daños derivados de la implementación de unas u otras medidas de mitigación del riesgo. La traducción de los daños estimados en pérdidas monetarias, sugiere un proceso cuidadoso de valoración que depende directamente del actor para el cual se estén cuantificando los resultados o desarrollando los análisis, pues la valoración de dichos beneficios son el resultado de un ejercicio fundamentalmente de tipo financiero para dicho actor.

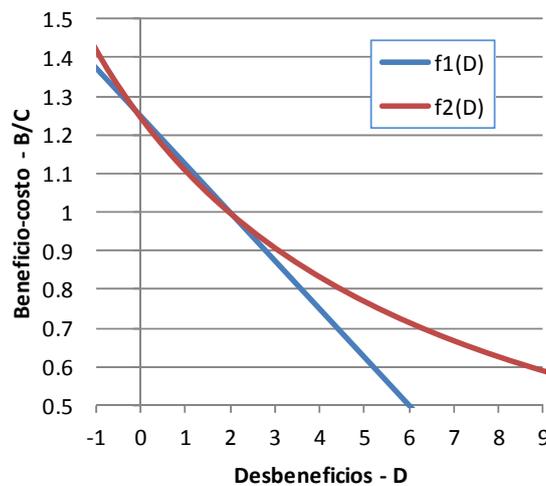
Ahora bien, de igual manera a como se evalúa la reducción de daño, es importante señalar que ante la ocurrencia de un evento, las consecuencias van más allá de las pérdidas económicas directas ocasionadas sobre los activos, por lo tanto también pueden evaluarse otros efectos favorables, debido que pueden además presentarse consecuencias asociadas a la interrupción de actividades sociales por la interrupción, por ejemplo, de servicios o de la producción (Kleindorfer & Kunreuther, 1999).

En cuanto a los costos, la implementación de unas medidas de mitigación del riesgo frecuentemente está cubierta o pagada por los propietarios, como es el caso de edificaciones de vivienda o naves industriales y, en el caso de sistemas de servicio público o de atención a la comunidad, aunque los costos pueden estar bajo el control de entidades agencias públicas o particulares, dichos costos son usualmente trasladados a los usuarios finales a través de alguna contraprestación por el servicio o a través de impuestos (Kunreuther et al., 2001).

Blank (1991) expone que en el análisis beneficio-costo para una cierta alternativa, aquí referida como medidas de mitigación del riesgo, es importante tener en cuenta que los beneficios y costos incluidos en el cálculo corresponden a incrementos o diferencias entre dos alternativas, y siempre será de esta manera pues no hacer nada, es una alternativa y puede ser aceptable (p.e. costos muy elevados frente a los beneficios percibidos). De igual manera para el caso de alternativas mutuamente excluyentes (alternativas independientes, lo que sucede frecuentemente) es necesario comparar una frente a las otras. Mientras que en la situación en donde alternativas no son excluyentes, habría que compararlas exclusivamente contra la alternativa de no hacer nada (estado actual).

Para ejemplarizar de mejor manera el anterior postulado se plantean los siguientes casos: (i) una edificación que requiere ser demolida o construir una nueva que continúe prestando los servicios de la actual. Aquí, el análisis se desarrolla sobre la alternativa en beneficio de construir una edificación con características de desempeño  $D_1$  o  $D_2$  (alternativas excluyentes por ser estructuras diferentes), respecto de los costos de construcción respectivos y comparando una frente a la otra. (ii) Ahora, por otro lado si la misma edificación fuera sujeto de reforzamiento, la comparación se realizaría como la estructura en el estado actual frente a la estructura en el estado reforzado (alternativas dependientes de la estructura actual).

Blank (1991) indica también la necesidad, según sea la alternativa a evaluar, de “emitir juicios que están sujetos a interpretaciones particulares”, justamente para clasificar montos como des-beneficios o costos asignando en lo posible valores monetarios. Como consecuencia de lo anterior, la magnitud de la relación beneficio-costo,  $B/C$ , podría cambiar, de acuerdo a la expresión planteada para su evaluación, pero no la decisión de aceptar o rechazar una u otra alternativa, ver Figura 2-21.



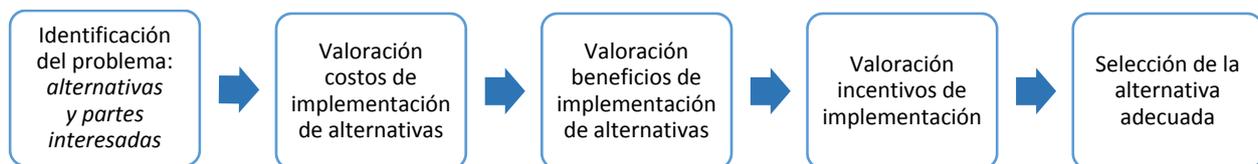
**Figura 2-21 Comparación entre expresiones de cálculo,  $f_1(D)$  y  $f_2(D)$  de la relación  $B/C$**

$$B/C = f_1(D) = \frac{\text{Beneficios-Desbeneficios}}{\text{Costos}} \quad (42)$$

$$B/C = f_2(D) = \frac{\text{Beneficios}}{\text{Costos+Desbeneficios}} \quad (43)$$

### 2.5.1 Evaluación beneficio-costo para gestión de riesgo

Se propone en Kunreuther et al. (2001) y en Smyth et al. (2004) un desarrollo sistemático, basado en un proceso simplificado de cinco pasos para la evaluación de la relación B/C comparativa entre medidas de mitigación del riesgo (ver Figura 2-22).



**Figura 2-22 Proceso simplificado para la evaluación de la relación B/C comparativa entre alternativas. Adaptado de (Kunreuther et al., 2001; Smyth, Altay, Deodatis, Erdik, Franco, Gülkan, et al., 2004)**

El primer paso del proceso sugiere la identificación del problema: se refiere a la revisión de alternativas abiertas a las diferentes partes interesadas, que como se comentó anteriormente, una de esas alternativas es la de no hacer nada (o dejar las cosas en el estado actual), la cual establecerá un punto de referencia para el análisis de múltiples alternativas (una discusión sobre la tendencia a mantener el estado actual se expondrá en el siguiente numeral). De igual forma en la identificación del problema es importante establecer quién es el interesado (habitantes, propietarios, gobierno) y a cuenta de quien se deben sumar los beneficios y costos asociados a las diferentes alternativas.

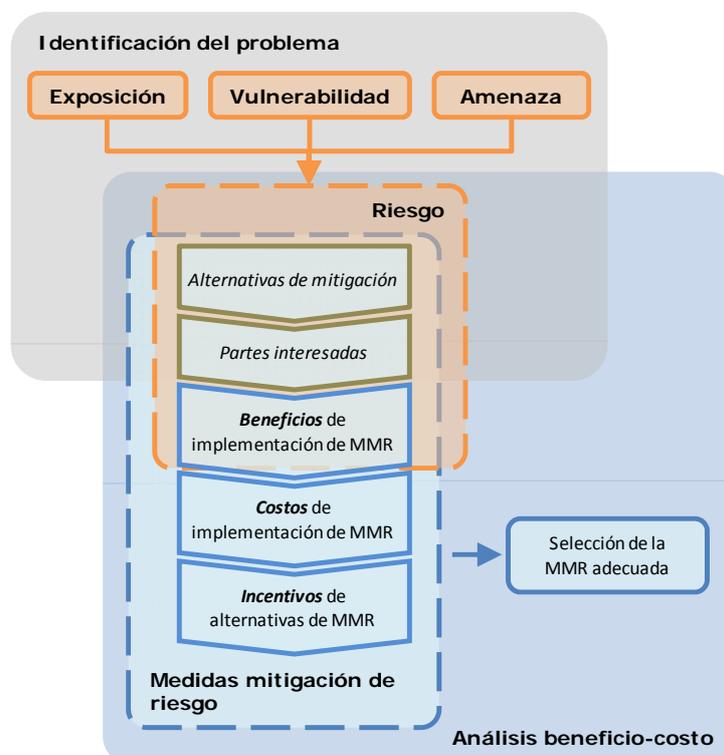
El segundo paso sugiere la valoración de los costos asociados a la implementación de cada una de las alternativas. Este paso se realiza sobre la plena identificación de los actores o partes interesadas en la implementación de cada una, sabiendo quiénes cargarán con los costos, de forma directa o indirecta por la implementación de las alternativas. La asignación de estas partidas se hará de acuerdo a la percepción de la eficiencia de las alternativas en la reducción del riesgo por parte de los interesados y voluntad de los mismos por financiar los gastos de implementación.

El tercer paso sugiere la valoración de los beneficios asociados a la implementación de cada una de las alternativas. Esta valoración se realiza por la comparación entre las alternativas y el estado actual, lo que se traduce en la reducción de pérdidas esperadas por la implementación de una u otra alternativa. En la publicación de la referencia se realiza una evaluación exclusiva de los beneficios directos o reducción de pérdidas directas, haciendo énfasis en la necesidad de extender este análisis a la estimación de beneficios indirectos.

El cuarto paso sugiere la valoración de los incentivos para la implementación de cada una de las alternativas. Esta valoración se realiza calculando el valor presente neto, VPN, de los beneficios (reducción de pérdidas) durante el periodo de exposición y comparándolos con el costo de la implementación de la alternativa. Ahora, si el valor presente neto es mayor a cero,  $VPN > 0$ , la alternativa será adecuada (efectiva) para la reducción de riesgo, pero sólo al calcular la relación B/C se podrá estimar si es económicamente atractiva.

El quinto paso sugiere la selección de la alternativa adecuada identificando la que se tiene la mayor relación B/C al realizar el gasto en la implementación de la alternativa en términos económicos. Esto sin dejar de tener en cuenta que existen límites de disponibilidad para las partes interesadas y la necesidad de consecución de recursos, lo cual también puede implicar costos.

Alineado con este proceso general se han desarrollado estudios previos (Mora et al., 2014; Mora, Ordaz, Yamin, & Cardona, 2011; Mora & Valcárcel, 2011; M. G. Ordaz, 2008; Valcárcel et al., 2013; Yamin, Ghesquiere, Cardona, & Ordaz, 2013) que siguen el esquema que se ilustra en la Figura 2-23 para la evaluación de alternativas de medidas de mitigación del riesgo en el marco del análisis probabilista del riesgo



**Figura 2-23 Esquema de evaluación de alternativas de mitigación del riesgo enfocado en la estimación de beneficios y costos asociados a la implementación**

### **2.5.2 Toma de decisiones/Evaluación de proyectos de inversión**

En la ejecución de cualquier medida de mitigación del riesgo es de gran interés conocer: los beneficios a lo largo de la vida útil (tiempo de exposición, o periodo de tiempo) del activo de involucrado; si los beneficios son mayores que la inversión inicial para la implementación y otros costos de dicha inversión.

Todas las partes interesadas o bajo la influencia de las medidas de mitigación del riesgo, deben ver su implementación favorablemente. El propietario debe ver las medidas como una inversión para incrementar el valor de la residencia o de su negocio; el promotor sabrá que hay un valor agregado al vender una propiedad mejor diseñada y adaptada para soportar eventos, incluso sabiendo que el precio de mercado sería mayor frente a propiedades menos seguras; el asegurador sabrá que las reclamaciones serán inferiores; la administración pública se beneficiará por la necesidad de menor cuantía de fondos para la atención y reconstrucción por la ocurrencia de eventos futuros (Kleindorfer & Kunreuther, 1999).

El comportamiento individual en la realidad refleja que la inversión en mitigación del riesgo no es observada como un incremento en el valor de las propiedades. Esto ocurre por la falta de experiencia individual en la materialización de pérdidas, y por lo tanto usualmente no se perciben los beneficios de la mitigación (percepción del riesgo), aparte que existen limitaciones de recursos de inversión que no favorecen la implementación (Kleindorfer & Kunreuther, 1999).

Con base en lo anterior es común o es generalmente aceptada la decisión de no hacer nada (Camerer & Kunreuther, 1989) más allá de investigar sobre el estado actual de riesgo, pues la implementación de medidas de mitigación del riesgo sugiere de acciones como: asignación de presupuestos, contratación, debate y política pública, y la confrontación de intereses públicos y privados, que a la larga son procesos que consumen mucho tiempo y muy difíciles de resolver por la cantidad de personas involucradas.

A la decisión de no hacer nada, se suma la incertidumbre sobre la cuantía de beneficios y costos en la implementación de medidas de mitigación del riesgo. Es sabido que las personas no toman acciones por la inexperiencia en problemas similares y particularmente cuando se trata de eventos de baja probabilidad de ocurrencia, evadiendo la responsabilidad por la toma de malas decisiones. De igual manera un administrador público tendrá menos responsabilidad al no hacer nada, porque desde la perspectiva del costo de oportunidad perdido, realizar una acción determinada, pesa menos que los errores de tomar una mala decisión (Camerer & Kunreuther, 1989)

### 3 ENFOQUE ANALÍTICO PROPUESTO

#### 3.1 Evaluación probabilista del beneficio-costo

En Ordaz (2008) se realiza un desarrollo analítico para la estimación de la distribución de probabilidad del valor presente neto - VPN, denominado en adelante como  $L$ , de las pérdidas futuras,  $\beta_i$ , por eventos sísmicos. La evaluación del  $L(\beta_i)$  se realiza sobre con base en la expresión ampliamente conocida en la literatura relacionada para calcular el costo del dinero en el tiempo como se describe a continuación:

$$L = \sum_i^{\infty} \beta_i e^{-\gamma t_i} \quad (44)$$

Donde  $\beta_i$  es la pérdida  $i$ ,  $\gamma$  es la tasa de descuento o valor del dinero en el tiempo,  $t_i$  es el tiempo en el que ocurre la pérdida  $i$ , y  $L$  es el valor presente neto de pérdidas futuras  $\beta_i$ .

Dado que la serie exacta de ocurrencia de eventos sísmicos es desconocida (y por consiguiente la serie de pérdidas, en razón de los tiempos de ocurrencia y sus intensidades),  $L$  es analizada como una variable aleatoria. Su función de densidad de probabilidad,  $pdf(L)$ , es representada en función de los dos primeros momentos estadísticos, considerando la ocurrencia aleatoria de eventos sísmicos. Las ecuaciones (45) y (46), corresponden respectivamente al valor esperado,  $E(L)$ , y la varianza,  $VAR(L)$ . De igual manera los momentos estadísticos de  $L$  se expresan en términos de los momentos estadísticos de la pérdida anual,  $B_A$ , que es el resultado más frecuente del análisis probabilista del riesgo.

$$E(L) = E(\beta_A) / \gamma \quad (45)$$

$$VAR(L) = VAR(\beta_A) / 2\gamma \quad (46)$$

Donde  $E(\beta_A)$  es el valor esperado la pérdida anual,  $\beta_A$ , o suma de todas las pérdidas acumuladas durante un año, obtenido del análisis probabilista del riesgo, y  $\gamma$  es el costo del dinero en el tiempo o tasa de descuento.

Ordaz (2008) determinó también que la distribución de probabilidad de  $L$  es aproximadamente una distribución Gamma con parámetros  $r$  y  $\lambda$  calculados como sigue:

$$r = \frac{E^2(L)}{VAR(L)} \quad (47)$$

$$\lambda = r/E(L) \quad (48)$$

En Mora (2008) la relación  $B/C$ , denominada en adelante como  $Q$ , se define como la relación entre el ahorro en pérdidas por la implementación de medidas de mitigación del riesgo, como la rehabilitación sísmica de edificaciones, y el costo inicial de implementación. La relación  $Q$  se plantea como sigue:

$$Q = \frac{L_U - L_R}{C} \quad (49)$$

donde  $L_U$  es el valor presente de pérdidas futuras en el estado sin implementación de una medida de mitigación,  $L_R$  es el valor presente de pérdidas futuras en el estado con la implementación de la medida de mitigación y  $C$  es el costo o valor de inversión por la implementación.

Conocida la  $pdf(L)$  expuesta en Ordaz (2008) por medio de las ecuaciones (47) y (48) es posible evaluar tanto la distribución de probabilidad del valor presente de las pérdidas futuras para la alternativa de no hacer nada,  $pdf(L_U)$ , y para la implementación de las medidas de mitigación del riesgo,  $pdf(L_R)$ . Con lo anterior, es posible evaluar la probabilidad de obtener una relación positiva,  $Q > 1$ , por causa la reducción de pérdidas,  $L_U - L_R$ , (ahorro de pérdidas o beneficio) respecto del costo de implementación de medidas de mitigación del riesgo,  $C$ , como se indica la ecuación (50), en cuyo caso es necesario evaluar la probabilidad conjunta de las variables aleatorias  $L_U$  y  $L_R$ , ecuación (56) que se presenta más adelante (Mora, 2008):

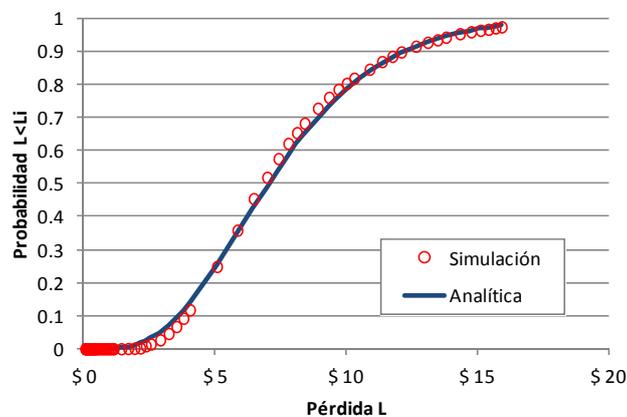
$$\Pr(Q > 1) = \Pr(L_U - L_R > C) \quad (50)$$

$$\Pr(L_U - L_R > C) = \int_0^{\infty} \int_{C+y}^{\infty} p_R(x) p_U(y) dx dy \quad (51)$$

### 3.2 Evaluación de medidas de mitigación y priorización de recursos

En Mora (2008) se realiza una validación del modelo analítico propuesto por Ordaz (2008)(M. G. Ordaz, 2008) para la evaluación de  $L(\beta_i)$ , a través de una simulación con base en información de un caso de estudio que incluye información de 824 edificaciones indispensables y de atención a la comunidad para la ciudad de Bogotá, Colombia (Uniandes - CEDERI, 2005b) pertenecientes a tres divisiones administrativas de la ciudad: edificaciones administrativas, de salud y de educación.

De la curva de excedencia de pérdidas resultado de la evaluación de riesgo de las dichas edificaciones fue posible evaluar la probabilidad de exceder o alcanzar un valor de pérdida sobre el conjunto de edificaciones. Conociendo el modelo de ocurrencia de eventos (proceso de Poisson) es posible estimar el tiempo de ocurrencia entre eventos (distribución exponencial) para así calcular el  $L(\beta_i)$  y por consiguiente con una serie suficiente de eventos de pérdida evaluar  $E(L)$  y  $VAR(L)$ . La distribución obtenida a partir de la simulación fue comparada junto con la solución analítica propuesta por Ordaz (2008) y se presenta en la siguiente figura.



**Figura 3-1 Comparación entre distribución de probabilidad analítica y simulada del  $VPN(\beta), L$**

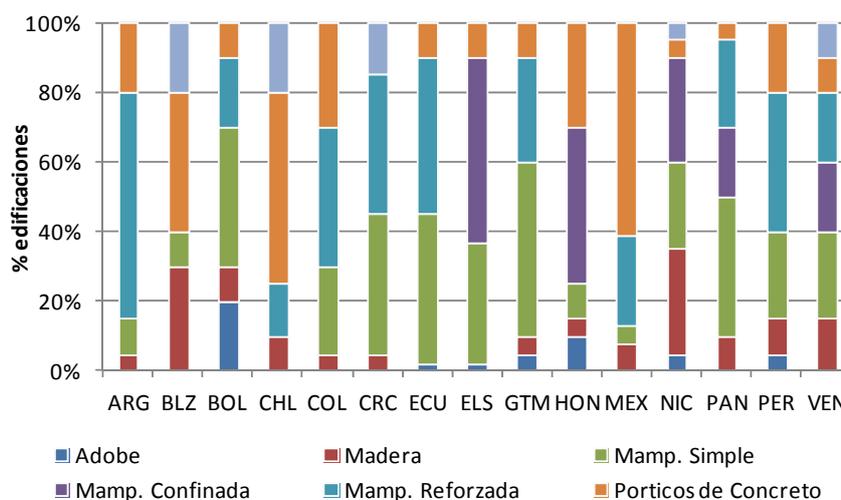
Adicionalmente a la validación del modelo analítico, se desarrolló un análisis beneficio-costo probabilista - ABCP para las tres divisiones administrativas citadas comparando tanto el estado de vulnerabilidad actual como para un estado rehabilitado (medidas de mitigación del riesgo implementadas), que junto con los costos de rehabilitación definidos por tipo de edificación y de medidas de mitigación del riesgo implementadas, permiten obtener los resultados que se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 3-1 Resultados evaluación beneficio-costo**

		Edificio	Edificio + Contenido	Edificio + Contenido + Lact
Educación	E(Q)	0.30	0.51	1.01
	Pr(Q>1)	1.4%	11.2%	43.6%
Salud	E(Q)	0.15	0.26	1.08
	Pr(Q>1)	0.5%	6.1%	72.6%
Administrativo	E(Q)	0.15	0.26	0.54
	Pr(Q>1)	0.0%	0.1%	11.8%

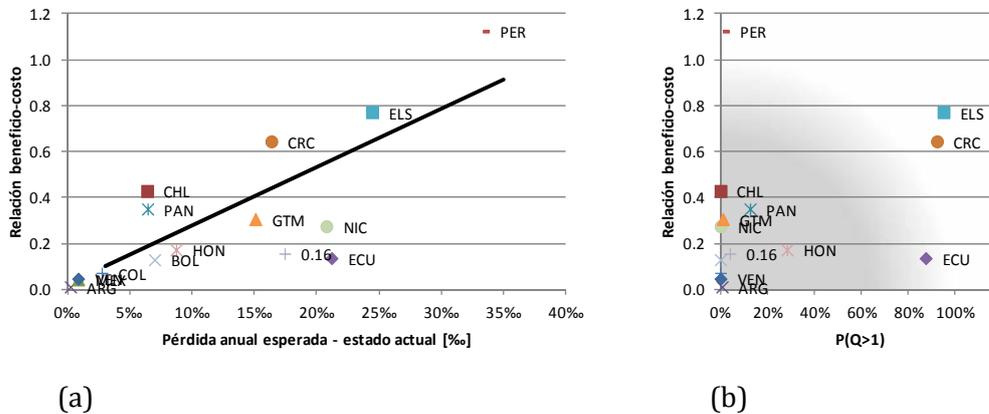
Se encontró que valores positivos ( $Q > 1$ ) de la relación B/C se obtienen sólo para el caso en el que se incluyen en el análisis las pérdidas agregadas de edificaciones, contenidos y las inducidas por la interrupción de las actividades (lucro cesante). Este resultado afirma los resultados obtenidos también por Smith et al. (2004).

Por otro lado, en Mora & Valcarcel (2011) se realizó un análisis beneficio-costo en las escuelas de la Región Andina y el Caribe en la que se presentan resultados concluyentes sobre la alta dependencia de los valores positivos de la relación B/C de acuerdo con calidad de la información disponible sobre la exposición y modelos de comportamiento estructural, específicamente con la asignación de sistemas estructurales. La distribución de estos últimos se presenta en la Figura 3-2, donde se observan participaciones importantes de sistemas estructurales de baja capacidad de resistencia sísmica en países de alta amenaza sísmica, como es el caso de Bolivia, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras y Perú.



**Figura 3-2 Distribución de sistemas estructurales**

Los resultados de la relación B/C en no todos los casos resulta óptima lo que resulta en una herramienta fundamental en el proceso de toma de decisiones en cuanto a la priorización de actividades encaminadas a la reducción de riesgo y optimización de recursos económicos.



**Figura 3-3 Resultados evaluación (a) relación B/C vs pérdida anual esperada (b) valor esperado B/C -  $E(Q)$  vs. Valor positivo B/C -  $P(Q>1)$**

De los resultados obtenidos se encontró una óptima relación B/C para países como Perú, El Salvador y Costa Rica con valores superiores a 0.6. (Figura 3-3b). No por lo anterior todos estos países deben ser el objetivo puntual de distribución o asignación de recursos. Es el caso de Perú donde a pesar de tener una relación B/C positiva (1.12), la probabilidad de obtener un valor superior a la unidad,  $P(Q>1)$ , es bastante baja (1%), contrario a lo que sucede en Ecuador donde a pesar de obtener una relación B/C baja (0.14) la probabilidad que el valor sea positivo es alta (87%). De forma similar, El Salvador y Costa Rica son opciones solidas de inversión (Figura 3-3a) pues son países de alto riesgo (con altas pérdidas anuales) con valores favorables de B/C ( $Q>0.6$ ) y altas probabilidades de obtener una relación positiva B/C,  $P(Q>1)$ , superiores a 0.9 en el grupo de países analizados.

### 3.3 Modelo extendido de evaluación probabilista del beneficio-costo

Con base en los avances realizados en la estimación de una relación beneficio costo probabilista, que son en realidad parciales, aquí se presenta una ampliación de dicho enfoque para lograr un análisis beneficio-costo probabilista completo. Este planteamiento corresponde a la propuesta central de esta investigación, resultado de los trabajos anteriores del autor y teniendo en consideración las contribuciones analíticas de Mario G. Ordaz.

En lo desarrollado hasta ahora para el Análisis Beneficio Costo (ABC) se define la relación beneficio costo,  $Q$ , como el ahorro en pérdidas o diferencia del VPN de pérdidas en el estado actual,  $L_U$ , y el estado rehabilitado,  $L_R$ , respecto del costo de implementación de Medidas de Mitigación del Riesgo (MMR),  $c$ , lo que significa que se ha llegado hasta lo siguiente:

$$Q = \frac{L_U - L_R}{c} \quad (52)$$

de donde interesa conocer la probabilidad que dicha relación  $Q$  sea mayor que 1 ( $Q > 1$ ).

$$P(Q > 1) = P(L_U - L_R > c) = P(L_U > c + L_R) \quad (53)$$

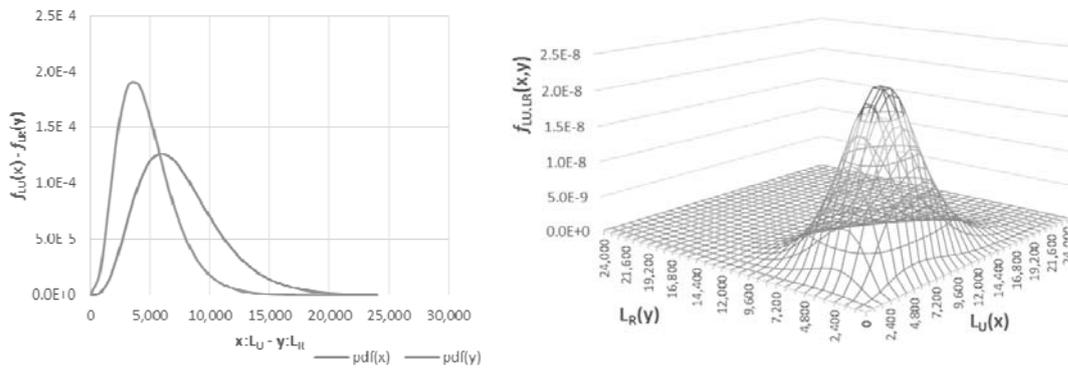
De (53) expresada en términos de la función de densidad de probabilidad conjunta se obtiene:

$$P(L_U > c + L_R) = \iint_{R^2: x > c+y} f_{L_U L_R}(x_U, x_R) dx_U dx_R \quad (54)$$

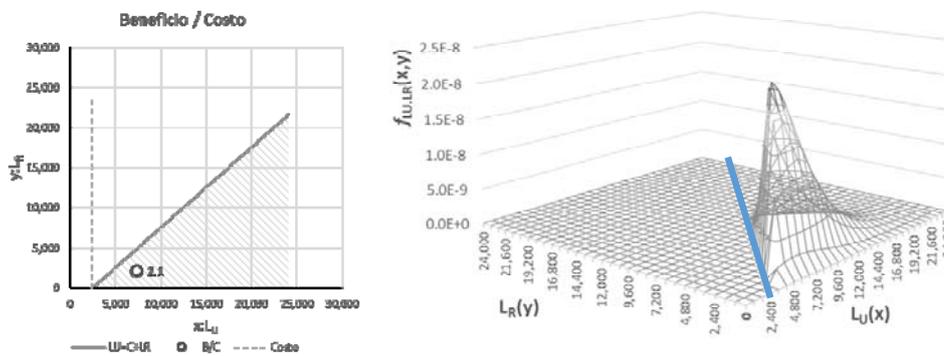
Dado que las variables  $L_U$  y  $L_R$  son variables independientes, pues obedecen a pérdidas en condiciones diferentes (la ocurrencia de pérdidas en un estado rehabilitado de la edificación,  $L_U$ , no depende de las pérdidas en el estado sin rehabilitar,  $L_R$ ), se obtiene:

$$P(L_U > c + L_R) = \int_0^{\infty} \int_{c+y}^{\infty} f_{L_U}(x_U) f_{L_R}(x_R) dx_U dx_R \quad (55)$$

Siendo (55) una integral de las funciones marginales de probabilidad de  $L_U$  y  $L_R$  (ver Figura 3-4) en la región  $R^2(x_U, x_R)$  que satisface  $L_U > c + L_R$  (ver Figura 3-5).



**Figura 3-4 Funciones marginales de probabilidad de  $L_U$  y  $L_R$**



**Figura 3-5 Región de cálculo de probabilidad que satisface  $L_U > c + L_R$**

Ahora bien, dado que:

$$\int_{c+y}^{\infty} f_{L_U}(x_U) dx = 1 - F_{L_U}(c + x_R) \quad (56)$$

desde la ecuación (55) y con (56) siendo  $F_{L_U}$  la función de distribución de probabilidad de  $L_U$  se obtiene:

$$P(Q \geq 1) = \int_0^{\infty} [1 - F_{L_U}(c + x_R)] f_{L_R}(x_R) dx_R \quad (57)$$

Esto significa, hasta aquí, que el costo de la implementación de medidas de mitigación del riesgo es evaluado de forma determinista, lo que conduce en un análisis beneficio-costo, en realidad, no completamente probabilista. A partir de lo anterior a continuación se presenta un análisis beneficio-costo totalmente probabilista al incluir la incertidumbre en los costos de implementación de las medidas de mitigación del riesgo de la siguiente forma:

$$Q = B/C \xrightarrow{\text{donde}} B = L_U - L_R \quad (58)$$

De nuevo el interés es conocer la probabilidad que la relación  $Q$  sea mayor que 1 por lo que se debe calcular la probabilidad que el beneficio  $B$  sea mayor que el costo de implementación,  $C$ .

$$P(Q \geq 1) = P(B \geq C) \quad (59)$$

De (53) expresada en términos de la función de densidad de probabilidad conjunta se obtiene la probabilidad del beneficio,  $B$ , mayor al costo,  $C$ , como una doble integral de la función de densidad de probabilidad conjunta de dichas variables sobre una región donde se satisface que el beneficio,  $b$ , es mayor que el costo,  $c$ :

$$P(B \geq C) = \iint_{R^2: b > c} f_{B,C}(b, c) db dc \quad (60)$$

Dado que el beneficio,  $B$ , que se pueda obtener por la implementación de medidas de mitigación del riesgo depende directamente del nivel de seguridad que se quiera alcanzar y, por consiguiente, de su costo,  $C$ , se deriva de aquí que existe una dependencia de las variables aleatorias y por consiguiente de (59) se tiene:

$$P(B \geq C) = P(B \geq b | C \geq c) = \frac{P[(B \geq b) \cap (C \geq c)]}{P(C \geq c)} \quad (61)$$

Para evaluar (61) consideremos lo siguiente:

$$P(b_1 \geq B \geq b_2 | c_1 \geq C \geq c_2) = \frac{P[(b_1 \geq B \geq b_2) \cap (c_1 \geq C \geq c_2)]}{P(c_1 \geq C \geq c_2)} \quad (62)$$

En términos de la función de densidad de probabilidad conjunta se tiene:

$$P(B \geq C) = \frac{\int_{c_1}^{c_2} \int_{b_1}^{b_2} f_{BC}(b, c) db dc}{\int_{c_1}^{c_2} f_C(c) dc} \quad (63)$$

Dado que  $(B > C) = (L_U - L_R > C)$  resulta (54) y (55) por lo que (63) se puede reescribir como sigue:

$$P(B \geq C) = \frac{\int_c^\infty \int_0^{x_R} \int_{c+x_R}^\infty f_{L_U L_R}(x_U, x_R) f_C(c) dx_U dx_R dc}{\int_c^\infty f_C(c) dc} \quad (64)$$

### 3.3.1 Discusión

De (64) se desprenden las siguientes observaciones con respecto a los límites de las integrales y la definición de las variables aleatorias: en la evaluación del denominador para todas las realizaciones de  $c$  se obtendrá un valor de 1 lo cual lleva pensar en la independencia de  $L_R$  (valor presente neto de posibles pérdidas en el estado rehabilitado) y  $C$  (costo de implementación de dichas obras de rehabilitación). De igual manera, derivado de la conclusión inmediatamente anterior, se observa de la definición de  $C$  que representa exclusivamente el comportamiento o incertidumbre en el valor monetario de las obras de rehabilitación sísmica, y no el costo por realizar obras para uno u otro nivel de desempeño de la estructura que a la vez correspondería a un valor diferente de  $L_R$ . En otras palabras, la variable aleatoria  $C$  mide la incertidumbre en los precios y no la incertidumbre en el valor de la obra para alcanzar de un nivel de desempeño prefijado.

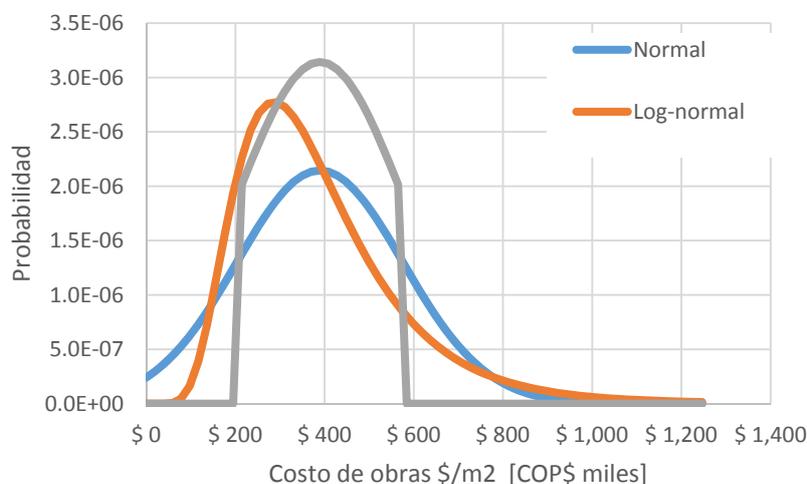
Por otro lado, de las funciones de distribución de probabilidad que depende (64) sólo se conocen las funciones que representan las variables aleatorias del valor presente neto de pérdidas tanto en el estado actual  $f_{L_U}(x_U)$  como reforzado  $f_{L_R}(x_R)$ , pero no se conoce aún la distribución de probabilidad de la variable aleatoria que representa el costo de las obras de rehabilitación sísmica  $f_C(c)$ . Esta función de distribución de probabilidad debe ser estimada de la incertidumbre de los costos de los materiales de construcción agrupados por sistema estructural, de múltiples edificaciones y con diferentes técnicas de reforzamiento de tal manera que se cubran todas las posibles combinaciones de sistemas estructurales, técnicas de reforzamiento y niveles de desempeño del grupo de edificaciones sobre el que se pretenda realizar un análisis beneficio-costo probabilista de reforzamiento sísmico.

La información disponible necesaria para estimar la distribución de probabilidad de costos de reforzamiento es insuficiente por la cantidad de combinaciones entre tipos estructurales y técnicas de reforzamiento a implementar, al punto que para cada edificación o proyecto de reforzamiento es único. La única información disponible libremente esta desactualizada en precios y corresponde exclusivamente a proyectos de rehabilitación sísmica de edificaciones en EEUU con base en costos de obras realizadas previas al año 1992 y actualizada para el año 1994 (FEMA, 1994).

Dada la poca información concerniente a los costos de reforzamiento sísmico, en este trabajo se pretende realizar un análisis beneficio-costo completamente

probabilista con la prueba de tres funciones de distribución de probabilidad, como son la distribución normal, la log-normal y por último con una distribución normal acotada, bajo los siguientes supuestos:

- *Distribución normal*: es la más usada en ingeniería en la descripción de valores de resistencia de materiales, en la localización y replanteo de edificaciones, y en descripción de dimensiones de elementos y cantidades de obra, y por ser la distribución esperada para el promedio de un número grande de variables aleatorias.
- *Distribución log-normal*: definida para los reales positivos  $x \in (0, +\infty)$ , mientras que la distribución normal es definida para todos los reales  $x \in (-\infty, +\infty)$ ; definición discutible de los costos de las obras de rehabilitación por la posibilidad de valores negativos en algunos casos.
- *Distribución normal truncada*: la más común en ingeniería con la particularidad de estar acotada por debajo y por arriba, de forma que se ajustaría a los costos de las obras de rehabilitación pues es lógico pensar que no serán menores a ni mayores a ciertos valores racionales.



**Figura 3-6: Funciones de distribución de probabilidad para el costo de obras de reforzamiento.**

De la Figura 3-6 y del análisis de sensibilidad realizado se observa lo siguiente de la utilización de las tres (3) funciones de distribución:

- i. Solo en casos particulares donde la media corresponde a un valor superior a dos desviaciones la distribución normal no toma valores importantes en el rango de los reales negativos; mientras que las colas superior e inferior de la función normal frente a la log-normal y normal truncada llevan a pensar en un error en la asignación de probabilidad de los precios.
- ii. La cola inferior y superior de la distribución log-normal cobran sentido en el supuesto que los costos de obras de rehabilitación tiendan a ser superiores a los costos presupuestados y siempre mayores que cero; sin embargo en valor esperado y la varianza tienden a ser menores, lo que repercute directamente en el valor esperado de B/C haciendo la relación más atractiva.
- iii. Respecto de las otras distribuciones analizadas, al parecer la distribución normal acotada tiene más sentido práctico, visto que los valores de las obras son valores acotados, por la naturaleza finita de los recursos para mitigación; mientras que las probabilidades de obtener beneficios superiores a los costos aumentan bajo la razón de poder realizar la operación de contribución de toda la función de probabilidad frente a la función no truncada.



## **4 APLICACIÓN DEL MODELO A LA CIUDAD DE MANIZALES**

### **4.1 Edificaciones públicas de la ciudad de Manizales**

Con el objeto de realizar una aplicación de la propuesta metodológica desarrollada en este trabajo para obtener un análisis beneficio-costo probabilista completo y en vista de la posibilidad de realizar un caso real en el marco del proyecto de reducción del riesgo de desastres en la ciudad de Manizales, Colombia, se aplicó esta técnica con la información para la evaluación del riesgo de dicha ciudad. Dentro de la información generada en el marco del proyecto se contó con la base de datos de exposición, funciones de vulnerabilidad, estudio de microzonificación sísmica y el estudio de amenaza sísmica nacional (Comité AIS-300, 2009).

Manizales es la ciudad capital del departamento de Caldas, ubicada en la estribación central del extremo norte de la Cordillera de los Andes. En la actualidad es habitada por cerca de 400 mil personas. El área urbana está subdividida en 11 comunas y el área rural en 7 corregimientos compuesto por 34 veredas. Pertenece al área metropolitana (no constituida legalmente) los municipios de Villamaria, Chinchiná, Neira y Palestina con una población total superior a los 550 mil habitantes. Históricamente ha sido afectada por sismos importantes (1938, 1962, 1964, 1979), incendios (1922, 1925 y 1926) y múltiples deslizamientos (donde se destacan los del barrio la Sultana en 2003 y barrio Cervantes en 2011).

Las edificaciones objeto del análisis beneficio-costo probabilista son las edificaciones públicas de la ciudad, pues son de especial interés en la implementación de medidas de mitigación del riesgo por ser administradas con recursos públicos y bajo un solo propietario, que es el municipio. Dentro de este grupo de edificaciones se encuentran edificaciones de atención en servicios en salud y educación, así como también las edificaciones de gobierno municipal.

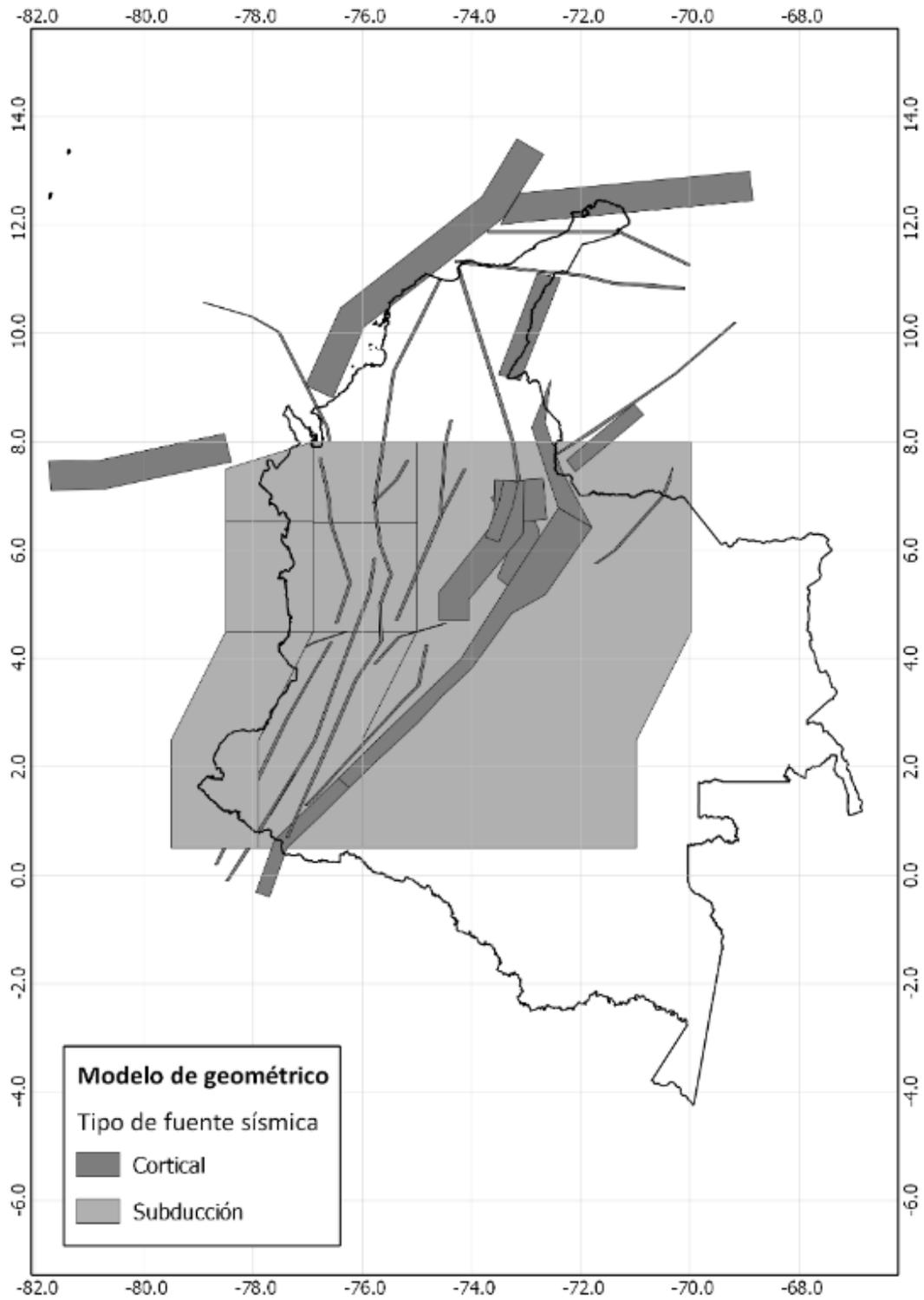
En la estimación de los beneficios para el análisis beneficio-costo probabilista en primer lugar se debe realizar un análisis, según se indicó, para determinar las distribuciones de probabilidad de  $L$  para dos escenarios: el primero para la situación actual de comportamiento sísmico de las edificaciones (propiedades actuales de resistencia, vulnerabilidad actual) sin refuerzo; y el segundo para el caso una vez se haya implementado como medidas de mitigación del riesgo el reforzamiento sísmico de las edificaciones (propiedades de resistencia mejoradas de las edificaciones de acuerdo al nivel de comportamiento esperado).

El análisis probabilista del riesgo parte en primera instancia de un análisis de amenaza sísmica de la región de estudio, que como ya se mencionó, dicha información será obtenida del estudio de amenaza sísmica de Colombia (Comité AIS-300, 2009), la información más relevante del modelo se presenta a continuación que se incluye el modelo geométrico y la información estadística de generación de eventos por fuente sísmica. Dicha información es incorporada en el software CRISIS-2007 (M. Ordaz et al., 2007) de donde se obtienen los resultados necesarios de amenaza para el análisis probabilista del riesgo y cuyos resultados principales también se describen a continuación.

#### **4.1.1 Amenaza sísmica**

##### *4.1.1.1 Regional*

Este modelo de amenaza nacional describe las propiedades geométricas de 38 fuentes sísmicas de influencia en el territorio colombiano que se presentan en la Figura 4-1 de las que se enumeran: latitud, longitud y profundidad de cada vértice de la superficie o línea de falla, así como el modelo de atenuación y de generación de eventos asociado. El modelo define de igual manera las características sísmicas de dichas fuentes las que se enumeran: la magnitud mínima, tasa anual de ocurrencia de eventos sísmicos, el valor esperado desviación, y límites inferior y superior de la magnitud última esperada para cada fuente sísmica. En la Tabla 4-1 se presentan los valores descritos anteriormente para las 38 fuentes sísmicas de influencia en el territorio colombiano.



**Figura 4-1: Modelo espacial de fuentes en el territorio colombiano**

**Tabla 4-1: Parámetros del modelo de fuente para el territorio colombiano**

Nombre	$M_0$	$\lambda$	$\beta$	$\alpha$	$E(M_U)$	$\sigma(M_U)$	$M_1$	$M_2$
Arco de Dabeiba	4	2.63	1.803	0.091	6.9	0.2	6.4	7.1
Bahía Solano	4	2.98	1.297	0.086	7.5	0.2	7	7.7
Benioff Intermedia I	4	1.85	3.847	0.07	8	0.2	7.5	8.2
Benioff Intermedia II	4	5.80	1.491	0.061	8	0.2	7.5	8.2
Benioff Intermedia III	4	2.17	1.912	0.1	8	0.2	7.5	8.2
Benioff Profunda	4	5.70	2.018	0.062	7.5	0.2	7	7.7
Boconó	4	4.93	2.034	0.066	7.4	0.2	6.9	7.6
B/manga-Sta Marta Norte	4	0.13	1.333	0.44	6.5	0.2	6	6.7
B/manga-Sta Marta Centro	4	0.87	2.272	0.16	6.5	0.2	6	6.7
B/manga-Sta Marta Sur	4	0.93	3.307	0.154	6.9	0.2	6.4	7.1
Cauca	4	5.00	2.619	0.066	7.5	0.2	7	7.2
Cimitarra	4	0.59	2.967	0.196	6.5	0.2	6	6.7
Compresión Caribe SE	4	0.59	1.646	0.196	6.5	0.2	6	6.7
Compresión Caribe SW	4	0.70	2.285	0.179	6.1	0.2	5.6	6.3
Cuiza	4	0.76	1.741	0.171	6.6	0.2	6.1	7
Espíritu Santo	4	0.22	2.04	0.333	6.5	0.2	6	6.7
Fallas del Magdalena	4	0.28	1.1	0.288	7	0.2	6.8	7.2
Frontal C.O. Norte	4	1.48	1.497	0.122	8	0.2	7.6	8.2
Frontal C.O. Centro	4	2.61	1.496	0.091	8	0.2	7.6	8.2
Frontal C.O. Sur	4	2.37	2.256	0.09	8	0.2	7.6	8.2
Garrapatas	4	0.26	3	0.302	6.5	0.2	6	6.7
Ibagué	4	0.26	1.579	0.302	6.9	0.2	6.4	7.1
Junín	4	0.15	2.188	0.408	7	0.2	6.5	7.2
Murindó	4	3.59	1.439	0.078	7.5	0.2	7	7.7
Nido Bucaramanga	4	32.10	1.88	0.026	6.5	0.2	6	6.2
Normal Panamá-Pacífico	4	2.20	1.829	0.1	7.1	0.2	6.6	7.3
Oca	4	1.63	2.055	0.116	6.5	0.2	6	6.7
Palestina	4	0.98	1.685	0.151	6.5	0.2	6	6.7
Perijá	4	0.59	3.068	0.196	6.5	0.2	6	6.7
Puerto Rondón	4	0.24	1.803	0.316	6.7	0.2	6.2	6.9
Romeral	4	1.54	2.028	0.119	7.6	0.2	7.4	7.8
Romeral Norte	4	0.46	1.875	0.223	6.5	0.2	6	6.7
Salinas	4	1.63	1.913	0.116	6.5	0.2	6	6.7
Suárez	4	1.33	2.469	0.129	6.5	0.2	6	6.7
Subducción Norte	4	3.15	1.331	0.083	8.6	0.2	8.1	8.6
Subducción Centro	4	2.46	1.294	0.094	8.6	0.2	8.1	8.6
Subducción Sur	4	16.30	1.949	0.036	8.9	0.2	8.4	8.9
Uribante-Caparro	4	0.87	1.6	0.16	7	0.2	6.5	7.2

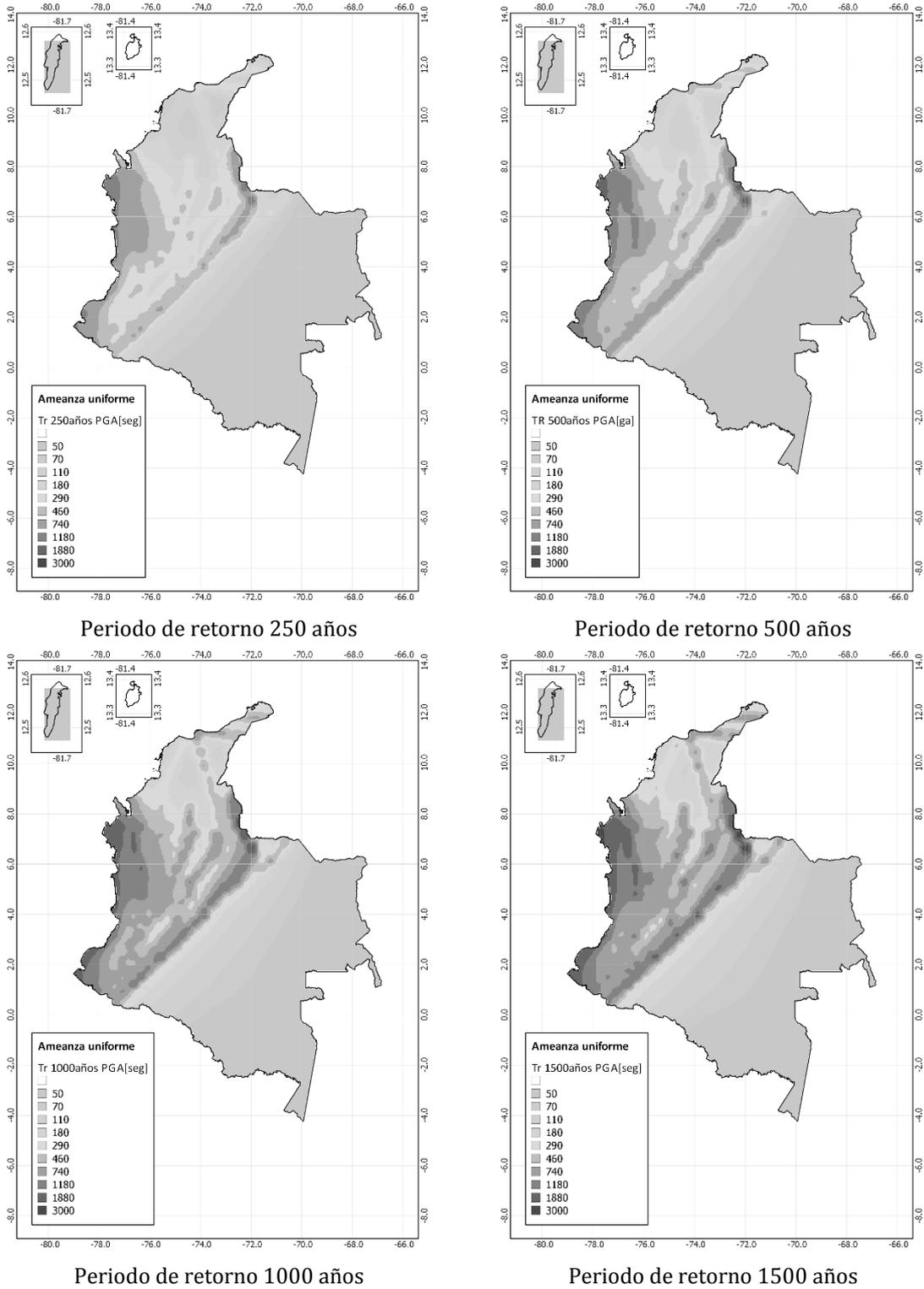
La información del modelo de amenaza sísmica fue introducida en el software CRISIS-2007 (M. Ordaz et al., 2007) para la evaluación del peligro sísmico de donde se obtuvieron los resultados de amenaza sísmica para el país en general, para la zona de estudio y para algunas ciudades principales con el objeto de ejemplificar el tipo de resultados que se obtienen de la evaluación de amenaza. Dichos resultados incluyen mapas de amenaza para múltiples periodos de retorno, espectros de amenaza uniforme, curvas de tasa de excedencia de intensidad, y participación de fuentes en la amenaza sísmicas total.

En la Figura 4-2 se presentan diferentes mapas de amenaza uniforme denominados así por representar la intensidad sísmica para un tiempo de exposición, una probabilidad de excedencia y una medida de intensidad (p.e. PGA) fijas (parámetros uniformes) para todo el territorio objeto del análisis.

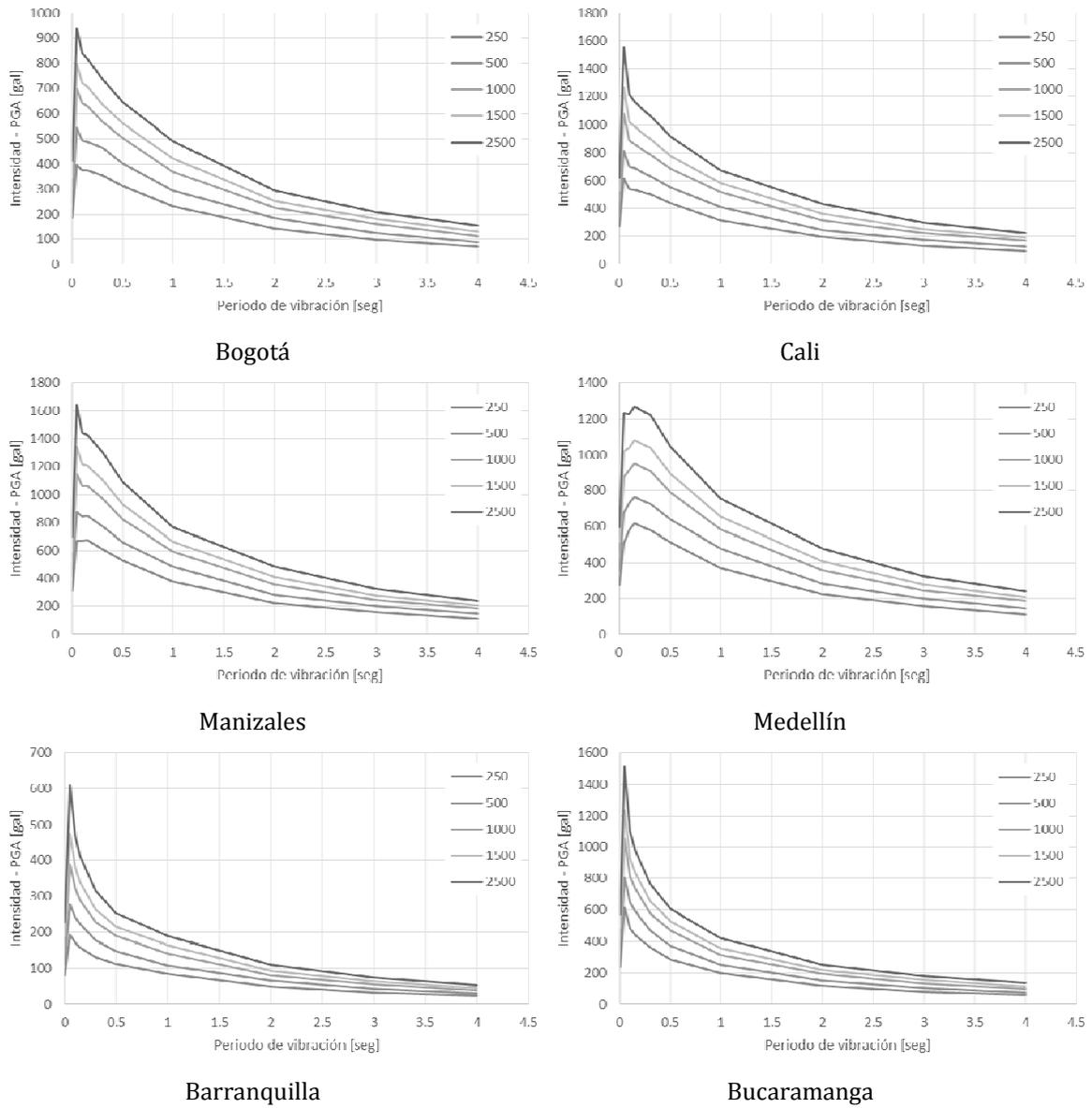
A diferencia de los anteriores mapas, en la Figura 4-3 se presentan los espectros de amenaza uniforme que describen las intensidades esperadas para un tiempo de exposición y probabilidad fijas (uniformes), para múltiples medidas de intensidad (ordenadas espectrales) en una localización específica.

Con el objetivo de observar la participación de las fuentes sísmicas en la amenaza total de una localización específica, en la Figura 4-4 se presentan las curvas de excedencia de intensidad (p.e. la aceleración pico del suelo, PGA) por fuente y para el total de fuentes para algunas ciudades principales colombianas. Como se describe previamente, en estas curvas se presenta la totalidad de la información del análisis probabilista de amenaza, en este caso exclusivamente de amenaza sísmica.

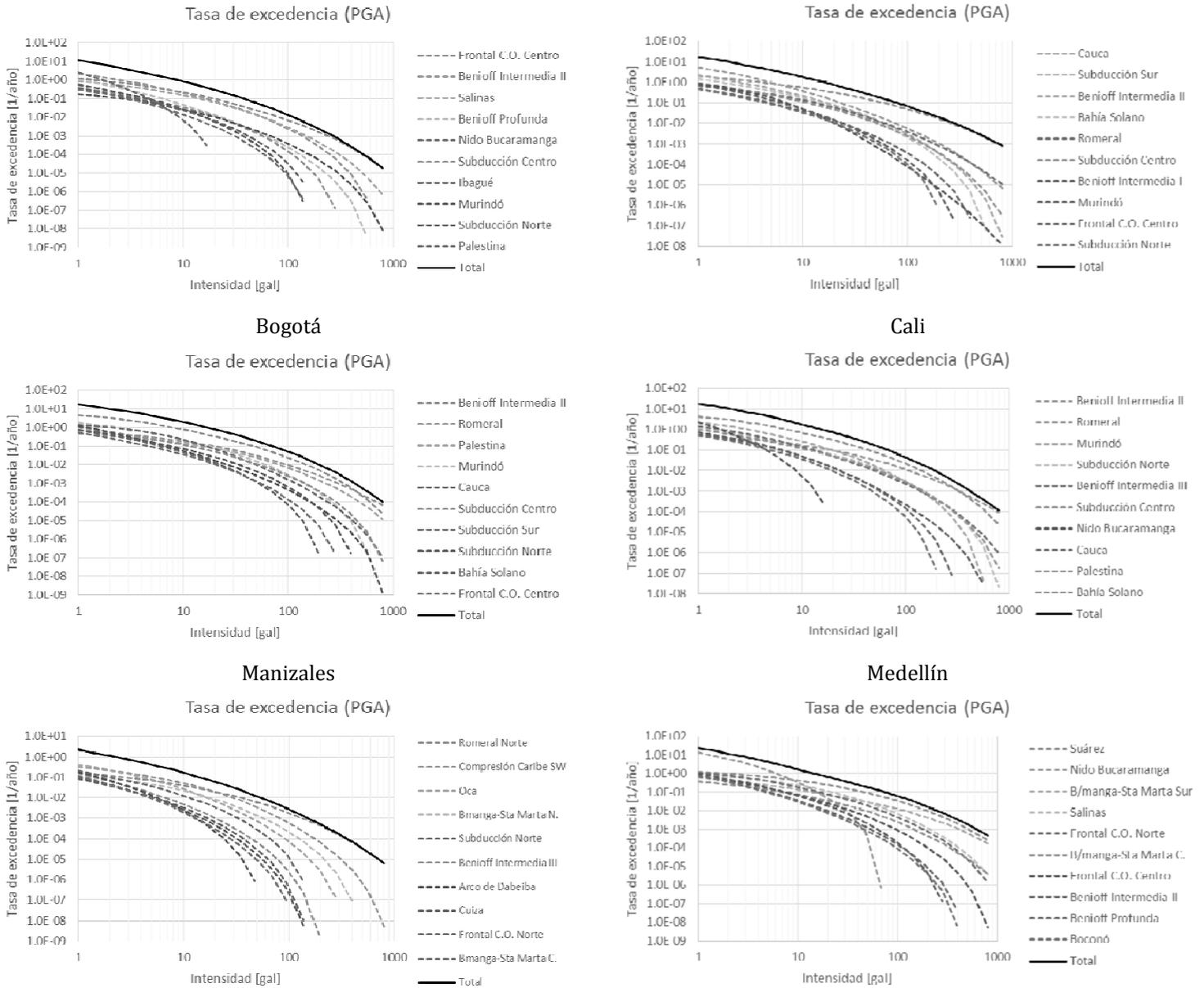
A partir de las curvas de excedencia de intensidad por fuente y para múltiples ordenadas espectrales es posible construir las gráficas de la Figura 4-5 donde se presenta la contribución por fuente en la amenaza total para las múltiples ordenadas espectrales, y de donde se destacan las principales fuentes para una región o localización específica.



**Figura 4-2: Mapa de amenaza uniforme para la zona de estudio, PGA[gal]**

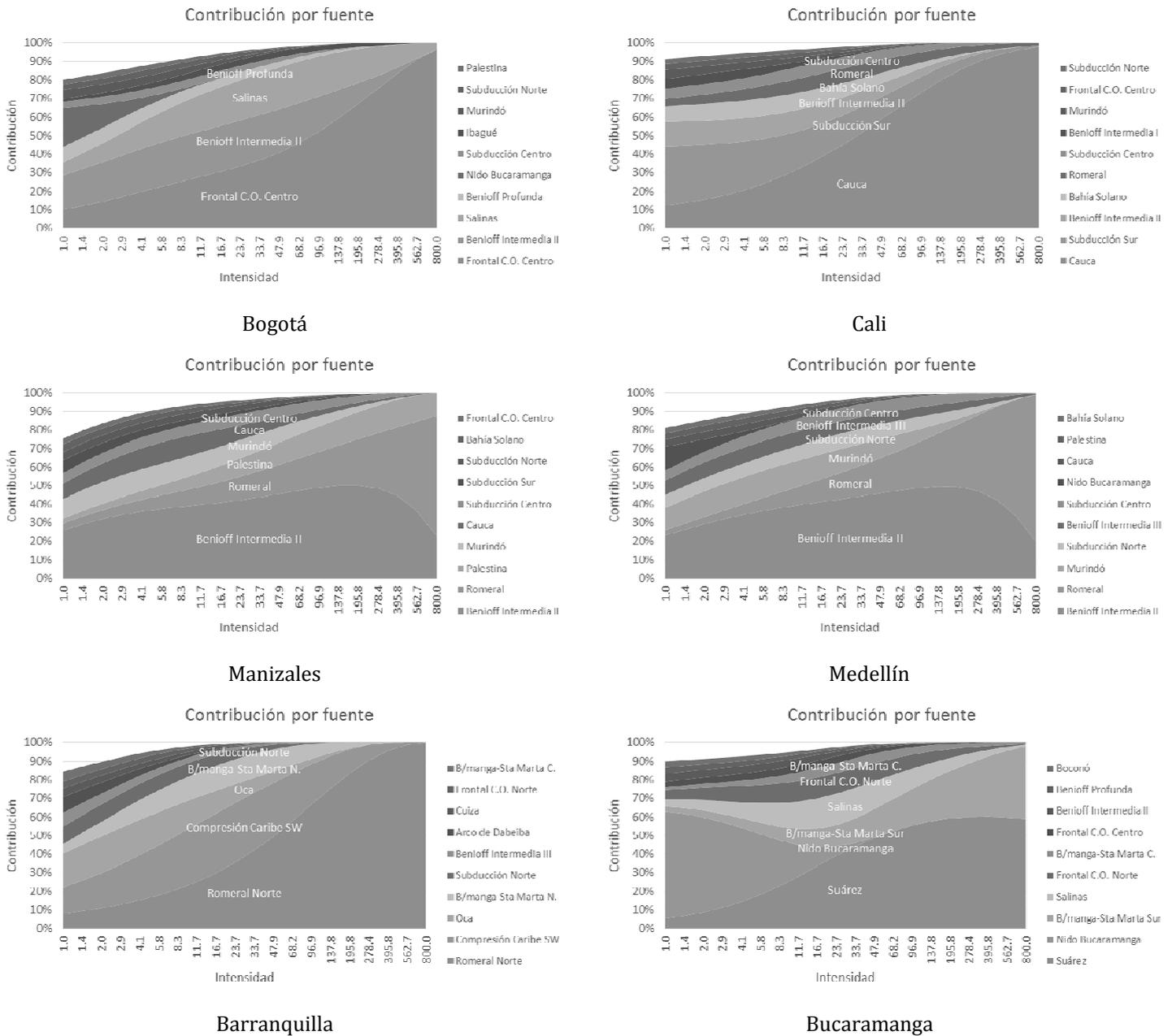


**Figura 4-3: Espectros de amenaza uniforme para diferentes periodos de retorno y para diferentes ciudades principales (intensidad PGA)**



Barranquilla Bucaramanga  
**Figura 4-4: Curvas de excedencia de intensidad por fuente y total**

## Análisis beneficio-costo probabilista de medidas de mitigación del riesgo por sismo

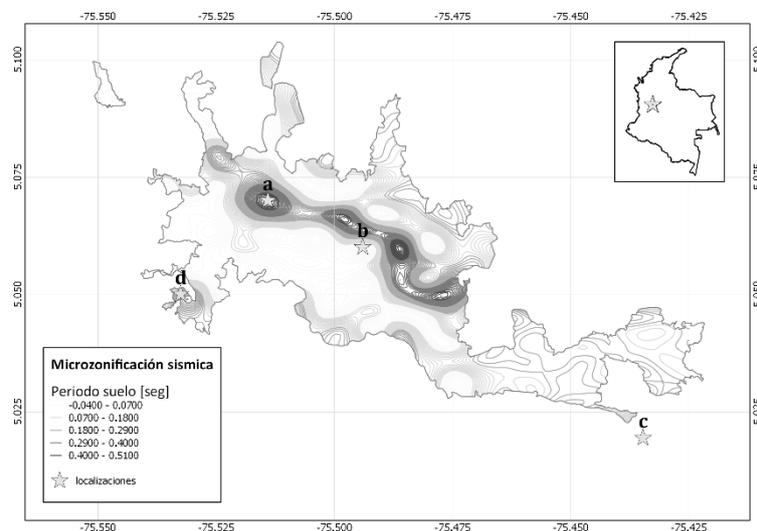


**Figura 4-5: Participación en la amenaza total por fuente (10 más importantes)**

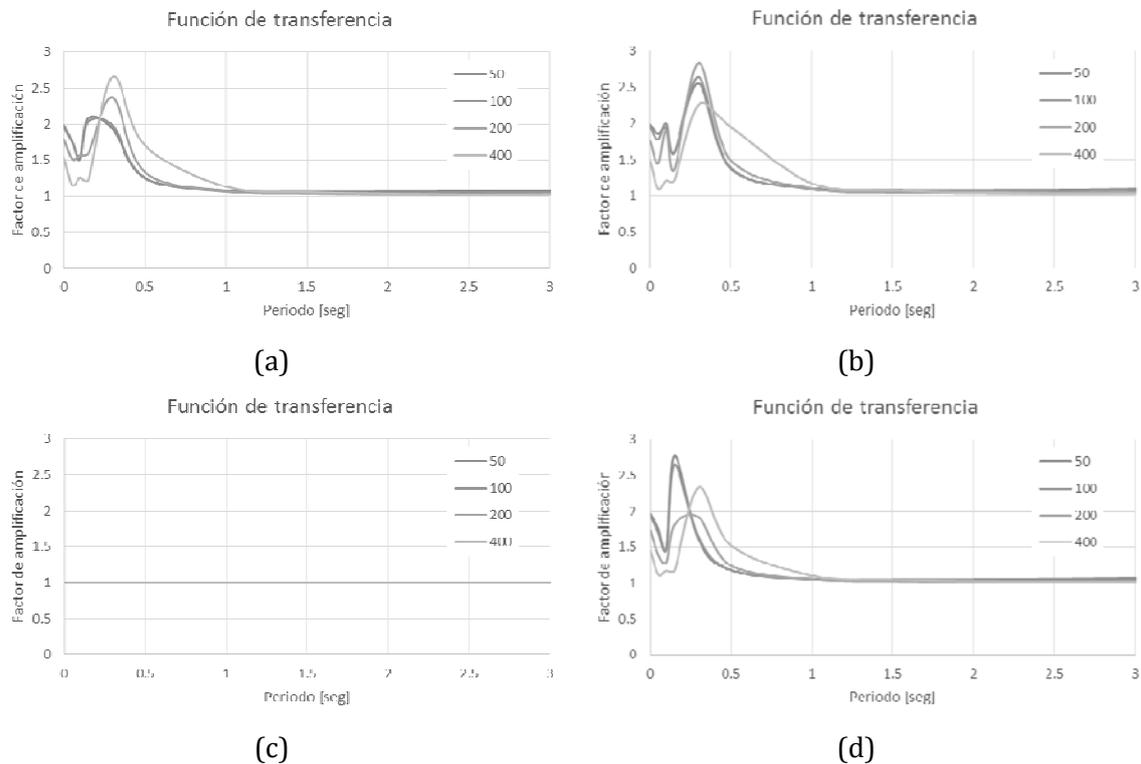
#### 4.1.1.2 Amenaza sísmica Local (microzonificación sísmica)

La evaluación de la amenaza sísmica local se realiza con el propósito de identificar características: geológicas, como la localización, posición y espesores de los depósitos de suelo y roca; y geotécnicas, como la penetración estándar, módulo dinámico de cortante y amortiguamiento, velocidad de corte de cada localización en una región, por lo general una ciudad o población.

Para el caso de la ciudad de Manizales en la Figura 4-7 presenta las funciones de transferencia de amplitudes sísmicas entre la roca y superficies para diferentes niveles de intensidad sísmica y ordenadas espectrales, para las localizaciones que se presentan en el mapa de isoperiodos de la Figura 4-6. De estas funciones de transferencia se denota la amplificación de los suelos más duros en las ordenadas espectrales cortas para intensidades bajas, y la amplificación de los suelos más blandos para para ordenadas espectrales medias para intensidades más altas. Se puntualiza sobre la amplificación de las localizaciones fuera del perímetro urbano como nula como se presenta en la gráfica (c) de la Figura 4-6, localizaciones en las que solo que tomará en cuenta la amenaza sísmica en roca sin efectos locales pues dichas localizaciones exceden los límites del estudio de respuesta local (Alcaldía de Manizales, OMPAD, 2008).



**Figura 4-6: mapa de periodos del suelo para la ciudad de Manizales**



**Figura 4-7: Funciones de transferencia para algunas localizaciones en el perímetro urbano de Maizales**

#### 4.1.2 Exposición: base de datos de edificaciones

Para la evaluación del riesgo es necesario identificar los elementos expuestos sobre los que se realizarán las estimaciones de pérdidas con el objetivo del análisis probabilista del riesgo. Dichos elementos expuestos se identificaron a partir de la base de datos de edificaciones públicas de la ciudad y que fue implementada dentro del proyecto de gestión del riesgo de la ciudad.

Al igual que en la identificación de elementos expuestos, los modelos de vulnerabilidad sísmica para las edificaciones se extrajeron del conjunto de funciones de vulnerabilidad generado en el proyecto. Este conjunto de funciones da cuenta de las tipologías estructurales presentes en la ciudad de acuerdo a la configuración de número de pisos y años de construcción.

#### 4.1.2.1 La ciudad

En la ciudad de Manizales se ubican un total de alrededor de 114 mil edificaciones con un valor expuesto superior a COP\$ 8 billones, de las cuales el 90% de las edificaciones corresponden a edificaciones residenciales con el 70% del valor expuesto. Desagregando las edificaciones de entre públicas y privadas, las primeras corresponden a solo el 0.3% con un valor expuesto que corresponde a COP\$ 144 mil millones. La distribución de número de edificaciones y valores expuestos de edificaciones por uso y sector se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 4-2: Distribución del número y valor expuesto de edificaciones de la ciudad por uso y sector**

Uso	Cuenta		Valor Expuesto	
	[und]	[% Total]	COP\$ [millones]	[% Total]
institucional	233	0.2%	\$ 117,939	1.4%
comercial	9,504	8.4%	\$ 1,357,970	16.5%
residencial	102,365	90.3%	\$ 5,753,638	69.9%
educación	369	0.3%	\$ 387,483	4.7%
salud	103	0.1%	\$ 121,582	1.5%
industrial	823	0.7%	\$ 492,685	6.0%
	<b>113,397</b>	<b>100%</b>	<b>\$ 8,231,298</b>	<b>100%</b>
Sectores				
publico	335	0.3%	\$ 144,151	1.8%
privado	113,062	99.7%	\$ 8,087,147	98.2%
	<b>113,397</b>	<b>100%</b>	<b>\$ 8,231,298</b>	<b>100%</b>

En cuanto a la distribución de edificaciones por sistema estructural, la mayoría de las edificaciones de la ciudad se concentra en sistemas estructurales de pórticos de concreto con muros de mampostería, mamposterías reforzadas y confinadas, y algunos sistemas losa columna respectivamente con el 23%, 47% y 12% del total de edificaciones de la ciudad. Es de notar en gran número de edificaciones en sistemas de muros en tierra, con cerca del 10% de las edificaciones, pues es un sistema estructural por el cual la ciudad es reconocida incluso a nivel internacional.

**Tabla 4-3: Distribución del número y valor expuesto de edificaciones de la ciudad por sistema estructural**

Sistema estructural	Cuenta		Valor Expuesto	
	[und]	[% Total]	COP\$ [millones]	[% Total]
Bahareque	10,362	9.1%	884,816	10.7%
Adobe	820	0.7%	34,606	0.4%
Mampostería simple	1,828	1.6%	38,988	0.5%
Mampostería confinada	21,604	19.1%	987,141	12.0%
Mampostería reforzada	32,161	28.4%	2,118,236	25.7%
Pórticos de concreto	1,610	1.4%	354,304	4.3%
Pórticos y muros de concreto	3	0.0%	41,032	0.5%
Pórticos y muros de mampostería	25,127	22.2%	2,104,600	25.6%
Reticular celularo	14,671	12.9%	1,092,523	13.3%
Muros y losas de concreto	4,341	3.8%	214,635	2.6%
Prefabricado ce concreto	348	0.3%	7,274	0.1%
Bodega (cub. ligera, luces cortas)	522	0.5%	353,143	4.3%
<b>Total</b>	<b>113,397</b>	<b>100%</b>	<b>8,231,298</b>	<b>100%</b>

#### 4.1.2.2 Los públicos

Por el lado del grupo de edificaciones públicas, son en mayoría de uso comercial y de servicios de educativos con porcentajes del 48% y 49% respectivamente. Mientras que los valores expuestos se concentran sólo en las edificaciones de servicios educativos y de administración (institucional) con 51% y 29% respectivamente. A continuación se describe el conteo y distribuciones del número de edificaciones y valores expuestos por uso.

**Tabla 4-4: Distribución del número y valor expuesto de edificaciones públicas por uso**

Uso	Cuenta		Valor Expuesto	
	[und]	[% Total]	[COP\$ millones]	[% Total]
institucional	6	1.8%	\$ 42,420	29.4%
comercial	162	48.4%	\$ 22,072	15.3%
residencial	18	5.4%	\$ 1,528	1.1%
educación	133	39.7%	\$ 73,944	51.3%
salud	15	4.5%	\$ 3,853	2.7%
industrial	1	0.3%	\$ 335	0.2%
	<b>335</b>	<b>100%</b>	<b>\$ 144,151</b>	<b>100%</b>

Al igual que para el total de la ciudad, el número de edificaciones públicas se concentra en sistemas estructurales de; pórticos de concreto con muros de mampostería, con alturas de hasta 16 pisos y fechas de construcción desde 1910 hasta 2001; mamposterías reforzadas, con alturas de 1 y 2 pisos y fechas de construcción desde 1950 hasta 2001; y sistemas losa columna (reticular celulado), también con alturas de 1 y 2 pisos y fechas de construcción desde 1930 hasta 1975. A continuación se describe el conteo y distribución del número de edificaciones y valor expuesto por sistema estructural, además se presentan las fechas de construcción y números de pisos máximo y mínimo del subgrupo.

**Tabla 4-5: Distribución del número y valor expuesto de edificaciones públicas por sistema estructural**

Sistema estructural	Cuenta		Pisos		Año		Valor Expuesto	
	[und]	[% Total]	Min	Max	Min	Max	[COP\$ millones]	[% Total]
Bahareque	6	1.8%	1	3	1960	1985	\$ 4,076	2.8%
Adobe	3	0.9%	1	1	1950	1985	\$ 515	0.4%
Mampostería simple	28	8.4%	1	1	1985	2000	\$ 1,947	1.4%
Mampostería confinada	3	0.9%	1	1	1975	1985	\$ 1,292	0.9%
Mampostería reforzada	48	14.3%	1	2	1950	2001	\$ 13,901	9.6%
Pórticos de concreto	14	4.2%	2	3	1950	2001	\$ 13,442	9.3%
Pórticos y muros de concreto	2	0.6%	2	2	2000	2001	\$ 40,144	27.8%
Pórticos y muros de mamp.	80	23.9%	1	16	1910	2001	\$ 60,338	41.9%
Reticular celulado	141	42.1%	1	2	1930	1975	\$ 7,383	5.1%
Muros y losas de concreto	0	0.0%	0	0	0	0	\$ 0	0.0%
Prefabricado de concreto	0	0.0%	0	0	0	0	\$ 0	0.0%
Bodega (cub. ligera, luces cortas)	10	3.0%	1	2	1985	2001	\$ 1,115	0.8%
<b>Total</b>	<b>335</b>	<b>100%</b>					<b>\$ 144,151</b>	<b>100%</b>

#### 4.1.3 Estrategia de reforzamiento de edificaciones públicas

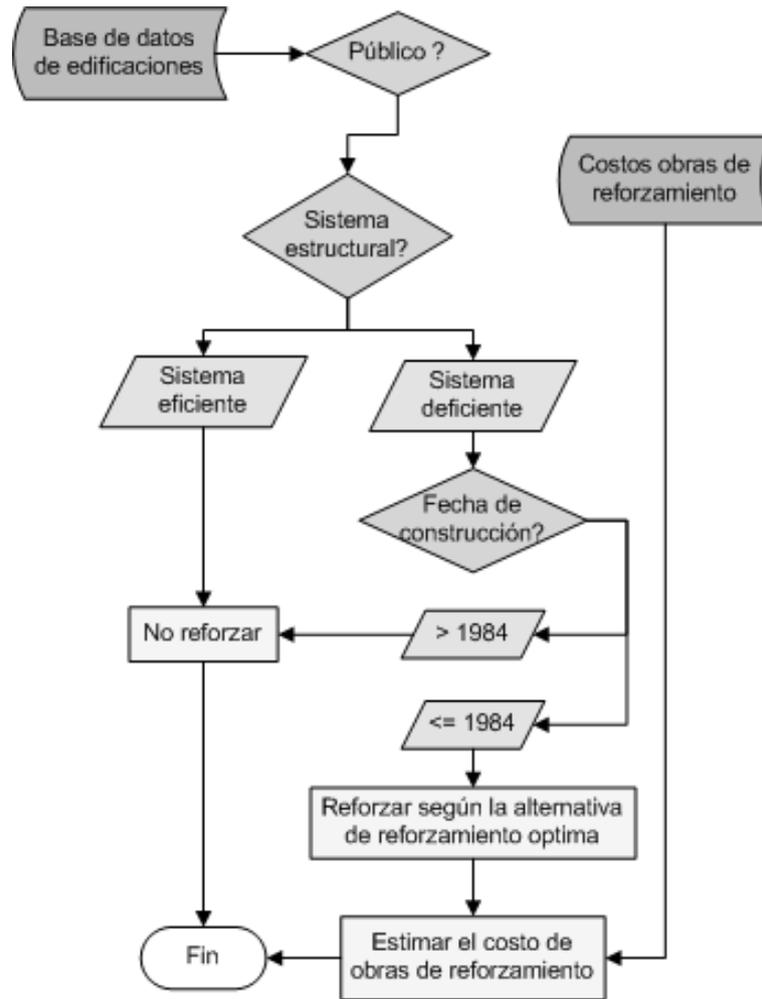
Identificado y caracterizado el grupo de edificaciones públicas, es necesario definir una estrategia para la implementación de las medidas de mitigación del riesgo sobre las edificaciones, de acuerdo a las características propias de cada edificación del inventario. La estrategia se realizó de acuerdo al procedimiento planteado en la Figura 4-8 y que toma como información de entrada de la edificación: el sector, el sistema estructural y la fecha de construcción, dicha información proviene de la base de datos de edificaciones que se describió previamente. Además de la información de cada edificación y de la estrategia de reforzamiento, también es

necesaria la información del costo de implementación de las medidas de mitigación del riesgo, que para el caso es la rehabilitación sísmica de las estructuras. El costo de dichas obras se diferencia según el sistema estructural y son como se presenta en la Tabla 4-6.

**Tabla 4-6: Valores de reforzamiento de edificaciones por sistema estructural, valor esperado y desviación**

Sistema estructural	\$/m <sup>2</sup>	
	E()	σ()
Muros de mampostería simple (ladrillos de concreto) con diafragma	\$ 532,149	\$ 81,233
Muros de mampostería simple (ladrillos de concreto)	\$ 454,786	\$ 65,132
Muros de mampostería confinada (ladrillos de concreto) con diafragma	\$ 588,763	\$ 77,532
Muros de mampostería confinada (ladrillos de concreto)	\$ 479,110	\$ 85,364
Muros de mampostería confinada con diafragma	\$ 518,072	\$ 76,443
Muros de mampostería confinada	\$ 443,122	\$ 62,871
Muros de mampostería confinada reforzada	\$ 389,507	\$ 185,944
Pórticos de concreto reforzado	\$ 1,032,024	\$ 218,424
Pórticos de concreto reforzado y muros de mampostería (ladrillos de concreto)	\$ 1,096,502	\$ 241,005
Pórticos de concreto reforzado arriostrados	\$ 1,348,231	\$ 395,468

Los valores presentados en la tabla anterior son el resultado de una evaluación de las cantidades de obras y los respectivos costos de construcción de los sistemas estructurales identificados dentro del grupo de edificaciones públicas y por un análisis de datos para determinar los momentos estadísticos de las tres funciones de distribución de probabilidad (Normal, Log-normal y Normal truncada) que se presentaron en el desarrollo metodológico del análisis beneficio-costo probabilista completo. En dicho análisis de datos se compararon las tres distribuciones de probabilidad junto con el resultado del análisis de frecuencias (concentración) de los costos estimados. La evaluación de las cantidades de obras se realizó sobre múltiples distribuciones arquitectónicas de edificaciones comunes al entorno colombiano y que se incluyen en el Anexo 1 junto con el análisis de datos descrito anteriormente.



**Figura 4-8: Algoritmo de criterios para la aplicación de la estrategia de reforzamiento de las edificaciones**

Como la alternativa planteada, pueden ser planteadas diferentes criterios de decisión de reforzamiento sísmico. Un criterio de reforzamiento sísmico de las edificaciones podría ser también la pérdida anual esperada obtenida de un análisis de riesgo preliminar y fijando un valor límite por encima del cual las edificaciones deberían ser objeto de reforzamiento sísmico.

Implementado el procedimiento descrito en el algoritmo de la Figura 4-8 se obtienen los costos de reforzamiento por sistema estructural de las edificaciones públicas, dichos costos se describen en la Tabla 4-7 de donde se destaca el sistema estructural de pórticos de concreto con muros de mampostería como el más frecuente y costoso.

**Tabla 4-7: Costos de reforzamiento de las edificaciones públicas reforzadas por sistema estructural**

Sistema estructural	Reforzamiento	
	Valor COP\$ [millones]	[% Total]
Bahareque	\$ 362	2.5%
Adobe	\$ 133	0.9%
Mampostería simple	\$ 375	2.6%
Mampostería confinada	\$ 616	4.2%
Mampostería reforzada	\$ 0	0.0%
Pórticos de concreto	\$ 815	5.6%
Pórticos y muros de concreto	\$ 0	0.0%
Pórticos y muros de mampostería	\$ 11,844	81.6%
Reticular celulado	\$ 371	2.6%
Muros y losas de concreto	\$ 0	0.0%
Prefabricado de concreto	\$ 0	0.0%
Bodega (cub. ligera, luces cortas)	\$ 0	0.0%
<b>Total</b>	<b>\$ 14,517</b>	<b>100%</b>

#### 4.1.4 Análisis probabilista de riesgo - APR

Los análisis probabilistas del riesgo necesarios para realizar el análisis beneficio-costo probabilista de las edificaciones públicas fueron realizados bajo los siguientes escenarios:

- i. Todas las edificaciones públicas de la ciudad en el estado actual
- ii. Todas las edificaciones públicas de servicios de salud en el estado actual
- iii. Todas las edificaciones públicas de educación en el estado actual
- iv. Todas las edificaciones públicas de la ciudad en el estado reforzado (sin estrategia)
- v. Edificaciones públicas de la ciudad susceptibles de ser reforzadas (con estrategia)
- vi. Edificaciones públicas de servicios de salud susceptibles de ser reforzadas (con estrategia)
- vii. Edificaciones públicas de educación susceptibles de ser reforzadas (con estrategia)

Las tablas de resultados, curvas de excedencia de pérdidas – CEP y pérdida máxima probable – PML para cada uno de los anteriores escenarios se presentan

en el 0. Todos los escenarios del análisis probabilista del riesgo descritos anteriormente fueron realizados con la plataforma CAPRA.

#### 4.1.5 Análisis de Beneficio de obras de mitigación

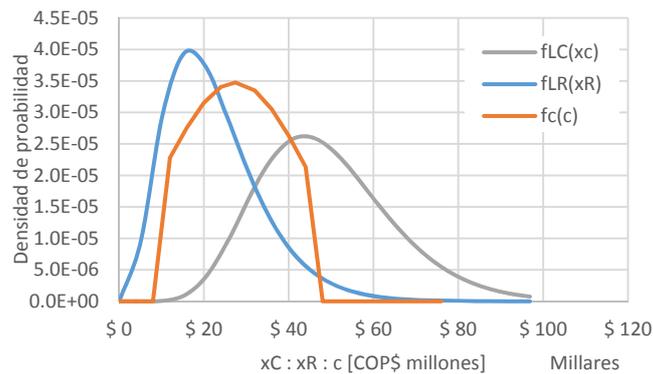
##### 4.1.5.1 Todas las edificaciones públicas

El análisis a continuación realizado corresponde a los resultados del análisis probabilista del riesgo sobre de los estados actual y reforzado de todas las edificaciones públicas de la ciudad. Este análisis se realizó con el fin de contextualizar la importancia de configurar estrategias de reforzamiento ajustadas a la realidad del grupo de edificaciones en consideración y el impacto que el costo de las obras de reforzamiento tiene en el análisis beneficio-costos probabilista.

**Tabla 4-8: Resultados del análisis de beneficio – costo para la estrategia de reforzamiento del grupo de edificaciones públicas**

Tasa interés		3.0%	
Costo rehabilitación ( c )		E()	$\sigma()$
		\$ 27,426	\$ 16,811
Variable	Actual	Reforzado	Beneficio
PAE	\$ 1,448	\$ 663	\$ 786
E(L)	\$ 48,866	\$ 22,349	\$ 26,517
VAR(L)	2.54E+08	1.28E+08	
r	9.41	3.92	
$\lambda$	1.93E-04	1.75E-04	
E(B/C)	0.97		
P(B>C)	49.4%		
P(B>c)	46.9%		

El valor esperado de la relación B/C para el presente análisis es de 0.97 con una probabilidad que los beneficios (reducción en el valor presente neto de pérdidas) sean superiores a COP\$ 27,426 millones; es decir cerca del 47%. De igual manera tomando en cuenta la incertidumbre en los costos de reforzamiento la relación B/C tiene una probabilidad del 49% de ser favorable.



**Figura 4-9: Distribuciones de probabilidad del valor presente neto de pérdidas en los estados actual y reforzado, y distribución de probabilidad de los costos de reforzamiento del grupo de edificaciones públicas**

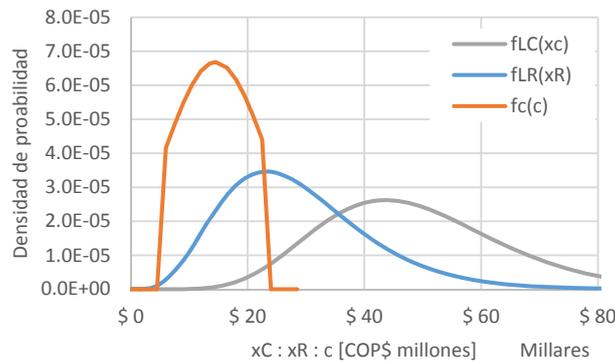
#### 4.1.5.1.1 Edificaciones publicas bajo una estrategia de reforzamiento ajustada

Con el objeto de realizar un análisis beneficio-costo probabilista ajustado a las reales condiciones del grupo de edificaciones públicas de la ciudad, se realiza el análisis que se presenta a continuación donde los resultados del estado reforzado corresponden a las edificaciones que efectivamente son sujetas de reforzamiento de acuerdo con los criterios descritos en el algoritmo de la Figura 4-8.

**Tabla 4-9: Resultados del análisis de beneficio - costo para la estrategia de reforzamiento del grupo de edificaciones públicas bajo la estrategia de reforzamiento**

Tasa interés		3.0%	
Costo rehabilitación ( c )		E()	$\sigma()$
		\$ 14,517	\$ 8,740
Variable	Actual	Reforzado	Beneficio
PAE	\$ 1,448	\$ 850	\$ 598
E(L)	\$ 48,866	\$ 28,691	\$ 20,175
VAR(L)	2.54E+08	1.58E+08	
r	9.41	5.21	
$\lambda$	1.93E-04	1.82E-04	
E(B/C)	<b>1.39</b>		
P(B>C)	<b>62.3%</b>		
P(B>c)	<b>60.8%</b>		

El valor esperado de la relación B/C para el grupo de edificaciones públicas bajo la estrategia de reforzamiento es de 1.39 con una probabilidad que los beneficios (reducción en el valor presente neto de pérdidas) sean superior a COP\$ 14,517 millones, lo que corresponde al 61%. De igual manera tomando en cuenta la incertidumbre en los costos de reforzamiento la relación B/C tiene una probabilidad de ser favorable del 62%.



**Figura 4-10: Distribuciones de probabilidad del valor presente neto de pérdidas en los estados actual y reforzado, y distribución de probabilidad de los costos de obras del grupo de edificaciones públicas bajo la estrategia de reforzamiento**

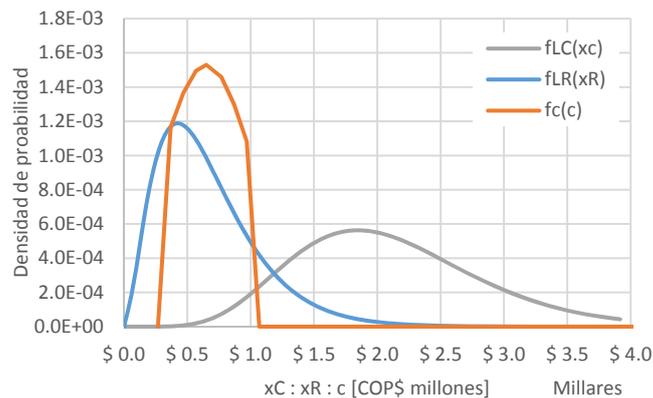
#### 4.1.5.1.2 Grupo de edificaciones de servicios de salud

Realizado el análisis beneficio-costos probabilista sobre la totalidad de edificaciones públicas, es de interés realizar el mismo análisis para el sub grupo de edificaciones de servicios de salud. A continuación se presentan dichos resultados bajo la estrategia de reforzamiento realizada también bajo los criterios del algoritmo de la Figura 4-8.

**Tabla 4-10: Resultados del análisis de beneficio – costo para la estrategia de reforzamiento del grupo de edificaciones públicas de salud**

Tasa interés		3.0%	
Costo rehabilitación ( c )		E()	$\sigma()$
		\$ 651	\$ 382
Variable	Actual	Reforzado	Beneficio
PAE	\$ 63	\$ 20	\$ 43
E(L)	\$ 2,112	\$ 666	\$ 1,447
VAR(L)	5.60E+05	1.61E+05	
r	7.96	2.75	
$\lambda$	3.77E-03	4.13E-03	
E(B/C)	<b>2.22</b>		
P(B>C)	<b>77.4%</b>		
P(B>c)	<b>83.5%</b>		

El valor esperado de la relación B/C para el grupo de edificaciones de servicios de salud bajo la estrategia de reforzamiento es de 2.22 con una probabilidad de que los beneficios (reducción en el valor presente neto de pérdidas) sean superiores a COP\$ 651 millones del 83%, mientras que la probabilidad de la relación B/C tomando en cuenta la incertidumbre en los costos de reforzamiento es de 77%.



**Figura 4-11: Distribuciones de probabilidad del valor presente neto de pérdidas en los estados actual y reforzado, y distribución de probabilidad de los costos de reforzamiento del grupo de edificaciones públicas de salud**

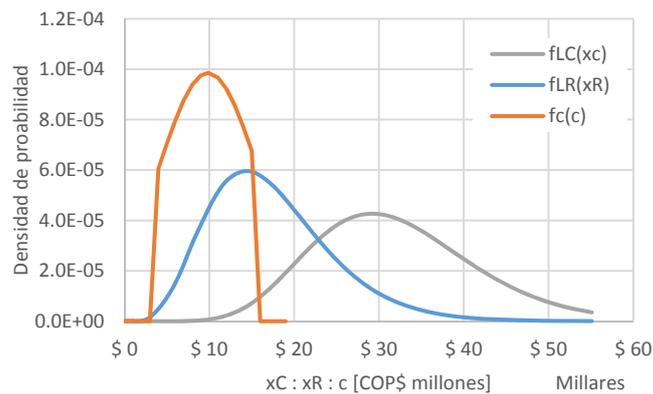
4.1.5.1.3 Grupo de edificaciones de servicios educativos

Al igual que para el grupo de edificaciones de servicios de salud es de especial interés realizar el análisis beneficio-costo probabilista sobre el sub grupo de edificaciones de servicios educativos. A continuación se presentan dichos resultados bajo la estrategia de reforzamiento realizada bajo los criterios del algoritmo de la Figura 4-8.

**Tabla 4-11: Resultados del análisis de beneficio – costo para la estrategia de reforzamiento del grupo de edificaciones públicas de educación**

Tasa interés		3.0%	
Costo rehabilitación ( c )		E()	$\sigma()$
		\$ 9,854	\$ 5,930
Variable	Actual	Reforzado	Beneficio
PAE	\$ 952	\$ 513	\$ 438
E(L)	\$ 32,150	\$ 17,330	\$ 14,820
VAR(L)	9.45E+07	5.24E+07	
r	10.94	5.73	
$\lambda$	3.40E-04	3.31E-04	
E(B/C)	<b>1.50</b>		
P(B>C)	<b>66.6%</b>		
P(B>c)	<b>65.8%</b>		

El valor esperado de la relación B/C para el grupo de edificaciones públicas de servicios educativos bajo la estrategia de reforzamiento es de 1.5 con una probabilidad que los beneficios (reducción en el valor presente neto de pérdidas) sean superiores a COP\$ 9,854 millones del 65.8%, y tomando en cuenta la incertidumbre en los costos de reforzamiento la relación B/C se tiene una probabilidad de ser favorable del 66%.



**Figura 4-12: Distribuciones de probabilidad del valor presente neto de pérdidas en los estados actual y reforzado, y distribución de probabilidad de los costos de reforzamiento del grupo de edificaciones públicas de educación**

#### 4.1.5.2 Discusión

El motivo de realizar un análisis beneficio-costo probabilista para un escenario en donde el total de las edificaciones del grupo de análisis es objeto de reforzamiento sísmico es para puntualizar sobre la importancia de ajustar una estrategia de implementación bajo las ideas que el riesgo no es completamente evitable (Kaplan & Garrick, 1981), que el riesgo está concentrado en una porción no muy alta de la población (en este caso edificaciones), principio de Pareto, y en la asignación óptima de recursos.

Observando las formas de las funciones de distribución de probabilidad de  $L$  para las edificaciones en el estado reforzado, se estiman con concentraciones de densidad de probabilidad mayor alrededor del valor esperado frente al de las edificaciones en el estado actual, algo que es posible pues es la razón de implementar unas medidas de mitigación del riesgo, como la del reforzamiento sísmico de estructuras, para reducir las consecuencias y lograr así un mejor desempeño.

De las distribuciones de probabilidad del costo de las obras de reforzamiento se resalta la concentración de probabilidad de dichos valores sin largas colas de densidad en valores altos o muy bajos; algo lógico en la práctica y principal razón expuesta en la metodología de evaluación del análisis beneficio-costo probabilista completo para la selección de una función de densidad de probabilidad de la forma normal truncada.

**Tabla 4-12: Resumen de resultados del caso de estudio.**

	Tasa	Actual		Reforzado		Beneficio - Costo			
		PAE	E(L)	PAE	E(L)	$\Delta$ PAE	$\Delta$ L	B/C	P(B>C)
<b>Públicos</b>	3.0%	\$ 1,448.4	\$ 48,866.0	\$ 850.3	\$ 28,691.4	\$ 598.2	\$ 20,174.5	<b>1.39</b>	<b>62.3%</b>
<b>Salud</b>	3.0%	\$ 62.6	\$ 2,112.4	\$ 19.7	\$ 665.6	\$ 42.8	\$ 1,446.7	<b>2.22</b>	<b>77.4%</b>
<b>Educación</b>	3.0%	\$ 951.6	\$ 32,150.0	\$ 513.4	\$ 17,329.8	\$ 438.3	\$ 14,820.2	<b>1.50</b>	<b>66.6%</b>

La Tabla 4-12 presenta el resumen de resultados de los grupos de edificaciones del análisis para los dos estados; actual, sin la implementación de las medidas de mitigación del riesgo; y reforzado, una vez implementadas las obras de reforzamiento sísmico de las estructuras como medidas de mitigación del riesgo. De entre los resultados que se resumen se encuentran la pérdida anual esperada PAE del grupo de edificaciones, el VPN de pérdidas futuras; la diferencia en PAE y VPN ; y el valor esperado de B/C y probabilidad de B>C.

Se observa que de los grupos de edificaciones en donde la relación B/C es más favorable en el caso de las de servicios de salud, pues el ahorro en pérdidas dobla los costos de las obras de reforzamiento y en donde la probabilidad que los posibles beneficios obtenidos por la rehabilitación sísmica superen los costos de las obras de reforzamiento es la mayor.

Análisis de este tipo deben realizarse en la elaboración de estudios de beneficio-costos con el fin de desagregar los resultados, para ajustar las medidas de mitigación del riesgo y enmarcar las obras dentro de las limitaciones presupuestales y de información disponible. El análisis aquí realizado corresponde exclusivamente a la primera aproximación en la toma de decisiones para la implementación de medidas de mitigación del riesgo, de aquí se debe derivar la decisión de mejorar la información de las 15 edificaciones del grupo y realizar los estudios de vulnerabilidad para determinar la real viabilidad de las obras, no sólo en términos de la reducción de los daños a la edificación sino en términos de la interrupción y traslado de servicios y en el mejor prestación final de los mismos a la población.

#### 4.1.5.2.1 Beneficios indirectos

Con el ánimo de incluir en la evaluación de beneficio-costos la afectación en la población y el efecto de las víctimas por causa de sismos, se pretende realizar una evaluación semejante del costo de las vidas salvadas por la implementación de la medida de mitigación, sólo con el objeto de incluir dicha afectación en la evaluación económica del beneficio-costos como se ha realizado en este documento. Esta evaluación no pretende asignar un valor a la vida humana, un tema por cierto bastante controversial, sino continuar con el análisis de beneficio-costos bajo las mismas unidades.

La Organización Mundial de la Salud ha adoptado una métrica denominada DALY (Disability-Adjusted Life Year) que hace referencia a los años perdidos de una vida humana sana, y se calcula por la composición de los años perdidos por muerte prematura YLL (Years of Life Lost) y años perdidos por una discapacidad física o mental YLD (Years Lost due to Disability).

En este referente Salgado et al. (2015) proponen una metodología para realizar una evaluación de la pérdida de productividad anual por muertes prematuras a causa de sismos en las bases del YLL y que es aplicada aquí para incluir el beneficio de salvar vidas por la implementación de las medidas de mitigación de riesgo, como el beneficio de productividad adquirido por las muertes prematuras evitadas.

Para tal fin es necesario calcular las víctimas anuales esperadas de la ocupación de las edificaciones tanto para estado actual como para el reforzado y de allí determinar el número anual de víctimas evitadas por la implementación de las obras de reforzamiento sísmico. La Tabla 4-13 presenta los resultados obtenidos para el caso de estudio de población en edificaciones públicas de la ciudad de Manizales bajo la metodología planteada en la publicación citada, solo cambiando la variable que hace referencia a la esperanza de vida por el valor de la edad de pensión basado en la idea que la población es económicamente activa hasta la edad de jubilación y no hasta la esperanza de vida.

**Tabla 4-13: Víctimas anuales esperadas**

Grupos	Víctimas anuales esperadas		
	Actual	Reforzado	$\Delta$
<b>Públicos</b>	6.6	3.96	2.64
<b>Educación</b>	5.2	3.15	2.05
<b>Salud</b>	0.22	0.08	0.14

Obtenidos los resultados de víctimas anuales esperadas para los grupos de edificaciones del análisis se desarrolló la estimación de la pérdida anual de producción PAP según la metodología adoptada y cuyos resultados se presentan en el 0 bajo el respectivo título. Dichos resultados son tenidos en cuenta en el análisis B/C como un rubro adicional a los beneficios obtenidos por la reducción del VPN de pérdidas, sumándolos directamente. Es de anotar que la suma directa de este valor no es un ejercicio riguroso al sumar VPNs con valores anualizados, pero el análisis se puede realizar con fines ilustrativos teniendo en cuenta el origen de los valores.

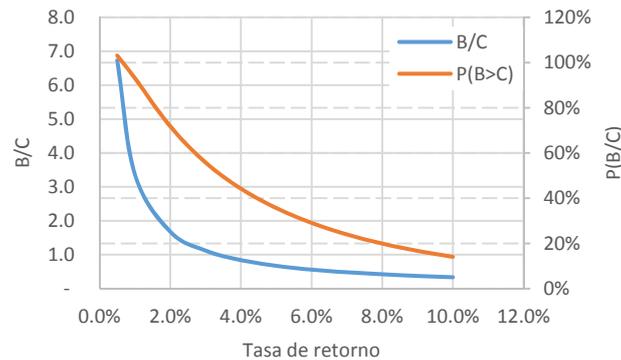
**Tabla 4-14: Resultados de la relación B/C incluyendo PAP**

		Grupos		
		Públicos	Salud	Educación
<b>Directos</b>	<b>Beneficio</b>	\$ 20,175	\$ 1,447	\$ 14,820
	<b>B/C</b>	<b>1.39</b>	<b>2.22</b>	<b>1.50</b>
<b>Directos + PAP</b>	<b>Beneficio</b>	\$ 20,880	\$ 1,484	\$ 15,769
	<b>B/C</b>	<b>1.44</b>	<b>2.28</b>	<b>1.60</b>

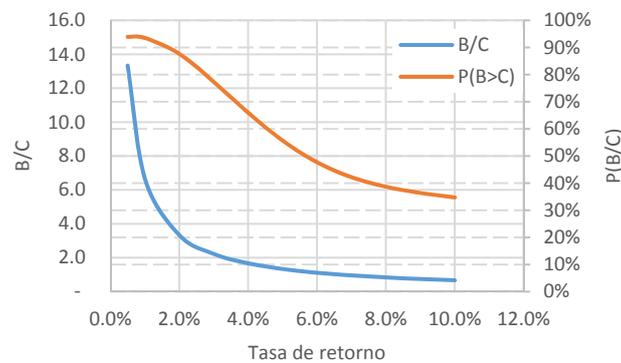
Para realizar el ejercicio anterior de forma rigurosa, sería necesario desarrollar un expresión bajo el concepto de la expresión (9) usada por Ordaz para derivar la distribución de probabilidad de L, que dé cuenta del VPN de pérdida de productividad por muertes prematuras por la ocurrencia de eventos sísmicos, tema que sobre pasa el alcance del presente trabajo y ha de ser objeto de futuros desarrollos.

Por otro lado, conviene investigar sobre el comportamiento del B/C y probabilidad que los beneficios excedan los costos bajo la variable de la tasa de retorno para convertir las perdidas futuras en VPN. LA simulación se realizó para los tres

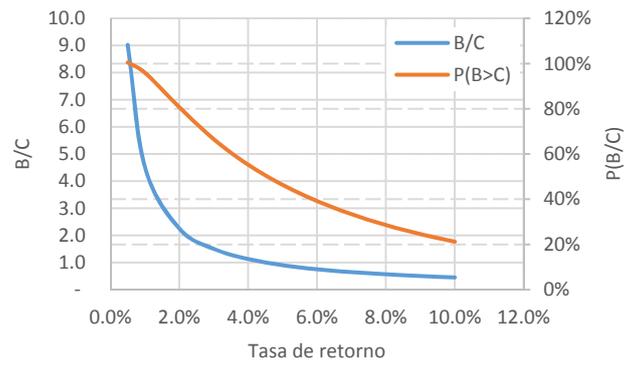
grupos del análisis con tasas desde 0.5% hasta 10%, de donde se observa la relación inversamente proporcional entre las variables y la no linealidad alta para valores inferiores de tasa del 4% desde donde la relación B/C es atractiva. Sólo en el caso del grupo de edificaciones de servicios de salud la tasa a partir de la cual el valor de B/C es favorable es un poco más alta, 6%. El comportamiento de B/C y  $P(B>C)$  se presentan en las siguientes figuras para los tres grupos de edificaciones.



**Figura 4-13: Distribución de la relación B/C y probabilidad de B>C con el cambio en la tasa de retorno para las edificaciones públicas**



**Figura 4-14: Distribución de la relación B/C y probabilidad de B>C con el cambio en la tasa de retorno para las edificaciones de servicios de salud**



**Figura 4-15: Distribución de la relación B/C y probabilidad de  $B > C$  con el cambio en la tasa de retorno para las edificaciones de servicios educativos**

## 5 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La primera duda que se presenta usualmente en la implementación de medidas de mitigación del riesgo es si dichas medidas alcanzaran el objetivo planteado y cómo traducir dichos objetivos en términos monetarios para compararlos con respecto de los recursos necesarios para implementar dichas medidas. Por otra parte, si no se cuenta con los recursos, cuánto riesgo se puede reducir con los recursos disponibles; además, de si el riesgo reducido es suficiente.

Para responder a la duda fundamental (beneficio vs costo) es necesario realizar comparaciones y análisis de equilibrio, en este caso la evaluación de la relación beneficio-costos B/C. Para tal objetivo en los últimos años se han desarrollado metodologías como el análisis por desempeño que no sólo responden a la duda fundamental si no que contribuyen al mejor entendimiento del problema, por permitir identificar el aporte de las múltiples variables que intervienen en el problema, tanto en la evaluación de la amenaza sísmica (localización de eventos, magnitud, frecuencia, amplificación de los suelos), la evaluación del comportamiento de estructuras (propiedades de materiales, sistemas de resistencia sísmica, técnicas de reforzamiento, nivel de desempeño) y la evaluación de pérdidas (humanas, y de capital) bajo diferentes escenarios económicos (tasas de retorno, tiempos de exposición) y sociales (servicios esenciales, erario público, desarrollo social).

Dichas metodologías no sólo tratan con los valores esperados de las variables de interés sino que se preocupan también de la incertidumbre asociada a dichas variables, asunto que permite tomar decisiones con mayor información y da cuenta de la medida de ignorancia frente a los temas que intervienen en la evaluación de opciones para responder a la relación B/C. Derivado de lo anterior, surge entonces también la necesidad de ahondar en múltiples áreas del conocimiento como por ejemplo en el desarrollo de mejores funciones de atenuación sísmica, estudio de los efectos locales en la amplificación de ondas sísmicas, evaluación de pérdidas directas e indirectas en las estructuras, contenidos y consecuencias en la interrupción de servicios, y la evaluación de costos de la implementación de técnicas de reforzamiento sísmico.

Con el objeto de extender la evaluación de B/C en el marco de la confiabilidad y tratamiento de incertidumbres, se expuso aquí una metodología de acuerdo con estos lineamientos que es ajustable a la información disponible de los elementos expuestos y parte de los principales resultados del análisis probabilista del riesgo, llevándolos a un lenguaje de común difusión y mejor comunicación para los tomadores de decisiones y los analistas en general, sin la necesidad de entrar en conocimientos específicos para la revisión y análisis de los resultados obtenidos.

La metodología aquí planteada es fruto de un trabajo realizado durante los últimos años por el autor, en el área de la evaluación de riesgo por amenazas naturales junto con la contribución y discernimiento con sus pares y colegas en múltiples

proyectos de análisis probabilista del riesgo en Colombia (DNP, ACCI, Banco Mundial, 2004; Mora et al., 2014; ODCA - ITEC, 2008; Uniandes - CEDERI, 2004, 2005a, 2005b, 2005b; Uniandes - CEDERI/CIACUA, 2006; Yamin et al., 2013), Latinoamérica (BID, 2005; O. D. Cardona et al., 2010; ERN-AL, 2006a; Mora & Valcárcel, 2011; Valcárcel et al., 2013) y alrededor del mundo (O.-D. Cardona et al., 2014; De Bono & Mora, 2014; UNISDR, 2011, 2013, 2015).

En el desarrollo de la metodología y aplicación del caso de estudio se realizaron análisis de sensibilidad de algunas variables, como la tasa de descuento, incidencia de los costos de implementación de las medidas de mitigación del riesgo, técnicas de reforzamiento; y modelos de distribución de probabilidad de los costos de las obras de reforzamiento.

Se destacan del análisis de sensibilidad la alta influencia de las bajas tasas de retorno para relaciones B/C muy favorables, resultado esperado, pero sin duda revelador en cuanto al comportamiento no lineal de la relación de estas dos variables.

En relación con la incidencia de los costos de implementación de las medidas de mitigación del riesgo y la reducción de pérdidas se confirma que no habrá medidas de mitigación del riesgo suficientes para reducir al riesgo de forma significativa bajo la premisa de que el riesgo siempre existe y es prácticamente imposible su eliminación (Kaplan & Garrick, 1981), pero que si existe un rango de exigencia de desempeño (técnicas de reforzamiento, seleccionar entre niveles de riesgo) en el cual el riesgo si puede ser reducido efectivamente con costos no excesivamente altos que resulten en relaciones B/C atractivas.

Otro concepto importante en la distribución de probabilidades de los costos de la implementación de las medidas de mitigación del riesgo, describiendo el grado de incertidumbre alrededor de dicha variable y su incidencia en el modelo y evaluación del B/C probabilista. Se destacó del análisis como al concentrarse la distribución de probabilidad de los costos se aumentan las probabilidades que estos sean excedidos por los beneficios obtenidos. Al final, se observó que al usar una distribución acotada resulta ser lo más razonable dada la naturaleza de la variable que se representa, pues los recursos económicos siempre son limitados y los costos nunca serán inferiores a los valores estimados, más bien la tendencia es siempre a que sean superiores.

La aplicación del análisis beneficio-costos probabilista completo aquí desarrollado está limitado a la información disponible y la incertidumbre derivada de los costos de reforzamiento sísmico de edificaciones en el territorio colombiano y por tanto los resultados y realizaciones de este tipo de análisis pueden ser objeto de mejora

si son implementados con mejor información de las características (técnica y cantidades de obra) de las obras de reforzamiento sísmico y su costos directos derivados e indirectos de las obras por las técnicas de reforzamiento a implementar y cantidades de obra.

De igual forma en la aplicación del análisis beneficio-costo probabilista completo aquí realizada, para la estimación del VPN de pérdidas sólo se tiene en cuenta las pérdidas directas en las edificaciones sin tomar en cuenta las pérdidas en contenidos ni interrupción de las actividades, rubro que suma directamente en el numerador de la relación B/C contribuyendo a esta favorablemente y contribuyendo a la implementación de la medida de mitigación de riesgo. La inclusión de la interrupción de actividades es un camino por recorrer y de importancia en la evaluación de medidas de mitigación del riesgo, tanto en edificaciones de grupos de ocupación primordial como en el sector privado e industrial, pues es la principal razón para el funcionamiento de dichas edificaciones.

La metodología aquí desarrollada si bien fue aplicada en edificios regulares (vivienda, educación, salud), enfocada a la toma de decisiones sobre si reforzar o no reforzar las edificaciones objeto del análisis. Es igualmente aplicable tanto a las mismas edificaciones frente a otras amenazas naturales (inundación, deslizamiento, vientos huracanados, caída de cenizas, etc), como a obras de infraestructura vial (vías y puentes), tratamiento, almacenamiento y distribución de agua (cuerpos de presas, tanques, tuberías), y obras de control de amenaza (diques, presas, boxculvert).

## **5.1 Estudios futuros**

Trabajos posteriores de investigación alrededor de la evaluación del beneficio-costo de obras de reforzamiento sísmico de edificaciones serían muy útiles en los siguientes aspectos:

### **5.1.1 Base de datos de costos de reforzamiento**

En el presente trabajo la evaluación de los costos de obras de reforzamiento fueron obtenidos por la conjunción de múltiples tipologías arquitectónicas y tipologías estructurales. Actualmente no se dispone de suficiente información de costos de implementación de las diferentes técnicas de reforzamiento sísmico, al menos como un ejercicio de escritorio como el aquí desarrollado y que se incluye en el Anexo 1. Un trabajo futuro de gran utilidad comprendería el desarrollo de una base de datos o compilación de costos de proyectos de reforzamiento sísmico para la

región de América Latina y para Colombia. En dicha compilación debe contar con información desagregada pero no limitada a variables como precios por metro cuadrado (\$/m<sup>2</sup>), análisis de precios unitarios, sistemas estructurales, número de pisos, años de construcción inicial, criterios de diseño inicial y nivel de desempeño esperado, similar al trabajo realizado para el informe de “Costos típicos de rehabilitación sísmica de edificios existentes” (FEMA, 1994), donde además de recoger información de costos propone una metodología y estructura de recolección de datos.

### **5.1.2 Pérdidas y costos consecuenciales**

En la realización del análisis beneficio-costos probabilista completo la evaluación de los beneficios objeto de este trabajo se enfocó principalmente en la evaluación de los beneficios directos sobre la estructura derivados de la reducción de pérdidas directas en la misma. Un avance importante en la evaluación de los beneficios obtenidos por la implementación de medidas de mitigación del riesgo comprendería la evaluación de beneficios indirectos derivados de la no interrupción de actividades, pérdida de productividad e interrupción de la vida. De igual manera múltiples variables adicionales pueden ser incluidas dentro de la evaluación de beneficios y costos derivados de la implementación de obras de reforzamiento como, costos de administración de obra y permisos de intervención, reducción de pérdidas en contenidos (muebles y equipo), reducción del valor de primas de aseguramiento.

## 6 PUBLICACIONES Y PROYECTOS

### 6.1 Artículos en revistas indexadas

Mora, M., Valcárcel, J., Cardona, O., Pujades, L., Barbat, A., & Bernal, G. (2014). Prioritizing interventions to reduce seismic vulnerability in school facilities in Colombia. *Earthquake Spectra*. <http://doi.org/10.1193/040412EQS151T>

Velásquez, C. A., Cardona, O. D., Mora, M. G., Yamin, L. E., Carreño, M. L., & Barbat, A. H. (2014). Hybrid loss exceedance curve (HLEC) for disaster risk assessment. *Natural Hazards*, 72(2), 455-479. <http://doi.org/10.1007/s11069-013-1017-z>

Salgado-Gálvez, M. A., Zuloaga-Romero, D., Bernal, G. A., Mora, M. G., & Cardona, O.-D. (2013). Fully probabilistic seismic risk assessment considering local site effects for the portfolio of buildings in Medellín, Colombia. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-25. <http://doi.org/10.1007/s10518-013-9550-4>

Valcárcel, J. A., Mora, M. G., Cardona, O. D., Pujades, L. G., Barbat, A. H., & Bernal, G. A. (2013). Methodology and applications for the benefit cost analysis of the seismic risk reduction in building portfolios at broadscale. *Natural Hazards*, 69(1), 845-868. <http://doi.org/10.1007/s11069-013-0739-2>

Cardona, O.-D., Ordaz, M. G., Mora, M. G., Salgado-Gálvez, M. A., Bernal, G. A., Zuloaga-Romero, D., González, D. (2014). Global risk assessment: A fully probabilistic seismic and tropical cyclone wind risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. <http://doi.org/10.1016/j.ijdr.2014.05.006>

De Bono, A., & Mora, M. (2014). A global exposure model for disaster risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10, Part B, 442-451. <http://doi.org/10.1016/j.ijdr.2014.05.008>

## 6.2 Otras revistas

Marulanda, M. C., Cardona, O. D., Mora, M. G., & Barbat, A. H. (2011). Diseño e implementación del seguro de riesgo sísmico para cubrir los edificios privados a través de una estrategia de subsidio cruzado. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 16(2). Recuperado a partir de <http://www3.espe.edu.ec:8700/handle/21000/4546>

Valcárcel, J. A., Pujades, L. G., Barbat, A. H., Mora, M. G., & Cardona, O. D. (2011). Evaluación Integrada de la seguridad de Hospitales: Implicaciones en la resiliencia de las comunidades. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 16(1). Recuperado a partir de <http://www3.espe.edu.ec:8700/handle/21000/2988>

## 6.3 Contribución en libros

Yamin, L. E., Ghesquiere, F., Cardona, O. D., & Ordaz, M. G. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre: El caso de Bogotá, Colombia*. Bogotá, Colombia: Banco Mundial & Universidad de los Andes.

## 6.4 Ponencias

Mora, M., Ordaz, M., Yamin, L., & Cardona, O. (2011). Relaciones beneficio costo probabilistas de rehabilitación sísmica. Presentado en 4° Congreso nacional de ingeniería sísmica, Granada, España.

Mora, M., & Valcárcel, J. (2011). Análisis beneficio-costos en las escuelas de la región andina de América del Sur y América Central. Presentado en V Congreso nacional de ingeniería sísmica, Medellín, Colombia.

Salgado, M., Bernal, G., Mora, M., Zuloaga, D., & Cardona, O. D. (2013). Probabilistic seismic risk analysis considering local sites effects of Medellín, Colombia. En *International Conference on Earthquake Engineering Proceedings*. Skopje, Republic of Macedonia.

Valcárcel, J. A., Bernal, G. A., & Mora, M. G. (2012). Lorca earthquake May 11 2011: a comparison between disaster figures and risk assessment outcomes. Presentado en 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon.

Velásquez, C. A., Mora, M. G., González, D. M., Yamin, L. E., & Cardona, O. D. (2011). Metodología para el levantamiento de información básica de exposición para la evaluación del riesgo sísmico. Presentado en V Congreso nacional de ingeniería sísmica, Medellín, Colombia.

## 6.5 Participación en proyectos

De igual manera el autor agradece a los proyectos e instituciones a continuación por la contribución de información y herramientas para lograr los objetivos de este aporte:

- Instituto de Estudios Ambientales – IDEA, Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, Manizales Colombia.
- Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS, Manizales, Colombia.
- The United Nations Office for Disaster Risk Reduction – UNISDR
- UNISDR. (2015). Making development sustainable: The future of disaster risk management. Geneva, Switzerland: United Nations Office For Disaster Risk Reduction (UNISDR)).
- UNISDR. (2013). From Shared Risk to Shared Value: the Business Case for Disaster Risk Reduction. Geneva, Switzerland: United Nations Office For Disaster Risk Reduction (UNISDR)).
- UNISDR. (2011). Revealing Risk, Redefining Development. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR)).



## 7 REFERENCIAS

- Alcaldía de Manizales, OMPAD. (2008). *Sistema de información sísmica de Manizales – laboratorio de instrumentación sísmica automática SISMan LISA*. Manizales: IDEA - Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales.
- ATC. (1985). *Earthquake Damage Evaluation. Data for California*. Redwood City, CA.: Applied Technology Council.
- ATC. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Redwood City, CA.: Applied Technology Council.
- Ayyub, B. M. (2003). *Risk analysis in engineering and economics*. Chapman & Hall/CRC.
- Bertero, V. V., Anderson, J. C., Krawinkler, H., & Miranda, E. (1991). *Design guidelines for ductility and drift limits: review of state-of-the-practice and state-of-the-art in ductility and drift-based earthquake-resistant design of buildings* (No. UCB/EERC-91/15) (p. 146). Berkeley, CA: Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- BID. (2005). *Sistema de indicadores para la gestión del riesgo de desastre* (p. 223). Manizales, Colombia: IDEA - Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales.
- Blank, L. T. (1991). *Ingeniería Económica* (3<sup>a</sup> ed). Bogota: McGraw-Hill.
- Camerer, C. F., & Kunreuther, H. (1989). Decision Processes for Low Probability Events: Policy Implications. *Journal of Policy Analysis and Management*, 8(4), 565-592. <http://doi.org/10.2307/3325045>
- Campbell, H. F., & Brown, R. P. C. (2005). A multiple account framework for cost-benefit analysis. *Evaluation and Program Planning*, 28(1), 23-32. <http://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2004.05.001>
- Cardona, O.-D., Ordaz, M. G., Mora, M. G., Salgado-Gálvez, M. A., Bernal, G. A., Zuloaga-Romero, D., ... González, D. (2014). Global risk assessment: A fully probabilistic seismic and tropical cyclone wind risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. <http://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.05.006>
- Cardona, O. D., Ordaz, M. G., Reinoso, E., Yamin, L. E., & Barbat, A. H. (2010). Comprehensive approach for probabilistic risk assessment (CAPRA): International Initiative for disaster risk management effectiveness. Presentado en 14th ECEE, Ohrid, Macedonia.
- Cardona, O. D., Ordaz, M. G., Yamin, L. E., Arámbula, S., Marulanda, M. C., & Barbat, A. H. (2008). Probabilistic seismic risk assessment for comprehensive risk management: modeling for innovative risk transfer and loss financing mechanisms. Presentado en 14 WCEE, Beijing, China.
- Claycamp, H. G. (2006). Rapid Benefit-Risk Assessments: No Escape from Expert Judgments in Risk Management. *Risk Analysis*, 26(1), 147-156. <http://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2006.00724.x>

- Comité AIS-300. (2009, septiembre). Estudio general de amenaza sísmica de Colombia 2009. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583-1606.
- Cusgüen Garzón, G. C., & Orrantía Herrera, A. (2006). *Vivienda avenida comuneros*. Bogotá : Uniandes, 2006.
- De Bono, A., & Chatenoux, B. (2014). *A global exposure model for GAR 15* (Input paper prepared for the Global Assessment Report on disaster risk reduction 2015). Geneva, Switzerland: UNEP/DEWA/GRID-Geneva.
- De Bono, A., & Mora, M. (2014). A global exposure model for disaster risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10, Part B, 442-451. <http://doi.org/10.1016/j.ijdr.2014.05.008>
- DNP, ACCI, Banco Mundial. (2004). *Base de datos de inmuebles públicos localizados en la ciudad de Manizales para efectos de análisis de riesgo* (Diseño de esquemas de transferencia de riesgo para la protección financiera de edificaciones públicas y privadas en manizales en el caso de desastres por eventos naturales). Bogotá, Colombia: ERN - Manizales.
- Erdik, M., Sesetyan, K., Demircioglu, M. B., Hancilar, U., & Zulfikar, C. (2010). Rapid Earthquake Loss Assessment After Damaging Earthquakes. En M. Garevski, A. Ansal, & A. Ansal (Eds.), *Earthquake Engineering in Europe* (Vol. 17, pp. 523-547). Springer Netherlands.
- ERN-AL. (2006a). *Análisis beneficio-costo de la mitigación del riesgo sísmico en edificaciones públicas de Costa Rica* (Informe Técnico No. ERN-CAPRA-T2-17). Bogotá, Colombia: CEPREDECAN-EIRD-BM.
- ERN-AL. (2006b). *Metodología de Análisis Probabilista de Riesgos* (Consultoría No. ERN-CAPRA-T3-2). Bogotá, Colombia: CEPREDECAN-EIRD-BM.
- ERN-AL. (2011). *Probabilistic modelling of disaster risk at global level: Development of a methodology and implementation of case studies. Phase 1A: Colombia, Mexico, Nepal*. Bogotá, Colombia.
- Fajfar, P. (1999). Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 28(9), 979–993. [http://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199909\)28:9<979::AID-EQE850>3.0.CO;2-1](http://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199909)28:9<979::AID-EQE850>3.0.CO;2-1)
- FEMA. (1994). *Typical Costs for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Volume 1, Second Edition* (Summary No. 156). Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency. Recuperado a partir de <https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/2905>
- FEMA. (1995). *Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings. Part 1 - Provisions* (No. 222A). Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (1997a). *NEHRP Commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings* (No. 274). Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.

- FEMA. (1997b). *NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings* (No. 273). Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (1997c). *NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures* (No. 302). Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (1997d). *Report on costs and benefits of natural hazard mitigation* (No. 294) (p. 50). Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2000a). *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*. (No. 368). Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2000b). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings* (No. 356). Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2003). *NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures* (No. 450). Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2004). *HAZUS-MH MR3 - Multi-hazard Loss Estimation Methodology* (Technical Manual). Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures* (No. 440). Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2006). *Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings* (No. 547). Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2010). *Design Guide for Improving School Safety in Earthquakes, Floods, and High Winds (2010)* (No. 424). Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency. Recuperado a partir de <http://www.fema.gov/media-library/assets/documents/5264>
- Field, E. (2005). *Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA): A primer*. Recuperado a partir de [http://www.opensha.org/sites/opensha.org/files/PSHA\\_Primer\\_v2\\_0.pdf](http://www.opensha.org/sites/opensha.org/files/PSHA_Primer_v2_0.pdf)
- Framer, F. (1967). Containment and siting of nuclear power plants. Intl Atomic Energy Agency.
- Gamba, P., Jaiswal, K., Crowley, H., & Huyck, C. (2012). The GED4GEM project: development of a global exposure database for the global earthquake model initiative. Presentado en 15WCEE, Lisbon, Portugal.
- Ganderton, P. T. (2002). *Benefit-Cost Analysis of Disaster Mitigation: A Review*. Albuquerque NM.
- García, L. E. (2000). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- Grossi, P. A. (1999). *Assessing the Benefits and Costs of Earthquake Mitigation*. Wharton School Center for Financial Institutions, University of Pennsylvania. Recuperado a partir de <http://ideas.repec.org/p/wop/pennin/99-24.html>
- Grünthal, G. (1998). European Macroseismic Scale 1998. *cahiers du centre européen de géodynamique et de séismologie*, 15, 99.

- Gutenberg, B., & Richter, C. (1941). Seismicity of the Earth. En *Geological Society of America Special Papers* (Vol. 34, pp. 1-126). Geological Society of America. Recuperado a partir de <http://specialpapers.gsapubs.org/lookup/doi/10.1130/SPE34-p1>
- Gutenberg, B., & Richter, C. (1954). *Seismicity of the earth and associated phenomena*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Hancilar, U., Tuzun, C., Yenidogan, C., & Erdik, M. (2010). ELER software – a new tool for urban earthquake loss assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10(12), 2677-2696. <http://doi.org/10.5194/nhess-10-2677-2010>
- Jaiswal, K., Wald, D., & Porter, K. (2010). A Global Building Inventory for Earthquake Loss Estimation and Risk Management. *Earthquake Spectra*, 26(3), 731. <http://doi.org/10.1193/1.3450316>
- Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On The Quantitative Definition of Risk. *Risk Analysis*, 1(1), 11-27. <http://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x>
- Kleindorfer, P. R., & Kunreuther, H. (1999). The Complementary Roles of Mitigation and Insurance in Managing Catastrophic Risks. *Risk Analysis*, 19(4), 727-738. <http://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1999.tb00442.x>
- Kull, D., Mechler, R., & Hochrainer-Stigler, S. (2013). Probabilistic cost-benefit analysis of disaster risk management in a development context. *Disasters*, 37(3), 374-400. <http://doi.org/10.1111/disa.12002>
- Kunreuther, H., Cyr, C., Grossi, P., & Tao, W. (2001, abril). Using Cost-Benefit Analysis to Evaluate Mitigation Measures for Lifelines. *Risk Management and Decision Processes Center - The Wharton School of the University of Pennsylvania*, 15.
- Lagomarsino, S., & Giovinazzi, S. (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 415-443. <http://doi.org/10.1007/s10518-006-9024-z>
- Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P., & Kisslinger, C. (2003). *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology*. Academic Press.
- Lupoi, G., Franchin, P., Lupoi, A., Pinto, P. E., & Calvi, G. M. (2008). *Probabilistic seismic assessment for hospitals and complex-social systems*. Pavia, Italy: ROSE School, IUSS Press.
- Mechler, R. (2005). *Cost-Benefit Analysis of Natural Disaster Risk Management in Developing and Emerging Countries* (Final Report) (p. 84). Eschborn, Germany: Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit (GTZ). Recuperado a partir de [http://www.iiasa.ac.at/publication/more\\_XQ-04-815.php](http://www.iiasa.ac.at/publication/more_XQ-04-815.php)
- Miranda, E. (1999). Approximate seismic lateral deformation demands on multistory buildings. *J. Struct. Eng.*, 125(4), 417-425.
- Modarres, M. (1999). *Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide*. New York ; Basel: Marcel Dekker.
- Modarres, M. (2006). *Risk analysis in engineering: techniques, tools, and trends*. Taylor & Francis.
- Molina, S., Lang, D. H., & Lindholm, C. D. (2010). SELENA – An open-source tool for

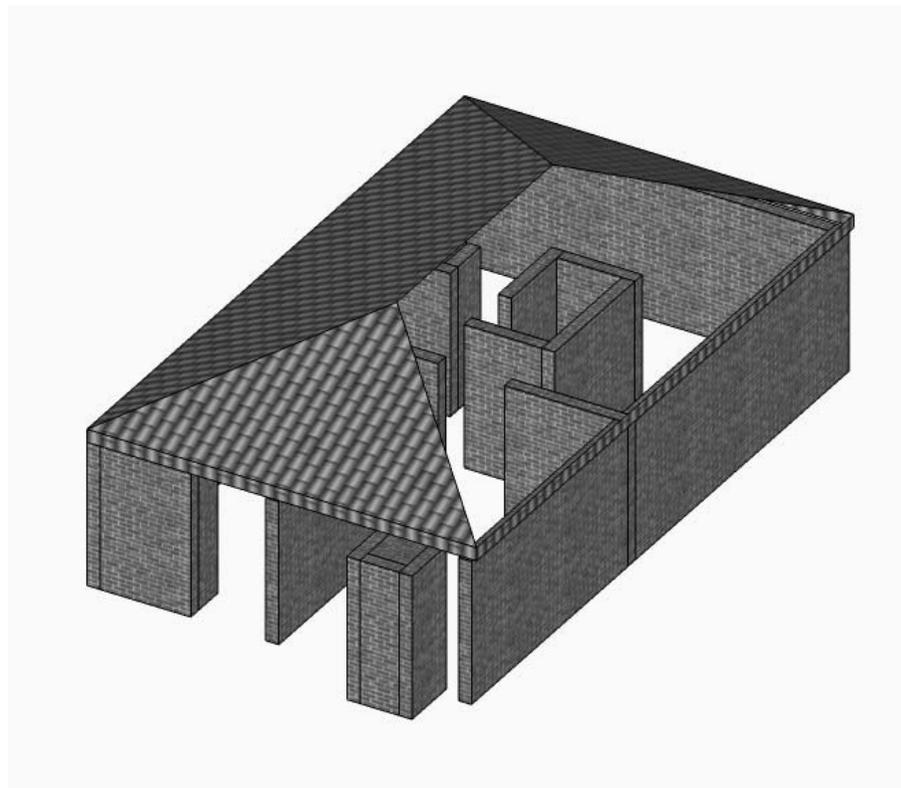
- seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure. *Computers & Geosciences*, 36(3), 257-269. <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.07.006>
- Monsalve Ruiz, A., Pinilla Acevedo, M. F., & Carrera Ruan, F. de la. (2009). *Simbiosis de la vivienda : vivienda económica al occidente la ciudad*. Bogotá : Uniandes, 2009.
- Mora, M. (2005). *Revisión de la información correspondiente a las edificaciones públicas y de atención a la comunidad (ELAC), con fines de reducción de la vulnerabilidad ante desastres naturales*. Bogotá : Uniandes, 2005.
- Mora, M. (2008). *Optimización del diseño y rehabilitación estructural por riesgo sísmico con base en relaciones beneficio-costo* (Tesis maestría). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Mora, M., Ordaz, M., Yamin, L., & Cardona, O. (2011). Relaciones beneficio costo probabilistas de rehabilitación sísmica. Presentado en 4° Congreso nacional de ingeniería sísmica, Granada, España.
- Mora, M., & Valcárcel, J. (2011). Análisis beneficio-costo en las escuelas de la región andina de América del Sur y América Central. Presentado en V Congreso nacional de ingeniería sísmica, Medellín, Colombia.
- Mora, M., Valcárcel, J., Cardona, O., Pujades, L., Barbat, A., & Bernal, G. (2014). Prioritizing interventions to reduce seismic vulnerability in school facilities in Colombia. *Earthquake Spectra*. <http://doi.org/10.1193/040412EQS151T>
- Navarro, J. O. (2005). *Bases técnicas para la estimación de pérdidas con fines de seguros de terremoto*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil, Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres.
- Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1982). *Earthquake Spectra and Design* (Monograph No. 3). Oakland, CA.: EERI.
- ODCA - ITEC. (2008). *Análisis de los mecanismos de aseguramiento de edificaciones privadas para la cobertura de desastres naturales*. Bogotá, Colombia: Secretaría de hacienda distrital.
- Ordaz, M., Aguilar, A., & Arboleda, J. (2007). CRISIS 2007 (Versión 7.6) [Windows]. Mexico, DF: Engineering Institute of the National University of Mexico (UNAM).
- Ordaz, M. G. (2000). *Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros para terremoto*. Nota Técnica, México, DF.
- Ordaz, M. G. (2008). *Desarrollo analítico para el cálculo de la distribución del valor presente de pérdidas futuras*. Comunicación personal, Bogotá, Colombia.
- Pérez Plazas, S. A., & Prieto Osorio, J. M. (2004). *Desarrollo de vivienda popular por autoconstrucción en Colombia : evaluación de procesos constructivos*. Bogotá : Uniandes, 2004.
- Porter, K. A. (2003). An Overview of PEER's Performance- Based Earthquake Engineering Methodology. Presentado en Ninth International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP9), San

- Francisco, CA.
- Priestley, M. J. N. (1997). Displacement-Based Seismic Assessment of Reinforced Concrete Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 1(1), 157-192. <http://doi.org/10.1080/13632469708962365>
- Rasmuseen, N. C. (1975). *Reactor safety study: an assessment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plants* (WASH-1400, NUREG 75/014). Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Rincón Lobo, A. F., & Correal Daza, J. F. J. (2010). *Vulnerabilidad sísmica de viviendas informales*. Bogotá : Uniandes, 2010.
- Salgado, M. A., Bernal, G. A., Barbat, A. H., Carreño, M. L., & Cardona, O.-D. (2015). Probabilistic Estimation of Annual Lost Economic Production Due to Premature Deaths Because of Earthquakes. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 0(ja), 00-00. <http://doi.org/10.1080/10807039.2015.1095072>
- Silva, V., Crowley, H., Pagani, M., Pinho, R., & Monelli, D. (2012). Development and Application of OpenQuake, an Open Source Software for Seismic Risk Assessment. Presentado en 15WCEE, Lisboa, Portugal.
- Smyth, A. W., Altay, G., Deodatis, G., Erdik, M., Franco, G., Güllkan, P., ... Yu`zu`gu`llu`, O. (2004). Probabilistic Benefit-Cost Analysis for Earthquake Damage Mitigation: Evaluating Measures for Apartment Houses in Turkey. *Earthquake Spectra*, 20(1), 171-203. <http://doi.org/10.1193/1.1649937>
- Smyth, A. W., Altay, G., Deodatis, G., Erdik, M., Franco, G., Güllkan, P., ... Yüzügüllü, O. (2004). Probabilistic Benefit-Cost Analysis for Earthquake Damage Mitigation: Evaluating Measures for Apartment Houses in Turkey. *Earthquake Spectra*, 20, 171. <http://doi.org/10.1193/1.1649937>
- So, E. (2014). *Introduction to the GEM Earthquake Consequences Database GEMECD* (GEM Technical report No. 2014-14 V1.0.0) (p. 158). Pavia, Italy.
- Sözen, M. A. (1997). Drift-Driven Design for Earthquake Resistance of Reinforced Concrete. Presentado en EERC-CUREe Symposium in Honor of Vitelmo V. Bertero, Berkeley, CA: University of California.
- Sugden, R., & Williams, A. H. (1978). *The principles of practical cost-benefit analysis*. Oxford University Press.
- Trendafiloski, G., Wyss, M., & Rosset, P. (2009). Loss Estimation Module in the Second Generation Software QLARM. Presentado en 2nd International Workshop on Disaster Casualties, Cambridge, UK.
- Trendafiloski, G., Wyss, M., & Rosset, P. (2011). Loss Estimation Module in the Second Generation Software QLARM. En R. Spence, E. So, & C. Scawthorn (Eds.), *Human Casualties in Earthquakes* (Vol. 29, pp. 95-106). Springer Netherlands.
- Trendafiloski, G., Wyss, M., Rosset, P., & Marmureanu, G. (2009). Constructing City Models to Estimate Losses Due to Earthquakes Worldwide: Application to Bucharest, Romania. *Earthquake Spectra*, 25(3), 665. <http://doi.org/10.1193/1.3159447>

- Uniandes - CEDERI. (2004). *Priorización de inversiones de intervención de la vulnerabilidad sísmica* (Estrategia para transferencia, retención, mitigación del riesgo sísmico en edificaciones indispensables y de atención a la comunidad del Distrito Capital). Bogotá, Colombia.
- Uniandes - CEDERI. (2005a). *Escenarios de riesgo y pérdidas por terremoto para Bogotá D.C.* Bogotá, Colombia: DPAAE.
- Uniandes - CEDERI. (2005b). *Estrategia de transferencia, retención y mitigación del riesgo sísmico en edificaciones indispensables y de atención a la comunidad del Distrito Capital de Bogotá.* (Consultoría). Bogotá, Colombia: DNP, ACCI, Banco Mundial.
- Uniandes - CEDERI/CIACUA. (2006). *Estudio para proponer la metodología para la evaluación, zonificación y reducción de riesgos por inundaciones y avenidas torrenciales y su articulación con los POT. Aplicación de zonificación de amenazas en un caso piloto del Distrito de Bogotá.* Bogotá, Colombia: FONADE, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- UNISDR. (2011). *Revealing Risk, Redefining Development* (Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction). Geneva, Switzerland: United Nations Office For Disaster Risk Reduction (UNISDR)).
- UNISDR. (2013). *From Shared Risk to Shared Value: the Business Case for Disaster Risk Reduction* (Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction). Geneva, Switzerland: United Nations Office For Disaster Risk Reduction (UNISDR)).
- UNISDR. (2015). *Making development sustainable: The future of disaster risk management* (Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction). Geneva, Switzerland: United Nations Office For Disaster Risk Reduction (UNISDR)).
- Valcárcel, J. A., Mora, M. G., Cardona, O. D., Pujades, L. G., Barbat, A. H., & Bernal, G. A. (2013). Methodology and applications for the benefit cost analysis of the seismic risk reduction in building portfolios at broadscale. *Natural Hazards*, 69(1), 845-868. <http://doi.org/10.1007/s11069-013-0739-2>
- Wald, D. J., Earle, P. S., Allen, T. I., Jaiswal, K. S., Porter, K. A., & Hearne, M. (2008). Development of the U. S. Geological Survey's PAGER system (Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response) (Vol. 10-0008). Presentado en 14th WCEE, Beijing, China.
- Whitman, R., Anagnos, T., Kircher, C., Lagorio, H., Lawson, R., & Schneider, P. (1997). Development of a National Earthquake Loss Estimation Methodology. *Earthquake Spectra*, 13(4), 643. <http://doi.org/10.1193/1.1585973>
- Yamin, L. E., Ghesquiere, F., Cardona, O. D., & Ordaz, M. G. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre: El caso de Bogotá, Colombia.* Bogotá, Colombia: Banco Mundial & Universidad de los Andes.
- Yves, C. (2004). *An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns (RISK-UE).* Europe: FP5-EESD Fifth Framework Programme.



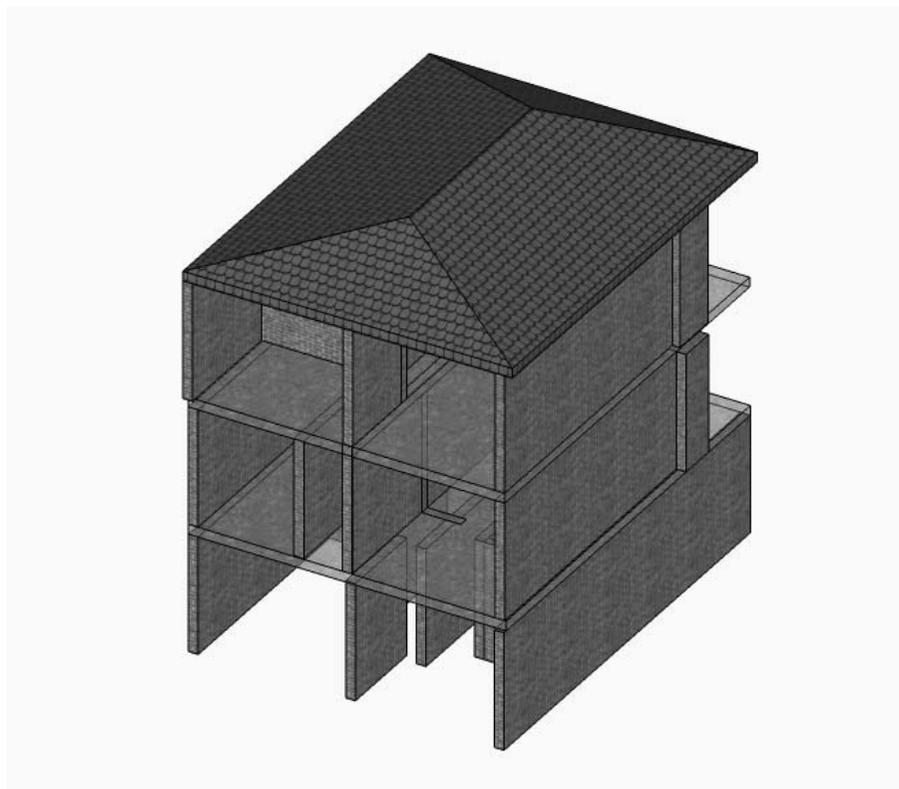
## **ANEXO 1 EVALUACIÓN PROBABILISTA DE COSTOS DE REFORZAMIENTO SÍSMICO**



***Figura A1-1: Modelo de vivienda unifamiliar, tomado de Pérez Plazas & Prieto Osorio (2004)***

**Tabla A1-1: Costos de elementos estructurales para diferentes sistemas de resistencia sísmica.  
Modelo de vivienda unifamiliar, tomado de Pérez Plazas & Prieto Osorio (2004)**

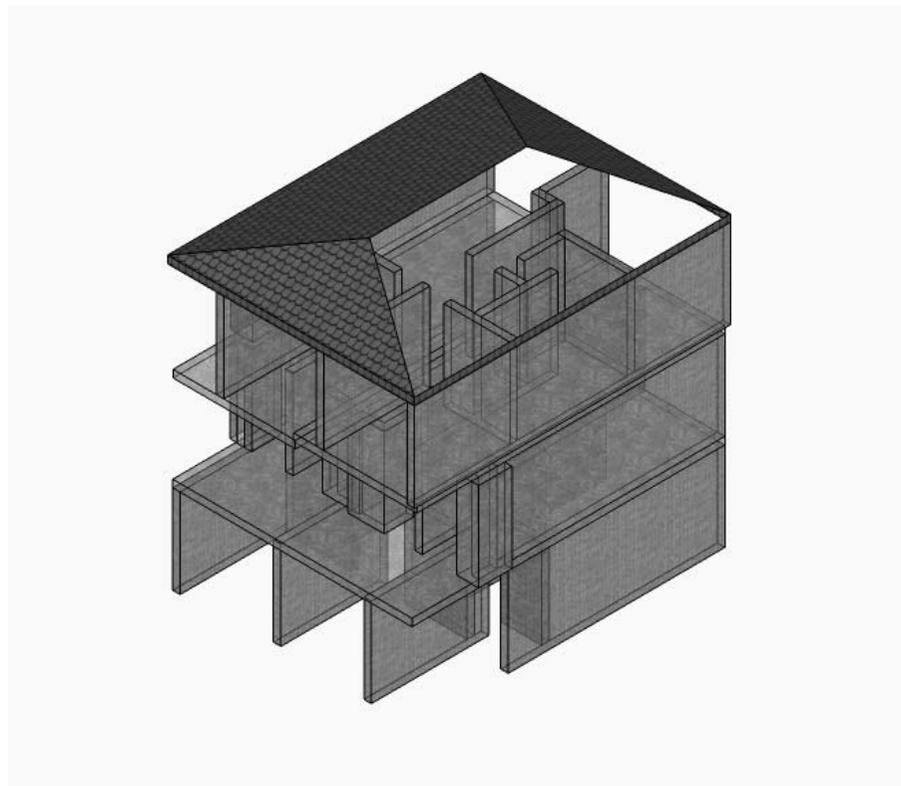
Muros				Viga corona				Vigas					
Perimetro	m	27.3		Long perimetro	m	31.6	\$ 51,238.5	\$ 752.9	Long perimetro	m	31.6	\$ 635,792.3	\$ 37,554.5
Interiores	m	15.7		long int	m	15.8	\$ 51,238.5	\$ 752.9	long int	m	15.8	\$ 635,792.3	\$ 37,554.5
Altura	m	2.4					\$ 2,428,704.9	\$ 26,598.9				\$ 30,136,552.7	\$ 1,326,797.0
Muro Est	m <sup>2</sup>	103	\$ 78,217.3										
			\$ 8,072,020.2										
Muro Div	m <sup>2</sup>	103	\$ 50,177.0										
			\$ 5,178,266.4										
Ciclópeo				Columnetas				Columnas					
Perimetro	m	27.3	\$ 89,755.0	No		18			No		18		
Interiores	m	15.7	\$ 89,755.0	Área	cm <sup>2</sup>	400			Área	cm <sup>2</sup>	1000		
			\$ 3,859,466.5		cm <sup>2</sup>	1.728	\$ 51,238.5	\$ 752.9		m <sup>3</sup>	4.32	\$ 635,792.3	\$ 37,554.5
			\$ 45,989.4				\$ 88,540.1	\$ 1,301.0				\$ 2,746,622.5	\$ 162,235.6
Sobresimiento				Diafragma				zapatas					
Perimetro	m	27.3	\$ 27,942.0	Area	m <sup>2</sup>	58.41			zapatas	m <sup>3</sup>	0.141	\$ 555,799.0	\$ 35,281.3
Interiores	m	15.7	\$ 27,942.0	placa	m <sup>2</sup>	58.41	\$ 71,720.8	\$ 4,453.1				\$ 78,159.2	\$ 4,961.4
			\$ 1,201,506.0	manto	m <sup>2</sup>	58.41	\$ 29,714.0	\$ 1,264.0					
			\$ 111,618.4				\$ 5,924,803.7	\$ 270,381.3					
Placa				Cubierta fibrocemento (30°)									
placa	m <sup>2</sup>	58.4	\$ 71,720.8	Área	m	58.41							
			\$ 4,189,209.0	estructura	m	58.41	\$ 43,588.0	\$ 0.0					
			\$ 260,106.2	teja	m	58.41	\$ 35,502.1	\$ 7,706.3					
							\$ 4,619,654.7	\$ 450,126.2					



***Figura A1-2: Modelo de vivienda Tipo 1, tomado de Cusgüen Garzón & Orrantía Herrera (2006)***

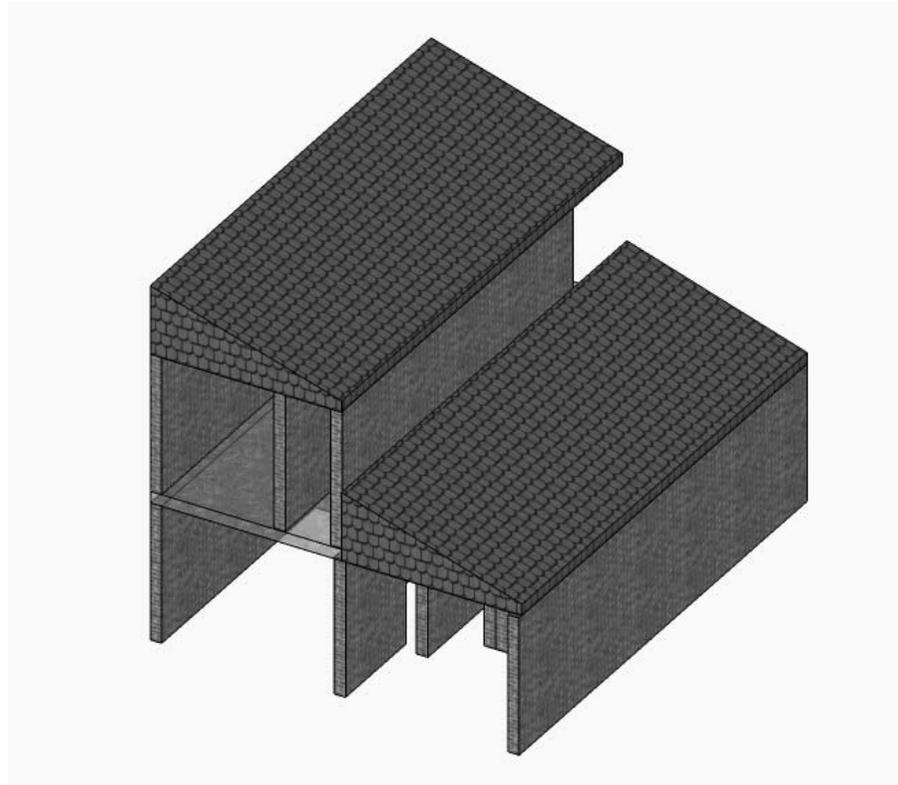
**Tabla A1-2: Costos de elementos estructurales para diferentes sistemas de resistencia sísmica.  
Modelo de vivienda Tipo 1, tomado de Cusgüen Garzón & Orrantía Herrera (2006)**

Muros			
Perimetro	m	49.5	
Interiores	m	71.6	
Altura	m	2	
	m <sup>2</sup>	242	
		\$ 78,217.3	\$ 6,532.9
		\$ 18,944,218.0	\$ 1,582,268.5
Muro Div	m <sup>2</sup>	242	
		\$ 50,177.0	\$ 3,848.1
		\$ 12,152,869.4	\$ 932,015.3
Ciclópeo			
Perimetro	m	49.5	\$ 89,755.0
Interiores	m	71.6	\$ 89,755.0
			\$ 1,460.3
			\$ 1,460.3
		\$ 10,869,334.9	\$ 127,113.9
Sobresimiento			
Perimetro	m	49.5	\$ 27,942.0
Interiores	m	71.6	\$ 27,942.0
			\$ 3,544.3
			\$ 3,544.3
		\$ 3,383,776.2	\$ 308,511.5
Placa			
placa	m <sup>2</sup>	103	\$ 71,720.8
			\$ 4,453.1
			\$ 7,413,056.7
			\$ 460,273.5
Viga corona			
Long perimetro	m	98.8	\$ 51,238.5
long int	m	33.8	\$ 51,238.5
			\$ 752.9
			\$ 752.9
		\$ 6,794,225.1	\$ 1,064.7
Columnetas			
No		44	
Área	cm <sup>2</sup>	400	
		3.52	\$ 51,238.5
			\$ 752.9
			\$ 180,359.5
			\$ 2,650.1
Diafragma			
Área	m <sup>2</sup>	103	
placa	m <sup>2</sup>	103	\$ 71,720.8
manto	m <sup>2</sup>	103	\$ 29,714.0
			\$ 1,264.0
		\$ 10,484,295.8	\$ 478,455.9
Cubierta fibrocemento (30°)			
Área	m	103	
estructura	m	103	\$ 43,588.0
teja	m	103	\$ 35,502.1
			\$ 7,706.3
		\$ 8,174,756.3	\$ 796,525.4
Vigas			
Long perimetro	m	98.8	\$ 635,792.3
long int	m	33.8	\$ 635,792.3
			\$ 37,554.5
			\$ 37,554.5
		\$ 84,306,052.4	\$ 53,110.1
Columnas			
No		22	
Área	cm <sup>2</sup>	1000	
	m <sup>3</sup>	4.4	\$ 635,792.3
			\$ 37,554.5
		\$ 2,797,485.9	\$ 165,240.0
zapatas			
zapatas	m <sup>3</sup>	0.172	\$ 555,799.0
			\$ 35,281.3
			\$ 95,528.0
			\$ 6,064.0
Arriostramiento			
Área	m <sup>2</sup>	48	\$ 583,155.7
			\$ 0.0
		\$ 27,991,471.8	\$ 0.0
Planitas Mamp			
Área	m <sup>2</sup>	242.2	\$ 38,902.3
			\$ 0.0
		\$ 9,422,125.0	\$ 0.0



***Figura A1-3: Modelo de vivienda Tipo 2, tomado de Cusgüen Garzón & Orrantía Herrera (2006)***

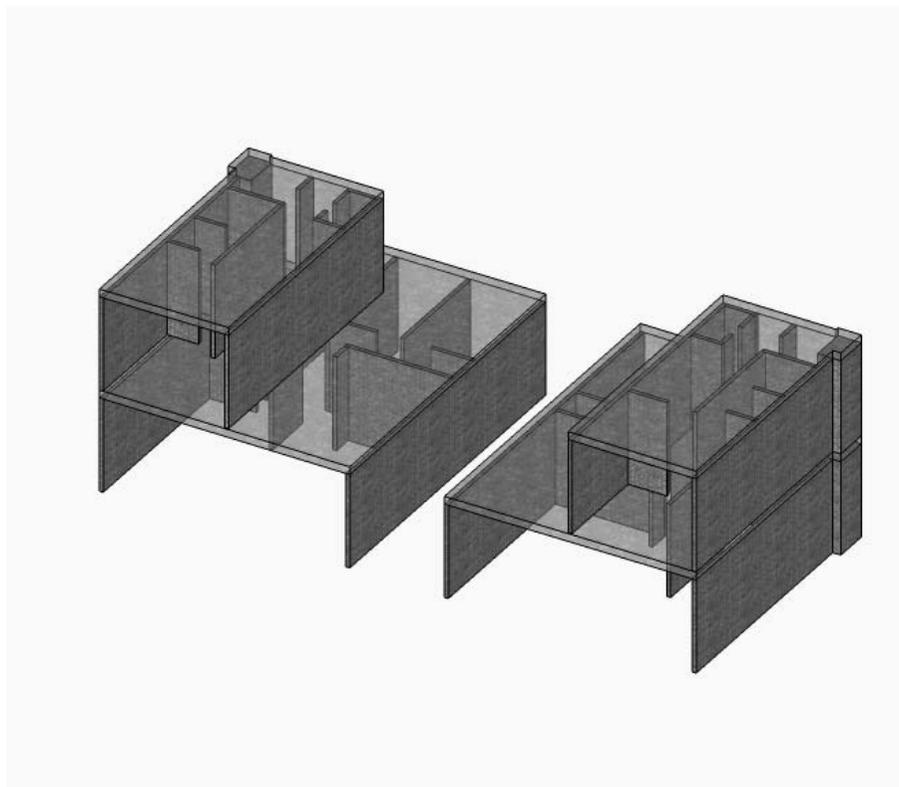




***Figura A1-4: Modelo de vivienda Tipo 3, tomado de Cusgüen Garzón & Orrantía Herrera (2006)***

**Tabla A1-4: Costos de elementos estructurales para diferentes sistemas de resistencia sísmica.  
Modelo de vivienda Tipo 3, tomado de Cusgüen Garzón & Orrantía Herrera (2006)**

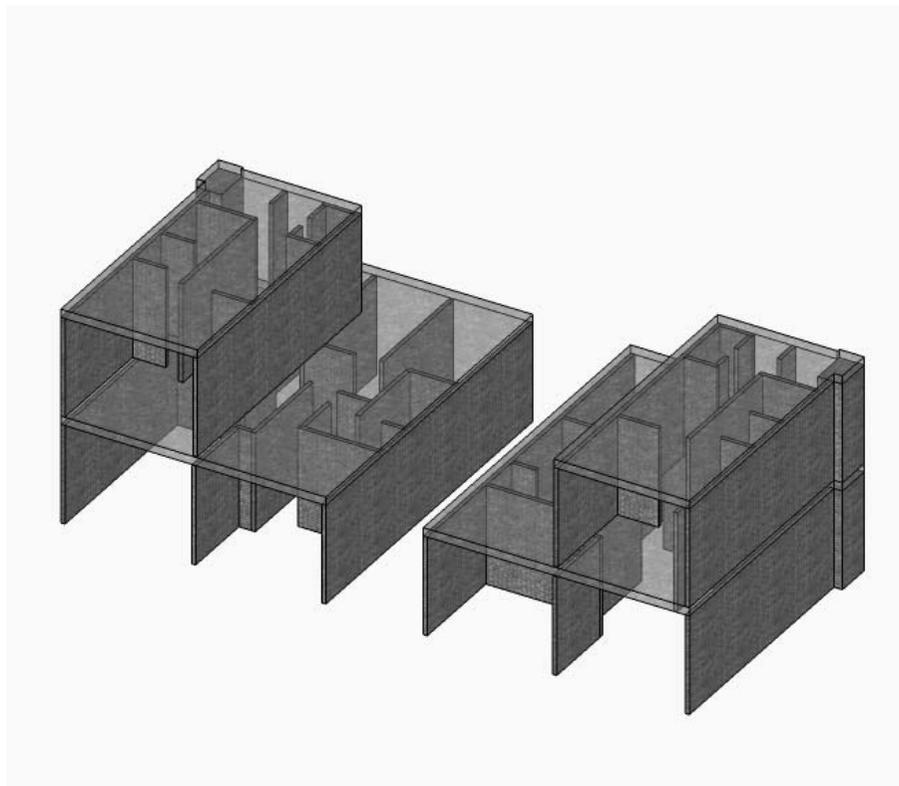
Muros			
Perimetro	m	23.6	
Interiores	m	35.8	
Altura	m	2.6	
Muro Est	m <sup>2</sup>	154	\$ 78,217.3 \$ 6,532.9
			\$ 12,079,872.1 \$ 1,008,941.2
Muro Div	m <sup>2</sup>	154	\$ 50,177.0 \$ 3,848.1
			\$ 7,749,335.9 \$ 594,304.1
Ciclópeo			
Perimetro	m	15.7	\$ 89,755.0 \$ 1,460.3
Interiores	m	23.9	\$ 89,755.0 \$ 1,460.3
			\$ 3,554,299.4 \$ 41,744.8
Sobresimiento			
Perimetro	m	15.7	\$ 27,942.0 \$ 3,544.3
Interiores	m	23.9	\$ 27,942.0 \$ 3,544.3
			\$ 1,106,503.2 \$ 101,316.6
Placa			
placa	m <sup>2</sup>	42.8	\$ 71,720.8 \$ 4,453.1
			\$ 3,072,516.9 \$ 190,771.2
Viga corona			
Long perimetro	m	44.2	\$ 51,238.5 \$ 752.9
long int	m	33.8	\$ 51,238.5 \$ 752.9
			\$ 3,996,603.0 \$ 1,064.7
Columnetas			
No		44	
Área	cm <sup>2</sup>	400	
		4.58	\$ 51,238.5 \$ 752.9
			\$ 234,467.4 \$ 3,445.1
Diafragma			
Área	m <sup>2</sup>	13	
placa	m <sup>2</sup>	26	\$ 71,720.8 \$ 4,453.1
manto	m <sup>2</sup>	26	\$ 29,714.0 \$ 1,264.0
			\$ 2,641,360.9 \$ 120,539.8
Cubierta fibrocemento (30°)			
Área	m	26	
estructura	m	26	\$ 43,588.0 \$ 0.0
teja	m	26	\$ 35,502.1 \$ 7,706.3
			\$ 2,059,507.1 \$ 200,672.6
Vigas			
Long perimetro	m	44.2	\$ 635,792.3 \$ 37,554.5
long int	m	33.8	\$ 635,792.3 \$ 37,554.5
			\$ 49,591,795.5 \$ 53,110.1
Columnas			
No		22	
Área	cm <sup>2</sup>	1000	
		5.72	\$ 635,792.3 \$ 37,554.5
			\$ 3,636,731.7 \$ 214,811.9
zapatas			
zapatas	m <sup>3</sup>	0.172	\$ 555,799.0 \$ 35,281.3
			\$ 95,528.0 \$ 6,064.0
Arriostramiento			
Área	m <sup>2</sup>	41.6	\$ 583,155.7 \$ 0.0
			\$ 24,259,275.6 \$ 0.0
Planitas Mamp			
Área	m <sup>2</sup>	154.4	\$ 38,902.3 \$ 0.0
			\$ 6,008,063.5 \$ 0.0



***Figura A1-5: Modelo de vivienda Tipo 4, tomado de Cusgüen Garzón & Orrantía Herrera (2006)***

**Tabla A1-5: Costos de elementos estructurales para diferentes sistemas de resistencia sísmica.  
Modelo de vivienda Tipo 4, tomado de Cusgüen Garzón & Orrantía Herrera (2006)**

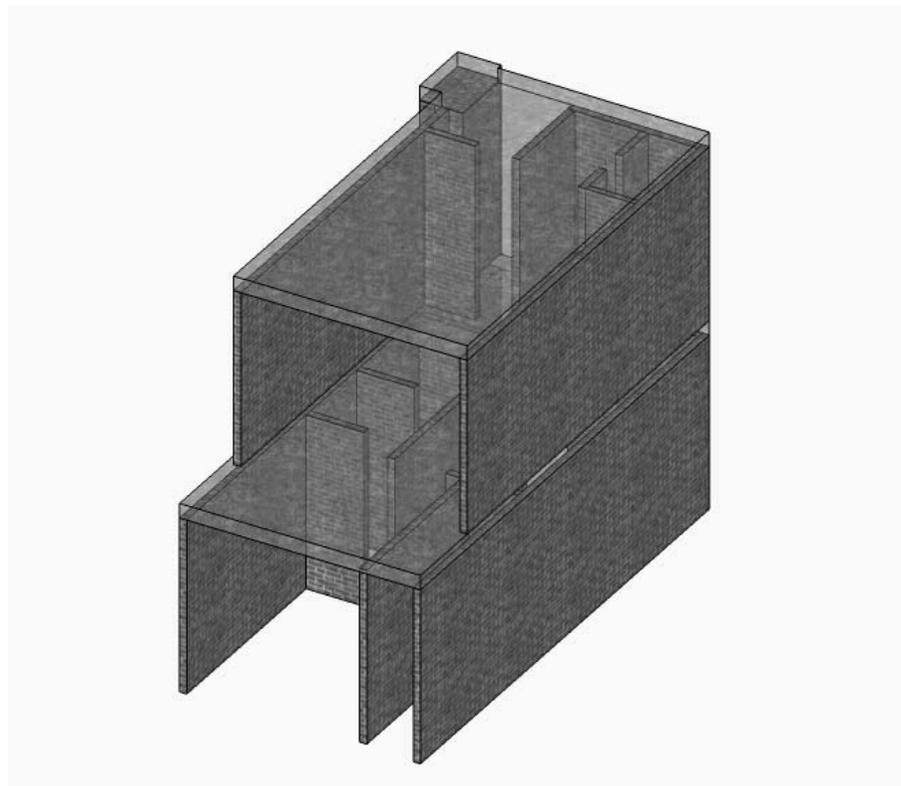
Muros				Viga corona				Vigas						
Perimetro	m	52.4		Long perimetro	m	98.8	\$ 51,238.5	\$ 752.9	Long perimetro	m	98.8	\$ 635,792.3	\$ 37,554.5	
Interiores	m	68.4		long int	m	33.8	\$ 51,238.5	\$ 752.9	long int	m	33.8	\$ 635,792.3	\$ 37,554.5	
Altura	m	2.6					\$ 6,794,225.1	\$ 1,064.7				\$ 84,306,052.4	\$ 53,110.1	
Muro Est	m <sup>2</sup>	314	\$ 78,217.3	\$ 6,532.9										
			\$ 24,566,473.9	\$ 2,051,853.4										
					Columnetas				Columnas					
					No		44		No		44			
Muro Div	m <sup>2</sup>	314	\$ 50,177.0	\$ 3,848.1	Área	cm <sup>2</sup>	400		Área	cm <sup>2</sup>	1000			
			\$ 15,759,592.2	\$ 1,208,618.3			4.576	\$ 51,238.5	\$ 752.9		11.4	\$ 635,792.3	\$ 37,554.5	
								\$ 234,467.4	\$ 3,445.1			\$ 7,273,463.3	\$ 429,623.9	
					Diafragma				zapatas					
					Área	m <sup>2</sup>	103.4				0.34	\$ 555,799.0	\$ 35,281.3	
					placa	m <sup>2</sup>	103.4	\$ 71,720.8	\$ 4,453.1			\$ 191,055.9	\$ 12,128.0	
					manto	m <sup>2</sup>	103.4	\$ 29,714.0	\$ 1,264.0					
			\$ 5,421,204.2	\$ 62,914.1				\$ 10,484,295.8	\$ 478,455.9					
					Cubierta fibrocemento (30°)				Arriostramiento					
					Área	m	103.4				41.6	\$ 583,155.7	\$ 0.0	
					estructura	m	103.4	\$ 43,588.0	\$ 0.0			\$ 24,259,275.6	\$ 0.0	
			\$ 1,687,696.8	\$ 152,695.6	teja	m	103.4	\$ 35,502.1	\$ 7,706.3					
								\$ 8,174,756.3	\$ 796,525.4					
					Planitas Mamp									
										Área	m <sup>2</sup>	314	\$ 38,902.3	\$ 0.0
													\$ 12,218,418.7	\$ 0.0
					Placa									
					placa	m <sup>2</sup>	51.7	\$ 71,720.8	\$ 4,453.1					
			\$ 3,706,528.4	\$ 230,136.7										



***Figura A1-6: Modelo de vivienda Tipo 5, tomado de Cusgüen Garzón & Orrantía Herrera (2006)***

**Tabla A1-6: Costos de elementos estructurales para diferentes sistemas de resistencia sísmica.  
Modelo de vivienda Tipo 5, tomado de Cusgüen Garzón & Orrantía Herrera (2006)**

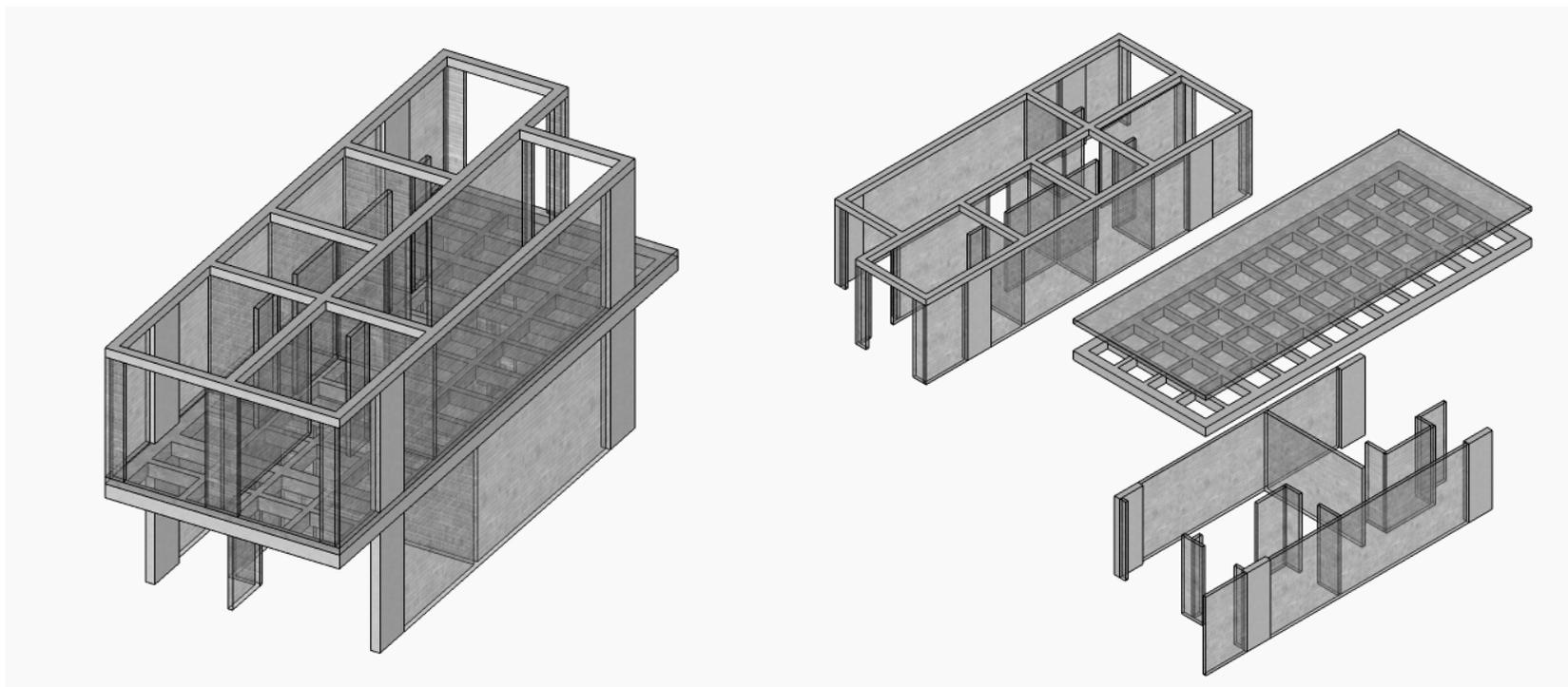
Muros			
Perimetro	m	52.4	
Interiores	m	86.2	
Altura	m	2.6	
	m <sup>2</sup>	360	\$ 78,217.3 \$ 6,532.9
			\$ 28,186,368.2 \$ 2,354,196.1
Muro Div	m <sup>2</sup>	360	\$ 50,177.0 \$ 3,848.1
			\$ 18,081,783.7 \$ 1,386,709.5
Ciclópeo			
Perimetro	m	26.2	\$ 89,755.0 \$ 1,460.3
Interiores	m	43.1	\$ 89,755.0 \$ 1,460.3
			\$ 6,220,024.0 \$ 73,656.8
Sobresimiento			
Perimetro	m	26.2	\$ 27,942.0 \$ 3,544.3
Interiores	m	43.1	\$ 27,942.0 \$ 3,544.3
			\$ 1,936,380.6 \$ 178,768.5
Placa			
placa	m <sup>2</sup>	51.7	\$ 71,720.8 \$ 4,453.1
			\$ 3,706,528.4 \$ 230,136.7
Viga corona			
Long perimetro	m	98.8	\$ 51,238.5 \$ 752.9
long int	m	33.8	\$ 51,238.5 \$ 752.9
			\$ 6,794,225.1 \$ 1,064.7
Columnetas			
No		44	
Área	cm <sup>2</sup>	400	
		4.576	\$ 51,238.5 \$ 752.9
			\$ 234,467.4 \$ 3,445.1
Diafragma			
Área	m <sup>2</sup>	103.36	
placa	m <sup>2</sup>	103.36	\$ 71,720.8 \$ 4,453.1
manto	m <sup>2</sup>	103.36	\$ 29,714.0 \$ 1,264.0
			\$ 10,484,295.8 \$ 478,455.9
Cubierta fibrocemento (30°)			
Área	m	103.36	
estructura	m	103.36	\$ 43,588.0 \$ 0.0
teja	m	103.36	\$ 35,502.1 \$ 7,706.3
			\$ 8,174,756.3 \$ 796,525.4
Vigas			
Long perimetro	m	98.8	\$ 635,792.3 \$ 37,554.5
long int	m	33.8	\$ 635,792.3 \$ 37,554.5
			\$ 84,306,052.4 \$ 53,110.1
Columnas			
No		44	
Área	cm <sup>2</sup>	1000	
		11.44	\$ 635,792.3 \$ 37,554.5
			\$ 7,273,463.3 \$ 429,623.9
zapatas			
zapatas	m <sup>3</sup>	0.34375	\$ 555,799.0 \$ 35,281.3
			\$ 191,055.9 \$ 12,128.0
Arriostramiento			
Área	m <sup>2</sup>	41.6	\$ 583,155.7 \$ 0.0
			\$ 24,259,275.6 \$ 0.0
Planitas Mamp			
Área	m <sup>2</sup>	360.36	\$ 38,902.3 \$ 0.0
			\$ 14,018,814.8 \$ 0.0



***Figura A1-7: Modelo de vivienda Tipo 6, tomado de Cusgüen Garzón & Orrantía Herrera (2006)***

**Tabla A1-7: Costos de elementos estructurales para diferentes sistemas de resistencia sísmica.  
Modelo de vivienda Tipo 6, tomado de Cusgüen Garzón & Orrantía Herrera (2006)**

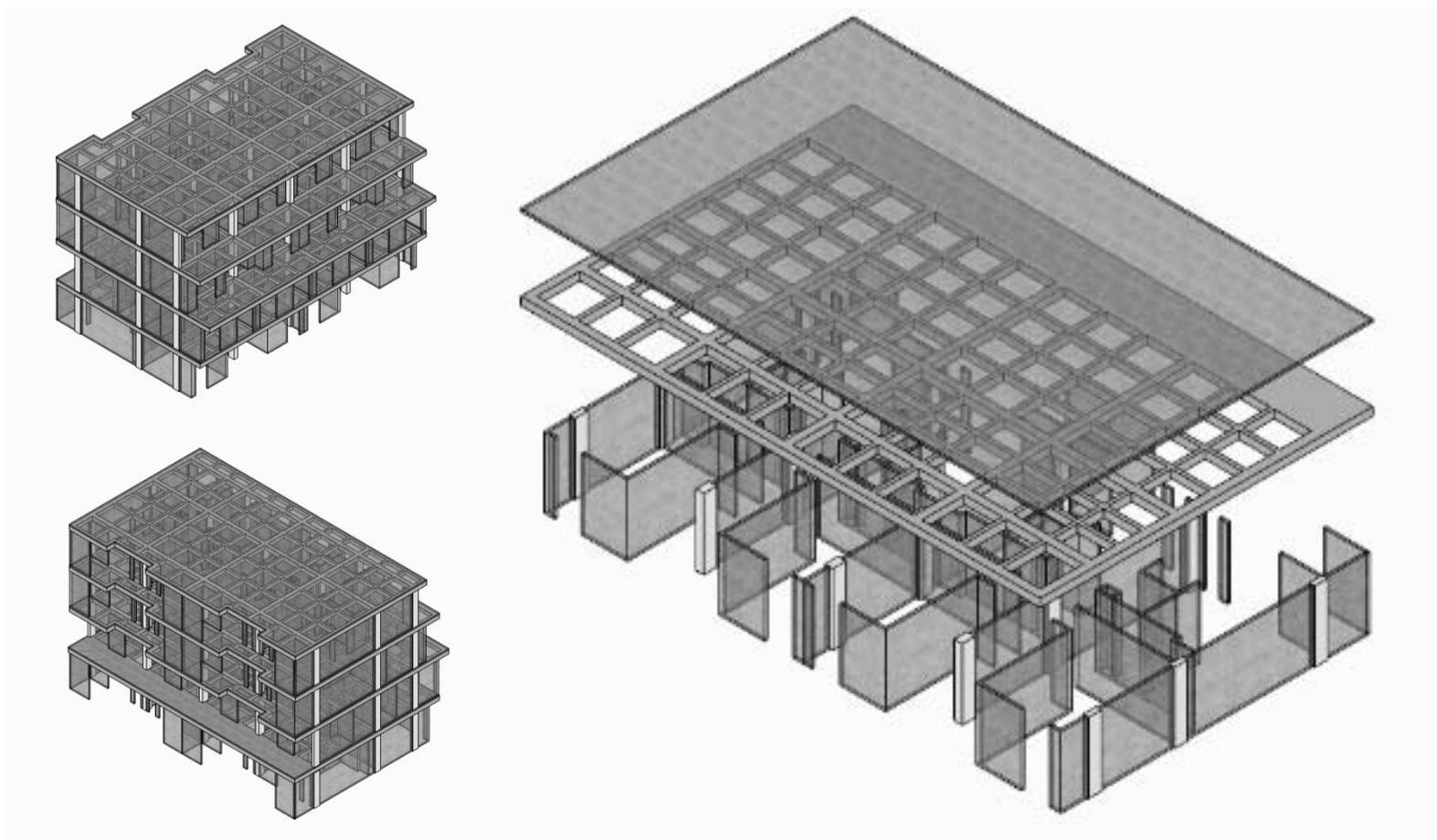
Muros			
Perimetro	m	26.6	
Interiores	m	12.5	
Altura	m	2.6	
Muro Est	m <sup>2</sup>	102	\$ 78,217.3    \$ 6,532.9
			\$ 7,951,565.6    \$ 664,134.7
Muro Div	m <sup>2</sup>	102	\$ 50,177.0    \$ 3,848.1
			\$ 5,100,993.8    \$ 391,200.1
Ciclópeo			
Perimetro	m	13.3	\$ 89,755.0    \$ 1,460.3
Interiores	m	6.25	\$ 89,755.0    \$ 1,460.3
			\$ 1,754,711.0    \$ 21,460.0
Sobresimiento			
Perimetro	m	13.3	\$ 27,942.0    \$ 3,544.3
Interiores	m	6.25	\$ 27,942.0    \$ 3,544.3
			\$ 546,266.1    \$ 52,084.4
Placa			
placa	m <sup>2</sup>	20.8	\$ 71,720.8    \$ 4,453.1
			\$ 1,489,640.0    \$ 92,491.1
Viga corona			
Long perimetro	m	37.4	\$ 51,238.5    \$ 752.9
long int	m	12.4	\$ 51,238.5    \$ 752.9
			\$ 2,551,677.3    \$ 1,064.7
Columnetas			
No		22	
Área	cm <sup>2</sup>	400	
		2.288	\$ 51,238.5    \$ 752.9
			\$ 117,233.7    \$ 1,722.6
Diafragma			
Área	m <sup>2</sup>	38.44	
placa	m <sup>2</sup>	38.44	\$ 71,720.8    \$ 4,453.1
manto	m <sup>2</sup>	38.44	\$ 29,714.0    \$ 1,264.0
			\$ 3,899,151.8    \$ 177,939.7
Cubierta fibrocemento (30°)			
Área	m	38.44	
estructura	m	38.44	\$ 43,588.0    \$ 0.0
teja	m	38.44	\$ 35,502.1    \$ 7,706.3
			\$ 3,040,224.8    \$ 296,231.0
Vigas			
Long perimetro	m	37.4	\$ 635,792.3    \$ 37,554.5
long int	m	12.4	\$ 635,792.3    \$ 37,554.5
			\$ 31,662,454.1    \$ 53,110.1
Columnas			
No		22	
Área	cm <sup>2</sup>	1000	
		5.72	\$ 635,792.3    \$ 37,554.5
			\$ 3,636,731.7    \$ 214,811.9
zapatas			
zapatas	m <sup>3</sup>	0.172	\$ 555,799.0    \$ 35,281.3
			\$ 95,528.0    \$ 6,064.0
Arriostramiento			
Área	m <sup>2</sup>	20.8	\$ 583,155.7    \$ 0.0
			\$ 12,129,637.8    \$ 0.0
Planitas Mamp			
Área	m <sup>2</sup>	101.7	\$ 38,902.3    \$ 0.0
			\$ 3,954,802.7    \$ 0.0



***Figura A1-8: Modelo de edificación en altura, tomado de Monsalve Ruiz, Pinilla Acevedo, & de la Carrera Ruan (2009)***

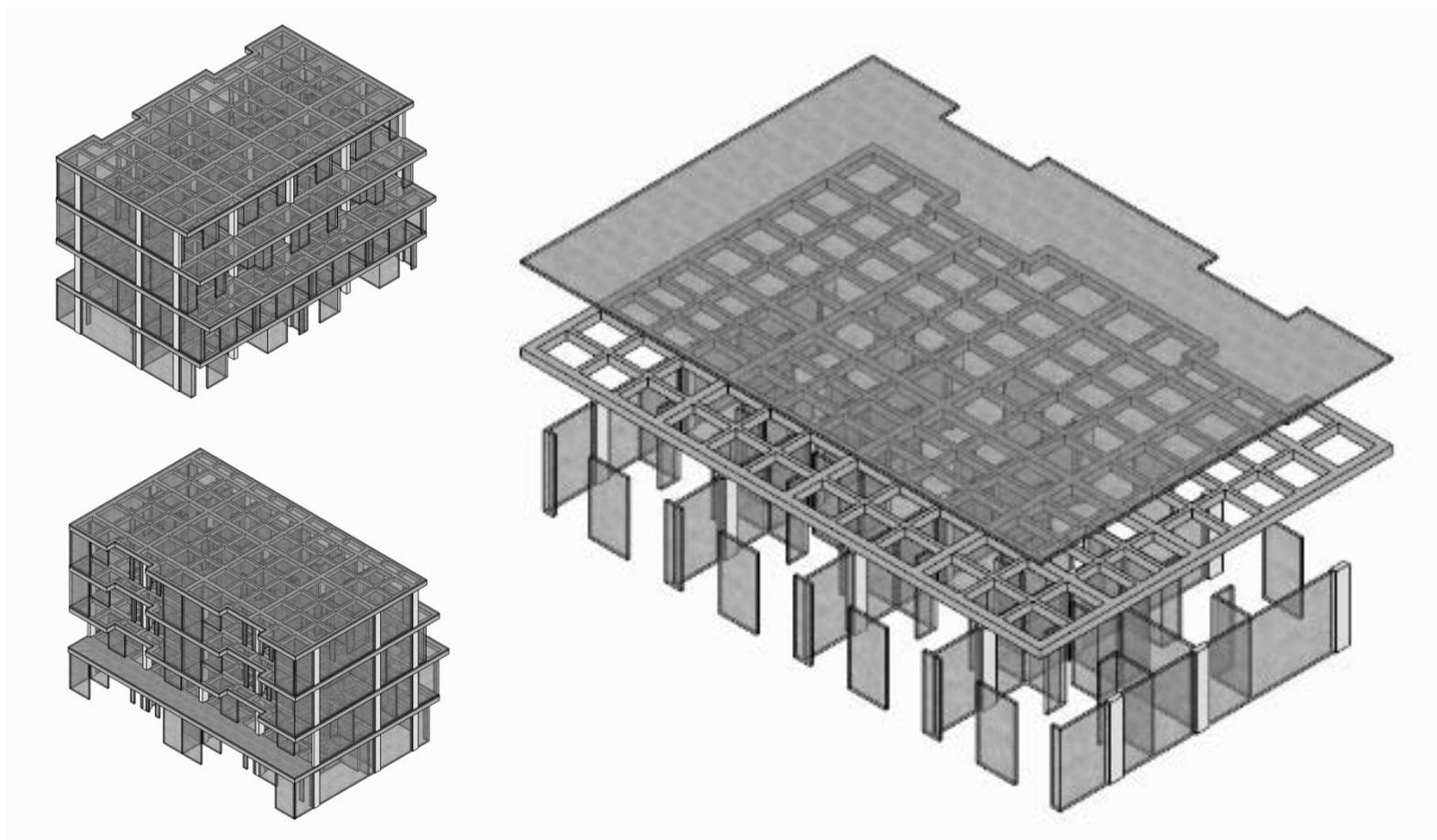
**Tabla A1-8: Costos de elementos estructurales para diferentes sistemas de resistencia sísmica.  
Modelo de edificación en altura, tomado de Monsalve Ruiz, Pinilla Acevedo, & de la Carrera Ruan (2009)**

Muros				Viga corona				Vigas					
<i>Entre Cols</i>	<i>m</i>	29.6		<i>Long perimetro</i>	<i>m</i>	56	\$ 51,238.5	\$ 752.9	<i>Long</i>	<i>m</i>	56	\$ 635,792.3	\$ 37,554.5
<i>interiores</i>	<i>m</i>	36.9		<i>long int</i>	<i>m</i>							\$ 35,604,366.0	\$ 2,103,053.9
<i>Altura</i>	<i>m</i>	2.6					\$ 2,869,356.0	\$ 42,160.9					
	<i>m<sup>2</sup></i>	173	\$ 78,217.3										
			\$ 13,523,762.5										
			\$ 6,532.9										
			\$ 1,129,538.5										
Muro Div				Columnetas				Columnas					
<i>Muro Div</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	173	\$ 50,177.0	<i>No</i>		8			<i>No</i>		8		
			\$ 3,848.1	<i>Área</i>	<i>cm<sup>2</sup></i>	400			<i>Área</i>	<i>cm<sup>2</sup></i>	2000		
			\$ 8,675,603.3			0.832	\$ 51,238.5	\$ 752.9			4.16	\$ 635,792.3	\$ 37,554.5
			\$ 665,340.4				\$ 42,630.4	\$ 626.4				\$ 2,644,895.8	\$ 156,226.9
Ciclópeo				Diafragma				zapatas					
<i>Perimetro</i>	<i>m</i>	29.6	\$ 89,755.0	<i>Area</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	45			<i>zapatas</i>	<i>m<sup>3</sup></i>	0.063	\$ 555,799.0	\$ 35,281.3
<i>Interiores</i>	<i>m</i>	36.9	\$ 89,755.0	<i>placa</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	45	\$ 71,720.8	\$ 4,453.1				\$ 34,737.4	\$ 2,205.1
			\$ 5,968,709.9	<i>manto</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	45	\$ 29,714.0	\$ 1,264.0					
			\$ 69,080.8				\$ 4,564,563.8	\$ 208,306.1					
Sobresimiento				Arriostramiento				Planitas Mamp					
<i>Perimetro</i>	<i>m</i>	29.6	\$ 27,942.0	<i>Area</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	20.8	\$ 583,155.7	\$ 0.0	<i>Area</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	172.9	\$ 38,902.3	\$ 0.0
<i>Interiores</i>	<i>m</i>	36.9	\$ 27,942.0				\$ 12,129,637.8	\$ 0.0				\$ 6,726,199.0	\$ 0.0
			\$ 1,858,143.0										
			\$ 167,662.5										
Placa													
<i>placa</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	45	\$ 71,720.8										
			\$ 3,227,433.8										
			\$ 200,390.0										



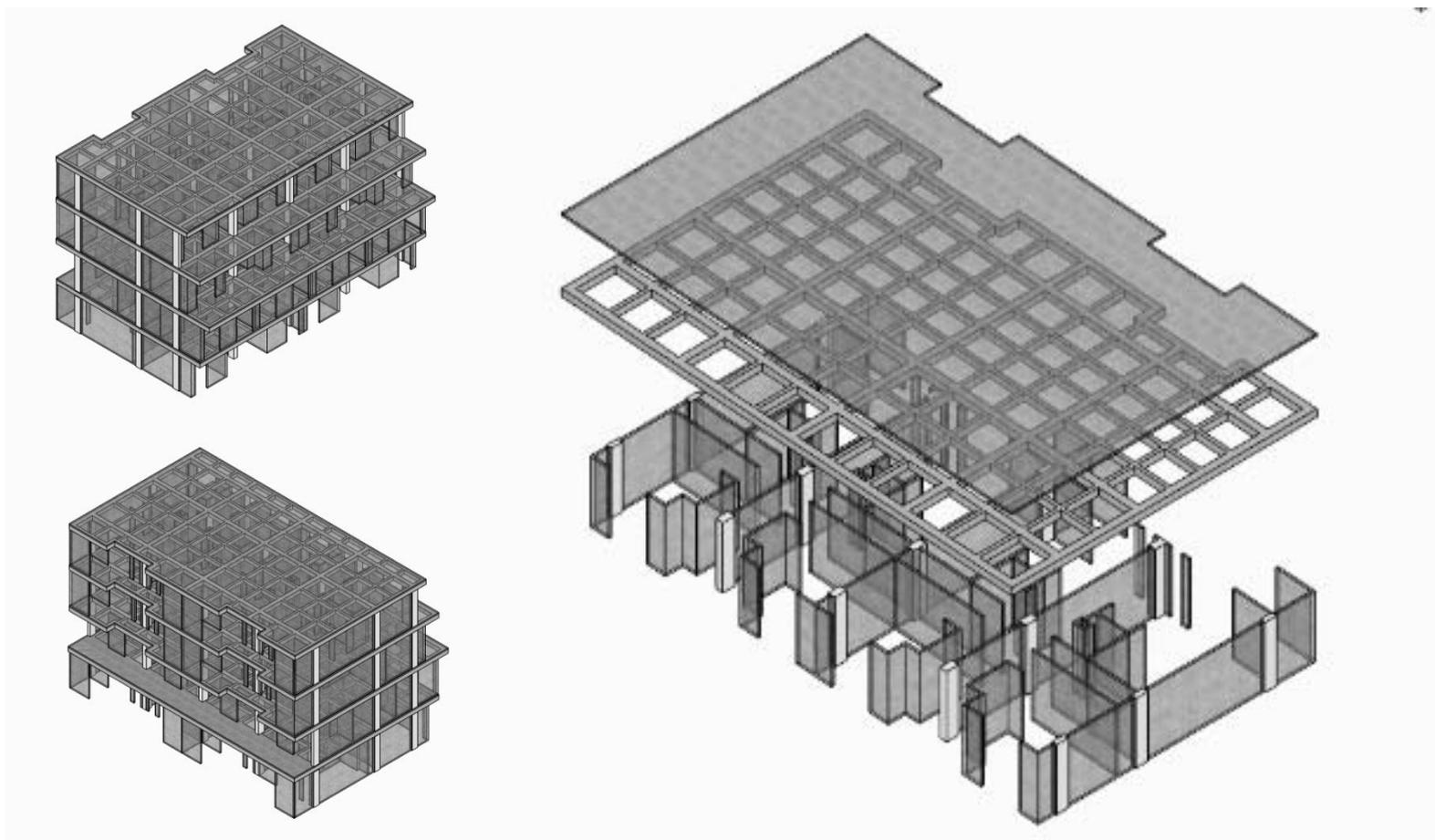
***Figura A1-9: Modelo de edificación Multifamiliar piso 1, tomado de Monsalve Ruiz, Pinilla Acevedo, & de la Carrera Ruan (2009)***





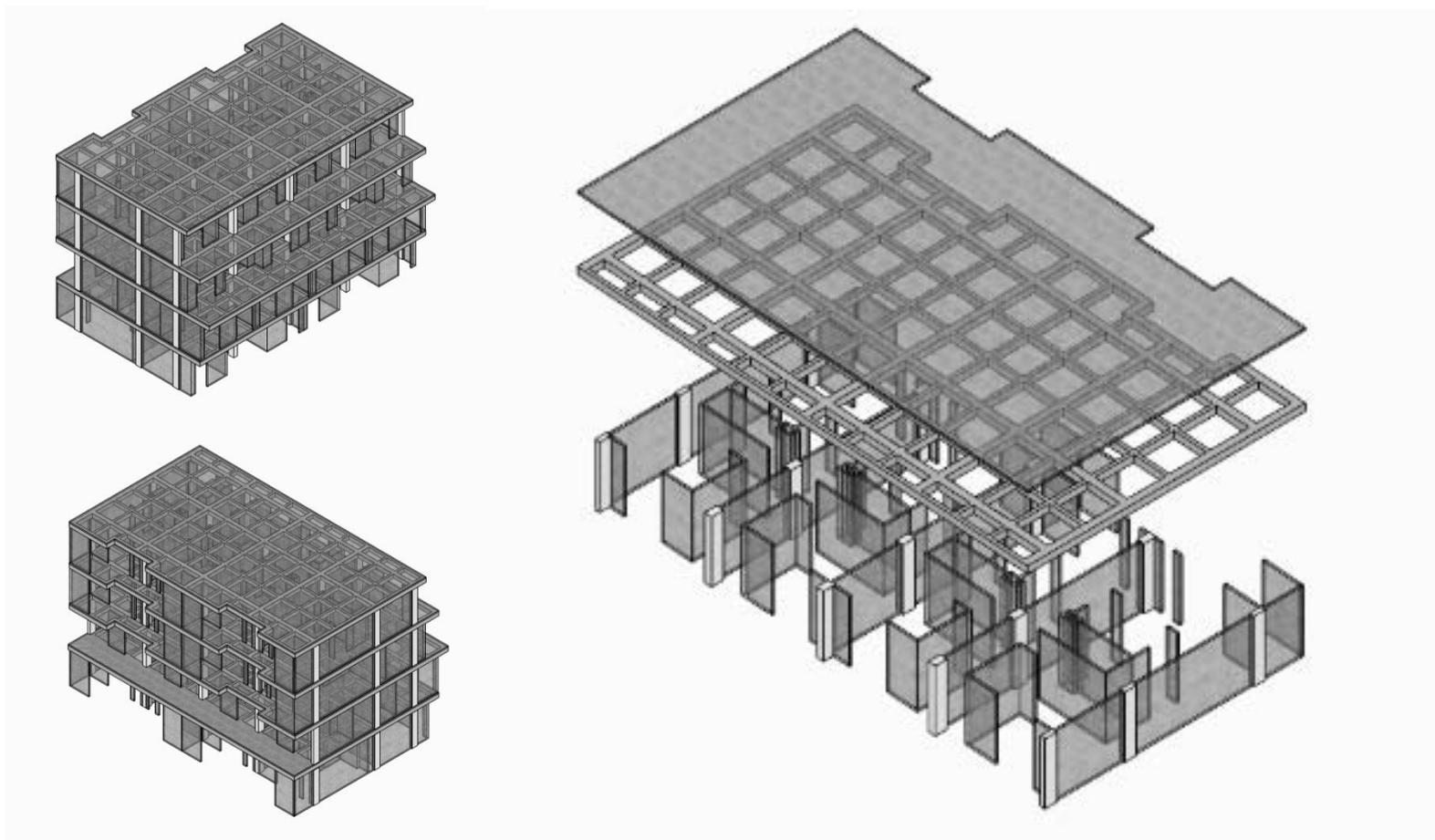
***Figura A1-10: Modelo de edificación Multifamiliar piso 2, tomado de Monsalve Ruiz, Pinilla Acevedo, & de la Carrera Ruan (2009)***





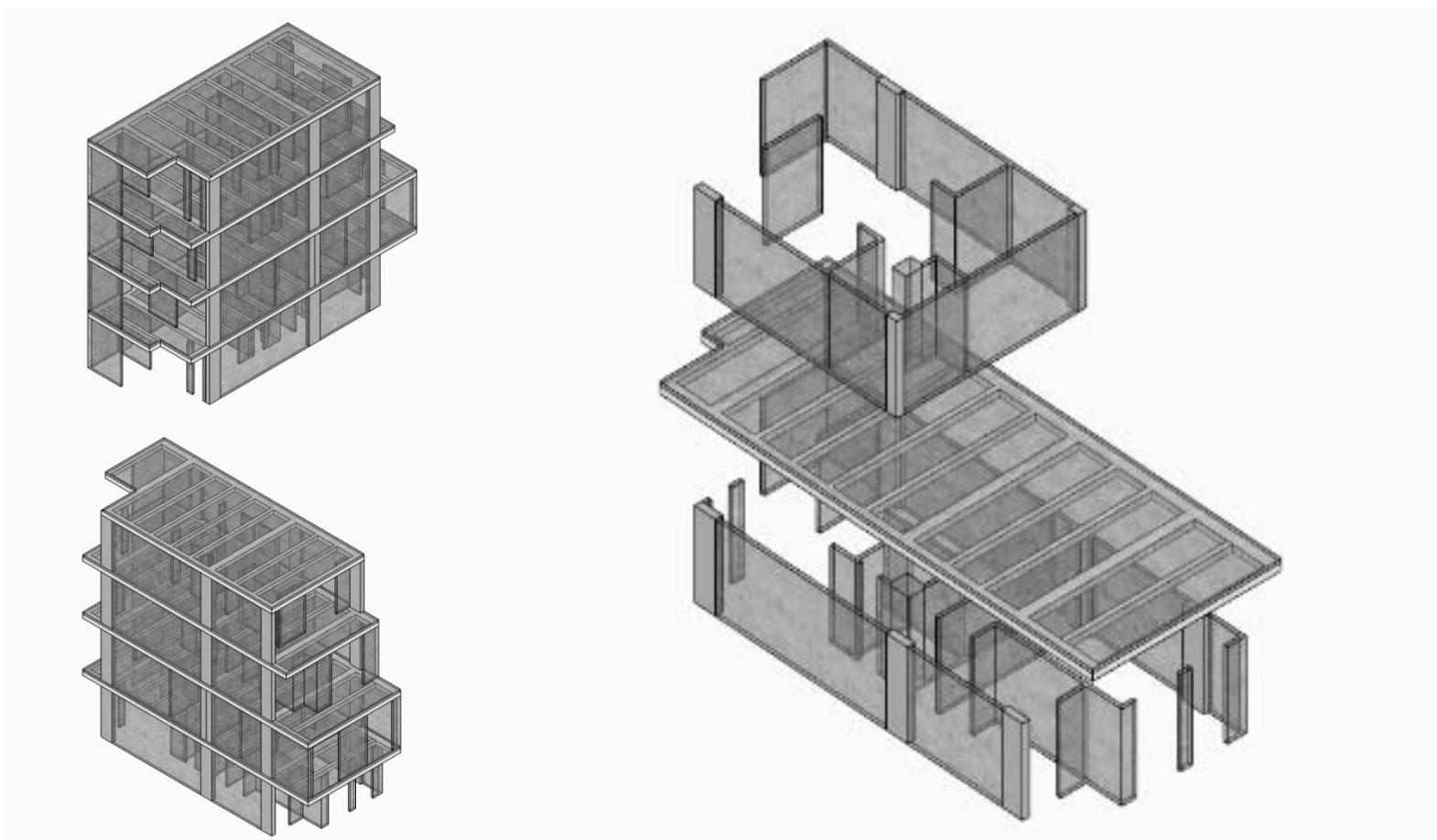
***Figura A1-11: Modelo de edificación Multifamiliar piso 3, tomado de Monsalve Ruiz, Pinilla Acevedo, & de la Carrera Ruan (2009)***





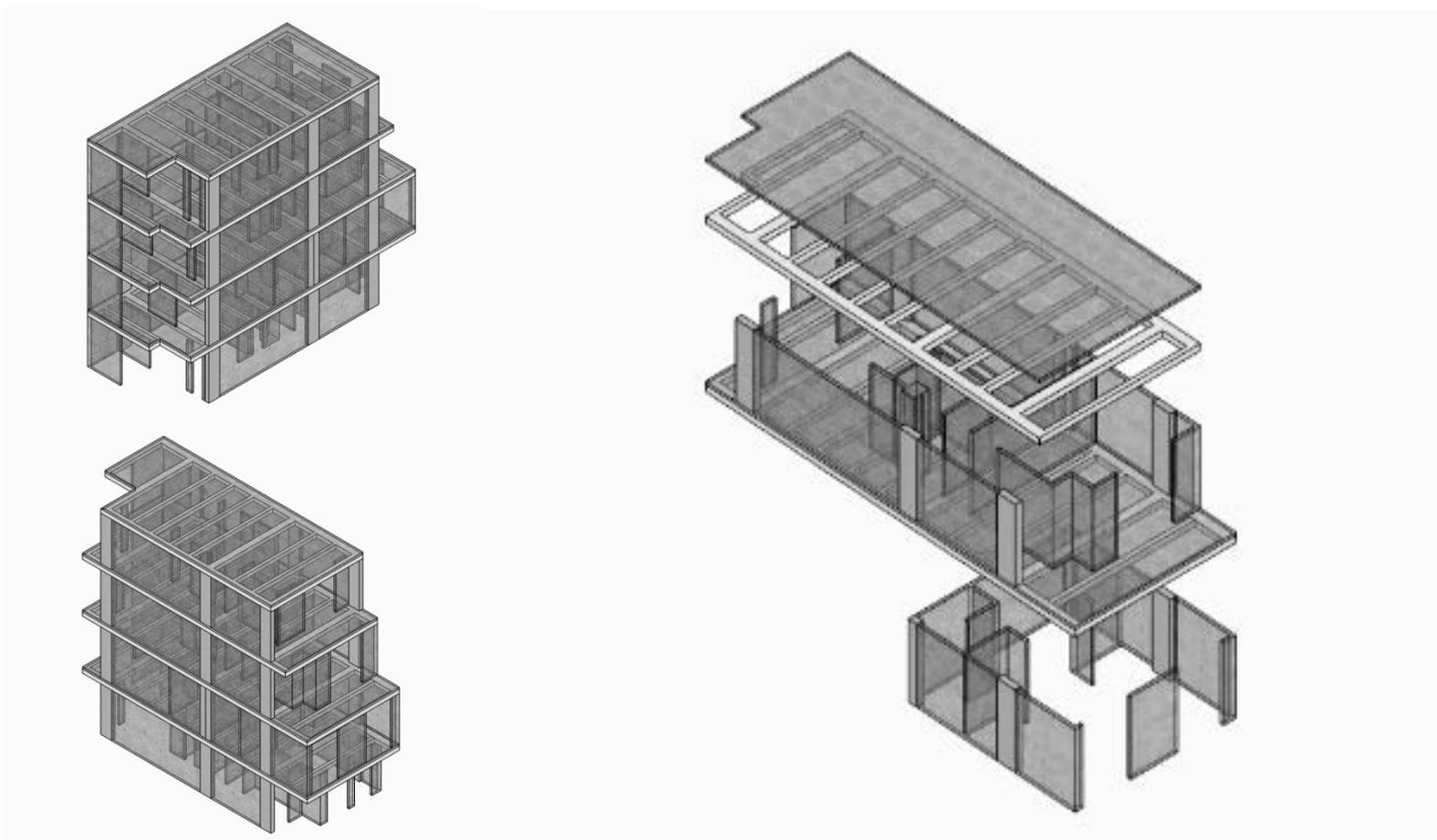
***Figura A1-12: Modelo de edificación Multifamiliar piso 4, tomado de Monsalve Ruiz, Pinilla Acevedo, & de la Carrera Ruan (2009)***





***Figura A1-13: Modelo de edificación Multifamiliar Tipo A, tomado de Monsalve Ruiz, Pinilla Acevedo, & de la Carrera Ruan (2009)***

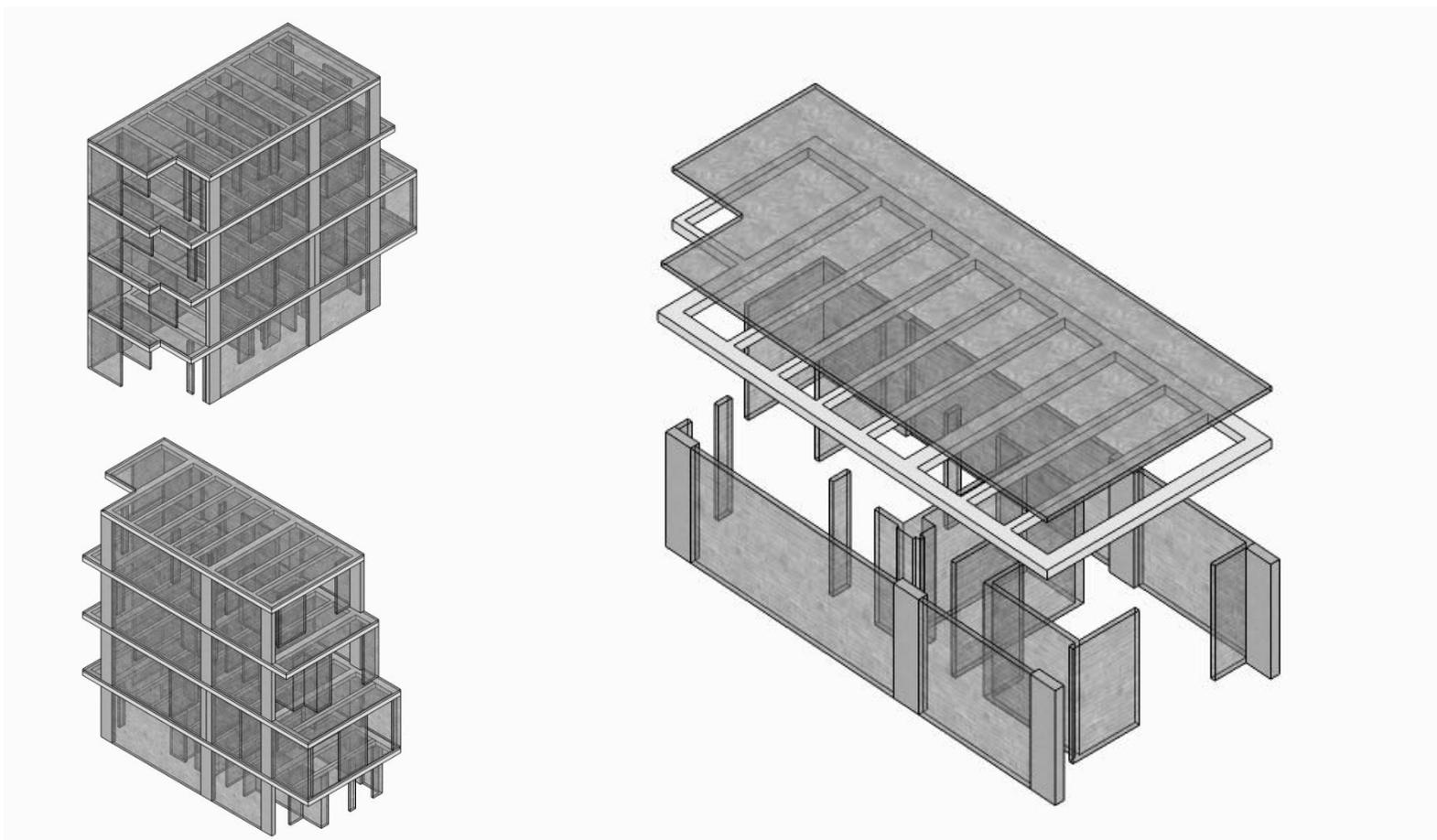




***Figura A1-14: Modelo de edificación Multifamiliar Tipo B, tomado de Monsalve Ruiz, Pinilla Acevedo, & de la Carrera Ruan (2009)***

**Tabla A1-14: Costos de elementos estructurales para diferentes sistemas de resistencia sísmica.  
Modelo de edificación Multifamiliar Tipo B, tomado de Monsalve Ruiz, Pinilla Acevedo, & de la Carrera Ruan (2009)**

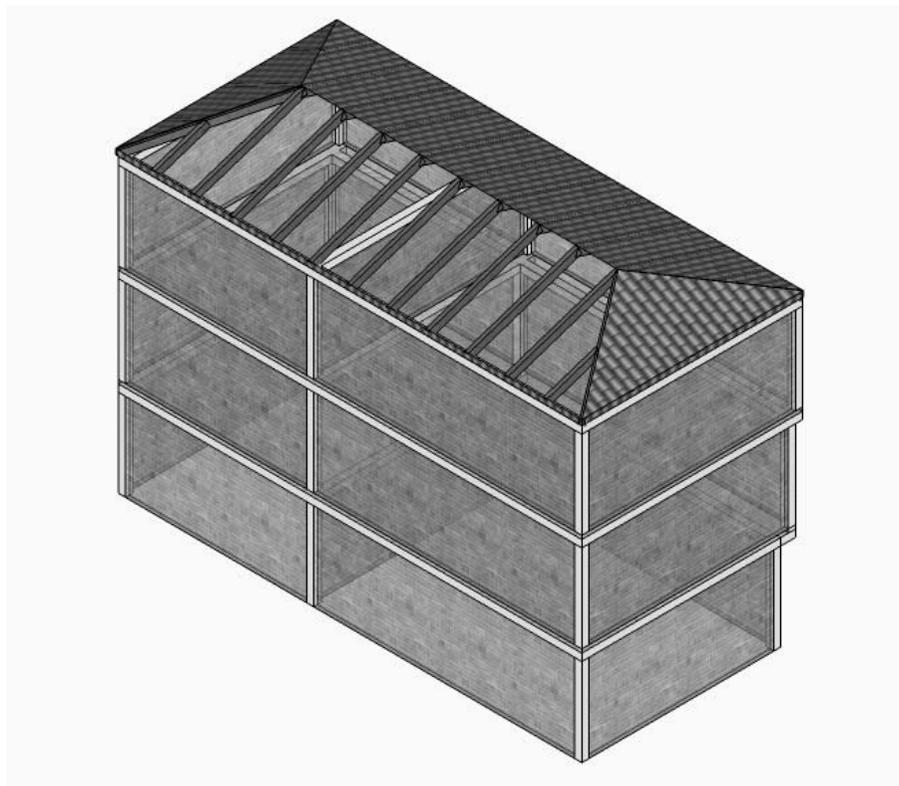
Muros			
Entre Cols	m	34.2	
interiores	m	25.3	
Altura	m	2.6	
	m <sup>2</sup>	154.7	\$ 78,217.3 \$ 6,532.9
			\$ 12,100,208.6 \$ 1,010,639.7
Muro Div	m <sup>2</sup>	154.7	\$ 50,177.0 \$ 3,848.1
			\$ 7,762,381.9 \$ 595,304.6
Ciclópeo			
Perimetro	m	58.1	89755.03597 1460.3261
Interiores	m	25.3	\$ 89,755.0 \$ 1,460.3
			\$ 7,485,570.0 \$ 92,540.2
Sobresimiento			
Perimetro	m	58.1	27942 3544.281121
Interiores	m	25.3	\$ 27,942.0 \$ 3,544.3
			\$ 2,330,362.8 \$ 224,599.5
Placa			
placa	m <sup>2</sup>	79.5	\$ 71,720.8 \$ 4,453.1
			\$ 5,701,799.6 \$ 354,022.2
Viga corona			
Long perimetro	m	58.1	\$ 51,238.5 \$ 752.9
long int	m		\$ 2,976,956.9 \$ 43,741.9
Columnetas			
No		10	
Área	cm <sup>2</sup>	400	
		1.04	\$ 51,238.5 \$ 752.9
			\$ 53,288.0 \$ 783.0
Diafragma			
Area	m <sup>2</sup>	79.5	
placa	m <sup>2</sup>	79.5	\$ 244,843.8 \$ 15,752.7
manto	m <sup>2</sup>	79.5	\$ 29,714.0 \$ 1,264.0
			\$ 21,827,341.1 \$ 1,256,366.7
Vigas			
Long	m	51.2	\$ 635,792.3 \$ 37,554.5
			\$ 32,552,563.2 \$ 1,922,792.2
Columnas			
No		10	
Área	cm <sup>2</sup>	1400	
		3.64	\$ 635,792.3 \$ 37,554.5
			\$ 2,314,283.8 \$ 136,698.5
zapatas			
zapatas	m <sup>3</sup>	0.078	\$ 555,799.0 \$ 35,281.3
			\$ 43,421.8 \$ 2,756.4
Arriostramiento			
Area	m <sup>2</sup>	20.8	\$ 583,155.7 \$ 0.0
			\$ 12,129,637.8 \$ 0.0
Planitas Mamp			
Area	m <sup>2</sup>	154.7	\$ 38,902.3 \$ 0.0
			\$ 6,018,178.1 \$ 0.0



***Figura A1-15: Modelo de edificación Multifamiliar Tipo C, tomado de Monsalve Ruiz, Pinilla Acevedo, & de la Carrera Ruan (2009)***

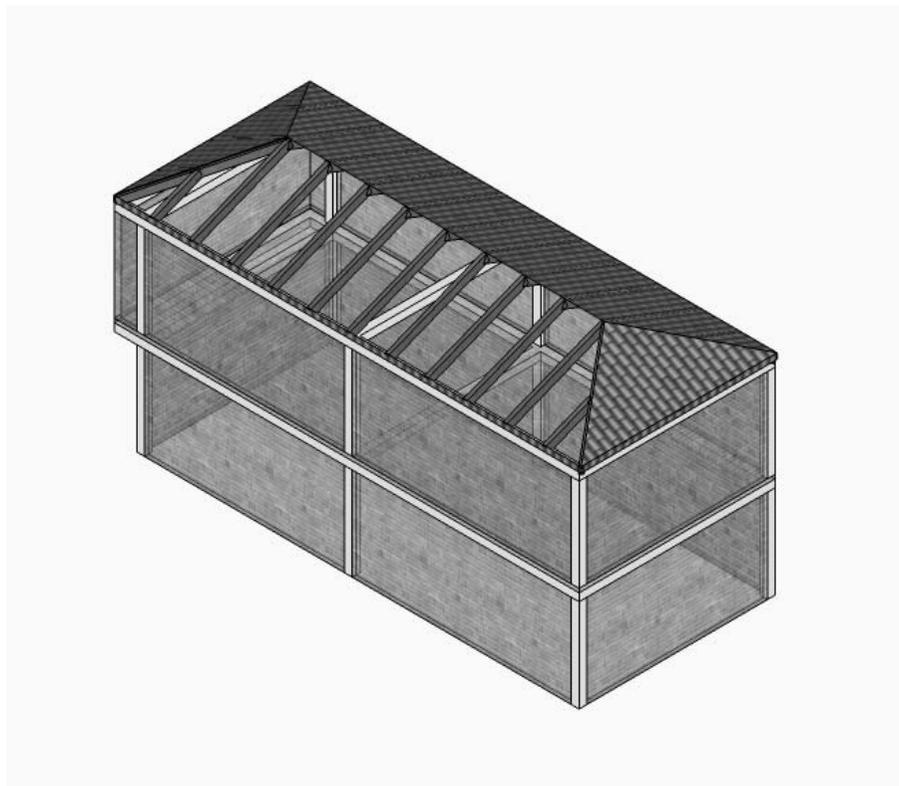
**Tabla A1-15: Costos de elementos estructurales para diferentes sistemas de resistencia sísmica.  
Modelo de edificación Multifamiliar Tipo C, tomado de Monsalve Ruiz, Pinilla Acevedo, & de la Carrera Ruan (2009)**

Muros			
<i>Entre Cols</i>	<i>m</i>	19.3	
<i>interiores</i>	<i>m</i>	9.3	
<i>Altura</i>	<i>m</i>	2.6	
	<i>m<sup>2</sup></i>	74.36	
			\$ 78,217.3
			\$ 6,532.9
			\$ 5,816,234.7
			\$ 485,786.5
<i>Muro Div</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	74.36	
			\$ 50,177.0
			\$ 3,848.1
			\$ 3,731,161.7
			\$ 286,146.4
Ciclópeo			
<i>Perimetro</i>	<i>m</i>	33.4	89755.03597
<i>Interiores</i>	<i>m</i>	9.3	\$ 89,755.0
			\$ 1,460.3
			\$ 3,832,540.0
			\$ 50,630.4
Sobresimiento			
<i>Perimetro</i>	<i>m</i>	33.4	27942
<i>Interiores</i>	<i>m</i>	9.3	\$ 27,942.0
			\$ 3,544.3
			\$ 1,193,123.4
			\$ 122,882.3
Placa			
<i>placa</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	46	\$ 71,720.8
			\$ 4,453.1
			\$ 3,299,154.5
			\$ 204,843.1
Viga corona			
<i>Long perimetro</i>	<i>m</i>	33.4	\$ 51,238.5
<i>long int</i>	<i>m</i>		\$ 752.9
			\$ 1,711,365.9
			\$ 25,145.9
Columnetas			
<i>No</i>		6	
<i>Área</i>	<i>cm<sup>2</sup></i>	400	
		0.624	\$ 51,238.5
			\$ 752.9
			\$ 31,972.8
			\$ 469.8
Diafragma			
<i>Area</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	46	
<i>placa</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	46	\$ 244,843.8
<i>manto</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	46	\$ 29,714.0
			\$ 1,264.0
			\$ 12,629,656.5
			\$ 726,954.3
Cubierta fibrocemento (30°)			
<i>Área</i>	<i>m</i>		
<i>estructura</i>	<i>m</i>		
<i>teja</i>	<i>m</i>		
Vigas			
<i>Long</i>	<i>m</i>	33.4	\$ 635,792.3
			\$ 37,554.5
			\$ 21,235,461.2
			\$ 1,254,321.5
Columnas			
<i>No</i>		6	
<i>Área</i>	<i>cm<sup>2</sup></i>	1400	
		2.184	\$ 635,792.3
			\$ 37,554.5
			\$ 1,388,570.3
			\$ 82,019.1
zapatas			
<i>zapatas</i>	<i>m<sup>3</sup></i>	0.047	\$ 555,799.0
			\$ 35,281.3
			\$ 26,053.1
			\$ 1,653.8
Arriostramiento			
<i>Area</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	5.2	\$ 583,155.7
			\$ 0.0
			\$ 3,032,409.4
			\$ 0.0
Planitas Mamp			
<i>Area</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	74.36	\$ 38,902.3
			\$ 0.0
			\$ 2,892,771.3
			\$ 0.0



***Figura A1-16: Modelo de edificación Ejemplo 1, tomado de Rincón Lobo & Correal Daza (2010)***

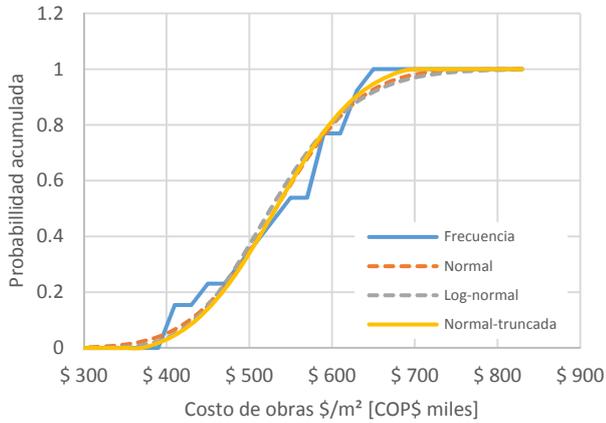




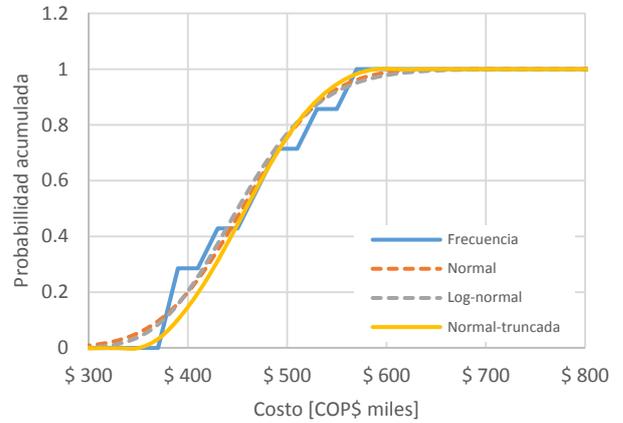
***Figura A1-17: Modelo de edificación Ejemplo 2, tomado de Rincón Lobo & Correal Daza (2010)***



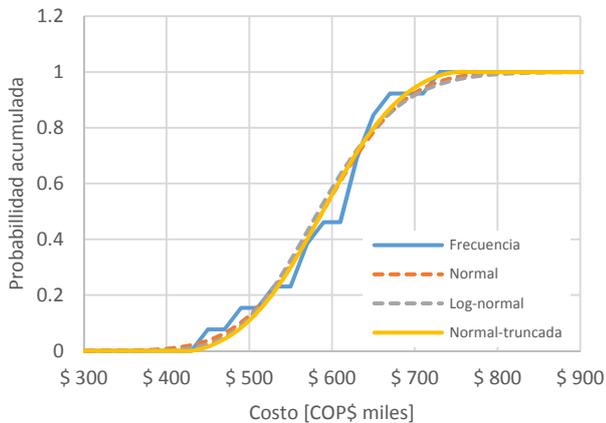
### A1.1 Ajuste de distribuciones de probabilidad para los costos de reforzamiento por sistema estructural



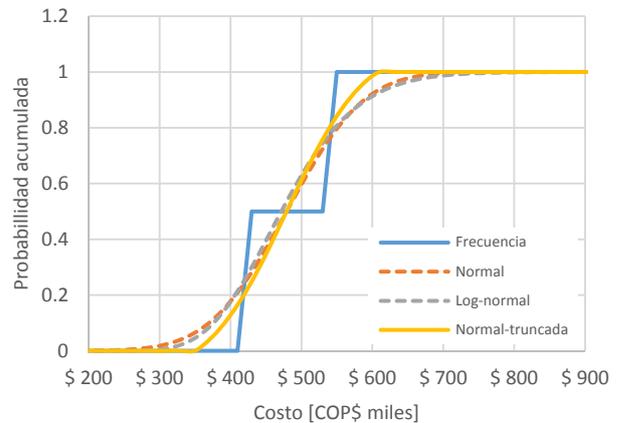
**Figura A1-18: cdf - Muros de mampostería simple (ladrillos de concreto) con diafragma.**



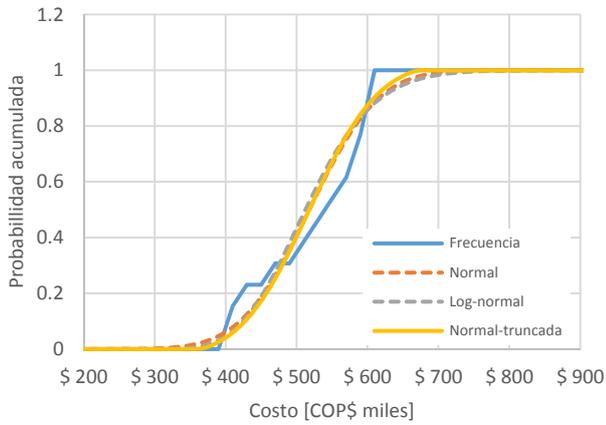
**Figura A1-19: cdf - Muros de mampostería simple (ladrillos de concreto)**



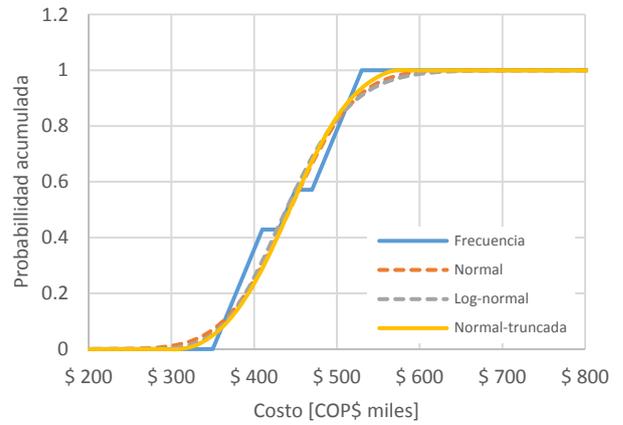
**Figura A1-20: cdf - Muros de mampostería confinada (ladrillos de concreto) con diafragma**



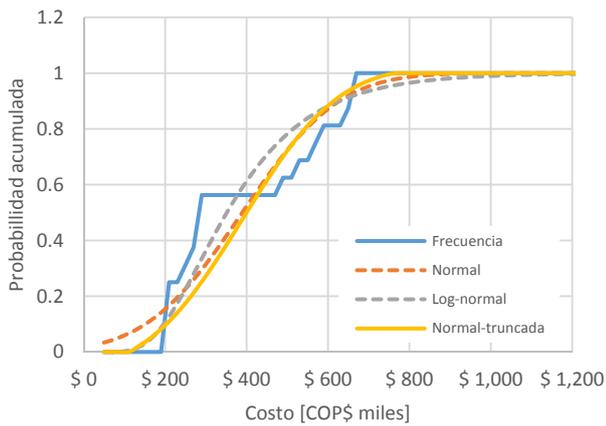
**Figura A1-21: cdf - Muros de mampostería confinada (ladrillos de concreto)**



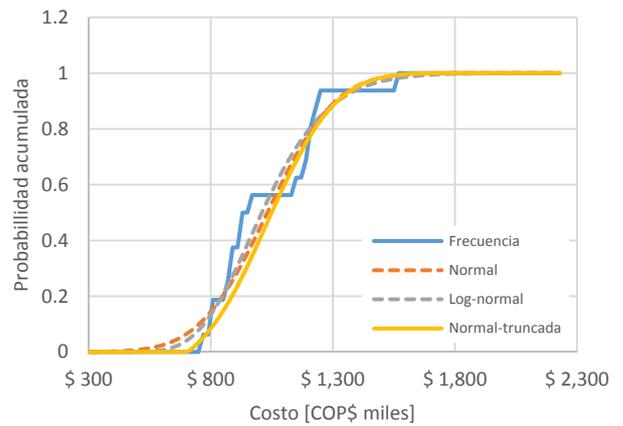
**Figura A1-22: cdf - Muros de mampostería confinada con diafragma**



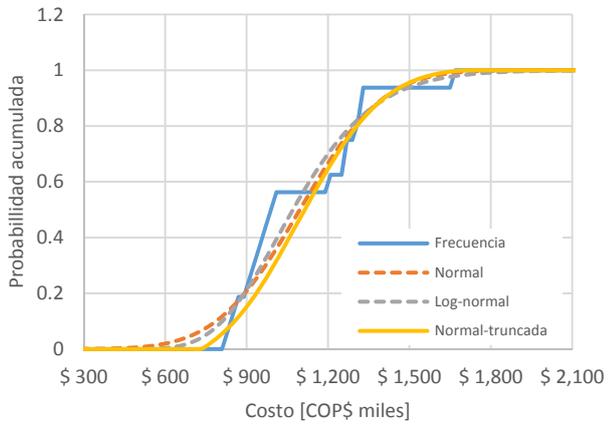
**Figura A1-23: cdf - Muros de mampostería confinada**



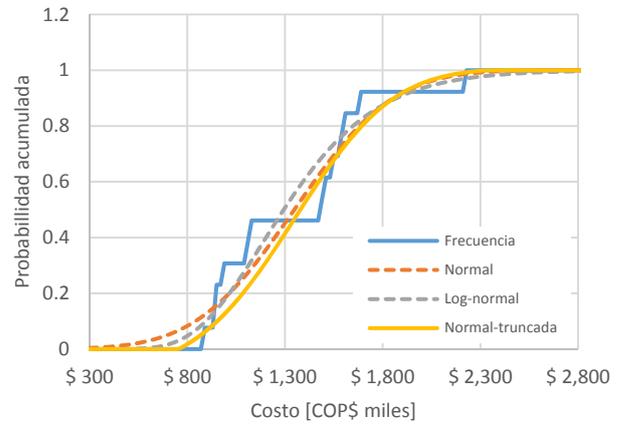
**Figura A1-24: cdf - Muros de mampostería confinada reforzada**



**Figura A1-25: cdf - Pórticos de concreto reforzado**



**Figura A1-26: cdf - Pórticos de concreto reforzado y muros de mampostería (ladrillos de concreto)**



**Figura A1-27: cdf - Pórticos de concreto reforzado arriostrados**

A continuación se presentan los momentos estadísticos de las distribuciones presentadas previamente junto con los límites de acotación de la distribución normal.

**Tabla A 1-1: Parámetros de las distribuciones de probabilidad de costos de obras de reforzamiento**

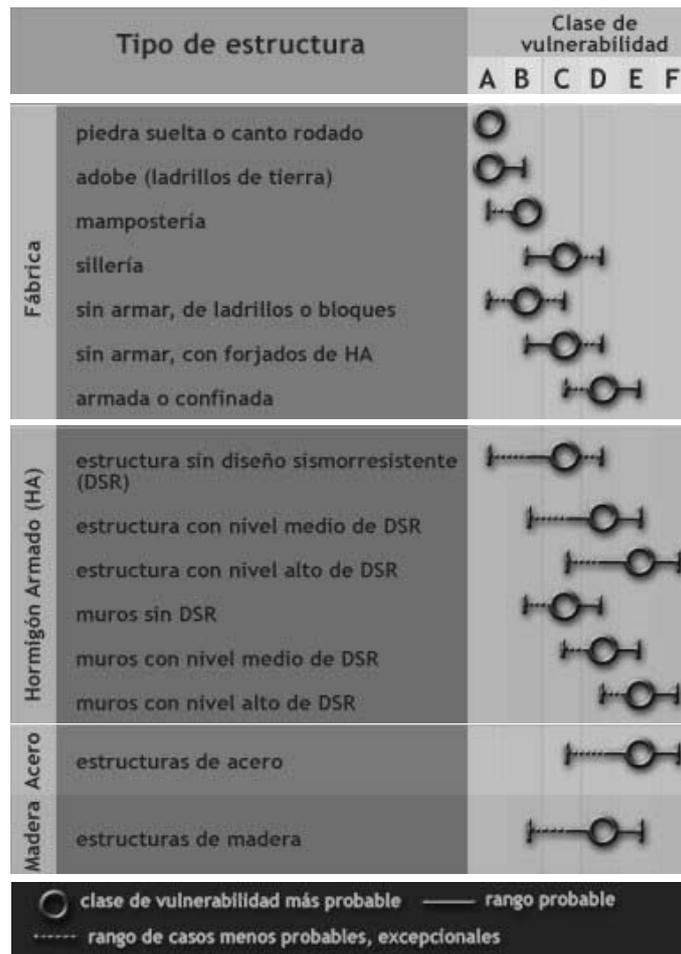
Sistema estructural	Normal		Log-normal		Límites normal trunc	
	\$/m <sup>2</sup>		\$/m <sup>2</sup>		\$/m <sup>2</sup>	
	$\mu()$	$\sigma()$	$\mu()$	$\sigma()$	$a*\sigma()$	$b*\sigma()$
Muros de mampostería simple (ladrillos de concreto) con diafragma	\$ 532,149	\$ 81,233	13.2	0.2	2.0	2.0
Muros de mampostería simple (ladrillos de concreto)	\$ 454,786	\$ 65,132	13.0	0.1	1.5	2.0
Muros de mampostería confinada (ladrillos de concreto) con diafragma	\$ 588,763	\$ 77,532	13.3	0.1	2.0	2.0
Muros de mampostería confinada (ladrillos de concreto)	\$ 479,110	\$ 85,364	13.1	0.2	1.5	1.5
Muros de mampostería confinada con diafragma	\$ 518,072	\$ 76,443	13.1	0.1	2.0	2.0
Muros de mampostería confinada	\$ 443,122	\$ 62,871	13.0	0.1	2.0	2.0
Muros de mampostería confinada reforzada	\$ 389,507	\$ 185,944	12.8	0.5	1.5	2.0
Pórticos de concreto reforzado	\$ 1,032,024	\$ 218,424	13.8	0.2	1.5	3.0
Pórticos de concreto reforzado y muros de mampostería (ladrillos de concreto)	\$ 1,096,502	\$ 241,005	13.9	0.2	1.5	2.5
Pórticos de concreto reforzado arriostrados	\$ 1,348,231	\$ 395,468	14.1	0.3	1.5	2.5



## **ANEXO 2 CLASIFICACIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS**

### A2.1 EMS 98 Clasificación de tipos estructurales

La escala la EMS-98 se define en 5 niveles de vulnerabilidad, con lo cual es posible determinar la demanda/intensidad sísmica de acuerdo a la definición de daños en las edificaciones para cada grado de intensidad de los 12 definidos en esta. Las descripciones de daños esperados para cada escala de intensidad sísmica junto con las distribuciones de edificaciones por tipo de vulnerabilidad/daño se presentan a continuación.



**Figura A2-1: Clases de vulnerabilidad por tipo constructivo.**

**Tabla A2-1: Clasificación de daños en edificios de mampostería.**

Grado de daño	Descripción
Grado 1.	Daños de despreciables a ligeros (ningún daño estructural, daños no estructurales ligeros). Fisuras en muy pocos muros. Caída sólo de pequeños trozos de revestimiento. Caída de piedras sueltas de las partes altas de los edificios en muy pocos casos.
Grado 2.	Daños moderados (daños estructurales ligeros, daños no estructurales moderados): Grietas en muchos muros. Caída de trozos bastante grandes de revestimiento. Colapso parcial de chimeneas.
Grado 3.	Daños de importancia a graves (daños estructurales moderados, daños no estructurales graves): Grietas grandes y generalizadas en la mayoría de los muros. Se sueltan tejas del tejado. Rotura de chimeneas por la línea del tejado. Se dañan elementos individuales no estructurales (tabiques, hastiales y tejados).
Grado 4.	Daños muy graves (daños estructurales graves, daños no estructurales muy graves): Se dañan seriamente los muros. Se dañan parcialmente los tejados y forjados.
Grado 5.	Destrucción (daños estructurales muy graves): Colapso total o casi total. Se dañan seriamente los muros. Se dañan parcialmente los tejados y forjados.

*(incluye las estructuras de piedra suelta o canto rodado, adobe, mampostería, sillería, sin armar de ladrillos o bloques, sin armar con forjados de hormigón armado, y las armadas o confinadas)*

**Tabla A2-2: Clasificación de daños en edificios de hormigón armado**

Grado de daño	Descripción
Grado 1.	Daños de despreciables a ligeros (ningún daño estructural, daños no estructurales ligeros). Fisuras en el revestimiento de pórticos o en la base de los muros. Fisuras en tabiques y particiones.
Grado 2.	Daños moderados (daños estructurales ligeros, daños no estructurales moderados): Grietas en vigas y pilares de pórticos y en muros estructurales. Grietas en tabiques y particiones; caída de enlucidos y revestimientos frágiles. Caída de mortero de las juntas de paneles prefabricados.
Grado 3.	Daños de importancia a graves (daños estructurales moderados, daños no estructurales graves): Grietas en pilares y en juntas viga-pilar en la base de los pórticos y en las juntas de los muros acoplados. Desprendimiento de revocos de hormigón, pandeo de la armadura de refuerzo. Grandes grietas en tabiques y particiones; se dañan paneles de particiones aislados.
Grado 4.	Daños muy graves (daños estructurales graves, daños no estructurales muy

	graves): Grandes grietas en elementos estructurales con daños en el hormigón por compresión y rotura de armaduras; fallos en la trabazón de la armadura de las vigas; ladeo de pilares. Colapso de algunos pilares o de una planta alta.
<b>Grado 5.</b>	Destrucción (daños estructurales muy graves): Colapso de la planta baja o de partes (por ejemplo alas) del edificio.

*(incluye las estructuras sin diseño sismorresistente, con nivel medio de diseño sismorresistente, con nivel alto de diseño sismorresistente, de muros sin diseño sismorresistente, de muros con nivel medio de diseño sismorresistente, y de muros con nivel alto de diseño sismorresistente)*

### Organización de la escala:

- a. Efectos en las personas.
- b. Efectos en los objetos y en la naturaleza (los efectos y fallos en el terreno se tratan especialmente en otra sección).
- c. Daños en edificios.

**Tabla A2-3: Grados de intensidad y descripción de la escala EMS-98:**

Grado de intensidad	Descripción
<b>Grado I. No sentido.</b>	a) No sentido, ni en las condiciones más favorables.
	b) Ningún efecto.
	c) Ningún daño.
<b>Grado II. Apenas sentido.</b>	a) El temblor es sentido sólo en casos aislados (< 1%) de individuos en reposo y en posiciones especialmente receptivas dentro de edificios.
	b) Ningún efecto.
	c) Ningún daño.
<b>Grado III. Débil.</b>	a) El terremoto es sentido por algunos dentro de edificios. Las personas en reposo sienten un balanceo o ligero temblor.
	b) Los objetos colgados oscilan levemente.
	c) Ningún daño.
<b>Grado IV. Ampliamente observado.</b>	a) El terremoto es sentido dentro de los edificios por muchos y sólo por muy pocos en el exterior. Se despiertan algunas personas. El nivel de vibración no asusta. La vibración es moderada. Los observadores sienten un leve temblor o cimbreo del edificio, la habitación o de la cama, la silla, etc.
	b) Golpeteo de vajillas, cristalerías, ventanas y puertas. Los objetos colgados oscilan. En algunos casos los muebles ligeros tiemblan visiblemente. En algunos casos chasquidos de la carpintería.
	c) Ningún daño.
<b>Grado V. Fuerte.</b>	a) El terremoto es sentido dentro de los edificios por la mayoría y por algunos en el exterior. Algunas personas se asustan y corren al

Grado de intensidad	Descripción
	<p>exterior. Se despiertan muchas de las personas que duermen. Los observadores sienten una fuerte sacudida o bamboleo de todo el edificio, la habitación o el mobiliario.</p> <p>b) Los objetos colgados oscilan considerablemente. Las vajillas y cristalerías chocan entre sí. Los objetos pequeños, inestables y/o mal apoyados pueden desplazarse o caer. Las puertas y ventanas se abren o cierran de pronto. En algunos casos se rompen los cristales de las ventanas. Los líquidos oscilan y pueden derramarse de recipientes totalmente llenos. Los animales dentro de los edificios se pueden inquietar.</p> <p>c) Daños de grado 1 en algunos edificios de clases de vulnerabilidad A y B.</p>
<b>Grado VI. Levemente dañino.</b>	<p>a) Sentido por la mayoría dentro de los edificios y por muchos en el exterior. Algunas personas pierden el equilibrio. Muchos se asustan y corren al exterior.</p> <p>b) Pueden caerse pequeños objetos de estabilidad ordinaria y los muebles se pueden desplazar. En algunos casos se pueden romper platos y vasos. Se pueden asustar los animales domésticos (incluso en el exterior).</p> <p>c) Se presentan daños de grado 1 en muchos edificios de clases de vulnerabilidad A y B; algunos de clase A y B sufren daños de grado 2; algunos de clase C sufren daños de grado 1.</p>
<b>Grado VII. Dañino.</b>	<p>a) La mayoría de las personas se asusta e intenta correr fuera de los edificios. Para muchos es difícil mantenerse en pie, especialmente en plantas superiores.</p> <p>b) Se desplazan los muebles y pueden volcarse los que sean inestables. Caída de gran número de objetos de estanterías. Salpica el agua de los recipientes, depósitos y estanques.</p> <p>c) Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 2; algunos de grado 3. Algunos edificios de clase de vulnerabilidad C presentan daños de grado 2. Algunos edificios de clase de vulnerabilidad D presentan daños de grado 1.</p>
<b>Grado VIII. Gravemente dañino.</b>	<p>a) Para muchas personas es difícil mantenerse en pie, incluso fuera de los edificios.</p> <p>b) Se pueden volcar los muebles. Caen al suelo objetos como televisores, máquinas de escribir, etc. Ocasionalmente las lápidas se pueden desplazar, girar o volcar. En suelo muy blando se pueden ver ondulaciones.</p> <p>c) Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daños de grado</p>

Grado de intensidad	Descripción
	4; algunos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 2; algunos de grado 3. Algunos edificios de clase de vulnerabilidad D presentan daños de grado 2.
<b>Grado IX. Destructor.</b>	<p>a) Pánico general. Las personas pueden ser lanzadas bruscamente al suelo.</p> <p>b) Muchos monumentos y columnas se caen o giran. En suelo blando se ven ondulaciones.</p> <p>c) Muchos edificios de clase de vulnerabilidad A sufren daños de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 4; algunos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 2; algunos de grado 3. Algunos edificios de clase de vulnerabilidad E presentan daños de grado 2.</p>
<b>Grado X. Muy destructor.</b>	c) La mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad A presentan daños de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad B sufren daños de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 4; algunos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad E sufren daños de grado 2; algunos de grado 3. Algunos edificios de clase de vulnerabilidad F presentan daños de grado 2.
<b>Grado XI. Devastador.</b>	c) La mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad B presentan daños de grado 5. La mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad C sufren daños de grado 4; muchos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad D sufren daños de grado 4; algunos de grado 5. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad E sufren daños de grado 3; algunos de grado 4. Muchos edificios de clase de vulnerabilidad F sufren daños de grado 2; algunos de grado 3.
<b>Grado XII. Completamente devastador.</b>	c) Se destruyen todos los edificios de clases de vulnerabilidad A, B y prácticamente todos los de clase C. Se destruyen la mayoría de los edificios de clase de vulnerabilidad D, E y F. Los efectos del terremoto alcanzan los efectos máximos concebibles.

## A2.2 PAGER-STR Tipos constructivos

Para el territorio Norteamericano se han desarrollado taxonomías como la PAGER-STR en el marco del “*Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response*” (PAGER) como una mejora al proceso de difusión de información para la atención de emergencias el USGS “*National Earthquake Information Center*” (NEIC).

**Tabla A2-4: tipologías constructivas definidas en le PAGER-STR (en inglés)**

General Description	Description	
	PAGER-STR	
Wood/Timber	W	Wood
	W1	Wood stud-wall frame with plywood/gypsum board sheathing. Absence of masonry infill walls. Shear wall system consists of plywood or manufactured wood panels. Exterior is commonly cement plaster ("stucco"), wood or vinyl planks, or aluminum planks (in lower cost houses). In addition, brick masonry or stone is sometimes applied to the exterior as a non-load-bearing veneer. The roof and floor act as diaphragms to resist lateral loading. (US & Canadian single family homes).
	W2	Wood frame, heavy members (with area > 5000 sq. ft.) (US & Canadian commercial and industrial wood frame).
	W3	Light post and beam wood frame. The floors and roofs do not act as diaphragms. No bracing, poor seismic load resistance path with poor connections. Timber frame may have partial infill walls with or without timber cladding.
	W4	Wooden panel or log construction. (Typically in central Asia, Russia). Walls are made of timber logs sawn horizontally in a square or circular cross section and assembled with special end joints.
	W5	Walls with bamboo/light timber log/reed mesh and post (Wattle and Daub).(Wattle and Daub- a woven lattice/sticks of wooden strips called wattle is daubed with a sticky material usually made of some combination of wet soil, clay, sand, animal dung and straw).
	W6	Unbraced heavy post and beam wood frame with mud or other infill material. Un-braced timber frame with connections meant to resist (gravity) vertical loads only. Floors or roof consists of wood purlins supporting thatched roof, wood planks or rafters

		supporting clay tiles.
	W7	Braced wood frame with load-bearing infill wall system. Frame is diagonally braced and infill walls are generally made of brick masonry, adobe, or wooden planks or wattle & daub infill. (European style)
Adobe/Mud Walls	M	Mud walls
	M1	Mud walls without horizontal wood elements
	M2	Mud walls with horizontal wood elements
	A	Adobe blocks (unbaked sundried mud block) walls
	A1	Adobe block, mud mortar, wood roof and floors
	A2	Adobe block, mud mortar, bamboo, straw, and thatch roof
	A3	Adobe block, straw, and thatch roof cement-sand mortar
	A4	Adobe block, mud mortar, reinforced concrete bond beam, cane and mud roof
	A5	Adobe block, mud mortar, with bamboo or rope reinforcement
	RE	Rammed Earth/Pneumatically impacted stabilized earth
Stone/Block Masonry	RS	Rubble stone (field stone) masonry
	RS1	Local field stones dry stacked (no mortar) with timber floors, earth, or metal roof.
	RS2	Local field stones with mud mortar.
	RS3	Local field stones with lime mortar.
	RS4	Local field stones with cement mortar, vaulted brick roof and floors
	RS5	Local field stones with cement mortar and reinforced concrete bond beam.
	DS	Rectangular cut-stone masonry block
	DS1	Rectangular cut stone masonry block with mud mortar, timber roof and floors
	DS2	Rectangular cut stone masonry block with lime mortar
	DS3	Rectangular cut stone masonry block with cement mortar
DS4	Rectangular cut stone masonry block with reinforced concrete floors and roof	

	MS	Massive stone masonry in lime or cement mortar
	UCB	Unreinforced concrete block masonry with lime or cement mortar
Brick Masonry	UFB	Unreinforced fired brick masonry
	UFB1	Unreinforced brick masonry in mud mortar without timber posts
	UFB2	Unreinforced brick masonry in mud mortar with timber posts
	UFB3	Unreinforced brick masonry in lime mortar
	UFB4	Unreinforced fired brick masonry, cement mortar, timber flooring, timber or steel beams and columns, tie courses (bricks aligned perpendicular to the plane of the wall)
	UFB5	Unreinforced fired brick masonry, cement mortar, but with reinforced concrete floor and roof slabs
Reinforced/Confined Masonry	RM	Reinforced masonry
	RM1	Reinforced masonry bearing walls with wood or metal deck diaphragms
	RM1L	Reinforced masonry bearing walls with wood or metal deck diaphragms low-rise
	RM1M	Reinforced masonry bearing walls with wood or metal deck diaphragms mid-rise (4+ stories)
	RM2	Reinforced masonry bearing walls with concrete diaphragms
	RM2L	Reinforced masonry bearing walls with concrete diaphragms low-rise
	RM2M	Reinforced masonry bearing walls with concrete diaphragms mid-rise
	RM2H	Reinforced masonry bearing walls with concrete diaphragms high-rise
	RM3	Confined masonry
Reinforced Concrete	C	Reinforced concrete
	C1	Ductile reinforced concrete moment frame with or without infill
	C1L	Ductile reinforced concrete moment frame with or without infill low-rise
	C1M	Ductile reinforced concrete moment frame with or without infill mid-rise
	C1H	Ductile reinforced concrete moment frame with or without infill high-rise

Precast Conc	C2	Reinforced concrete shear walls
	C2L	Reinforced concrete shear walls low-rise
	C2M	Reinforced concrete shear walls mid-rise
	C2H	Reinforced concrete shear walls high-rise
	C3	Nonductile reinforced concrete frame with masonry infill walls
	C3L	Nonductile reinforced concrete frame with masonry infill walls low-rise
	C3M	Nonductile reinforced concrete frame with masonry infill walls mid-rise
	C3H	Nonductile reinforced concrete frame with masonry infill walls high-rise
	C4	Nonductile reinforced concrete frame without masonry infill walls
	C4L	Nonductile reinforced concrete frame without masonry infill walls low-rise
	C4M	Nonductile reinforced concrete frame without masonry infill walls mid-rise
	C4H	Nonductile reinforced concrete frame without masonry infill walls high-rise
	C5	Steel reinforced concrete (Steel members encased in reinforced concrete)
	C5L	Steel reinforced concrete (Steel members encased in reinforced concrete) low-rise
	C5M	Steel reinforced concrete (Steel members encased in reinforced concrete) mid-rise
	C5H	Steel reinforced concrete (Steel members encased in reinforced concrete) high-rise
	C6	Concrete moment resisting frame with shear wall - dual system
	C6L	Concrete moment resisting frame with shear wall - dual system low-rise
	C6M	Concrete moment resisting frame with shear wall - dual system mid-rise
	C6H	Concrete moment resisting frame with shear wall - dual system high-rise
C7	Flat slab structure	
PC1	Precast concrete tilt-up walls	

	PC2	Precast concrete frames with concrete shear walls
	PC2L	Precast concrete frames with concrete shear walls low-rise
	PC2M	Precast concrete frames with concrete shear walls mid-rise
	PC2H	Precast concrete frames with concrete shear walls high-rise
	PC3	Precast reinforced concrete moment resisting frame with masonry infill walls
	PC3L	Precast reinforced concrete moment resisting frame with masonry infill walls low-rise
	PC3M	Precast reinforced concrete moment resisting frame with masonry infill walls mid-rise
	PC3H	Precast reinforced concrete moment resisting frame with masonry infill walls high-rise
	PC4	Precast panels (wall panel structure)
Steel	S	Steel
	S1	Steel moment frame
	S1L	Steel moment frame low-rise
	S1M	Steel moment frame mid-rise
	S1H	Steel moment frame high-rise
	S2	Steel braced frame
	S2L	Steel braced frame low-rise
	S2M	Steel braced frame mid-rise
	S2H	Steel braced frame high-rise
	S3	Steel light frame
	S4	Steel frame with cast-in-place concrete shear walls
	S4L	Steel frame with cast-in-place concrete shear walls low-rise
	S4M	Steel frame with cast-in-place concrete shear walls mid-rise
	S4H	Steel frame with cast-in-place concrete shear walls high-rise
	S5	Steel frame with unreinforced masonry infill walls
S5L	Steel frame with unreinforced masonry infill walls low-rise	

	S5M	Steel frame with unreinforced masonry infill walls mid-rise
	S5H	Steel frame with unreinforced masonry infill walls high-rise
	MH	Mobile homes
Other	INF	Informal constructions (generally made of wood/plastic sheets/GI Sheets/light metal or composite etc not confirming to engineering standards. Such constructions are common in slums, squatters).
	UNK	Not specified (unknown/default)

### A2.3 RISK-UE Matriz de tipologías estructurales

De igual manera que para el territorio Norteamericano, y derivado de la escala EMS-98 (Grünthal, 1998), la metodología RISK-UE (Yves, 2004) para la evaluación de riesgo sísmico define una taxonomía ajustada para la región, denominada como *Building Type Matrix* (BTM) descrita a continuación.

**Tabla A2-5: Matriz de tipologías estructurales BTM**

Tipo estructural	Descripción
M1.1	Muros de carga con mampostería de piedras y piedra machacada
M1.2	Muros de carga con mampostería de piedra tallada
M1.3	Muros de carga de mampostería de sillería
M2	Adobe
M3.1	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de madera
M3.2	Muros de carga de mampostería no reforzada con bóvedas de mampostería
M3.3	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería
M3.4	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de losas de hormigón armado
M4	Muros de carga de mampostería reforzados o confinados
M5	Edificios de mampostería totalmente reforzada
RC1	Estructuras de hormigón resistentes al momento
RC2	Muros de cortante de hormigón,
RC3.1	Estructuras de hormigón con muros de relleno regulares de mampostería no reforzada
RC3.2	Estructuras de hormigón irregulares con muros de mampostería no reforzada

Análisis beneficio-costo probabilistas  
de medidas de mitigación de riesgo por sismo

---

RC4	Sistemas duales, muros y pórticos de hormigón armado
RC5	Muros de hormigón prefabricado
RC6	Estructuras de hormigón prefabricado con muros de cortante de hormigón
S1	Estructuras metálicas resistentes al momento
S2	Estructuras metálicas arriostradas
S3	Estructuras metálicas con muros de relleno de mampostería no reforzada
S4	Estructuras metálicas con muros de cortante de hormigón colocados in situ
S5	Sistemas o estructuras mixtas, de acero y hormigón armado
W	Estructuras de madera



**ANEXO 3 RELACIONES ENTRE CURVAS DE FRAGILIDAD,  
MATRICES DE PROBABILIDAD Y FUNCIONES DE  
VULNERABILIDAD**

Este aparte en su mayoría ha sido una contribución de Mario Ordaz, que ha contribuido a los desarrollos realizados sobre el tema:

### **Curvas de fragilidad**

En términos generales, las curvas de fragilidad estipulan cuánto vale la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño como función de cierto parámetro de la demanda sísmica.

Supongamos que existen  $N$  estados de daño, que llamaremos  $ED_i$ ,  $i=0\dots N$ . Entonces, las curvas de fragilidad estipulan que la probabilidad de que se alcance o exceda el  $i$ -ésimo estado de daño, dado que se presentó una demanda sísmica  $s$ , puede ser calculada, con la ayuda una función de fragilidad, de la siguiente manera:

$$Pr(\text{alcanzar o exceder el } ED_i) = f_i(s; \theta_i) \quad (65)$$

donde  $\theta_i$  es un vector de parámetros de la función de fragilidad  $f_i(s; \theta_i)$ .

Puesto que se trata de estados de daño discretos, es posible calcular la probabilidad de estar exactamente en el estado de daño  $i$  con la siguiente relación:

$$\begin{aligned} Pr(\text{estar exactamente en el estado de daño } i | s) \\ = f_{i+1}(s; \theta_{i+1}) - f_i(s; \theta_i) \end{aligned} \quad (66)$$

Por convención se admite que el estado de daño  $0$  corresponde a total ausencia de daños y que la probabilidad de alcanzarlo o excederlo, dado cualquier valor de intensidad, es igual a 1. Se admite también que el  $N$ -ésimo estado de daño corresponde al colapso y que la probabilidad de estar en un estado de daño superior es nula.

### **Matrices de probabilidad**

A partir de la expresión anterior es posible calcular las llamadas matrices de probabilidad de daños, que establecen cual es la probabilidad de que, dado que se presentó una demanda sísmica  $s$ , el edificio se encuentre exactamente en el estado de daño  $ED_i$ . Estas matrices tienen la siguiente forma:

**Tabla A3-1: Matrices de probabilidad de daños**

		Demanda			
		S1	S2	S3	S4
Estado de daño	0	$Pr(ED=0) S1$	$Pr(ED=0) S2$	$Pr(ED=0) S3$	$Pr(ED=0) S4$
	1	$Pr(ED=1) S1$	$Pr(ED=1) S2$	$Pr(ED=1) S3$	$Pr(ED=1) S4$
	2	$Pr(ED=2) S1$	$Pr(ED=2) S2$	$Pr(ED=2) S3$	$Pr(ED=2) S4$
	3	$Pr(ED=3) S1$	$Pr(ED=3) S2$	$Pr(ED=3) S3$	$Pr(ED=3) S4$
	...				
	N	$Pr(ED=N) S1$	$Pr(ED=N) S2$	$Pr(ED=N) S3$	$Pr(ED=N) S4$

Para una intensidad dada, ¿tiene sentido calcular el “estado de daño medio”? El “estado de daño medio” resultaría de efectuar la siguiente operación:

$$EDM|S = \sum_{i=0}^N i Pr(Ed = i|S) \quad (67)$$

En términos generales, la operación descrita en la expresión anterior no tiene sentido. Los estados de daño, en principio, no están asociados a ninguna métrica susceptible de ser ponderada. Los valores 0, 1, ..., N con que los identificamos son sólo eso, identificaciones o letreros. Por ello, en general, el “estado de daño medio” no tiene ningún sentido útil.

### Cálculo de pérdidas económicas

Nótese que hasta ahora, las curvas de fragilidad y las matrices de probabilidad de daño no nos permiten calcular pérdidas económicas. En efecto, aunque sabemos cuál es la probabilidad de alcanzar cierto estado de daño dado que la demanda tuvo un valor conocido, no sabemos cuál será el costo monetario de haber alcanzado tal estado de daño.

Sin embargo, podemos asociar un valor monetario (o, como veremos más adelante, un rango de valores monetarios) a un estado de daño, calculando, por ejemplo, cuánto costaría restituir a la estructura sus condiciones originales después de que alcanzó en cierto estado de daño. Denominaremos este valor monetario como pérdida, y asociaremos al estado de daño  $ED_i$  la pérdida  $Li$ . En otras palabras, cada vez que la estructura entre al estado de daño  $i$ , su dueño tendrá que pagar la cantidad  $Li$ .

En estas condiciones, es posible calcular, a partir de las matrices de probabilidad de daño, momentos estadísticos de la pérdida para valores de demanda conocidos, de la siguiente manera:

$$E(L^k|S) = \sum_{i=0}^N L^k_i Pr(Ed = i|S) \quad (68)$$

Con los primeros dos momentos ( $k=1$  y  $k=2$ ) podremos calcular el valor esperado y la desviación estándar de la pérdida dado un valor de demanda.

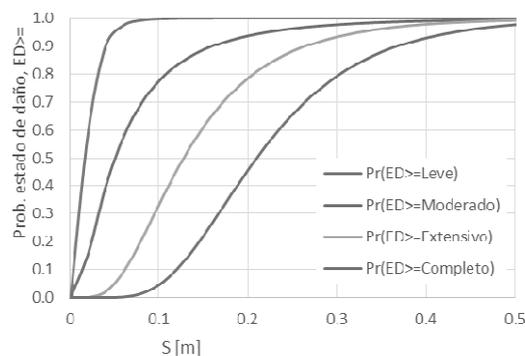
Tomaremos el ejemplo del artículo de Vielma et al (2007). Encontramos que se tienen 5 estados de daño (nulo, leve, moderado, severo y colapso). La demanda sísmica se especifica en términos del desplazamiento espectral. Para los últimos cuatro estados de daño, las curvas de fragilidad son de la siguiente forma:

$$Pr(ED > i|S) = \Phi\left(\frac{1}{\beta_i} \ln \frac{S}{\mu_i}\right) \quad (69)$$

Los valores  $\beta_i$  y  $\mu_i$  son diferentes para cada estado de daño y, aunque no se reportan en el artículo, pueden ser obtenidos fácilmente de manera gráfica, dando lugar a la siguiente tabla:

**Tabla A3-2: Parámetros que definen las curvas de fragilidad en el ejemplo de Vielma et al (2007)**

i	Estado de daño		
1	Leve	0.018	0.623
2	Moderado	0.051	0.892
3	Severo	0.128	0.566
4	Colapso	0.210	0.437



**Figura A3-1: Curvas de fragilidad del ejemplo de Vielma et al (2007).**

Con estas curvas podríamos calcular, por ejemplo, cuáles serían las probabilidades de estar en diferentes estados de daño si la demanda fuera, por ejemplo, 0.162 m. Estos valores se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla A3-3: Probabilidad de estar exactamente en el estado de daño, dado que**

Nulo	Leve	Moderado	Severo	Colapso
0.0000	0.097	0.241	0.385	0.276

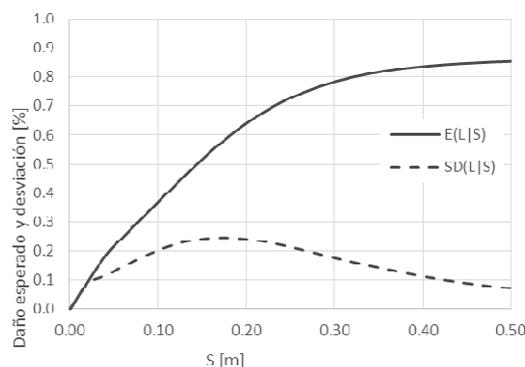
Sin embargo, no estamos en posibilidad de calcular pérdidas económicas puesto que no conocemos las pérdidas asociadas a los diferentes estados de daño. Digamos que adoptamos los siguientes valores:

**Tabla A3-4: Pérdida esperada asociada a cada estado de daño**

L0	L1	L2	L3	L4
0.003	0.103	0.315	0.580	0.865

En este caso hemos medido la pérdida como una fracción del valor de reposición de la estructura. Por ejemplo, la pérdida de 0.315 asociada al estado de daño 2 implica que el costo económico de hallarse en ese estado de daño es el 31.5% del valor total de la estructura.

Entonces, de acuerdo con las ecuaciones anteriormente descritas y utilizando los valores de la Tabla A3-4, estamos en posibilidad de calcular el valor esperado de la pérdida y su desviación estándar, como función de la demanda. Las curvas correspondientes se presentan en la Figura A3-2:



**Figura A3-2: Esperanza y desviación estándar de la pérdida implícitas en las funciones de fragilidad descritas por la ecuación 4 y la Tabla 2, en conjunto con las relaciones estado de daño – pérdida dadas en la Tabla 3.**

Las curvas de la Figura A3-2 son justamente las funciones de vulnerabilidad. Hemos demostrado entonces que:

- Las funciones de fragilidad, adicionadas de relaciones entre el estado de daño y la pérdida económica, permiten derivar funciones de vulnerabilidad
- Las curvas de fragilidad por sí solas no son suficientes para hacer estimaciones de daño económico en una estructura.

### Funciones de vulnerabilidad

Como hemos indicado, las funciones de vulnerabilidad describen la variación de momentos estadísticos de la pérdida (media y desviación estándar en nuestro caso) como función de la demanda sísmica.

En principio, en vista de que con la ecuación (68) podríamos calcular tantos momentos estadísticos de la pérdida como quisiéramos, la distribución de probabilidades completa de la pérdida quedaría totalmente definida (conviene recordar que conocer todos los momentos estadísticos de una variable aleatoria equivale a conocer su distribución de probabilidad completa).

Cuando se utilizan funciones de vulnerabilidad, sin embargo, es usual especificar solamente los dos primeros momentos de la pérdida y asumir que su distribución de probabilidad es Beta.

Utilizaremos la siguiente parametrización para la densidad de probabilidad:

$$P_{L|S}(L) = L^{a-1}(1-L)^{b-1} \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} \quad (70)$$

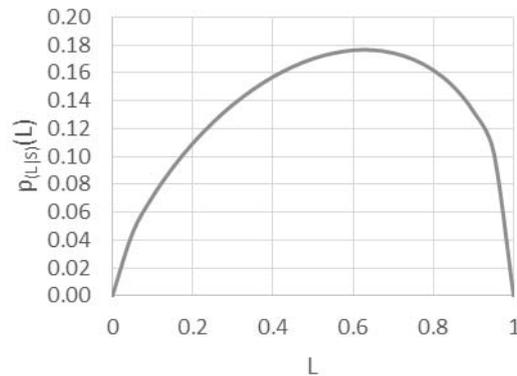
donde  $a$  y  $b$  son parámetros de la distribución que, como veremos, en general son funciones de la demanda sísmica  $S$ . Con esta parametrización tenemos que  $a$  y  $b$  están relacionados con la media y desviación estándar de la pérdida de la siguiente manera:

$$a = \frac{1 - (1 + c^2(L|S))E(L|S)}{c^2(L|S)} \quad (71)$$

$$b = a \frac{1 - E(L|S)}{E(L|S)} \quad (72)$$

donde  $c(L|S) = SD(L|S)/E(L|S)$  es el coeficiente de variación de la pérdida para cierto valor de demanda. Entonces, dado un valor de  $S$ , podemos calcular la media y desviación estándar de la pérdida y determinar los coeficientes  $a$  y  $b$  correspondientes, con lo que quedaría completamente determinada su

distribución de probabilidad. Siguiendo con el ejemplo numérico anterior, para un valor de  $S=0.162\text{ m}$  podemos determinar que  $E(L/S)=0.548$ ,  $SD(L/S)=0.246$ , con lo que  $a=1.692$  y  $b=1.394$ . La densidad de probabilidad correspondiente se ilustra en la siguiente figura:



**Figura A3-3: Densidad de probabilidad de la pérdida dado que la demanda sísmica fue igual a 0.162 m.**

La variable aleatoria descrita por la densidad de probabilidad de la figura 3 tiene distribución Beta y media y desviación estándar iguales, precisamente, a  $0.548$  y  $0.246$ , respectivamente.

Hasta ahora, hemos demostrado que las funciones de vulnerabilidad, junto con una suposición de la forma de la distribución de la pérdida, contienen toda la información necesaria para fijar distribuciones de probabilidad de la pérdida condicionadas a cierto valor de intensidad.

¿Podríamos determinar probabilidades de estar en cierto estado de daño utilizando las funciones de vulnerabilidad? Sí, siempre que contemos, nuevamente, con relaciones entre estado y daño y valores de pérdida.

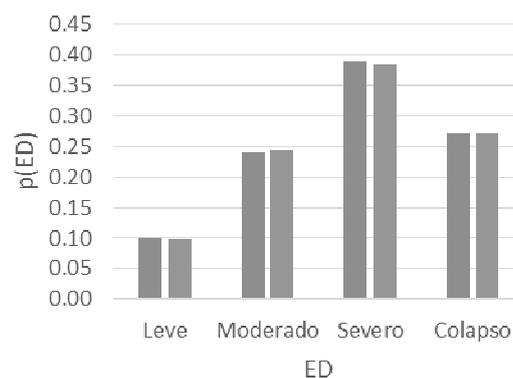
A diferencia de los estados de daño, que más o menos arbitrariamente fueron definidos como estados discretos, la pérdida es una variable continua que, usando nuestra definición, puede tomar valores entre  $0$  y  $1$ . Debemos, por tanto, asociar estados de daño a todos los valores posibles de pérdida. Esto puede hacerse definiendo los estados de daño no con el valor esperado de la pérdida, sino con un rango de valores posibles de pérdida que forman parte del mismo estado de daño. Tomemos, por ejemplo, los siguientes rangos:

**Tabla A3-5: Rangos de pérdida que definen los estados de daño**

Estado de daño	0	1	2	3	4
<b>Límite superior</b>	0.000	0.005	0.200	0.430	0.730
<b>Límite inferior</b>	0.005	0.200	0.430	0.730	1.000
<b>Marca de Clase</b>	0.003	0.103	0.315	0.580	0.865

Con los números de la Tabla A3-5 estamos diciendo que si la pérdida estuviese, por ejemplo, entre 0.005 y 0.200, su estado de daño sería clasificado como 2. Nótese que hemos seleccionado los intervalos de clase de suerte que su marca de clase coincida con los valores de pérdida dados en la Tabla A3-4.

Con estas consideraciones, estamos en posibilidad de calcular probabilidades de estado de daño dado un valor de demanda. Por ejemplo, si la demanda fuera  $0.162 m$ , sabemos que la densidad de probabilidad de la pérdida es la de la Figura A3-3, por lo que para calcular probabilidades de estar en cierto estado de daño dada una demanda, bastaría calcular la probabilidad de que la pérdida estuviese entre el límite superior y el inferior de las pérdidas que definen un estado de daño. Al hacer estas operaciones obtenemos valores que se presentan en la siguiente figura, donde se comparan con los dados en la Tabla A3-3, es decir, los obtenidos directamente de la matriz de probabilidad de daño.



**Figura A3-4: Probabilidades de estar en cierto estado de daño calculadas con curvas de fragilidad y funciones de vulnerabilidad.**

Puede observarse que las probabilidades calculadas son prácticamente iguales. Hemos demostrado entonces que:

- Las funciones de vulnerabilidad, por sí solas, son suficientes para hacer estimaciones del daño económico en una estructura
- Las funciones de vulnerabilidad, adicionadas con una definición cuantitativa de los estados de daño, permiten estimar probabilidades de encontrarse en un estado de daño determinado.

### Relaciones límite

Supongamos que tenemos un número infinitamente grande de estados límite, para cada uno de los cuales tendremos una curva de fragilidad y un valor de pérdida. El estado de daño será entonces una variable continua. Entonces, la ecuación (68) toma la siguiente forma:

$$E(L^k|S) = \sum_{i=0}^{\infty} L^k_i Pr(Ed = i|S) \quad (73)$$

Pero, de acuerdo con la ecuación 2:

$$E(L^k|S) = \sum_{i=0}^N L^k_i [f_{i+1}(s; \theta_{i+1}) - f_i(s; \theta_i)] \quad (74)$$

Que también podría escribirse así:

$$E(L^k|S) = \sum_{i=0}^N L^k_i \frac{f_{i+1}(s; \theta_{i+1}) - f_i(s; \theta_i)}{\Delta i} \Delta i \quad (75)$$

Si hacemos que la separación entre estados de daño sea infinitesimal, el término  $(f_{i+1}(s; \theta_{i+1}) - f_i(s; \theta_i))/\Delta i$  es justamente la derivada de la curva de fragilidad con respecto al estado de daño, que es ya una variable continua. En esas condiciones,

$$E(L^k|S) = \int_0^{\infty} L^k_i \frac{df}{di} di = \int_0^{\infty} L^k_i di \quad (76)$$

La ecuación anterior establece una relación general entre funciones de vulnerabilidad y curvas de fragilidad.

En conclusión, las funciones de vulnerabilidad contienen toda la información necesaria para hacer estimaciones de pérdidas económicas. Si este es el propósito del estudio, las funciones de vulnerabilidad constituyen un medio completo y directo para lograrlo.

Las curvas de fragilidad no contienen toda la información que se requiere para hacer estimaciones económicas de las pérdidas. Para lograr esto último, es necesario adicionar relaciones cuantitativas entre estado de daño y pérdida económica. Si el propósito del estudio es estimar probabilidades de encontrarse en cierto estado de daño, tal como ocurre en los métodos de diseño por desempeño, entonces las curvas de fragilidad son suficientes.

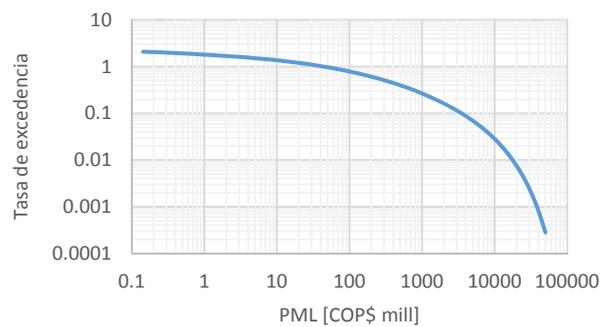
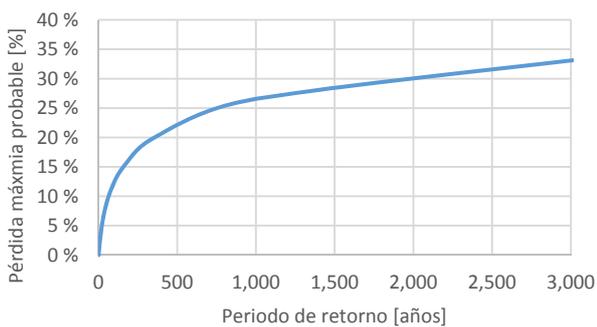
**ANEXO 4 RESULTADOS ANÁLISIS PROBABILISTA DE RIESGO  
SÍSMICO DE EDIFICACIONES PÚBLICAS DE LA CIUDAD DE  
MANIZALES**

**A4.1 Estado actual: sin obras de mitigación**

**Todas las edificaciones públicas**

**Tabla A4-1: Resultados de riesgo de las edificaciones públicas, estado actual**

Resultados		
Valor Expuesto	COP\$ [millones]	\$ 144,151
Riesgo		
Pérdida anual esperada	COP\$ [millones]	\$ 1,448
	‰	10.05
PML		
Periodo de retorno	Pérdidas	
años	COP\$ [millones]	%
225	\$ 24,066	16.70
475	\$ 30,610	21.23
1000	\$ 38,181	26.49
1500	\$ 40,529	28.12
2500	\$ 45,227	31.37



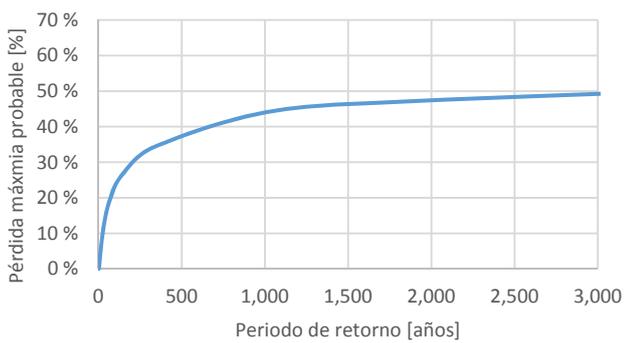
**Figura A4-1: Curva de pérdida máxima probable para el grupo de edificaciones públicas, estado actual**

**Figura A4-2: Curva de excedencia de pérdidas para el grupo de edificaciones públicas, estado actual**

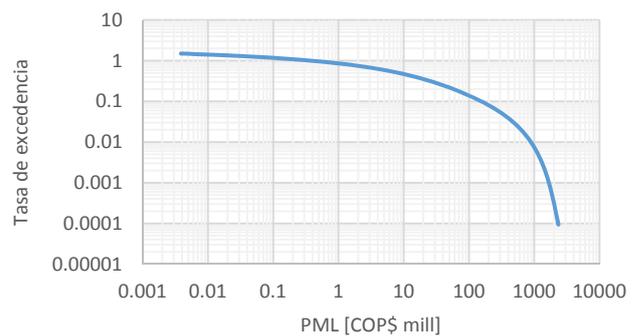
**Grupo de edificaciones de servicios de salud**

**Tabla A4-2: Resultados de riesgo de las edificaciones públicas de salud, estado actual**

Resultados		
Valor Expuesto	COP\$ [millones]	\$ 3,853
Riesgo		
Pérdida anual esperada	COP\$ [millones]	\$ 63
	‰	16.24
PML		
Periodo de retorno	Pérdidas	
años	COP\$ [millones]	%
225	\$ 1,142	29.64
475	\$ 1,391	36.09
1000	\$ 1,621	42.07
1500	\$ 1,780	46.19
2500	\$ 1,841	47.78



**Figura A4-3: Curva de pérdida máxima probable para el grupo de edificaciones públicas de salud, estado actual**

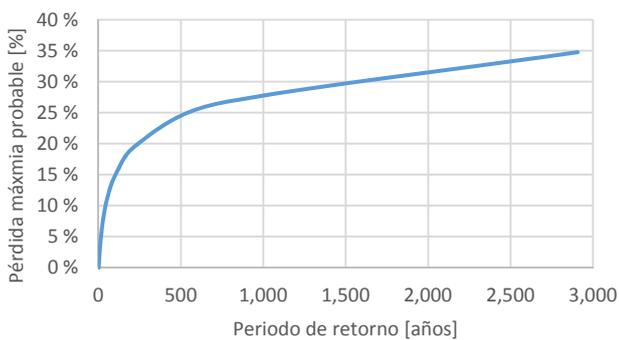


**Figura A4-4: Curva de excedencia de pérdidas para el grupo de edificaciones públicas de salud, estado actual**

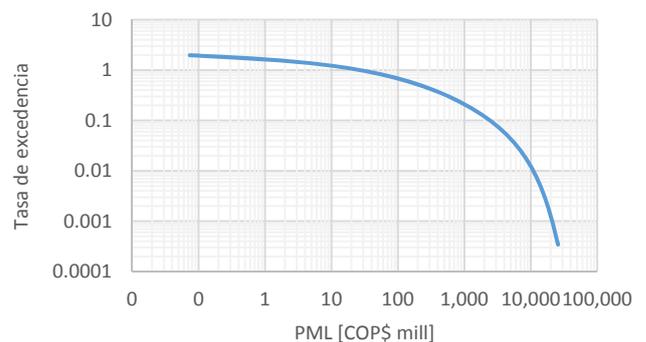
**Grupo de edificaciones de servicios educativos**

**Tabla A4-3: Resultados de riesgo de las edificaciones públicas de educación, estado actual**

Resultados		
Valor Expuesto	COP\$ [millones]	\$ 73,944
Riesgo		
Pérdida anual esperada	COP\$ [millones]	\$ 952
	‰	12.87
PML		
Periodo de retorno	Pérdidas	
años	COP\$ [millones]	%
225	\$ 14,329	19.38
475	\$ 17,140	23.18
1000	\$ 20,320	27.48
1500	\$ 21,731	29.39
2500	\$ 24,552	33.20



**Figura A4-5: Curva de pérdida máxima probable para el grupo de edificaciones públicas de educación, estado actual**



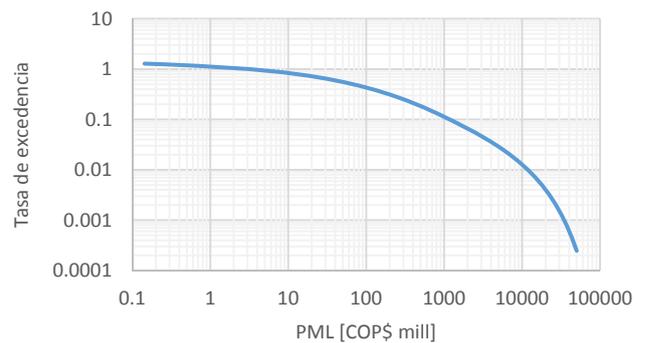
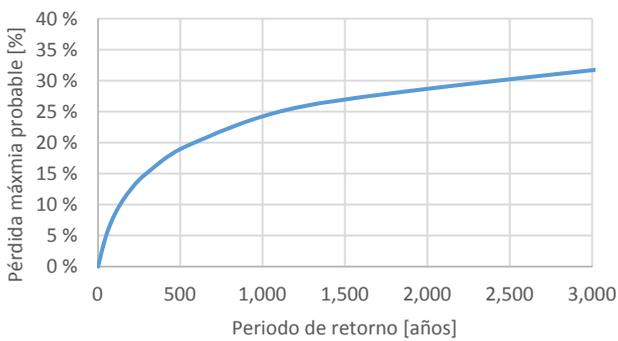
**Figura A4-6: Curva de excedencia de pérdidas para el grupo de edificaciones públicas de educación, estado actual**

## A4.2 Estado reforzado: ejecución de obras de mitigación

### Todas las edificaciones públicas

**Tabla A4-4: Resultados de riesgo de las edificaciones públicas, estado reforzado**

Resultados		
Valor Expuesto	COP\$ [millones]	\$ 144,151
Riesgo		
Pérdida anual esperada	COP\$ [millones]	\$ 663
	‰	4.60
PML		
Periodo de retorno	Pérdidas	
	años	COP\$ [millones]      %
225	\$ 18,665	12.95
475	\$ 26,098	18.10
1000	\$ 33,807	23.45
1500	\$ 38,688	26.84
2500	\$ 43,205	29.97



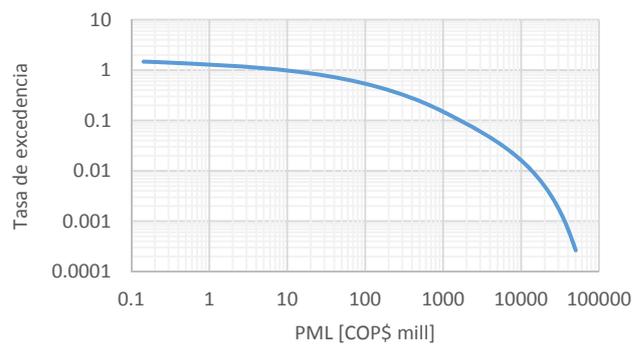
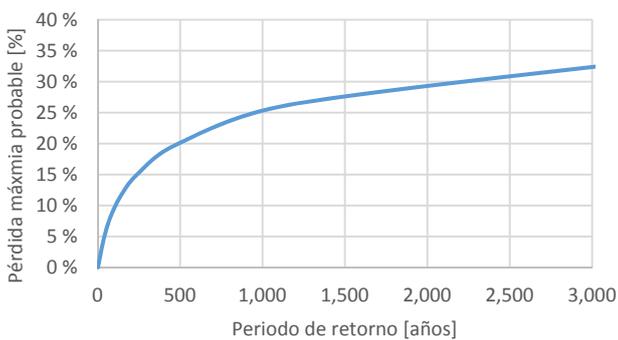
**Figura A4-7: Curva de pérdida máxima probable para el grupo de edificaciones públicas, estado reforzado**

**Figura A4-8: Curva de excedencia de pérdidas para el grupo de edificaciones públicas, estado reforzado**

**Edificaciones publicas bajo una estrategia de reforzamiento ajustada**

**Tabla A4-5: Resultados de riesgo de las edificaciones públicas bajo la estrategia de reforzamiento**

Resultados		
Valor Expuesto	COP\$ [millones]	\$ 144,151
Riesgo		
Pérdida anual esperada	COP\$ [millones]	\$ 850
	‰	5.90
PML		
Periodo de retorno	Pérdidas	
	años	COP\$ [millones]
225	\$ 20,909	14.50
475	\$ 28,434	19.73
1000	\$ 35,601	24.70
1500	\$ 39,494	27.40
2500	\$ 44,174	30.64



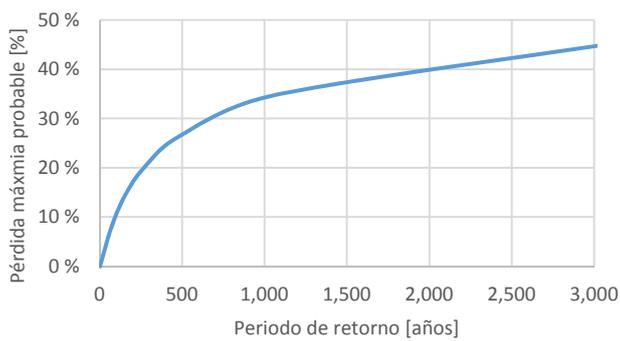
**Figura A4-9: Curva de pérdida máxima probable para el grupo de edificaciones públicas bajo la estrategia de reforzamiento**

**Figura A4-10: Curva de excedencia de pérdidas para el grupo de edificaciones públicas bajo la estrategia de reforzamiento**

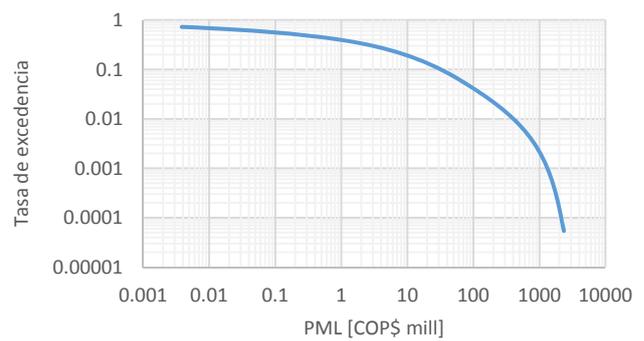
**Grupo de edificaciones de servicios de salud**

**Tabla A4-6: Resultados de riesgo de las edificaciones públicas de salud, estado reforzado**

Resultados		
Valor Expuesto	COP\$ [millones]	\$ 3,853
Riesgo		
Pérdida anual esperada	COP\$ [millones]	\$ 20
	‰	5.12
PML		
Periodo de retorno	Pérdidas	
	años	COP\$ [millones]      %
225	\$ 690	17.90
475	\$ 1,005	26.09
1000	\$ 1,303	33.83
1500	\$ 1,425	36.98
2500	\$ 1,621	42.08



**Figura A4-11: Curva de pérdida máxima probable para el grupo de edificaciones públicas de salud, estado reforzado**

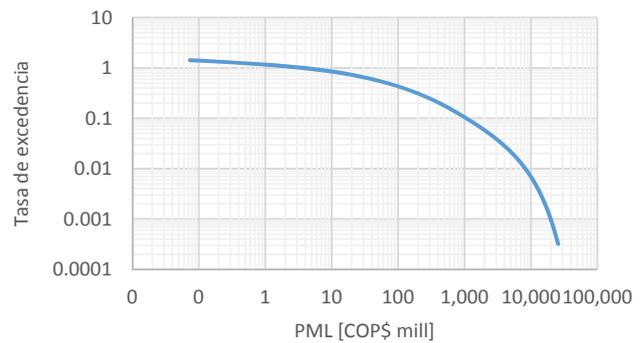
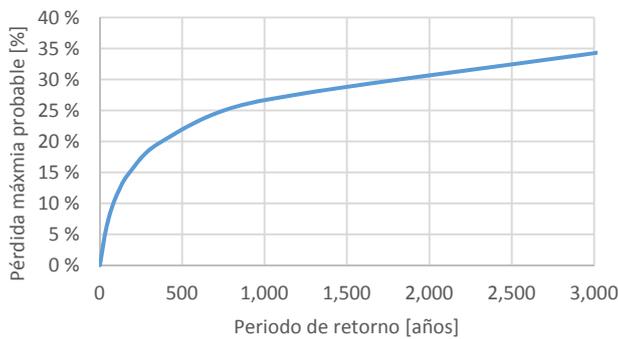


**Figura A4-12: Curva de excedencia de pérdidas para el grupo de edificaciones públicas de salud, estado actual**

**Grupo de edificaciones de servicios educativos**

**Tabla A4-7: Resultados de riesgo de las edificaciones públicas de educación, estado reforzado**

Resultados		
Valor Expuesto	COP\$ [millones]	\$ 73,944
Riesgo		
Pérdida anual esperada	COP\$ [millones]	\$ 513
	‰	6.94
PML		
Periodo de retorno	Pérdidas	
años	COP\$ [millones]	%
225	\$ 11,925	16.13
475	\$ 15,601	21.10
1000	\$ 19,660	26.59
1500	\$ 21,075	28.50
2500	\$ 23,904	32.33



**Figura A4-13: Curva de pérdida máxima probable para el grupo de edificaciones públicas de educación, estado reforzado**

**Figura A4-14: Curva de excedencia de pérdidas para el grupo de edificaciones públicas de educación, estado actual**

### A4.3 Pérdida de productividad por muertes súbitas en colapso de edificaciones

#### Edificaciones públicas bajo una estrategia de reforzamiento ajustada

**Tabla A4-8: Evaluación de la pérdida de productividad debido a las muertes prematuras por sismo en las edificaciones públicas**

Población Manizales					Públicos											
Rango		2015			Años productivos			Pi	VAEi	Años perdidos			Pérdida de productividad			
Min	Max	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres			Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	
0	4	26,376	13,516	12,860	44.50	47.00	42.00	0.07	0.18	7.91	8.36	7.47	\$ 84	\$ 89	\$ 79	
5	9	26,942	13,638	13,304	44.50	47.00	42.00	0.07	0.18	8.08	8.54	7.63	\$ 86	\$ 90	\$ 81	
10	14	29,473	15,074	14,399	44.50	47.00	42.00	0.08	0.20	8.84	9.34	8.34	\$ 94	\$ 99	\$ 88	
15	19	31,472	15,983	15,489	42.50	45.00	40.00	0.08	0.21	9.02	9.55	8.49	\$ 96	\$ 101	\$ 90	
20	24	37,742	19,536	18,206	37.50	40.00	35.00	0.10	0.25	9.54	10.18	8.90	\$ 101	\$ 108	\$ 94	
25	29	35,040	17,756	17,284	32.50	35.00	30.00	0.09	0.24	7.68	8.27	7.09	\$ 81	\$ 88	\$ 75	
30	34	27,501	13,296	14,205	27.50	30.00	25.00	0.07	0.19	5.10	5.56	4.63	\$ 54	\$ 59	\$ 49	
35	39	23,457	10,971	12,486	22.50	25.00	20.00	0.06	0.16	3.56	3.95	3.16	\$ 38	\$ 42	\$ 34	
40	44	24,953	11,071	13,882	17.50	20.00	15.00	0.06	0.17	2.94	3.36	2.52	\$ 31	\$ 36	\$ 27	
45	49	27,018	11,972	15,046	12.50	15.00	10.00	0.07	0.18	2.28	2.73	1.82	\$ 24	\$ 29	\$ 19	
50	54	25,757	11,369	14,388	7.50	10.00	5.00	0.07	0.17	1.30	1.74	0.87	\$ 14	\$ 18	\$ 9	
55	59	22,550	9,815	12,735	2.50	5.00	0.00	0.06	0.15	0.38	0.76	0.00	\$ 4	\$ 8	\$ 0	
60	64	17,456	7,693	9,763	0.00	0.00	0.00	0.04	0.12	0.00	0.00	0.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
65	69	12,472	5,440	7,032	0.00	0.00	0.00	0.03	0.08	0.00	0.00	0.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
70	74	9,192	3,788	5,404	0.00	0.00	0.00	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
75	79	6,742	2,633	4,109	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
80	80	7,497	2,872	4,625	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
<b>Total</b>		<b>391,640</b>	<b>186,423</b>	<b>205,217</b>	<b>59.50</b>	<b>62.00</b>	<b>57.00</b>	<b>1.00</b>	<b>2.64</b>	<b>157.08</b>	<b>163.68</b>	<b>150.48</b>	<b>\$ 706</b>	<b>\$ 766</b>	<b>\$ 645</b>	

**Grupo de edificaciones de servicios de salud**

**Tabla A4-9: Evaluación de la pérdida de productividad debido a las muertes prematuras por sismo en las edificaciones públicas de servicios de salud**

Pobalción Manizales					Salud											
Rango		2015			Años productivos			Pi	VAEi	Años perdidos			Perdida de productividad			
Min	Max	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres			Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	
0	4	26,376	13,516	12,860	44.50	47.00	42.00	0.07	0.01	0.42	0.44	0.40	\$ 4	\$ 5	\$ 4	
5	9	26,942	13,638	13,304	44.50	47.00	42.00	0.07	0.01	0.43	0.45	0.40	\$ 5	\$ 5	\$ 4	
10	14	29,473	15,074	14,399	44.50	47.00	42.00	0.08	0.01	0.47	0.50	0.44	\$ 5	\$ 5	\$ 5	
15	19	31,472	15,983	15,489	42.50	45.00	40.00	0.08	0.01	0.48	0.51	0.45	\$ 5	\$ 5	\$ 5	
20	24	37,742	19,536	18,206	37.50	40.00	35.00	0.10	0.01	0.51	0.54	0.47	\$ 5	\$ 6	\$ 5	
25	29	35,040	17,756	17,284	32.50	35.00	30.00	0.09	0.01	0.41	0.44	0.38	\$ 4	\$ 5	\$ 4	
30	34	27,501	13,296	14,205	27.50	30.00	25.00	0.07	0.01	0.27	0.29	0.25	\$ 3	\$ 3	\$ 3	
35	39	23,457	10,971	12,486	22.50	25.00	20.00	0.06	0.01	0.19	0.21	0.17	\$ 2	\$ 2	\$ 2	
40	44	24,953	11,071	13,882	17.50	20.00	15.00	0.06	0.01	0.16	0.18	0.13	\$ 2	\$ 2	\$ 1	
45	49	27,018	11,972	15,046	12.50	15.00	10.00	0.07	0.01	0.12	0.14	0.10	\$ 1	\$ 2	\$ 1	
50	54	25,757	11,369	14,388	7.50	10.00	5.00	0.07	0.01	0.07	0.09	0.05	\$ 1	\$ 1	\$ 0	
55	59	22,550	9,815	12,735	2.50	5.00	0.00	0.06	0.01	0.02	0.04	0.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
60	64	17,456	7,693	9,763	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
65	69	12,472	5,440	7,032	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
70	74	9,192	3,788	5,404	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
75	79	6,742	2,633	4,109	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
80	80	7,497	2,872	4,625	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	
<b>Total</b>		<b>391,640</b>	<b>186,423</b>	<b>205,217</b>	<b>59.50</b>	<b>62.00</b>	<b>57.00</b>	<b>1.00</b>	<b>0.14</b>	<b>3.53</b>	<b>3.84</b>	<b>3.23</b>	<b>\$ 37</b>	<b>\$ 41</b>	<b>\$ 34</b>	







---

# Análisis Beneficio Costo Probabilista de Medidas de Mitigación del Riesgo por Sismo

---

MIGUEL G. MORA

En la situación de tomar decisiones sobre qué medida de mitigación de riesgo sísmico implementar y del nivel de riesgo o desempeño que se requiere, surge la necesidad de realizar un análisis cuantitativo tanto de los beneficios que se puedan obtener, como de los costos necesarios para la implementación de dichas medidas, para de forma sistemática realizar una comparación de entre alternativas con el objeto de tomar decisiones informadas.

En este trabajo se desarrolla y describe una metodología cuantitativa para la evaluación probabilista de tanto los beneficios como de los costos del reforzamiento sísmico de estructuras y de las alternativas de implementación de medidas de mitigación de riesgo sísmico en edificaciones. Este enfoque innovador, en el marco de la evaluación probabilista, toma en cuenta las incertidumbres asociadas a la estimación de dichos beneficios, evaluado como la reducción de pérdidas económicas mediante el refuerzo sísmico estructural y los costos asociados con su implementación considerados de una forma probabilista apropiada.

La metodología aquí desarrollada es aplicada sobre un grupo de edificaciones públicas de la ciudad de Manizales, Colombia, con información real derivada del proyecto de gestión del riesgo de Manizales, donde se generó la información necesaria de amenaza, exposición y vulnerabilidad, a partir de donde en el presente trabajo se realizan los análisis de los costos y la evaluación del beneficio-costos probabilista de las medidas de mitigación del riesgo.

---

In the situation to make decisions about of which seismic risk mitigation measures to implement, and the risk level or performance level required, arises the need of a quantitative analysis for both the benefits that may be obtained as the necessary costs from the implementation of these measures, to systematically compare between alternatives in order to make informed decisions.

This work develops and describes a quantitative methodology for probabilistic assessment of both the benefits and costs of the seismic reinforcement of structures and the implementation alternatives of measures to mitigate seismic risk in buildings. This innovative approach, within the framework of the probabilistic assessment, taking into account the uncertainties associated with the estimation of these benefits, evaluated as the reduction of economic losses through structural seismic reinforcement and the costs associated with its implementation considered in an appropriate probabilistic way.

The methodology developed here is applied to a group of public buildings in Manizales city, Colombia, with actual information derived from the risk management project for Manizales, where necessary information on hazard, exposure and vulnerability was generated, from which the present work develops the cost analysis and probabilistic benefit-cost assessment of risk mitigation measures.