

**IMPLEMENTACION DEL MODELO DE INDICE DE VULNERABILIDAD
AJUSTADO A UNA EDIFICACION HISTORICA CON ESTRUCTURA
DE VARIOS MATERIALES**

**VERONICA JOHANA HURTADO ORTIZ
ALBA CAROLINA LEÓN MEZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FALCULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2008**

**IMPLEMENTACION DEL MODELO DE INDICE DE VULNERABILIDAD
AJUSTADO A UNA EDIFICACION HISTORICA CON ESTRUCTURA
DE VARIOS MATERIALES**

**VERONICA JOHANA HURTADO ORTIZ
ALBA CAROLINA LEÓN MEZA**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
RICARDO A. CRUZ HERNANDEZ
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FALCULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2008**

A DIOS, por este logro alcanzado

*A MIS PADRES, Wilson Esteban y
Verónica, por su apoyo
incondicional y por estar siempre a
mi lado*

*Y A MIS HERMANOS, Luisa
Fernanda, Alexandra Julieth y
Wilson Esteban*

Verónica Johana

A DIOS *por permitirme
llegar tan lejos*

A MI FAMILIA *por su valioso
apoyo y por tantos sacrificios*

Y A ESTEBAN *una personita
que llenara nuestras vidas
de mucha felicidad*

Alba Carolina

LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL ES
EL ARTE DE USAR MATERIALES
cuyas propiedades sólo pueden ser estimadas
PARA CONSTRUIR ESTRUCTURAS REALES
que sólo pueden ser analizadas aproximadamente
PARA SOSTENER FUERZAS
que no son conocidas con exactitud
DE MODO QUE NUESTRA RESPONSABILIDAD CON RESPECTO A
LA SEGURIDAD PÚBLICA SEA SATISFECHA

Anónimo

AGRADECIMIENTOS

Las autoras demuestran sus más sinceros agradecimientos al director de este proyecto, el profesor Ricardo Cruz Hernández, por su colaboración y el interés que demostró en la realización de esta tesis.

Al Ingeniero Álvaro Viviescas, por su colaboración en el préstamo de material bibliográfico que resultó de mucha utilidad para el desarrollo de este.

Al Padre Néstor Jesús Aponte Zambrano por abrirnos las puertas de la Catedral de la Sagrada Familia y colaborarnos con la recopilación de información sobre esta. Al Señor Samuel Camacho, encargado del mantenimiento de la iglesia; por acompañarnos durante las inspecciones de la Catedral y por compartir todo su conocimiento acerca de ella con nosotras.

Al Señor Edmundo Gavassa por facilitarnos algunas fotografías antiguas de la iglesia.

Y principalmente a nuestras familias por su incondicional colaboración y apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	19
RESUMEN	22
INTRODUCCION	24
1.1 GENERALIDADES.....	24
1.2 OBJETIVOS.....	26
1.2.1 Objetivo General.....	26
1.2.2 Objetivos Específicos.....	27
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	27
1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	28
CAPITULO 2	
ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DE LA VULNERABILIDAD	
SISMICA	30
2.1 INTRODUCCION.....	30
2.2 VULNERABILIDAD SISMICA DE EDIFICIOS HISTORICOS.....	30
2.2.1 Introducción.....	30
2.2.2 Evaluación de la vulnerabilidad sísmica.....	31
2.2.3 La vulnerabilidad sísmica de iglesias.....	33
2.2.4 Métodos para evaluar la vulnerabilidad sísmica en iglesias....	35
2.2.4.1 Método simplificado de revisión sísmica e índice de área resistente a sismo.....	38
2.2.4.2 Método del índice de vulnerabilidad propuesto dentro del Proyecto RISK-UE (Lagomarsino et al., 2003).....	41

CAPITULO 3

EDIFICACIONES ANTIGUAS TIPO IGLESIA.....	53
3.1 MATERIALES ESTRUCTURALES.....	53
3.1.1 Piedra.....	53
3.1.2 Barro.....	56
3.1.3 Mampostería.....	57
3.1.4 Morteros.....	61
3.1.5 Madera.....	62
3.1.6 Metales.....	63
3.2 ELEMENTOS Y SISTEMAS ESTRUCTURALES BASICOS.....	64
3.2.1 Columnas.....	65
3.2.2 Muros.....	66
3.2.3 Vigas y Arcos.....	67
3.2.4 Bóvedas.....	68
3.2.5 Cúpulas.....	69
3.2.6 Contrafuertes y arbotantes.....	71
3.2.7 Sistemas de piso y techo.....	72
3.2.8 Elementos de cimentación.....	73

CAPITULO 4

ADAPTACION DEL METODO DEL INDICE DE VULNERABILIDAD (BENEDETTI-PETRINI) A EDIFICACIONES HISTORICAS TIPO IGLESIA.....	75
4.1 GENERALIDADES.....	75
4.2 ADAPTACIÓN DEL MODELO.....	77
4.3 INTERPRETACIÓN DEL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD.....	92
4.4 FORMULARIO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD PARA EDIFICACIONES ANTIGUAS.....	93

CAPITULO 5

EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD SISMICA DE LA CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA.....	94
5.1 INTRODUCCION.....	94
5.2 SISMICIDAD HISTORICA DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA.....	95
5.3 DESCRIPCION GENERAL DE LA CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA.....	104
5.3.1 Aspectos Históricos.....	104
5.3.2 Características arquitectónicas y estructurales.....	109
5.4 APLICACIÓN DEL METODO DEL INDICE DE VULNERABILIDAD PROPUESTO DENTRO DEL PROYECTO RISK-UE, A LA CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA.....	114
5.5 APLICACIÓN DEL MODELO ADAPTADO DEL INDICE DE VULNERABILIDAD PROPUESTO POR BENEDETTI-PRETRINI, A LA CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA.....	121
5.5.1 Diligenciamiento del formato de cálculo de la vulnerabilidad de edificaciones antiguas.....	121
5.5.2 Cálculo del índice de vulnerabilidad.....	126
5.6 COMPARACION ENTRE LOS DOS METODOS.....	132
CONCLUSIONES.....	134
RECOMENDACIONES.....	136
BIBLIOGRAFIA.....	137
ANEXO A CARTA DE VENECIA, 1964.....	139
ANEXO B FORMATO DE EVALUACIÓN PRELIMINAR DE INDICE DE VULNERABILIDAD NIVEL 1.....	143
ANEXO C FORMATO DE ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PROPUESTO POR BENEDETTI Y PETRINI.....	154

ANEXO D FORMULARIO DE CATEGORIZACIÓN CUALITATIVA DE DISTINTOS PARÁMETROS PARA EDIFICACIONES.....	166
ANEXO E Ficha No. 44 SISMICIDAD HISTORICA DE BUCARAMANGA.	167
ANEXO F ESCALA DE INTENSIDAD MSK-64.....	173
ANEXO G PLANO EN PLANTA DE LA CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA.....	180

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 2

Figura 2.1 Subdivisión de una iglesia en macroelementos.....	35
Figura 2.2 Macroelementos para iglesias.....	36
Figura 2.3 Ejemplo de curva de vulnerabilidad para una estructura específica.....	45

CAPITULO 4

Figura 4.1 Configuración en planta.....	85
Figura 4.2 Configuración en elevación.....	86

CAPITULO 5

Figura 5.1 Fallas geológicas existentes en Colombia.....	96
Figura 5.2 Mapa de los principales lineamientos geológicos estructurales existentes en la región de Bucaramanga.....	96
Figura 5.3 Histograma del número de noticias sísmicas encontradas en cada año para la región de Bucaramanga, a partir de 1919, año en que se consigue la primera noticia en este siglo, hasta 1997.....	101
Figura 5.4 Historia sísmica en la ciudad de Bucaramanga; representa la máxima intensidad observada durante cada año, desde 1932 hasta 1997.....	101
Figura 5.5 Vista en planta del centro de la ciudad.....	104
Figura 5.6 Vista de antes y después de la Catedral.....	105
Figura 5.7 La Catedral cuando aún no habían sido terminadas las torres.	106
Figura 5.8 Campana de la torre oriente.....	107
Figura 5.9 Catedral de la Sagrada familia en los años 40's.....	108
Figura 5.10 Catedral de la Sagrada Familia en 1930.....	109

Figura 5.11 Planta general de la Catedral de la Sagrada Familia.....	110
Figura 5.12 Cúpula de la Catedral de la Sagrada Familia.....	111
Figura 5.13 Vista de una columna en la parte trasera de la Catedral.....	112
Figura 5.14.a Vista piso de la Catedral.....	113
Figura 5.14.b Bóveda de Lámina acanalada de la nave central.....	113
Figura 5.15 Vista de la obra pictórica de la bóveda de lámina acanalada de la nave central.....	113
Figura 5.16 Curvas de vulnerabilidad para la Catedral de la Sagrada Familia.....	117
Figura 5.17 Muros resistentes a sismo “x”.....	123
Figura 5.18 Muros resistentes a sismo “y”.....	123
Figura 5.19 Refuerzo con tirantes de acero.....	128
Figura 5.20 Refuerzo con malla electrosoldada.....	129
Figura 5.21 Ejemplo de apoyo de segundo grado.....	130
Figura 5.22 Detalle de la cubierta de la nave central.....	130
Figura 5.23 Detalle del apoyo de la cubierta de la nave central.....	131
Figura 5.24 Detalle de una de las grietas del tambor en la cúpula.....	131
Figura 5.25 Inyección para sellar grietas.....	132

ANEXO B

Figura B.1 Ubicación de la edificación dentro de la manzana.....	144
Figura B.2 Topografía del terreno.....	145
Figura B.3 Posición de una edificación adyacente.....	146
Figura B.4 Tipo de colindancia.....	147
Figura B.5 Tipos de cimentación.....	151

ANEXO C

Figura C.1 Configuración en planta de la estructura.....	160
Figura C.2 Configuración en elevación de la estructura.....	161

ANEXO G

Figura G.1 Vista en planta de la Catedral de la Sagrada Familia..... 180

LISTA DE TABLAS

CAPITULO 2

Tabla 2.1 Tipologías para construcciones históricas.....	42
Tabla 2.2 Grados de daño.....	43
Tabla 2.3 Valores del índice de vulnerabilidad y parámetro β para diferentes tipologías.....	46
Tabla 2.4 Modificadores de vulnerabilidad generales.....	46
Tabla 2.5 Modificadores de vulnerabilidad específicos para arcos triunfales.....	47
Tabla 2.6 Modificadores de vulnerabilidad específicos para iglesias....	47
Tabla 2.7 Modificadores de vulnerabilidad específicos para oratorios o capillas.....	48
Tabla 2.8 Modificadores de vulnerabilidad específicos para torres.....	48
Tabla 2.9 Modificadores de vulnerabilidad específicos para monasterio.	49
Tabla 2.10 Modificadores de vulnerabilidad específicos para castillos...	49
Tabla 2.11 Modificadores de vulnerabilidad específicos para muros....	49
Tabla 2.12 Modificadores de vulnerabilidad específicos para palacios y edificios.....	50
Tabla 2.13 Modificadores de vulnerabilidad específicos para teatros....	50
Tabla 2.14 Modificadores de vulnerabilidad específicos para puentes de fábrica antigua.....	50
Tabla 2.15 Modificadores de vulnerabilidad específicos para obeliscos.	51
Tabla 2.16 Modificadores de vulnerabilidad específicos para estatuas y fuentes.....	51

CAPITULO 4

Tabla 4.1 Calificación y peso de ponderación de ítems de vulnerabilidad..	91
Tabla 4.2 Escala global de vulnerabilidad.....	92

Tabla 4.3 Formulario del Índice de Vulnerabilidad para edificaciones antiguas.....	93
--	----

CAPITULO 5

Tabla 5.1 Terremotos en el Departamento de Santander entre 1566-1963.....	98
Tabla 5.2 Número de noticias sísmicas encontradas en cada año entre 1900 y 1997.....	100
Tabla 5.3 Terremotos ocurridos en las vecindades del área metropolitana de Bucaramanga	103
Tabla 5.4 Índices de vulnerabilidad para iglesias.....	114
Tabla 5.5 Modificadores de vulnerabilidad para iglesias.....	115
Tabla 5.6 Modificadores de vulnerabilidad.....	116
Tabla 5.7 Índices de vulnerabilidad finales.....	116
Tabla 5.8 Grados de daño.....	118
Tabla 5.9 Matriz de probabilidad de daño para la Catedral de la Sagrada Familia utilizando los valores inferiores de μ_D	119
Tabla 5.10 Matriz de probabilidad de daño para la Catedral de la Sagrada Familia utilizando los valores medios de μ_D	119
Tabla 5.11 Matriz de probabilidad de daño para la Catedral de la Sagrada Familia utilizando los valores superiores de μ_D	119
Tabla 5.12 Definición de la Acción Sísmica.....	124
Tabla 5.13 Formulario del Índice de Vulnerabilidad para edificaciones antiguas.....	125
Tabla 5.14 Cálculo del índice de vulnerabilidad a partir de la escala numérica del índice de vulnerabilidad para edificaciones antiguas tipo iglesia.....	126
Tabla 5.15 Cálculo del índice de vulnerabilidad de cada parámetro.....	127

ANEXO C

Tabla C.1 Escala de vulnerabilidad de Benedetti-Petrini..... 154

Tabla C.2 Formulario para el levantamiento de la vulnerabilidad de edificios de mampostería..... 155

ANEXO D

Tabla D.1 Categorización cualitativa de distintos parámetros..... 166

GLOSARIO

Arbotante: Elemento exterior inclinado, normalmente en forma de arco que funge de contrafuerte para transmitir el empuje lateral desde el arranque de una bóveda o arco, a la parte superior de un apoyo más bajo (muro o pilar).

Arcadas: Serie de arcos sobre pilares.

Arco: Elemento estructural curvo que cubre un claro horizontal, y en que el peso propio y las cargas externas producen principalmente fuerzas axiales que inducen esfuerzos de comprensión.

Bóveda: Elemento espacial curvo para cubrir un claro.

Catedral: Templo principal de la diócesis, en el que se encuentra el trono del obispo.

Cimborrio: Cuerpo cilíndrico que constituye la base la cúpula.

Claro: Distancia horizontal entre los apoyos de una viga o losa, o entre los arranques de un arco o bóveda.

Clase: Son las categorías que tienen todos los parámetros del método del índice de vulnerabilidad adoptado por el Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT) y propuesto por Benedetti y Petrini; estas clases son A, B, C, D, donde A es la mejor calificación y D la mas mala.

Cocceo: Empuje lateral que un arco o bóveda ejercen sobre sus apoyos.

Contrafuerte: Elemento estructural vertical o inclinado que tiene la función de proveer estabilidad lateral, absorbiendo los empujes laterales o el coceo de la cubierta.

Grieta: Abertura o hendidura que se presenta en un elemento estructural cuando los esfuerzos de tensión exceden la resistencia a este efecto. El termino fisura es equivalente aunque suele emplearse para identificar grietas pequeñas.

Mampostería: Sistema constructivo de tipo cajón, que consiste en pegar piezas o bloques para formar muros y soportar cargas.

Nave: Cada uno de los espacios que entre muros o filas de arcadas se extienden a lo largo de las iglesias.

Riesgo Sísmico: Son las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un terremoto, como resultado de la falla de estructuras cuya capacidad resistente fue excedida por un terremoto.

Sismo: Evento físico causado por la liberación repentina de energía, debido a una dislocación o desplazamiento en la corteza terrestre; parte de la energía es irradiada en todas direcciones en forma de ondas elásticas y ondas sísmicas, y es percibido en la superficie como una vibración del terreno denominada “temblor”, cuando no causa daños, y “terremoto”, cuando la sacudida es violenta y el evento es destructivo, causando daños severos y víctimas.

Tambor: Cada uno de los bloques que componen el fuste de la columna. Muro cilíndrico que sirve de base a una cúpula.

Vulnerabilidad estructural: Grado de pérdidas de un elemento o grupo de elementos que están en riesgo por la probable ocurrencia de un evento desastroso, como resultado del daño al que es susceptible el sistema estructural que mantiene en pie a un edificio.

Vulnerabilidad Sísmica: Es un valor único que permite clasificar a las estructuras de acuerdo a la calidad estructural intrínseca de las mismas, dentro de un rango de nada vulnerable a muy vulnerable ante la acción de un terremoto.

TÍTULO: IMPLEMENTACION DEL MODELO DE INDICE DE VULNERABILIDAD AJUSTADO A UNA EDIFICACION HISTORICA CON ESTRUCTURA DE VARIOS MATERIALES *

**AUTORES: VERONICA JOHANA HURTADO ORTIZ
ALBA CAROLINA LEON MEZA****

PALABRAS CLAVE: Amenaza sísmica, Índice de Vulnerabilidad, edificación histórica tipo iglesia, Bucaramanga.

DESCRIPCION: Nuestro patrimonio histórico y cultural, representa el valor desarrollado en el tiempo como parte de un proceso histórico, y que aún pueden serlo en el futuro. En este sentido, las obras (edificios, casas, iglesias, monumentos y ruinas) adquieren valor museal, entendido como el valor que tienen los objetos o bienes en este caso bienes inmuebles considerados patrimonio. Este es para cada comunidad memoria de su pasado, de su conciencia y define una identidad que relaciona dicho pasado con el presente.

Por tal motivo, para la realización de este proyecto se tomó como caso de referencia a la catedral de la Sagrada Familia en la ciudad de Bucaramanga, la cual fue construida a finales del siglo XIX y declarada patrimonio nacional el 12 de marzo de 1982. Este edificio se consideró como representativo para la investigación, debido a que es una admirable estructura con grandes dimensiones en planta y en altura y además porque se encuentra ubicada en una zona de alta sismicidad.

En la presente tesis se realiza una adaptación para edificaciones históricas tipo iglesia del método de índice de vulnerabilidad propuesto por Benedetti-Petrini, y a su vez se realiza un ajuste cualitativo con los resultados obtenidos en el método de índice de vulnerabilidad propuesto dentro del proyecto RISK-UE (Lagomarsino et al., 2003) para edificaciones históricas; esto con el fin de corroborar que ambos métodos se puedan utilizar en una zona de alta sismicidad como es el caso de la ciudad de Bucaramanga.

Finalmente, se analizan las ventajas y desventajas de los métodos propuestos.

* Trabajo de Investigación

** Facultad de Ciencias Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Ricardo Cruz Hernández

**TÍTULO: IMPLANTATION OF THE INDEX VULNERABILITY MODEL
ADJUSTED TO A HISTORICAL BUILDING WITH A SEVERAL
MATERIALS STRUCTURE***

**AUTHORS: VERONICA JOHANA HURTADO ORTIZ
ALBA CAROLINA LEON MEZA****

KEY WORDS: Seismic Hazard, Vulnerability Index, Historical Building type church, Bucaramanga.

ABSTRACT: Our historical and cultural patrimony represents the value of a historical process developed through the years that continues into the future. This means that all these buildings (museums, churches, monuments and ruins) acquire a social importance, because they make part of the patrimony of a community, of its past and its memories and it defines the identity of a nation, connecting its past with the present.

That's why the Sagrada Familia Cathedral of Bucaramanga has been taken as reference of this project. It was built at the end of the XIX century and it was declared national patrimony on March 12th 1982. This building has been object of academical researches due to its admirable structure with big dimensions in height and plant, and because it's located in a high seismic zone.

The object of this thesis is to make an adaptation for historical buildings type church of the Vulnerability Index proposed by Benedetti-Petrini, and a qualitative adjustment based on the results achieved with the Vulnerability Index method proposed in the RISK-UE project (Lagomarsino et al., 2003) for historical buildings. All this is made in order to corroborate that both methods may be used in a high seismic zone as Bucaramanga.

Finally, the advantages and disadvantages of the proposed methods are analyzed.

* Work of research

** Faculty of Physical-mechanical Sciences, Civil Engineering School, Ricardo Cruz Hernández

INTRODUCCION

1.1 GENERALIDADES

Nuestro patrimonio histórico y cultural, representa el valor desarrollado en el tiempo como parte de un proceso histórico, y que aún pueden serlo en el futuro. “En este sentido, las obras (edificios, casas, iglesias, monumentos y ruinas) adquieren valor museal, entendido como el valor que tienen los objetos o bienes en este caso bienes inmuebles considerados patrimonio”¹. Este es para cada comunidad memoria de su pasado, de su conciencia y define una identidad que relaciona dicho pasado con el presente.

Los fenómenos naturales de origen geológico, como es el caso de los terremotos, son eventos que representan un peligro latente que puede considerarse como una amenaza para el desarrollo social y económico de una región o un país; más aún, si se encuentra en zonas de alto riesgo sísmico.

Colombia está localizada en una de las zonas de mayor actividad sísmica del planeta, denominado “Cinturón circumpacífico”, que corresponde a los bordes del Océano Pacífico; en su territorio convergen tres placas tectónicas, Nazca, Suramericana y Caribe. Según el estudio de microzonificación de Bucaramanga se obtuvo aproximadamente 150 registros, los cuales han sido publicados en los boletines de Movimiento Fuerte (Ingeominas 1996, 1997, 1998 y 1999). En su mayoría los registros

¹ BLASCO, Hugo. “Corrientes y la preservación de su patrimonio arquitectónico” http://www.ucp.edu.ar/conexionesI2006/pdf/corrientes_y_la_preservacion.pdf

pertenecen a sismos ocurridos en el Nido sísmico de Bucaramanga, el cual presenta una actividad frecuente².

A la vez la ciudad de Bucaramanga está rodeada por dos fallas geológicas la de Bucaramanga-Santa Marta y la de Suárez, la norma NSR-98 la ubica en una zona de amenaza sísmica alta; por esta razón es necesario enfocar nuestra atención en las edificaciones consideradas patrimonio histórico y cultural, ya que estas por presentar obsolescencia real o aparente en las estructuras y por su propia debilidad en el material necesitan tener un tratamiento especial para su preservación en el tiempo.

Es por eso que existe en la actualidad una preocupación y necesidad de buscar métodos que ayuden a estimar la vulnerabilidad sísmica de este tipos de edificaciones y en particular las de iglesias a través de modelos que sean rápidos y económicos, teniendo en cuenta su gran variabilidad en las propiedades de los materiales que la conforman, los procedimientos constructivos utilizados, las irregularidades en planta y elevación, los cambios de resistencia y rigidez, sus grandes luces y alturas y los daños acumulados durante su periodo de vida.

Debido a la poca información que existe sobre sismos que hayan ocasionado daños considerables en las iglesias que se encuentran en zonas de alta sismicidad, como es el caso de la ciudad de Bucaramanga, se plantea implementar el modelo de Índice de Vulnerabilidad, ajustado a este tipo de edificaciones, las cuales en su gran mayoría están compuestas por varios materiales en su estructura como es el caso de la Catedral de la Sagrada Familia; y a la vez se realiza un ajuste con los resultados obtenidos del

² GOMEZ I. D.; RODRIGUEZ E. J. Generación de funciones de vulnerabilidad para edificaciones de mampostería no reforzada de baja altura utilizando técnicas de simulación. Trabajo de grado (Ingeniero Civil), Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2006. p 13

método de Índice de Vulnerabilidad propuesto por el proyecto RISK-UE (Lagomarsino et al., 2003).

Para la adaptación del modelo se tienen en cuenta normas, documentos y guías nacionales e internacionales de evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones existentes, entre las cuales se encuentran: la NSR-98 de Colombia, ATC-21, FEMA-178, y el modelo original de índice de vulnerabilidad. Estas normas son el resultado de revisar y actualizar las edificaciones existentes con el fin de resistir las fuerzas impuestas por los sismos.

La metodología de evaluación de vulnerabilidad pretende salvaguardar la vida de las personas que habitan en las edificaciones históricas y a su vez mantener en buen estado el patrimonio y legado cultural heredado de nuestros antepasados³.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

El objetivo general de la presente tesis es implementar el modelo de Índice de Vulnerabilidad a una edificación histórica cuya estructura está compuesta por varios materiales y está ubicada en una zona de alta sismicidad, ajustándose con los resultados obtenidos del método propuesto dentro del proyecto RISK-UE (Lagomarsino et al., 2003). Caso particular: Catedral de la Sagrada Familia de Bucaramanga.

³ CORTEZ Wilmer. Desarrollo de una metodología para la evaluación sismorresistente de edificaciones antiguas en tapia pisada y adobe. Trabajo de grado (Ingeniero Civil), Universidad Industrial de Santander Bucaramanga, 2002, p 22

1.2.2 Objetivos específicos

- Aplicar a la Catedral de la Sagrada Familia el método de Índice de Vulnerabilidad ajustado dentro del proyecto RISK-UE (Lagomarsino et al., 2003), para estructuras de fábrica antigua.
- Adaptar y aplicar el modelo de índice de vulnerabilidad sísmica adoptado por el Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT) y propuesto por Benedetti y Petrini, a las condiciones y características de edificaciones de iglesias en zonas de riesgo sísmico alto.
- Verificar la aplicabilidad de la metodología propuesta dentro del proyecto RISK-UE (Lagomarsino et al., 2003), para iglesias ubicadas en zonas de alta sismicidad, como es el caso de la ciudad de Bucaramanga.

1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

El propósito de este proyecto es la implementación del modelo de Índice de Vulnerabilidad a una edificación histórica con estructura de varios materiales y a su vez ajustarlo con los resultados del modelo de índice de vulnerabilidad propuesto dentro del proyecto RISK-UE. Esto con el fin de aportar una herramienta eficaz en la formulación de planes de intervención para la conservación y mantenimiento de este tipo de estructuras, evitando así pérdidas humanas y daños en el patrimonio histórico y cultural.

La metodología de evaluación de la vulnerabilidad sísmica va dirigida a aquellas edificaciones históricas de mediana y gran luz con estructura de varios materiales como lo son las iglesias antiguas.

Cabe resaltar que en nuestro país, no existe una metodología específica para realizar estudios de este tipo. Esto se debe a que en parte las fuentes sísmicas de cada zona en el país y el mundo en general son particulares y a que las tipologías estructurales varían de una cultura a otra. Por lo tanto, los resultados mostrados no son concluyentes y no se debe asumir que el índice de vulnerabilidad calculado para la iglesia garantiza por su valor numérico, el colapso o no de dicha edificación.

1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Capítulo 1. Este capítulo incluye la introducción al trabajo de grado, además de los objetivos establecidos y los alcances y limitaciones del proyecto.

Capítulo 2. En este capítulo se desarrolla el estado actual del conocimiento relativo en el área de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones históricas tipo iglesia, como punto de partida para la definición de una acción sísmica consistente para los estudios de vulnerabilidad.

Capítulo 3. Este capítulo desarrolla las características particulares de las edificaciones antiguas, en este caso Iglesias, tales como los materiales utilizados y los elementos estructurales; como siguiente paso para la identificación de las características propias de la Catedral de la Sagrada Familia de Bucaramanga.

Capítulo 4. Este capítulo incluye la adaptación del Método de Índice de Vulnerabilidad propuesto por Benedetti-Petrini para edificaciones de mampostería, a las edificaciones antiguas tipo iglesia.

Capítulo 5. En este capítulo se presenta el tema de la sismicidad histórica de la ciudad de Bucaramanga e incluye el estado del conocimiento relativo de los aspectos históricos relevantes de la Catedral de la Sagrada Familia y las características geométricas y arquitectónicas principales de esta edificación. Además se realiza la aplicación de los dos métodos planteados a desarrollar en esta tesis: el método de índice de vulnerabilidad propuesto dentro del proyecto RISK-UE (Lagomarsino et al., 2003) y la adaptación al método de índice de vulnerabilidad propuesto por Benedetti-Petrini para edificaciones de mampostería, considerando la acción sísmica propuesta por la NSR-98.

CAPITULO 2: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE VULNERABILIDAD SÍSMICA

2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene como objetivo presentar una revisión al estado del conocimiento actual, correspondiente a los principales temas de este proyecto de grado como punto de partida para el desarrollo del mismo, presentando así el estado del conocimiento relativo a los estudios de vulnerabilidad sísmica en edificaciones históricas tipo Iglesia.

2.2 VULNERABILIDAD SISMICA DE EDIFICIOS HISTORICOS

2.2.1 Introducción

La protección del patrimonio histórico construido ha sido tema de muchos estudios y discusiones. Por esta razón la carta de Venecia de 1964 (Anexo A) ha definido los principios de cómo esta protección se puede llevar a cabo, conservando el valor autentico de este tipo de edificaciones.

Si bien es conocido, este patrimonio ha sufrido la agresión de los terremotos en diferentes partes del mundo. Es por eso que resulta necesario reforzar las estructuras más vulnerables ante la acción de futuros eventos sísmicos, implicando así una acción que puede causar variaciones en la edificación original.

De modo que, una forma de introducirse en el problema, es realizando un análisis estructura por estructura, partiendo del entendimiento de su

construcción y su evolución en el tiempo bajo la acción de las sollicitaciones involucradas, como lo son las reparaciones y los fenómenos naturales.

2.2.2 Evaluación de la vulnerabilidad sísmica⁴

Guillermo Martínez en su tesis doctoral enuncia las siguientes definiciones:

La vulnerabilidad sísmica se define como la predisposición de una estructura de ser susceptible a sufrir un cierto daño, como consecuencia de un terremoto de cierta intensidad.

El riesgo sísmico es la probabilidad de pérdida en la estructura como consecuencia de un terremoto con una cierta intensidad durante un cierto período de exposición.

La función de vulnerabilidad de una estructura es aquella que describe de forma gráfica o matemática su vulnerabilidad para varias intensidades de movimiento del terreno, siendo estos valores expresados mediante algún parámetro físico que bien puede ser la aceleración máxima del terreno, o la intensidad en cualquier escala macrosísmica (Caicedo et al., 1994)⁵.

La vulnerabilidad es entonces una característica intrínseca de las estructuras, que depende del criterio empleado para su diseño y a su vez es independiente de la peligrosidad sísmica del sitio donde estén ubicadas. Se puede afirmar que cada estructura tiene su propia función

⁴ MARTINEZ Guillermo. Vulnerabilidad Sísmica para Edificios Históricos de Obra de Fábrica de Mediana y Gran Luz. Barcelona, 2007, 454 p. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela técnica superior de Ingenieros de caminos, canales y puertos. Programa de Ingeniería sísmica y Dinámica Estructural.

⁵ CAICEDO C., BARBAT A.H., CANAS J.A., AGUILAR R. Vulnerabilidad sísmica de edificios, Monografías de Ingeniería Sísmica (CIMNE IS-6 1994), Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). Citado por Guillermo Martínez. p 13.

de vulnerabilidad, y la determinación de esta última variará para comportamientos estructurales distintos (Caicedo et al., 1994)⁶.

La vulnerabilidad se puede conseguir a través del estudio de modelos numéricos del daño sísmico en estructuras, de pruebas ejecutadas en los laboratorios o de la realización de inspecciones a edificaciones existentes. Por lo tanto, la vulnerabilidad observada es aquella que resulta de la observación de los daños causados por un terremoto y del análisis estadístico de los mismos para la estructura en estudio, y la vulnerabilidad calculada, es la que se deriva de un análisis matemático a través de un modelo estructural analítico, o a través de ensayos realizados en el laboratorio, utilizando modelos a escala y cuyos resultados han sido expresados en términos probabilísticos (Caicedo et al., 1994).

Evaluar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones trae como consecuencia múltiples dificultades, como la aplicación de los métodos que se encuentran clasificados dentro de la vulnerabilidad calculada, ya que ellos utilizan la modelación analítica para simular el comportamiento ante acciones sísmicas de diseño. Estos métodos no son del todo analíticos, debido a que durante la calibración del modelo se requiere de parámetros que algunas veces se pueden conseguir a través de ensayos de laboratorio o bien de pruebas no destructivas en el sitio, permitiendo así, comprobar la eficiencia del método para predecir el daño observado en la estructura (Lagomarsino et al., 2003)⁷. Los métodos anteriores requieren de una ponderación del daño calculado en cada elemento estructural, para obtener un *índice global de daño* (Caicedo et al., 1994). Este índice por sí solo no es suficiente para evaluar el comportamiento sísmico de una edificación completa, por lo que

⁶ *Ibid.*, p 14.

⁷ LAGOMARSINO S., GIOVINAZZI S., PODESTA S., RESEMINI S. (2003). Wp5 – Vulnerability of historical and monumental buildings Handbook. Risk- UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract No. EVK4-CT-2000-00014. 90 pp. Citado por Guillermo Martínez. p 14.

se le debe dar una validez de tipo práctico, calibrando su valor numérico con el daño real observado en las estructuras después de un terremoto.

Por otro lado, los métodos clasificados dentro de la vulnerabilidad observada, están basados en la observación del daño producido en estructuras durante la ocurrencia de los sismos o en la opinión subjetiva de expertos. Desde el punto de vista estructural estos métodos utilizan características que se basan en el uso del coeficiente sísmico como una medida de la capacidad de la estructura para resistir fuertes sismos, o en el uso de un parámetro de respuesta que sirve para hallar el daño en el sistema, determinando el desplazamiento del nivel superior de la estructura; y los métodos analíticos se usan para el análisis detallado de estructuras particulares, cuando los métodos simplificados o subjetivos muestran que el sistema en estudio no es capaz de resistir las fuerzas cortantes horizontales de diseño.

2.2.3 La vulnerabilidad sísmica de iglesias⁸

Los daños más frecuentes que se producen en las iglesias después de un terremoto, enunciados por Guillermo Martínez en su tesis son:

- 1) Daños en las torres (implicando su caída en algunos casos).
- 2) Separación de los muros perimetrales principales, por rotación en relación a la línea de cimentación.
- 3) Agrietamiento de los muros perimetrales producido por fuerzas cortantes en el plano y grandes aberturas en los mismos.
- 4) Colapso total o parcial en esquinas.
- 5) Aplastamiento de elementos verticales (columnas y muros) debido a cargas axiales altas.
- 6) Daños en regiones localizadas fuera de la estructura principal.

⁸ MARTINEZ, op. cit., p.15-17.

Los daños anteriores dependen de variables como, presencia de conectores que permitan la restricción de los muros, del estado de deterioro, del tipo de suelo o de las características de la acción sísmica, en las cuales se debe incluir el efecto de las componentes verticales. Crespellani y Uzielli (2001)⁹ demostraron que el daño en este tipo de construcciones antiguas dependía, del tipo de terreno sobre el cual se encontraran construidas, el contenido espectral y el avance mostrado debido a sismos fuertes.

Para caracterizar el comportamiento sísmico de este tipo de estructuras, (Doglioni et al. 1994)¹⁰ establece que las iglesias se conforman de elementos arquitectónicos repetitivos que se caracterizan porque la respuesta sísmica es independiente del resto de la edificación. Estos elementos llamados macroelementos se indican en la figura 2.1.

Por consiguiente la definición del macroelemento permite el análisis de las partes más vulnerables de la iglesia, las cuales se caracterizan por tener mecanismos de colapso parciales. La suma de la contribución de cada macroelemento presente en la estructura dará como resultado, el comportamiento sísmico global.

La figura 2.2 presenta los mecanismos de daño en iglesias según Lagomarsino (1998)¹¹, los cuales han sido propuestos a partir de la

⁹ CREPELLANI T. and UZIELLI M. (2001) Geotechnical analysis and interpretation of seismic damage for the church of S. Filippo at Nocera Umbra, Italy. XV ICSMGE Satellite Conference on 'Lessons from Recent Strong Earthquakes', A.M. Ansal (ed.), Istanbul. Citado por Guillermo Martínez. p 16

¹⁰ DOGLIONI F., MORETTI A. and PETRINI V. (1994). Churches and earthquakes. LINT. Trieste (en italiano). Citado por Guillermo Martínez. p 16

¹¹ LAGOMARSINO S. (1998). A new methodology for the post-earthquake investigation of ancient churches. 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris. CDROM, Rotterdam: Balkema. Citado por Guillermo Martínez. p 16

observación del comportamiento estructural presente, durante los terremotos que han pasado.

Augusti et al. (2001)¹², diferencia a los macroelementos en críticos y no críticos, los primeros se caracterizan porque su colapso implica la destrucción de toda la edificación, y los segundos porque su colapso no necesariamente implica el colapso de toda la estructura.

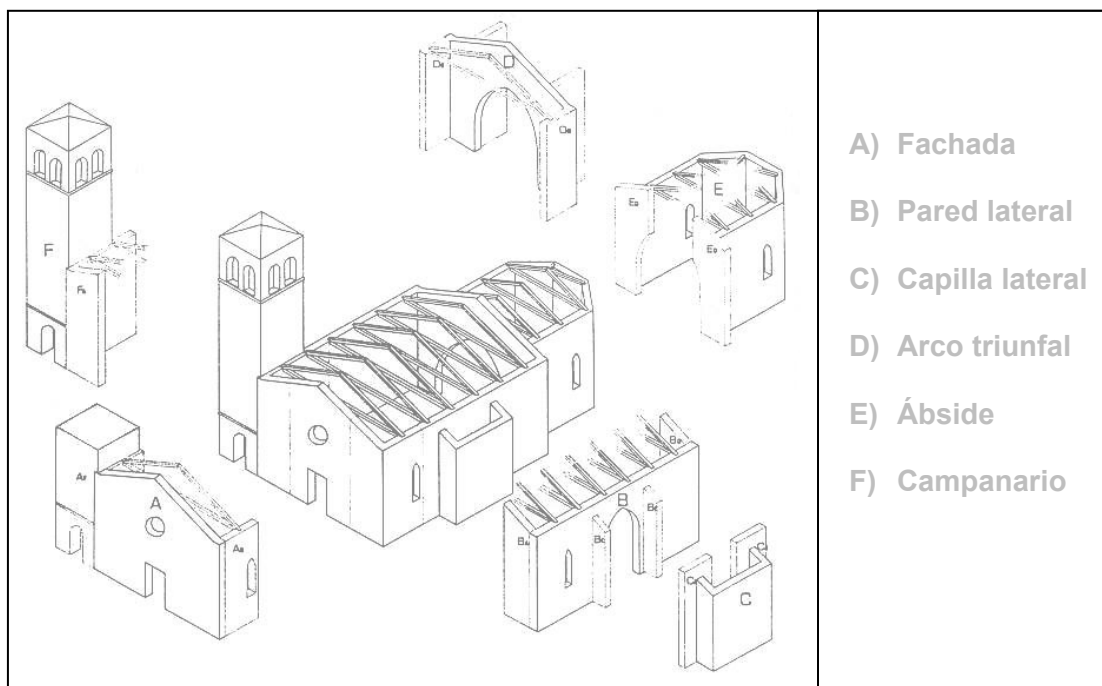


Figura 2.1 Subdivisión de una iglesia en macroelementos

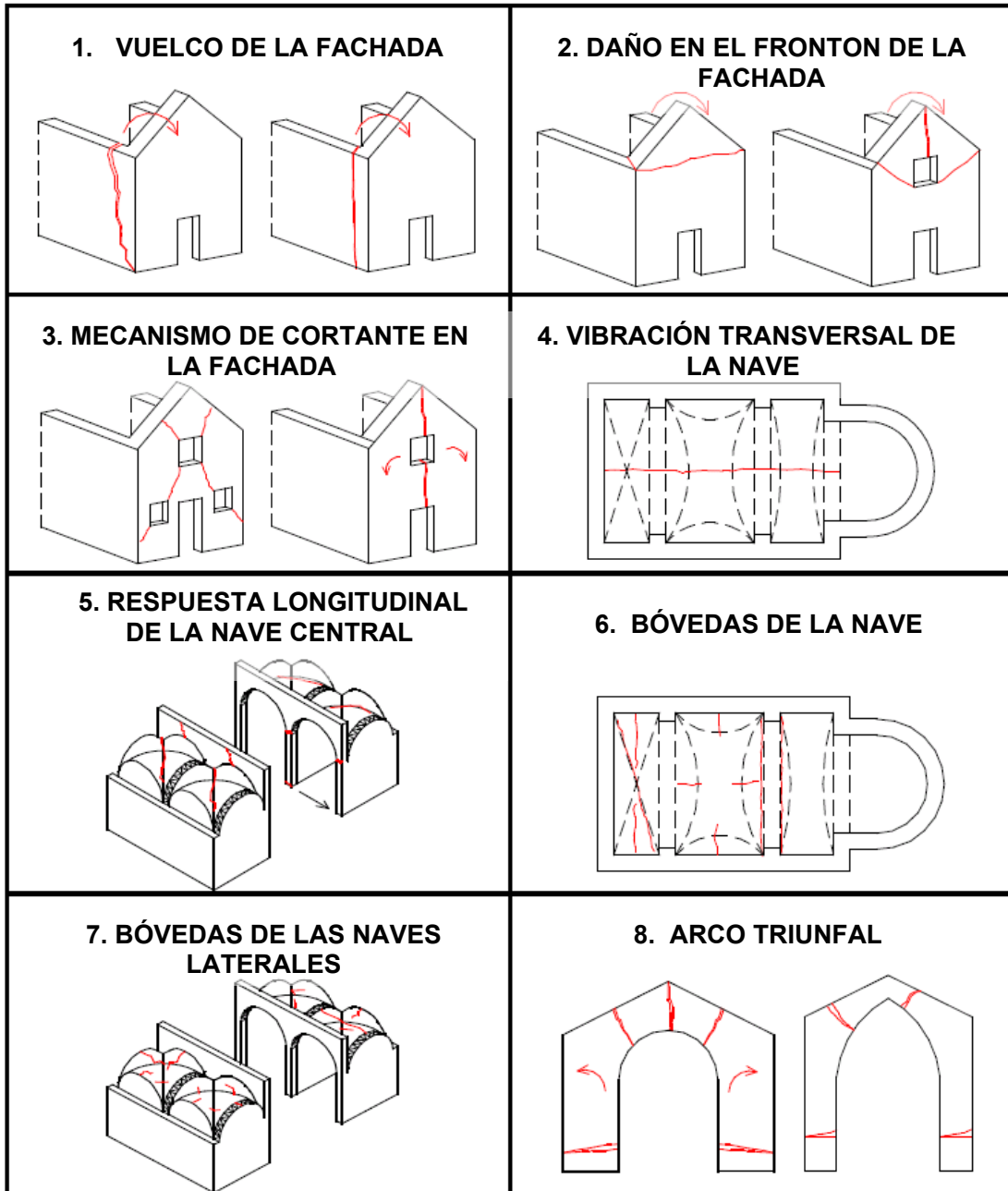
2.2.4 Métodos para evaluar la vulnerabilidad sísmica en iglesias¹³

Aunque la mayoría de las metodologías que existen para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica se han diseñado para las estructuras de hormigón, acero o mampostería, hace muy poco se comenzó a implementar en

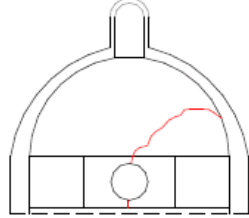
¹² AUGUSTI G., CIAMPOLI M., GIOVENALE P. (2001). Seismic vulnerability of monumental buildings. Structural safety 23, pp. 253-274. Citado por Guillermo Martínez. p 17

¹³ MARTINEZ, op. cit., p.17-19.

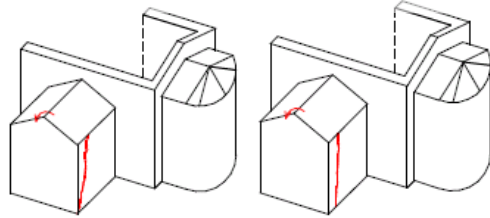
estructuras de fábrica antigua. Algunos de los métodos que se utilizan normalmente para este tipo de edificaciones son:



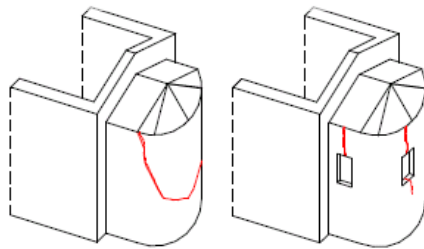
9. CÚPULA O CIMBORIO



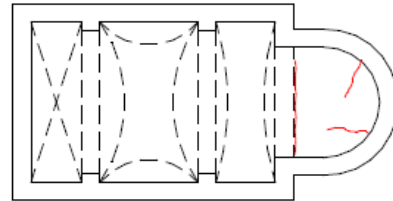
10. VUELCO DE MUROS EXTREMOS



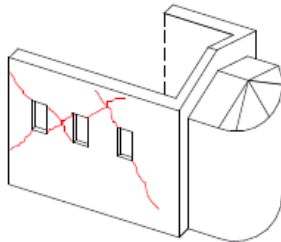
11. VUELCO DEL ÁBSIDE



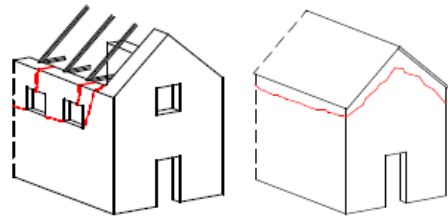
12. BÓVEDAS EN EL PREBISTERIO O EN EL ÁBSIDE



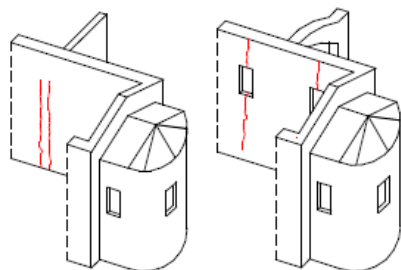
13. FALLA POR CORTANTE EN MUROS



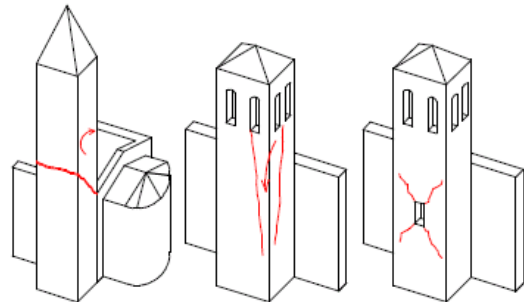
14. MARTILLAMIENTO DE LA CUBIERTA



15. FALTA DE CONTINUIDAD EN MUROS



16. TORRE CAMPANARIO



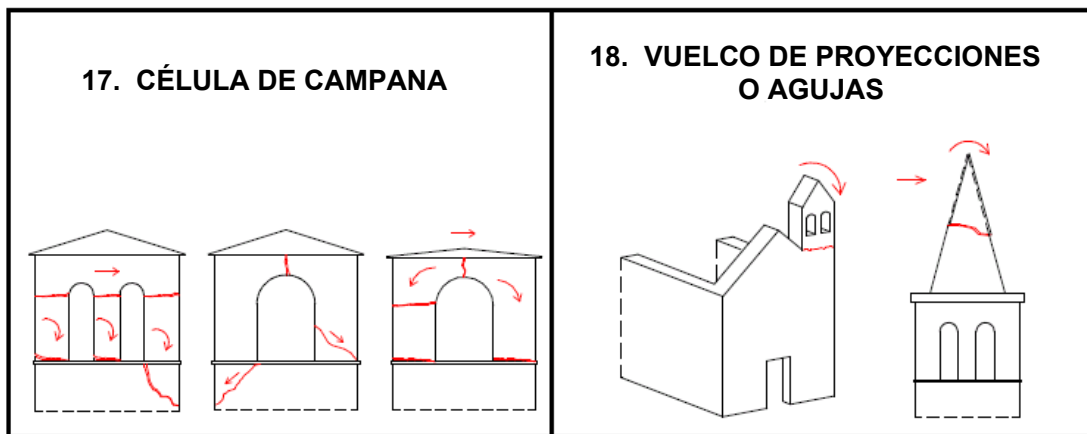


Figura 2.2 Macroelementos para iglesias.

2.2.4.1 Método simplificado de revisión sísmica e índice de área resistente a sismo¹⁴

El fin de estos métodos es el de estudiar la correlación que existe entre las características arquitectónico-estructurales de las edificaciones antiguas, permitiendo así, ver de una forma fácil el grado de seguridad, como un indicador de los modos y mecanismos de daño más probables.

Frecuentemente los métodos simplificados exigen, que la estructura sea simétrica y regular, que el sistema de cubiertas sean diafragmas rígidos y sobre todo que el modo de falla suceda por cortante en el plano de los muros. Las últimas dos condiciones no se cumplen en todas las estructuras históricas, por lo que la evaluación de la seguridad sísmica por métodos simplificados resulta apenas como un indicador muy general de la capacidad que tiene la edificación para resistir sismos.

El método se fundamenta en relacionar la fuerza lateral total impuesta por el sismo y la capacidad que la estructura tiene para resistir dicha fuerza.

¹⁴ MELI Roberto. "Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos". 1^{era} Ed. México. p 113-119

$$V_A = cW \quad (2.1)$$

Donde la fuerza sísmica total (V_A) se puede considerar igual al peso total del edificio (W), multiplicado por un coeficiente sísmico (c)

La fuerza es igual en cada dirección en la que actúa el sismo. Por otro lado, para cada una de sus dos direcciones principales, x y y la edificación cuenta con una resistencia diferente. Se realiza la suposición de que todos los muros pueden desarrollar su capacidad total a fuerza cortante y que la fuerza sísmica resistente es igual a la sumatoria de las contribuciones de todos los muros alineados en la dirección en que se está estudiando la capacidad sísmica. “Esta contribución se determina como el producto del área transversal del muro (A_m) y por el esfuerzo cortante resistente de la mampostería (V_m)”

$$V_R = \sum A_m v_m \quad (2.2)$$

El cálculo anterior se puede mejorar al considerar que los muros cortos y altos tienen una menor eficiencia para absorber las fuerzas sísmicas que los muros largos, debido a que los primeros son más flexibles y absorben menor proporción de la fuerza lateral actuante. “Las Normas de Mampostería del RCDF consideran el factor correctivo siguiente”:

$$R = (1.33L / H)^2 \leq 1 \quad (2.3)$$

“Este factor se aplica a la contribución de muros en los que la relación entre la altura (H) y la longitud (L) es mayor de 1.33. El factor afecta el área de los muros involucrados, dando lugar a un área efectiva, cuya suma es la que se considera en la ecuación anterior para el cálculo de V_R ”.

En una revisión formal, se supone el esfuerzo resistente de la mampostería, según sus características mecánicas para el cálculo de V_R , y se determina el factor de seguridad adecuado para definir la relación mínima entre la fuerza resistente y la actuante.

$$F_s = \frac{V_R}{V_A} \quad (2.4)$$

Los conceptos del método simplificado pueden aplicarse para determinar ciertos índices que permiten comparar la seguridad sísmica de edificios en condiciones reales propias del sitio y de la estructura como tal.

El factor de seguridad resulta

$$F_s = \frac{V_R}{V_A} = \frac{\sum A_m v_m}{w c} \quad (2.5)$$

Se puede definir un índice de seguridad sísmica, suponiendo materiales de resistencia a cortante semejante y el mismo coeficiente sísmico.

$$I_s = \frac{\sum A_m}{w} \quad (2.6)$$

Donde I_s es la relación entre la suma de las áreas efectivas de todos los muros resistentes a sismo, en la dirección en la que se está haciendo la revisión, dividida entre el peso total de la edificación. El índice que se toma es el valor menor obtenido en las dos direcciones estudiadas.

Otra simplificación que se puede realizar se llama **índice de densidad de muros** (Meli, 1994), o la relación de área de muros, la cual consiste en

considerar, que el peso total de la edificación, W , es proporcional al área en planta del edificio A_p y se representa como:

$$d = \frac{\sum A_m}{A_p} \quad (2.7)$$

Este índice es adimensional y no requiere de cálculo de pesos ya que solo depende de cantidades únicamente geométricas.

Las principales limitaciones de este índice son:

- a) La diferencia de peso entre edificios de igual área cubierta puede ser muy grande; esto depende de la altura del edificio y de la presencia de elementos muy pesados (grandes cúpulas centrales, torres, etc).
- b) La falla por cortante de los muros no es la única que puede presentarse; el índice de la falla no es representativo debido a empujes normales al plano en los muros, siendo estos muy comunes.
- c) Si la distribución de los muros no es uniforme y simétrica, la resistencia estará regida por condiciones locales y no por la suma de las capacidades de todos los muros.

2.2.4.2 Método del índice de vulnerabilidad propuesto dentro del Proyecto RISK-UE. (Lagomarsino et al., 2003)¹⁵

Este análisis se basa en los datos aproximados de una cierta tipología estructural (iglesias, torres, palacios, etc.), asignando un índice de vulnerabilidad a cada edificación, este es corregido mediante ciertos factores que se correlacionan con otros parámetros que se identifican fácilmente a simple vista, como lo son, la calidad de los materiales, el estado de

¹⁵ MARTINEZ, op. cit., p.25-33.

mantenimiento, la regularidad estructural, entre otros. El método se basa en que las estructuras que tienen características similares, tales como el sistema estructural, las condiciones de carga, entre otros, tiene la tendencia a sufrir daños parecidos cuando se ven sometidas a acciones sísmicas, permitiendo así con base en la observación de daños ocurridos en la tipología estructural estudiada, desarrollar funciones de vulnerabilidad.

Dentro del proyecto RISK-UE (Lagomarsino et al., 2003)¹⁶, se plantean funciones de vulnerabilidad para la aplicación del método del índice de vulnerabilidad, combinando métodos tipológicos, los cuales se basan en la caracterización de grupos de edificaciones que presenten un comportamiento similar y los semióticos, en los cuales se evalúan la vulnerabilidad de las edificaciones de forma individualizada, mediante un sistema de puntaje que se basa en diferentes factores que pueden afectar el comportamiento estructural. En esta propuesta, las edificaciones se clasifican a partir de las tipologías, asignando un índice de vulnerabilidad que puede ser modificado en función de las características que pudieran afectar su comportamiento sísmico. Las diferentes tipologías consideradas se muestran en la Tabla 2.1.

Tipología	
Palacios	Puentes
Monasterios	Muros urbanos
Castillos	Torres/Campanarios
Iglesias	Teatros
Oratorios-Capillas	Obeliscos
Arcos triunfales	Fuentes/Estatuas

Tabla 2.1 Tipologías para construcciones históricas.

¹⁶ MARTINEZ, op. cit., p.24

Para el caso particular de las iglesias, Lagomarsino et al. (2003)¹⁶ se vale de un gran número de datos estadísticos de daños que se obtuvieron en campañas realizadas posteriormente a los terremotos de Friuli (1976) y Umbria-Marcas (1996, 1997). De resto en las tipologías enunciadas anteriormente, la caracterización del comportamiento sismorresistente se fundamenta en la experiencia o en la opinión subjetiva de expertos.

Las matrices de probabilidad se podrán definir, siempre y cuando se dispongan de numerosas estadísticas de daño para una cierta tipología estructural. Ellas permiten conocer, la distribución del nivel de daño esperado a una cierta intensidad sísmica (Braga et al., 1982¹⁷; Dolce, 1997)¹⁸, en los cuales los niveles de daño son una interpretación cuantitativa de las consecuencias que se producen en los elementos estructurales y no estructurales por la acción del terremoto.

Lagomarsino et al (2003)¹⁹ propone 6 grados de daño (0 a 5), los cuales se indican en la Tabla 2.2.

Tipo de daño	Grado de daño
Sin daño	0
Despreciable a ligero	1
Ligero	2
Medio	3
Severo	4
Colapso	5

Tabla 2.2 Grados de daño.

¹⁷ BRAGA F., DOLCE M., LIBERATORE D. (1982). A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the M.S.K.- scale. Proceedings of the 7th. European Conference on Earthquake Engineering. Athens. Citado por Guillermo Martínez. p 25

¹⁸ DOLCE M. (1997). Evaluation of vulnerability for risk analysis and damage scenarios. Acts of the 8th. ANIDIS National Congress: Seismic Engineering in Italy, Taormina, pp. 217-226. Citado por Guillermo Martínez. p 25

¹⁹ MARTINEZ, op. cit., p.25

La probabilidad de que una tipología de edificación en particular, en el caso de que se cuenten con estadísticas de daño o de que una cierta estructura sufra un cierto nivel de daño debido a un nivel de intensidad sísmica dada, se puede obtener (Braga et al., 1982)²⁰ mediante la ecuación 2.11, la cual se basa en que la distribución de daño se puede modelar por medio de una función de distribución binomial, que se encuentra descrita por un solo parámetro, el cual suele ser el grado de daño medio, μ_D .

Para obtener la curva de vulnerabilidad (figura 2.3), la cual puede construirse para una estructura en particular, se gráfica la intensidad sísmica contra el grado de daño medio.

Mediante la ecuación 2.8, sugerida por Lagomarsino et al. (2003)²¹ e inicialmente propuesta por Sandi y Floricel (1995)²², se puede estimar el índice o grado de daño medio de una estructura o representar las curvas de vulnerabilidad para una cierta tipología estructural o utilizarla en edificios ordinarios como Giovinazzi y Lagomarsino (2002)²³.

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25V_I - 13.1}{\beta} \right) \right] \quad (2.8)$$

donde:

μ_D : Índice de daño medio

²⁰ MARTINEZ, op. cit., p.26

²¹ Ibid., p 26

²² SANDI H., FLORICEL I. (1995). Analysis of seismic risk affecting the existing building stock. Proceedings of the 10th. European Conference on Earthquake Engineering, Vol. 3, pp. 1105-1110. Citado por Guillermo Martínez. p 26

²³ LAGOMARSINO S., GIOVINAZZI S., PODESTA S., RESEMINI S. (2002). WP4 – Vulnerability assessment of current buildings: I level methodology for the vulnerability assessment of current buildings and guidelines for the implementation. RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract No. EVK4-CT-2000-00014. 28 pp. Citado por Guillermo Martínez. p 26

V_i : Índice de vulnerabilidad, el cual varía de 0 a 1

β : Parámetro que controla la pendiente de la curva de vulnerabilidad

I: Intensidad macrosísmica

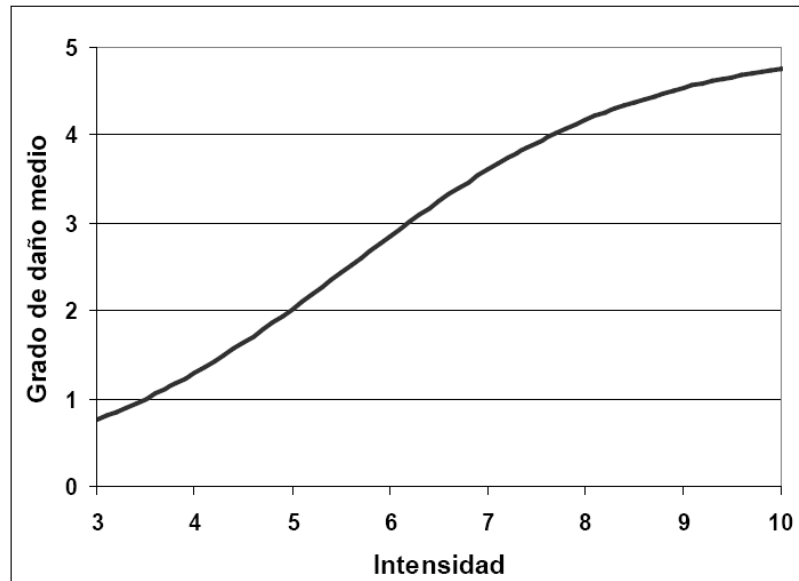


Figura 2.3 Ejemplo de curva de vulnerabilidad para una estructura específica.

Lagomarsino et al. (2003)²⁴ plantea para los índices de vulnerabilidad y el parámetro β los valores que se muestran en la Tabla 2.3. La variabilidad se ve reflejada en los valores mínimos, medios y máximos para los distintos índices, los cuales se indican en la Tabla 2.3.

Estos índices se modifican en función de las características específicas de cada edificación, los cuales pueden ser generales o específicos (Lagomarsino et al., 2003) y se presentan en la Tabla 2.4. Los modificadores generales, son aquellos que son comunes a todas las topologías indicadas y los específicos son los que están asociados a las características de uno o un grupo de tipologías. Estos modificadores se desarrollaron empíricamente y se basan en patrones de daños observados.

²⁴ MARTINEZ, op. cit., p.26

Tipología	Valor inferior (V _i)	Valor medio (V _i)	Valor superior (V _i)	β
Palacios/Edificios	0.496	0.616	0.956	2.30
Monasterios	0.616	0.736	1.076	2.30
Castillos	0.356	0.456	0.766	2.30
Iglesias	0.770	0.890	1.260	3.00
Capillas/Oratorios	0.650	0.770	1.140	3.00
Mezquitas	0.670	0.730	0.940	2.65
Teatros	0.616	0.736	1.086	2.65
Torres	0.636	0.776	1.136	2.30
Puentes	0.216	0.296	0.566	2.30
Muros	0.396	0.496	0.746	2.30
Arcos Triunfales	0.376	0.456	0.706	2.30
Obeliscos	0.396	0.456	0.746	1.95
Estatuas/Fuentes	0.236	0.296	0.606	1.95

Tabla 2.3 Valores del índice de vulnerabilidad y parámetro β para diferentes tipologías.

PARÁMETROS GENERALES		δV _i
ESTADO DE MANTENIMIENTO	Malo	0,04
	Medio	0
	Bueno	-0,04
NIVEL DE DAÑO	Severo	0,04
	Ligero	0,02
	Despreciable	0
TRANSFORMACIONES ESTRUCTURALES	Si	0,02
	No	0
INTERVENCIONES RECIENTES	Si	-0,02
	No	0,02
CALIDAD DE LA MAMPOSTERIA	Mala	0,05
	Buena	0
MORFOLOGIA DEL SITIO	Arista	0,04
	Inclinado	0,02
	Plano	0

Tabla 2.4 Modificadores de vulnerabilidad generales.

Por otro lado, el objetivo de los modificadores de vulnerabilidad específicos, es tomar en cuenta los aspectos relativos a la configuración sísmica del edificio, como la regularidad en planta y elevación, la altura, las luces, la posición con respecto a otros edificios, entre otros. Estos valores que corresponden a diferentes tipologías estructurales se presentan en las Tablas 2.5 a 2.16 (Lagomarsino et al., 2003)²⁵.

ARCOS TRIUNFALES		δV_i
POSICIÓN	Aislado	0
	Incluido	-0.02
LUZ	<6m	0
	>6m	0.02
ALTURA	<12m	0
	>12m	0.02

Tabla 2.5 Modificadores de vulnerabilidad específicos para arcos triunfales.

IGLESIAS		δV_i
TIPOLOGIA DE NAVE	Nave Central	-0,02
	Una sola nave	0
	Tres naves	0,02
DESPLOME DE FACHADA/ ELEMENTOS SOBRESALIENTES EN ALTURA (Agujas, Torres, etc.)	Si	0,04
	No	0
POSICION DE LA IGLESIA	Incluida	-0,02
	Añadida	0,02
	Aislada	0
CUPULAS/BOVEDAS	Si	0,04
	No	0
ALTURA DE PAREDES LATERALES (H)	H < 6m	-0,02
	6 < H < 12 m	0
	H > 12 m	0,04

Tabla 2.6 Modificadores de vulnerabilidad específicos para iglesias.

²⁵ MARTINEZ, op. cit., p.27

ORATORIOS/CAPILLAS		δV_i
TIPOLOGIA DE NAVE	Nave central	-0.02
	Una sola nave	0
	Tres naves	0.02
DESPLOME DE FACHADA/ELEMENTOS SOBRESALIENTES EN ALTURA (Agujas, Torres, etc.)	Si	0.02
	No	0
POSICION	Incluida	-0.02
	Conectada a otros edificios	0.02
	Aislada	0
CÚPULAS/BÓVEDAS	Si	0.04
	No	0
ALTURA DE MUROS LATERALES (H)	H<4 m	-0.02
	4<H<8 m	0
	H>8 m	0.04

Tabla 2.7 Modificadores de vulnerabilidad específicos para oratorios o capillas.

TORRES		δV_i
FORMA EN PLANTA	Cuadrada	0
	Rectangular	0.02
	Poligonal	0
	Circular	0
POSICION	Incluida	0.04
	Conectada en dos caras	0.02
	Conectada en una sola cara	0
	Aislada	-0.02
ALTURA TOTAL (H)	H<10 m	-0.02
	10<H<20 m	0
	H>20 m	0.02
ALTURA POR ENCIMA DE LA ESTRUCTURA (h)	h<10 m	0
	h>10 m	0.02
DIMENSION MINIMA	<2 m	0.01
ELEMENTOS DE ATADO (Tie-Rods)	Si	-0.04
	No	0.04

Tabla 2.8 Modificadores de vulnerabilidad específicos para torres.

MONASTERIOS		δV_i
REGULARIDAD EN PLANTA	Si	-0.02
	No	0.02
REGULARIDAD EN ELEVACIÓN	Si	0
	No	0.02
POSICION	Incluido	-0.02
	Ubicado en esquina	0.04
	Aislado	0
NUMERO DE PLANTAS	Bajo (1-2)	-0.02
	Medio (3-5)	0
	Alto (>5)	0.04
CLAUSTROS/LOGIAS	Si	0.01
	No	0

Tabla 2.9 Modificadores de vulnerabilidad específicos para monasterios.

CASTILLOS		δV_i
REGULARIDAD EN PLANTA	Si	-0.02
	No	0.02
ELEMENTOS ESBELTOS/DE MAYOR ALTURA QUE LA ESTRUCTURA	Si	0.04
	No	0
ALTURA	Alto	0.04
	Medio	0
	Bajo	-0.02

Tabla 2.10 Modificadores de vulnerabilidad específicos para castillos.

MUROS		δV_i
ALTURA (H)	H<10 m	0
	H>10 m	0.04
CONTRAFUERTES	Si	-0.04
	No	0

Tabla 2.11 Modificadores de vulnerabilidad específicos para muros.

PALACIOS/EDIFICIOS		δV_i
REGULARIDAD EN PLANTA	Si	-0.02
	No	0.02
REGULARIDAD EN ELEVACIÓN	Si	0
	No	0.02
POSICION	Incluido	-0.02
	Ubicado en esquina	0.04
	Aislado	0
NUMERO DE PLANTAS	Bajo (1-2)	-0.02
	Medio (3-5)	0
	Alto (>5)	0.04
CLAUSTROS/LOGIAS	Si	0.01
	No	0

Tabla 2.12 Modificadores de vulnerabilidad específicos para palacios y edificios.

TEATROS		δV_i
REGULARIDAD EN PLANTA	Si	-0.02
	No	0.02
ELEMENTOS ESBELTOS/OSCILANTES	Si	0.02
	No	0
POSICION	Incluido	-0.02
	Ubicado en esquina	0.04
	Aislado	0
ALTURA	Bajo	0.02
	Medio	0
	Alto	0.02
CLAUSTROS/LOGIAS	Si	0
	No	0.06

Tabla 2.13 Modificadores de vulnerabilidad específicos para teatros.

PUENTES		δV_i
LUZ (L)	<10 m	-0.02
	10<L<50 m	0
	>50 m	0.04
TIPO DE ARCADA	Rebajada	0.02
	Medio punto	0
	Profunda/ojival	0.02

Tabla 2.14 Modificadores de vulnerabilidad específicos para puentes de fábrica antigua.

OBELISCOS		δV_i
ALTURA	<10 m	0
	>10 m	0.02
ELEMENTOS ESBELTOS	Si	0.02
	No	0
MASAS ELEVADAS	Si	0.04
	No	0

Tabla 2.15 Modificadores de vulnerabilidad específicos para obeliscos.

ESTATUAS/FUENTES		δV_i
ALTURA	<3 m	0
	>3 m	0.02
ELEMENTOS ESBELTOS	Si	0.04
	No	0
MASAS ELEVADAS	Si	0.04
	No	0

Tabla 2.16 Modificadores de vulnerabilidad específicos para estatuas y fuentes.

Después de conocidos los modificadores, el índice de vulnerabilidad final para la estructura o el conjunto de estructuras será igual a:

$$V_{I_f} = V_{I_{inicial}} + \sum_{i=1}^n \delta V_i \quad (2.9)$$

donde:

V_{I_f} : Índice de vulnerabilidad final

$V_{I_{inicial}}$: Índice de vulnerabilidad general inicial

δV_i : Factor de modificación específico de la vulnerabilidad

n: Número total de factores de vulnerabilidad

Conociendo el grado de daño medio, se puede hallar la probabilidad P_k asociada a un cierto grado de daño k de la siguiente manera:

$$P_k(N, d) = \frac{(N-1)!}{k!((N-1)-k)!} \mu_D^k (1-\mu_D)^{(N-1)-k} \quad (2.10)$$

donde:

P_k : Probabilidad de que se presente un cierto grado de daño k

μ_D : Índice de daño medio

k : Grado de daño = 0, 1, 2, 3, 4, 5

N : Grados de intensidad usados = 6

Sustituyendo los grados de daño empleados se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_k = \frac{5!}{k!(5-k)!} \mu_D^k (1-\mu_D)^{5-k} \quad (2.11)$$

Con la anterior ecuación se pueden obtener distribuciones y matrices de probabilidad de daño.

CAPITULO 3: EDIFICACIONES ANTIGUAS TIPO IGLESIA

3.1 MATERIALES ESTRUCTURALES

En las edificaciones históricas el comportamiento está gobernado primordialmente por los materiales que la componen, es por esta razón que se hace necesario describir las propiedades y características intrínsecas de cada material, y la influencia que tienen en el desarrollo de una metodología de vulnerabilidad sísmica de edificaciones antiguas.

La arquitectura histórica y en este caso las edificaciones antiguas tipo iglesia, en la mayoría de nuestros pueblos y ciudades, está construida principalmente con materiales conseguidos de la propia naturaleza: piedra y derivados de la tierra (adobes, tapias o ladrillos).

3.1.1 Piedra

El material más antiguo empleado para la construcción es tal vez la piedra, por ser abundante y duradera, comúnmente utilizado para la mampostería de edificaciones antiguas, y que constituye además un elemento estructural por sí solo, para la construcción de elementos monolíticos, o formados con bloques o sillares sobrepuestos.

El tipo de piedra en los elementos estructurales de los edificios se ha escogido conforme a sus propiedades contrastantes: La durabilidad y la facilidad de ser trabajada para darle la forma deseada. La durabilidad ha sido más importante que la resistencia, aunque ambas propiedades están relacionadas con la densidad del material. La resistencia no es un factor

crítico en el momento de la elección de la piedra, como si lo es la capacidad de resistir los efectos del intemperismo²⁶.

En muchas de las culturas antiguas, la piedra fue el material más utilizado para la construcción, debido a su alta resistencia y abundancia en el medio. Sin embargo, debido a su peso excesivo, el transporte de este material en la antigüedad era muy difícil, lo cual obligó a las distintas sociedades a usar los recursos locales. Esto dio como resultado, una variedad de formas y detalles, que reflejaban las limitaciones y potenciales de los materiales disponibles²⁷.

Las principales rocas utilizadas en la construcción se dividen en tres categorías geológicas: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Varios tipos y formas de piedra natural también pueden procesarse para producir otros materiales de construcción.

La resistencia a compresión de las rocas puede variar entre 100 y 1000 Kg/cm², la resistencia a tensión es del orden del 10% de la de compresión, y el módulo de elasticidad es cercano a 1000 veces la resistencia a compresión, dependiendo del origen de la roca y el procedimiento utilizado durante el ensayo.

Dentro de las aplicaciones se encuentran: como piedra bruta para cimientos, pisos, muros o en estructuras de techo, sillares para obras de albañilería antepecho de ventanas, dinteles, gradas y pavimentos, como barrera impermeable, enchapado de muros exteriores, como árido para concreto y como piedra caliza para la producción de cal y cemento.

²⁶ CORTEZ, op. cit., p.23.

²⁷ BONETT Ricardo. "Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada". Tesis de Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.2003. p 185-190

Los elementos de piedra para su uso en construcción, en función de sus medidas, procedencia y estado de elaboración pueden ser clasificados en:

— **Sillares:** bloques de piedra cuyo peso y dimensiones exige la manipulación mediante dispositivos especiales de suspensión y asiento, tallados por una o más caras que pueden estar provistos o no de modulaciones (Arco y Porcu, 2003)²⁸.

— **Sillarejo:** diminutivo de sillar, pieza pequeña labrada toscamente y sin modulación u ornamentación, pero de forma prismática aproximadamente.

— **Mampuesto:** su mismo nombre lo indica “puesto a mano”. Corresponden a piedras cuyo peso es inferior a 25kg, por lo tanto, es posible su manipulación sin necesidad de recurrir a aparatos de suspensión, y cuya forma es irregular, a veces tal y como sale de cantera, sin desbaste ni talla (Arcos y Porcu, 2003).

— **Ripio:** conjunto de piedras de pequeño tamaño, muchas veces procedentes del desbaste de los mampuestos, que son utilizados para asentar, acuñar y estabilizar los mampuestos en las fábricas de piedra, operación que recibe el nombre de enripiado (Arcos y Porcu, 2003).

— **Chapa:** sillar de escaso espesor, destinado a encarar o revestir otras fábricas no pétreas, dándoles aspecto de sillería, artificio sumamente utilizado hoy día ante la dificultad y precio de la sillería auténtica, y como elemento protector de los materiales que conforman el muro ante los agentes atmosféricos (Arcos y Porcu, 2003).

²⁸ ARCOS, H., y PORCU, M. C. (2003). Movimientos sísmicos y estructuras murarias. Origen, efectos y evaluación de daños en la vivienda tradicional (terremoto en la comarca del río Mula del 2 de febrero de 1999). Consorcio de Compensación de Seguros, CCS. Madrid. Citado por Ricardo Bonett. p 189

Además los elementos de piedra se pueden clasificar según el tipo de composición de la columna:

— **Monolito:** Es un elemento de un solo bloque de piedra sin uniones²⁹.

— **Columna de Bloques:** Las grandes piedras están sobrepuestas en seco, o en algunas ocasiones con una delgada capa de mortero para emparejar las irregularidades de la superficie de contacto y para nivelar.

— **Columna de Sillares:** Esta tiene delgadas juntas horizontales y verticales de mortero. La parte interna de estos elementos suele ser resuelta con material de menor calidad.

3.1.2 Barro³⁰

El barro se empezó a utilizar en las edificaciones en el modo de tierra pisada, o como relleno y recubrimiento de entramados de madera o caña, conocido como bahareque. Su principal desventaja es la degradación por la intemperie y el agrietamiento a causa de las contracciones por el secado. La adición de paja reduce la contracción, y la aplicación de un mortero pulido lo protege de la lluvia.

Para remediar el problema de contracción, la construcción con barro evolucionó a la elaboración de pequeños bloques secados previamente al sol “adobes”, y así completar su contracción por secado antes de ser colocados en los elementos constructivos definitivos.

²⁹ BONETT, op. cit., p.23.

³⁰ MELI, op. cit., p.24-25.

Las propiedades mecánicas de la tierra, apisonada o en adobe, tienen grandes variaciones según las características del suelo con que se fabrique y de los cuidados que se tengan en el proceso constructivo. La resistencia a compresión puede variar entre 5 y 20 Kg/cm², y la resistencia a tensión entre 0.25 y 1 Kg/cm².

La aparición del ladrillo permitió un avance significativo en la construcción de barro, ya que se logra una estabilidad dimensional y mayor resistencia al intemperismo, al ser sometido a unas temperaturas cercanas a los 1000°C, y en un proceso similar al de la cocción de los adobes. Sus propiedades varían notablemente según el tipo de suelo que se emplee, el procedimiento de fabricación y la temperatura de cocción. En las piezas utilizadas en la construcción de edificaciones históricas, pueden encontrarse resistencia a la compresión desde 20 hasta 150 Kg/cm².

3.1.3 Mampostería³¹

La mampostería es una mezcla de bloques, ya sean adobes, piedras o ladrillos, con un material mortero, que permite rellenar huecos, y proporcionar una superficie uniforme para la transmisión de cargas y el correcto posicionamiento de los elementos. En esta definición podríamos incluir los muros construidos en tapia pisada.

La tapia pisada es un método de construcción con tierra, donde se levantan muros monolíticos. Con este sistema se construyen casas sin sostenerlas con piezas de madera y sin mezcla de paja o relleno, apisonando capa por capa, en medio de dos tableros encofrados con el espesor normal de los muros de tierra preparada con este propósito. Una vez apisonada de esta forma la tierra se liga, toma consistencia formando una masa homogénea,

³¹ *Ibíd.*, p 29-37

que puede ser elevada en secciones cortas, moviendo las formaletas hacia arriba o hacia los lados de la sección recién hecha, hasta la altura necesaria para una casa.

El adobe es un ladrillo moldeado con tierra arcillosa y paja, secados al sol. La unión entre adobes se hace con una junta de mortero, que por lo general es barro. Se recomienda utilizar suelos que no contengan piedras gruesas, raíces ni tierra vegetal. Las piedras producen puntos de concentración de esfuerzos y las materias de origen orgánico se degradan con el tiempo y disminuyen la resistencia y durabilidad del elemento.

Las características de la mampostería están gobernadas por la disposición y propiedades de los materiales que la componen. Según la disposición de los materiales, la mampostería se puede dividir en: mampostería organizada, mampostería irregular y mampostería con paramento regular, desconectado del interior

Las propiedades de la mampostería varían ampliamente dependiendo de la calidad de los materiales y su disposición y otros factores como el deterioro por intemperismo.

El color, la forma y las propiedades estructurales de los ladrillos, varían considerablemente entre los diferentes tipos. Los ladrillos de arcilla cocida, pueden resultar sumamente atractivos, por la variedad de apariencias que pueden ser obtenidas a partir de las combinaciones de forma de las unidades y la disposición del mortero. Las dimensiones de los ladrillos varían desde 12.0×9.0×4.5 cm a 30.0 × 18.0 × 12.0 cm y su peso específico se encuentra entre 13 y 22 KN/m³. Los ladrillos de arcilla pueden clasificarse en dos tipos: 1) perforados, en los cuales el área neta es menor que el 75% del área bruta

de la sección y, 2) sólidos o no perforados, en donde el área de las perforaciones es menor o igual al 25% del área de la sección bruta.

La mampostería tiene un comportamiento frágil, es decir, falla de una manera brusca al alcanzar su capacidad de carga, presentándose colapsos súbitos con pocas señales de daño previo.

Para la mampostería de ladrillos se tienen algunos valores experimentales de su resistencia a compresión, la cual puede variar entre 5 y 50 Kg/cm². También se encuentran en la mampostería esfuerzos de corte, que están regidos por esfuerzos a tensión. Aunque estos valores son bajos, no pueden despreciarse, ya que de ellos depende la resistencia de los muros a fuerzas laterales como la producida por los sismos.

El módulo de elasticidad varía entre 5000 Kg/cm², para la mampostería irregular con altos contenidos de mortero, hasta de 20000 Kg/cm², en mampostería de bloques de piedra de buena calidad, con juntas de mortero muy delgadas.

La mampostería experimenta cambios volumétricos por las siguientes razones: por contracción de los materiales que la componen y por flujo plástico —después de un acortamiento inicial elástico, se sigue deformando en el tiempo mientras la carga permanezca—. Estos fenómenos deben tenerse en cuenta en la reposición o reparación de los elementos estructurales de las edificaciones antiguas, ya que a pesar de utilizar los mismos materiales, se presentan deformaciones y cambios volumétricos, que los separan de la estructura original.

Se han planteado dos hipótesis del comportamiento de la mampostería: *Comportamiento lineal (hasta la falla)* y *Comportamiento plástico*. Aunque

esta última hipótesis parece alejarse del comportamiento de un material frágil, como la mampostería, que es el que permite mejores estimaciones de la resistencia, debido a que la redistribución de los esfuerzos antes de la falla, se acerca más a la plastificación que a una distribución lineal.

La condición de carga más común de un elemento de mampostería es la de carga axial combinada con un momento flector, debido generalmente a la excentricidad con la que actúa dicha carga. Una forma eficiente de mejorar el comportamiento de la mampostería ante cargas de compresión es mediante la aplicación de un confinamiento que restrinja la expansión lateral por el efecto Poisson, lo que evita el agrietamiento vertical y la falla del conjunto.

Existe una clasificación de la mampostería según el tipo de material y disposición, para dar su mecanismo de fallo:

→ **Mampostería regular de piedra y mortero:** Al estar sometido a esfuerzos de compresión, se produce un acortamiento en dirección a la carga aplicada y un alargamiento en la dirección transversal “efecto Poisson”. El mortero es mucho menos rígido que la piedra, y tiene deformaciones mayores en la dirección longitudinal y transversal. La interacción entre los dos materiales produce una contracción transversal del mortero, y una expansión de la piedra, esto implica la aparición de esfuerzos a compresión y tensión respectivamente, ambos en dirección transversal. Debido a la baja resistencia a tensión de la piedra se producen agrietamientos transversales a medida que aumenta la carga. La capacidad en compresión del mortero no suele ser crítica, debido a que por su pequeño espesor, se encuentra confinado en la piedra. Por lo anterior, se puede decir que la resistencia de la mampostería es menor a la de la piedra, pero mayor a la del mortero.

→**Mampostería regular de ladrillos o adobes:** Cuando se trata de mampostería de ladrillos o adobes puestos en hiladas de una forma regular, la resistencia del conjunto está entre 30 y 40 % del elemento individual. Las mejores resistencias se obtienen mejorando la calidad de los morteros.

→**Arreglos irregular de piedras:** Aquí se presenta una separación de las piedras, abultamiento de un tramo de muro y separación en franja verticales independientes, lo que conduce al pandeo y al subsiguiente colapso; juega un papel importante la presencia de piedras transversales que amarren la mampostería en la dirección del espesor del elemento. La resistencia del conjunto tiene poca relación con la resistencia de las piedras, y depende de su organización y de la calidad del mortero.

3.1.4 Morteros³²

El mortero es un material plástico que permite la unión entre bloques de adobe o piedras que les proporciona cierta adherencia y continuidad entre ellas.

El material más utilizado es el barro, pero este presenta problemas de debilidad a la degradación por efectos del agua al encontrarse en un estado de intemperismo. Este tipo de mortero más la adición de materia orgánica y en algunas ocasiones cal, fue ampliamente utilizado en las edificaciones antiguas de América latina. Otro mortero utilizado ha sido la mezcla de cal y arena, que permitió la construcción de elementos más resistentes y durables.

Una de las ventajas del mortero de cal es su tiempo de fraguado lento, el cual puede durar varios años, esto permite que los elementos se deformen y se acomoden a cambios de forma tales como, hundimientos de la

³² CORTEZ op. cit., p.25

cimentación. Los morteros de cal-arena alcanzan una resistencia entre 5 y 20 Kg/cm². A pesar de ser más durable que los morteros de barro, también son afectados por el intemperismo, presentándose problemas de carbonatación. Los romanos lograron un avance significativo en la producción de morteros, agregando puzolana (material fino de origen volcánico) al mortero, el cual entra en reacción química con la cal, y permite la carbonatación sin necesidad del aire y disminuye el tiempo de endurecimiento, mejorando su resistencia, permeabilidad y durabilidad. Esto permitió el desarrollo del *primer concreto*, con el que se construyeron grandes obras durante su imperio: Puentes, canales, acueductos y bóvedas de grandes luces.

Otros aditivos como: polvo de ladrillo, arena pumítica, fueron empleados en varias épocas y diferentes culturas para mejorar las propiedades de los morteros, pero resultaba muy costoso y solo se empleaban en monumentos muy importantes.

A finales del siglo XIX, aparece el cemento Pórtland. El mortero de cemento alcanza mayor resistencia que otros (50-200 Kg/cm²), tiene un endurecimiento muy rápido y mayor módulo de elasticidad.

3.1.5 Madera³³

La madera no sólo es uno de los materiales de construcción más antiguos, junto con la piedra, tierra y otros materiales vegetales, sino que se ha mantenido hasta hoy como el más versátil y en términos de comodidad interior y aspectos de salud, el material más aceptable. Sin embargo, la madera es un material extremadamente complejo, disponible en gran variedad de especies y formas, adecuado para todo tipo de aplicaciones.

³³ *Ibíd.* p 29

La madera para construcción de edificaciones está dividida en dos categorías: especies de madera primaria y secundaria. Ya sean primarias o secundarias, pueden encontrarse maderas rollizas y aserradas. Y su resistencia depende de la forma como estén orientadas sus fibras.

La madera, rolliza o aserrada, puede ser utilizada en: estructuras reticuladas para techos y construcciones completas o parciales, pisos estructurales y no estructurales, paredes y entrepisos o techos, enchapado de piezas de madera de inferior calidad o enchapado de otros materiales (ladrillos, concreto, etc.), y en marcos de ventana y puertas, persianas, antepechos de ventana, escaleras y elementos de construcción similares.

3.1.6 Metales³⁴

Ningún metal fue usado extensamente como elemento estructural primario hasta los tiempos relativamente recientes (siglo XIX). El bronce tuvo algunas aplicaciones aisladas con preferencia al hierro por su mayor durabilidad al no ser sujeto a corrosión. El hierro fundido se usó para tensores desde épocas antiguas, para lo cual se desarrollaron diversos sistemas de anclaje. Estos anclajes no contaban en general con sistemas de ajuste para tensar el tirante; para ello se utilizaban cuñas y frecuentemente se calentaba la barra en toda su longitud antes de fijarla, para que al enfriarse se acortara y quedara tensa.

El hierro fundido se obtenía del mineral de hierro al calentarlo con un combustible (carbón), que funcionara como reductor de oxígeno. Hasta el siglo XV las temperaturas que se alcanzaban eran suficientes para extraer el hierro que era batido por el herrero. Después que se usaron temperaturas mayores para las cuales el hierro fundido toma nuevamente oxígeno de

³⁴ MELI, op. cit., p.42,43

carbón y puede vaciarse formando lingotes, que se vuelven a fundir y colarse en moldes con la forma deseada. El hierro colado así obtenido, tiene alta resistencia y puede dar lugar a elementos de características uniformes. Solo en el siglo XVIII este material llegó a ser suficientemente económico como para uso estructural a escala importante.

El hierro colado es un material de buena resistencia, pero notablemente frágil cuando se sujeta a esfuerzo de tensión, debido a su alto contenido de carbono. Por ello fue empleado principalmente para elementos en compresión, como postes, columnas y arcos. Las conexiones fueron adaptadas de las usuales en estructuras de maderas.

A finales de siglo XIX se comenzaron a usar el hierro dulce y el acero; en éste último, el carbono es removido de los lingotes de hierro, eliminando así el carácter frágil del hierro colado; esto permite rolar elementos de secciones variadas y en grandes longitudes. La trabajabilidad del acero permitió el desarrollo de formas de unión más eficientes y sencillas, como los remaches, los pernos y tornillos, y la soldadura.

Son problemas principales de los elementos de hierro y acero, su sensibilidad al fuego y la corrosión; ambos factores han hecho que muchas estructuras metálicas antiguas no hayan sobrevivido. Otra razón para lo mismo ha sido el robo de este material, por su alto costo y la facilidad de ser rehusado.

3.2 ELEMENTOS Y SISTEMAS ESTRUCTURALES BASICOS³⁵

En la mayoría de los edificios, estilos arquitectónicos y soluciones estructurales que se han utilizado en las construcciones antiguas, se

³⁵ Ibid. p 45-70

identifican algunos elementos que cumplen funciones estructurales básicas y que aparecen, con distintos cambios, en la mayoría de las edificaciones. Estos elementos pueden ser columnas, muros, vigas y arcos, bóvedas, cúpulas, contrafuertes, techos y elementos de cimentación.

3.2.1 Columnas

Las columnas son los elementos que cumplen la función de soporte del edificio al transmitir el peso del mismo hacia la cimentación. Constituyen el elemento estructural más simple, porque reciben cargas fundamentalmente en la dirección de su eje principal, y estas están sujetas a esfuerzos de comprensión que son los que la mampostería y otros materiales resisten más eficazmente.

En la antigüedad las primeras columnas fueron troncos de madera o monolitos, enterrados a profundidad suficiente para evitar los estratos más débiles del suelo. Estas estructuras cambiaron hacia otras que presentaban ventajas constructivas, como las columnas de bloques y de sillares, y las de mampostería de diferentes características. La adición de capiteles y pedestales favoreció la captación de cargas desde la techumbre y la transmisión de la misma hacia los cimientos. Por su posición tan visible en el edificio, las columnas adquirieron una función más decorativa, y se han convertido en el objeto refinado de diseño arquitectónico, hasta ser elementos distintivos de los estilos arquitectónicos.

La capacidad de carga de una columna depende de la resistencia del material básico del que está construida, pero es afectada por ciertos factores que reducen significativamente la resistencia, con respecto a la material base.

Las columnas a diferencia de otros elementos estructurales de mampostería, solo muestran signos de claros daños cuando llegan a condiciones muy cercanas al colapso; su falla es por ello del tipo frágil. El principal signo de que se está alcanzando la capacidad de carga de la columna es la aparición de grietas verticales que indican que la expansión lateral del material ha alcanzado niveles elevados y puede comenzar el desprendimiento del material.

La problemática estructural de las columnas es similar a la de los postes y puntales, que son elementos sometidos a carga axial, y que por su flexibilidad no adsorben fuerzas laterales o momentos flexionantes significativos. Dichos elementos, de madera o metálicos, son sensibles al pandeo. Este fenómeno es el que generalmente limita su capacidad de carga, y su tratamiento se hace con las herramientas modernas de la ingeniería estructural.

3.2.2 Muros

Los muros son, al igual que las columnas, elementos de soporte del peso del edificio, además cumplen otras funciones estructurales, como absorber los empujes laterales debidos al coceo de arcos y bóvedas, y al efecto del viento y sismos. El material típico para muros es la mampostería, usualmente en modalidades menos refinadas que las que se usan en las columnas.

La resistencia a cargas axiales está gobernada por los mismos factores que influyen en la resistencia de columnas. El efecto de pandeo no puede ser crítico debido a que los espesores empleados son muy grandes; la relación altura-espesor no excede de 6, y cuando lo hace, se recurre a engrosamientos locales, como contrafuertes.

Cuando el edificio sufre hundimientos diferentes en distintas partes de su cimentación, se producen distorsiones en los muros que dan lugar a un estado de esfuerzos similares al inducido por las fuerzas laterales debidas a sismos, con la diferencia de que ahora la distorsión se produce en un solo sentido, por lo que el agrietamiento se da en una sola diagonal. De hecho, la posición y dirección de estas grietas diagonales permiten identificar el tipo y magnitud de los hundimientos diferenciales.

Un origen adicional de agrietamiento en los muros de mampostería es la contracción por secado de material, sobre todo del mortero de los adobes y ladrillos.

3.2.3 Vigas y Arcos

Encontrar soluciones simples y eficientes para los techos y pisos resulto más difícil que para las columnas y muros. Pero recurrir a la madera, aprovechando su capacidad para resistir esfuerzos de tensión y su disponibilidad en elementos de longitud apreciable. Para las edificaciones importantes se buscaron soluciones duraderas y más imponentes mediante el empleo de la mampostería.

Un avance significativo fue cuando se pensó darle una geometría circular a la distribución de piedras, acuñándolas unas contra las otras; se formo así el arco circular en que se modifica radicalmente la condición de esfuerzos con respecto a los casos anteriores. Ahora las cargas se transmiten hacia los apoyos mediante esfuerzos de comprensión que son resistidos eficazmente por la mampostería. Por este último el arco es la forma más natural de cubrir claros con mampostería lo mismo que bóveda.

En los arcos los esfuerzos de comprensión que se generan en condiciones normales de carga (peso propio del arco, mas relleno, mas sobrecarga, todo distribuido simétricamente en la longitud del claro), son razonablemente pequeños si la geometría del mismo es la más adecuada para que las cargas se transmitan siguiendo aproximadamente el eje del arco. De manera, el diseño de un arco de mampostería es mas problema de geometría que uno esfuerzos.

Rara vez se han encontrado casos de arcos que hayan fallado por los efectos solamente de la sobrecarga, sin que este haya sido acompañado por el movimiento de los apoyos, sea por el propio coceo debido a la sobrecarga o por condiciones externas, como el asentamiento de la cimentación, o los movimientos sísmicos. El movimiento en los apoyos da lugar a un conjunto de agrietamiento característico que inicia en la parte inferior en el centro del arco con una grieta y después con grietas en la parte superior, en los arranques del arco. Estas grietas funcionan como articulaciones o bisagras, que permiten que el arco gire y se abra, aunque siga manteniendo su estabilidad. Se requiere una abertura muy considerable del arco para que se forme una articulación adicional en un punto intermedio, con lo que el arco se vuelve inestable y se produce el colapso.

3.2.4 Bóvedas

La extensión natural del arco para formar techo completo, es la bóveda cilíndrica o de un cañón corrido, que puede visualizarse como una sucesión de arcos adosados. Para estudiar su comportamiento, modos de fallas y análisis de esfuerzos se puede considerar una franja de bóveda de ancho unitario, ósea un arco.

Al igual que para los arcos, el aspecto crítico para la estabilidad de la bóveda es la rigidez de sus apoyos. En este caso se necesita evitar el movimiento hacia fuera en toda la longitud de la bóveda. La necesidad de un apoyo continuo entra en conflicto con la de permitir acceso e iluminación al interior. Esto se resuelve perforando los muros de apoyo con arcos u otras aberturas que no afecten significativamente la rigidez del muro. Por la poca aptitud de la mampostería para resistir tensiones no es común que se haga trabajar la bóveda como viga y en sentido longitudinal, sino que se propicia el apoyo continuo en sus bordes.

Se ha empleado en la arquitectura un gran número de variantes de la bóveda cilíndrica, las que dan lugar a formas más eficientes desde el punto de vista estructural. Hay diferentes formas para rigidizar las bóvedas, como intersecando con cierto ángulo dos bóvedas inclinadas iguales, o con la insertación de bóvedas, de arcos o de casquetes esféricos y de menores dimensiones.

3.2.5 Cúpulas

Igual que para los arcos, el desarrollo de la cúpulas o domos, pasó por el de la “falsa cúpula”, en el que se construyen anillos circulares cuyas piedras o sillares se proyectan hacia adentro de la hilada anterior, cerrando progresivamente el claro. El problema del volteo hacia adentro es menos crítico en este caso, ya que cada hilada constituye un arco horizontal que contiene la parte ya construida de la cúpula.

Para la construcción de la cúpula se necesita el empleo de piedras de geometría compleja para dar la forma espacial de la misma. Por tal razón y por el elevado peso del material, se encuentra muy pocos casos de cúpulas de piedra. El material más adecuado para la elaboración de estos elementos

ha sido el ladrillo de barro y con frecuencia el concreto de mortero de cal y aditivos puzolánicos. El proceso constructivo casi siempre requiere el uso de cimbra y apuntalamiento total o parcial.

Fue con el desarrollo de la cúpula que cambio radicalmente la distribución interior de los templos y grandes construcciones, al permitir espacios y alturas libres que antes no se podrían lograr.

El funcionamiento estructural de la cúpula es ejemplar al de los cascarones o estructuras espaciales delgadas que transmiten las cargas, debidas sobre todo a su propio peso, esencialmente por esfuerzos de compresión en dos direcciones principales.

En las cúpulas la gran mayoría de los daños se deben a los esfuerzos tangenciales, que en la parte superior son de compresión, pero que cambian a valores crecientes de tensión hacia la base de la cúpula. Por la baja resistencia en tensión de la mampostería, dichos esfuerzos dan lugar frecuentemente a un agrietamiento a lo largo de los meridianos que hace que el domo se separe en una serie de gajos que funcionan como arcos adyacentes. Estos arcos son capaces de transmitir las cargas por esfuerzos normales de compresión de manera que la cúpula agrietada no pierde estabilidad; sin embargo los arcos agrietados originan un aumento de coceo sobre los apoyos que pueden ser causa de inestabilidad de la cúpula por el excesivo desplazamiento hacia fuera de dichos apoyos.

Los elementos rígidos abajo de la base de la cúpula, como el tambor son de gran utilidad para absorber los esfuerzos de tensión tangencial y evitar el agrietamiento; sobre todo si estos elementos contienen materiales resistentes a tensión, como bandas de acero.

3.2.6 Contrafuertes y arbotantes

El empuje perpendicular al plano de los muros es una de las situaciones más críticas para la estabilidad de las construcciones de mampostería. Este fenómeno se genera principalmente por el coceo de las bóvedas y arcos, por fuerzas laterales debidas a sismo o viento y por el empuje de tierra o líquidos retenidos en el muro.

El peso propio del muro absorbe los empujes transversales que equilibra el momento de volteo; a medida que la altura del muro y la magnitud del empuje crecen, se vuelve poco práctico contrarrestar el momento del volteo con espesores cada vez mayores del muro.

Con el objeto de aumentar la eficiencia en contrarrestar el volteo, se puede recurrir a la colocación de contrafuertes, que son muros transversales exteriores a través de los cuales se transmiten los empujes laterales hacia el terreno sin introducir tensiones en la mampostería. La geometría del contrafuerte puede ser rectangular, o más eficientemente trapecial para formar un espolón exterior.

Para aligerar el contrafuerte sin disminución significativa de su efecto de contrarresto, se abre un hueco central en su parte interior debajo de un arco superior que funciona como puntal; eso permite la circulación a través del muro de contrafuerte y el uso de espacio interior.

El arco inclinado que actúa como puntal se denomina arbotante y su desarrollo se dio en la arquitectura gótica; es el elemento estructural de los edificios antiguos que más ha llamado la atención, por su desarrollo y aplicación implican un conocimiento preciso de la manera en que las cargas

se transmiten en la estructura, y porque tiene un gran impacto visual que deja en claro su función, esencialmente estructural.

La función del arbotante es servir de contraviento para rigidizar la bóveda central y transmitir los empujes laterales debidos al viento o a los sismos. Una función no estructural es canalizar hacia partes inferiores el agua de la lluvia que cae sobre la cubierta.

3.2.7 Sistemas de piso y techo

Para construir los pisos intermedios y en muchos casos los techos de los edificios antiguos se usaron esencialmente elementos de madera, por lo que pocos han perdurado hasta hoy. Las variantes son pocas y muchas de ellas permanecen en las construcciones actuales, especialmente en los países menos industrializados.

Los pisos fueron primero vigas de madera rolliza y después de madera escuadrada, apoyados en huecos abiertos en los muros de mampostería. Sobre las vigas principales apoyaban directamente tablones paralelos para formar la superficie plana sobre la que se colocaba el revestimiento final del piso.

Para procurar mejor aislamiento térmico y acústico, se colocaba frecuentemente entre el revestimiento del piso y los tablones una capa de tierra o de material más ligero, como ceniza.

En la segunda mitad del siglo pasado, las vigas de madera comenzaron a ser sustituidas por vigas hierro fundido o colado y posteriormente, de acero estructural. Esto llevó a cambios en los elementos secundarios de piso, como

la introducción *de bóveda de lámina acanalada o del ladrillo*, además de otras variantes.

El aprovechamiento de la madera en modalidades estructuralmente más eficientes se vio limitado por la dificultad de lograr uniones capaces de transmitir esfuerzos de corte y tensión. Sin un adecuado mantenimiento la vida de estos elementos es limitada; particularmente críticas son las condiciones de los apoyos de las vigas de madera que se empotran en muros que pueden ser sujetos a cambios importantes de humedad.

3.2.8 Elementos de cimentación

Los elementos de cimentación fueron creados debido a la necesidad de transmitir las cargas de elementos de soporte de la estructura a un suelo con una resistencia menor que la del material de dichos elementos de apoyo. Para la construcción de muchas de las grandes construcciones antiguas se busco un sitio donde la roca sólida estuviera a la vista, para así desplantar directamente los elementos estructurales “muros o columnas” de mampostería sobre la roca, sin necesidad de una cimentación propiamente dicha.

La solución típica para la cimentación de los edificios sobre un suelo de buena calidad fue el engrosamiento de dichos elementos de soporte para formar zapatas aisladas o corridas, de espesor solo un poco mayor que el de los elementos estructurales.

No son más raros los casos de edificios antiguos que han experimentado problemas estructurales debido a hundimientos diferenciales de los puntos de apoyo de sus elementos de soporte; esto aun en casos en que el suelo de apoyo era de razonable capacidad de carga. En estos suelos pueden

presentarse hundimientos por la presencia de extractos inferiores más deformables o por las modificaciones en las propiedades de los suelos, debidas sobre todo a cambios importantes en los niveles de aguas freáticas. Los daños en estas situaciones pueden aparecer inclusive muchos siglos después de la construcción del edificio.

El funcionamiento estructural de estos elementos de cimentación no presenta características particulares, diferentes a las de los elementos de la superestructura. Los daños de la cimentación se deben principalmente a efectos de hundimientos diferenciales o a deterioro por la humedad.

CAPITULO 4: ADAPTACION DEL METODO DEL INDICE DE VULNERABILIDAD (BENEDETTI-PETRINI) A EDIFICACIONES HISTORICAS TIPO IGLESIA

4.1 GENERALIDADES

El método propuesto por Benedetti y Petrini³⁶, se define como indirecto y fue adoptado por el Gruppo Nazionale Difesa dai Terremoti (GNDT) del C.N.R (Italia) desde el año 1982, esto con el fin de determinar de una manera práctica la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones existentes. El procedimiento consiste en analizar una serie de datos sobre las características de los elementos que componen una edificación en particular, recopilando cada información en los formularios diseñados para la evaluación de la vulnerabilidad. Este método se caracteriza por ser subjetivo y se basa en el juicio de expertos, permitiendo así, valorar la vulnerabilidad en función de un cierto número de parámetros que representan la predisposición de una edificación a sufrir daño debido a un evento sísmico. Algunos de esos parámetros se basan en el comportamiento de los elementos estructurales, mientras que otros analizan el comportamiento del conjunto constructivo³⁷.

De acuerdo con la escala de vulnerabilidad propuesta por Benedetti-Petrini, el índice de vulnerabilidad resulta de la suma ponderada de los valores numéricos que expresan la "calidad sísmica" de cada uno de los parámetros estructurales y no estructurales que juegan un papel importante en el comportamiento sísmico de las estructuras de mampostería.

³⁶ BENEDETTI D, PETRINI V. "Sulla vulnerabilità sísmica di edifici in muratura: Prioste di un método di valutazione, L'industria delle Costruzioni Roma 1984

³⁷ GOMEZ I; RODRIGUEZ E. op. cit., p.120.

A cada parámetro se le asigna, una de las cuatro clases A, B, C o D, durante las investigaciones de campo. A cada clase le corresponde un valor numérico K_i que varía entre 0 y 45. Por otra parte, cada parámetro es afectado por un coeficiente de peso W_i , que varía entre 0.25 y 1.5, el cual refleja la importancia de cada parámetro dentro del sistema resistente del edificio. De esta manera, el índice de vulnerabilidad IV se define por la siguiente ecuación:

$$VI = \sum_{i=1}^{11} K_i W_i \quad (4.1)$$

Al analizar la anterior expresión se puede decir que el índice de vulnerabilidad define una escala continua de valores desde 0 hasta 382.5 que es el máximo valor posible³⁸.

Cada puntaje y peso de los parámetros se determinaron a partir del análisis estadístico y la opinión de expertos, que se obtuvieron de la información recolectada en los terremotos sucedidos desde 1976 en las diferentes regiones de Italia.

El formulario de levantamiento consta de dos niveles y se han diseñado con el objetivo de tener dos grados de aproximación. El primer nivel, se usa para seleccionar las edificaciones más peligrosas desde el punto de vista estructural, para investigarlas después y con el segundo nivel se busca obtener una apreciación más exacta de la vulnerabilidad. El primer nivel incluye los datos generales del edificio, como: Ubicación, dimensiones, utilización, tipología estructural, y un apartado para la recopilación de la extensión y el nivel de daño que se utiliza para las investigaciones post-

³⁸ CHAVARRIA D.A; GOMEZ D. "Estudio piloto de vulnerabilidad sísmica en viviendas de 1 y 2 pisos del barrio cuarto de legua en el cono Cañaveralejo". Tesis de grado, Universidad del Valle. Santiago de Cali. 2001. Cap.6

terremotos (Parte de este formulario se encuentra en el Apéndice B de este libro). Sin embargo no forma parte fundamental del método ya que no influye para nada en el cálculo del índice de vulnerabilidad.

Mientras, en el segundo nivel se recopilan los datos y parámetros más importantes para el cálculo del índice de vulnerabilidad, el cual consiste a su vez en dos apartados diferentes uno para edificaciones de mampostería y otro para edificaciones de hormigón armado³⁹.

4.2 ADAPTACIÓN DEL MODELO

Debido a que este método se ha implementado en Europa, más exactamente en Italia por el Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti 1982 (Ver anexo C), se debe entonces, realizar las modificaciones pertinentes para adecuarlas al contexto de la zona y a las edificaciones en estudio, ya que el método original se hizo para unas condiciones diferentes a las nuestras. Estas modificaciones se harán siguiendo los siguientes aspectos:

Se analizan los parámetros con el objetivo de verificar si son los necesarios para estimar el grado de vulnerabilidad de las edificaciones históricas tipo iglesia de la zona en estudio frente a la acción sísmica, y luego se realiza una adaptación de las instrucciones de modo, que se pueda determinar la clase de cada parámetro al contexto de las iglesias antiguas de la región.

Las modificaciones se definen de la siguiente manera:

- En los Parámetros se realizan consultas de metodologías nacionales y extranjeras.

³⁹ GOMEZ I; RODRIGUEZ E. op. cit., p.121.

- En las instrucciones de las clases de cada parámetro también se realizan consultas de metodologías nacionales y extranjeras, además de una revisión fotográfica de las iglesias de la zona.

1. Organización del sistema resistente⁴⁰

La adaptación de este parámetro se relaciona con la modificación de la especificación de cada clase, adecuándolas a las características que estuvieran más acordes con las particularidades de las iglesias.

Este parámetro trata de determinar la eficacia de la estructura existente prescindiendo del tipo de material, atendiendo a los detalles como la existencia de vigas y columnas, y evaluando los enlaces entre los elementos de resistencia vertical, la ligazón de las paredes y como están conectadas en sus encuentros esquineros.

- A.** Edificación en mampostería confinada o reforzada en todas las plantas.
- B.** Edificación en mampostería que solo posee vigas de confinamiento sin columnas o columnas sin vigas de confinamiento o poseen vigas y columnas de confinamiento pero no en todas las plantas.
- C.** Edificación en mampostería que no posee vigas y columnas de confinamiento en todas las plantas y que se encuentra constituido por paredes ortogonales bien ligadas.
- D.** Edificación en mampostería que no posee vigas y columnas de confinamiento en todas las plantas, con paredes ortogonales no ligadas o mal ligadas.

⁴⁰ *Ibíd.* p 125

2. Calidad del Sistema Resistente

Cuando se habla de la calidad del sistema resistente se deben examinar minuciosamente las características de los materiales y las posibles etapas que hubieran existido en la construcción de la edificación antigua, ya que esta nos podría resolver muchas inquietudes, y de esta manera realizar la modificación de las especificaciones de cada clase.

Este parámetro determina el tipo de mampostería que más se utiliza frecuentemente, diferenciando de modo cualitativo, su característica de resistencia con el fin de asegurar la eficiencia del comportamiento de la estructura. La atribución de un edificio a una de las cuatro clases se efectúa en función de dos factores: por un lado, del tipo de material y de la forma de los elementos que constituyen la mampostería. Por otro lado, de la homogeneidad del material y de las piezas, por toda la extensión del muro.

- El tipo de material utilizado y la forma de los elementos:

Piedra: La piedra es el componente más común para la mampostería de los edificios históricos.

Los diferentes tipos de elementos de piedra son:

- **Monolito**: es un elemento de un solo bloque de piedra sin uniones.
- **de Bloques**: en esta las grandes piedras están superpuestas en seco o con una delgada capa de mortero para absorber las irregularidades de la superficie de contacto y para nivelar.
- **de sillares**: Tiene delgadas juntas horizontales y verticales de mortero, el interior de estas suele estar hecho de material de menor calidad.

Efectos que disminuyen la resistencia a compresión en los elementos compuestos de piedra:

- Efecto poisson: Por la baja resistencia a tensión de estos materiales, desde niveles relativamente bajos de esfuerzos de compresión, se comienzan a presentar un microagrietamiento transversal que se propaga a medida que aumentan los esfuerzos, hasta producir la separación de una serie de pequeñas columnas individuales, cuya capacidad de carga está limitada por su pandeo.
- Efecto del tamaño: que hace que a medida que crece el elemento disminuye su resistencia. Las imperfecciones del material dan lugar a puntos débiles desde donde se inicia el agrietamiento transversal causante de falla. A medida que crece el elemento crecen también las imperfecciones.

Mampostería de ladrillo (Temosá): desde el punto de vista del comportamiento estructural se distinguen los siguientes:

- Que tienen un aparejo regular (mampostería organizada).
- Que tienen un aparejo irregular, pero existe una liga adecuada de mortero.
- Distribución de ladrillos desorganizada.
- Caras exteriores con mampostería regular, y el interior es vaciado con mampostería de tipo ciclópeo.
- Muros de limosna: es la mampostería constituida con piedras, tezontle, pedacería de ladrillo, y otros, todo embebido en una matriz de mortero de cal⁴¹.

- Homogeneidad de los materiales: Se refiere a la correcta disposición y secuencia de los elementos que constituyen los muros y las columnas. La

⁴¹ MELI op. cit., p.29

homogeneidad se pierde cuando se encuentran otros materiales dentro de los muros, lo que produce una concentración de esfuerzos debido a la pérdida de su uniformidad.

- A.** Mampostería de ladrillo de buena calidad o mampostería en piedra bien cortada, piezas homogéneas y de dimensiones constantes a lo largo de todo el elemento. Presencia de trabazón entre las unidades de mampostería. Mortero o ligamento de buena calidad.
- B.** Mampostería en ladrillo o piedra bien cortada, con presencia de ligamento entre las unidades de mampostería, con mampostería no muy homogénea a lo largo de todo el elemento.
- C.** Mampostería de ladrillo de baja calidad, y con poca presencia de ligamento, o Mampostería en piedra mal cortada, con piezas no homogéneas, pero bien trabadas a lo largo del elemento.
- D.** Mampostería en piedra irregular mal trabada o ladrillo de baja calidad, con piezas no homogéneas o sin presencia de ligamento.

3. Resistencia Convencional

En este parámetro se decide utilizar el método simplificado de revisión sísmica descrito en el Capítulo 2, al ser usado comúnmente en edificaciones históricas tipo iglesia y que es propuesto en el método original del Índice de Vulnerabilidad, que se basa en relacionar el cortante resistente de los muros (V_R) y la fuerza basal actuante (V_A).

$$F_s = \frac{V_R}{V_A} \quad (4.2)$$

donde;

$$V_A = cW \quad (4.3)$$

$$V_R = \sum A_m v_m \quad (4.4)$$

C es el coeficiente sísmico, W representa Peso total de la edificación, A_m es el área transversal del muro resistente a sismo, v_m representa el esfuerzo cortante de la mampostería.

El cálculo anterior se puede refinar con el siguiente factor correctivo:

$$R = (1.33L/H)^2 \leq 1 \quad (4.5)$$

Este factor se aplica a la contribución de muros en los que la relación entre la altura (H) y la longitud (L) es mayor de 1.33. El factor afecta el área de los muros involucrados, dando lugar a un área efectiva, cuya suma es la que se considera en la ecuación anterior para el cálculo de V_R .

La calificación final de este ítem se realizará mediante el factor *FS*.

- A. Edificación con un valor de **FS** ≥ 1.0
- B. Edificación con un valor de **FS** entre 0.6 y 1.0
- C. Edificación con un valor de **FS** entre 0.4 y 0.6
- D. Edificación con un valor de **FS** < 0.4

4. Posición del Edificio y Cimentación

La adaptación de este parámetro se relaciona con la modificación de la especificación de cada clase, adecuándolos a los tipos de cimentación que se encuentran frecuentemente en este tipo de edificaciones.

Este parámetro evalúa, la influencia del terreno y de la cimentación en el comportamiento sísmico de la edificación, por medio de una inspección visual. Para esto se tienen en cuenta algunos aspectos, como son: la

capacidad y la pendiente del terreno, la ubicación de la cimentación a diferente cota y la presencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén.

- *Terrenos inclinados*: Se genera una fuerza horizontal que dificulta la transferencia de la fuerza sísmica, cuando la pendiente del terreno presenta una diferencia en el nivel de la cimentación entre los costados de la edificación y cuando la superficie del terreno es totalmente plana y no se encuentra sobre algún terraplén o ladera, se dice que esa es la condición más favorable.

- *Capacidad del suelo*: La capacidad del suelo de fundación ante cargas, tiene que ser suficiente, ya que debe ser capaz de soportar la estructura con todas las cargas solicitadas, incluyendo las fuerzas de sismo y teniendo en cuenta el asentamiento que la estructura es capaz de resistir. Se reporta una de las clases⁴²:

- A.** Edificación cimentada sobre terreno estable o roca con pendiente inferior al 10%, la fundación esta a la misma cota. Ausencia de empujes de tierra debido a un terraplén.
- B.** Edificación cimentada sobre terreno estable o roca con pendiente entre 10% y 30%, la diferencia de las cotas de fundación no es mayor a 1 metro. Ausencia de empujes de tierra debido a un terraplén.
- C.** Edificación cimentada sobre terreno blando o suelto con pendiente comprendida entre 10% y 30% o sobre terreno estable o roca con pendiente comprendida entre 30% y 50%. La diferencia de las cotas de fundación no es mayor a 1 metro. Presencia de empujes de tierra debido a un terraplén.
- D.** Edificación cimentada sobre terreno blando o suelto con pendiente mayor al 30% o terreno estable o roca con pendiente mayor al 50%. La

⁴² CORTEZ op. cit., p.122

diferencia de las cotas de fundación es mayor a 1 metro. Presencia de empujes de tierra debido a un terraplén.

5. Diafragmas Horizontales⁴³

Este parámetro permanece similar al método original, porque las instrucciones de sus clases corresponden a las características particulares de las iglesias.

Este parámetro busca primordialmente la evaluación de dos aspectos, que la rigidez del diafragma en el plano sea suficiente y que las conexiones entre el diafragma y los elementos verticales, sean de carácter adecuado.

- A.** Edificación con diafragmas de cualquier naturaleza que satisfagan las siguientes condiciones:
 - 1.** Ausencia de planos a desnivel
 - 2.** La deformabilidad del diafragma es despreciable. Se considera despreciable la deformación cuando el porcentaje de abertura en el diafragma es menor de un 30%.
 - 3.** La conexión entre el diafragma y los muros es eficaz.
- B.** Edificación con diafragma como los de la clase A, pero no cumplen una de las condiciones.
- C.** Edificación con diafragmas como los de la clase A, pero que no cumplen dos de las condiciones.
- D.** Edificación cuyos diafragmas no cumplen ninguna de las tres condiciones.

⁴³ GOMEZ I; RODRIGUEZ E. op. cit., p.1231.

6. Configuración en Planta

El comportamiento sísmico de una edificación depende de la forma que tiene el diafragma. En las edificaciones rectangulares se debe tener en cuenta la relación a/L entre el ancho y el largo en planta, y se deben tener en cuenta las protuberancias presentadas en el cuerpo principal b/L , ya que se pueden producir efectos torsionales no deseados en la estructura. (Figura 4.1)

- A. $a/L \geq 0.8$ o $b/L \leq 0.1$
- B. $0.6 \leq a/L < 0.8$ o $0.1 < b/L \leq 0.2$
- C. $0.4 \leq a/L < 0.6$ o $0.2 < b/L \leq 0.3$
- D. $a/L < 0.4$ o $b/L > 0.3$

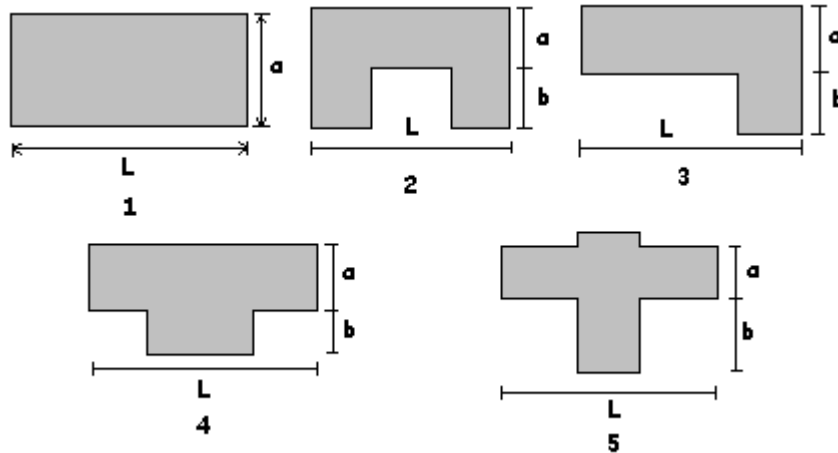


Figura 4.1 Configuración en planta

7. Configuración en Elevación

En el caso de las edificaciones de mampostería histórica tipo Iglesias, la causa principal de irregularidad la conforman las torretas, las cuales se caracterizan por tener una altura y una masa significativa respecto a la parte

restante del edificio (Cúpulas, torres) y se determinan por medio de la relación T/H , tal como se indica en la Figura 4.2.

Otra forma para determinar estas irregularidades es con la variación de masa en porcentaje $\pm\Delta M/M$ entre dos pisos sucesivos, siendo M la masa del piso más bajo y el signo (+) se usa si se presenta aumento o el (-) si se presenta disminución de masa hacia lo alto del edificio.

- A. Edificación con $-\Delta M/M < 10\%$
- B. Edificación con $10\% \leq -\Delta M/M < 20\%$
- C. Edificación con $-\Delta M/M > 20\%$ ó $T/H < 2/3$
- D. Edificación con $+\Delta M/M > 0$ ó $T/H > 2/3$

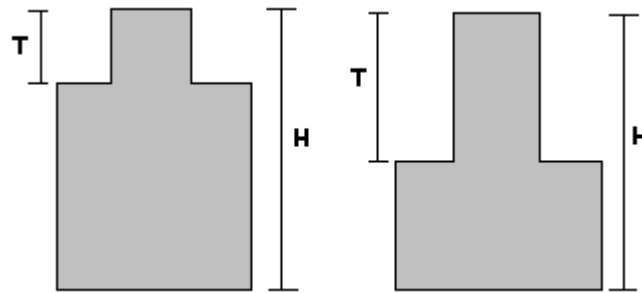


Figura 4.2 Configuración en elevación

8. Distancia máxima entre los muros

Este parámetro tiene en cuenta la presencia de muros cargueros interceptados por muros transversales ubicados a distancia excesiva entre ellos. La evaluación se realiza con el factor L/S , donde L es el espaciamiento de los muros transversales y S el espesor del muro carguero. Se evalúa el caso más desfavorable.

- A. Edificación con $L/S < 15$
- B. Edificación con $15 \leq L/S < 18$
- C. Edificación con $18 \leq L/S < 25$
- D. Edificación con $L/S \geq 25$

9. Tipo de Cubierta

La adaptación de este parámetro se relaciona con la modificación de la especificación de cada clase, ajustando con las características de las edificaciones tipo iglesia.

En este parámetro se tiene en cuenta la capacidad que tiene el techo para resistir un movimiento provocado por la fuerza sísmica.

- A. Edificación con cubierta estable y provisto de viga cumbreira ó edificación con cubierta plana.
- B. Edificación con cubierta estable y bien conectada a los muros, pero sin viga cumbreira ó edificación con cubierta parcialmente estable y provista de viga cumbreira.
- C. Edificación con cubierta inestable, provista de viga cumbreira.
- D. Edificación con cubierta inestable, sin viga cumbreira.

10. Elementos no Estructurales

Este parámetro se adaptó teniendo en cuenta las características principales de las iglesias, las cuales generalmente están totalmente adornadas de detalles de arquitectura. Por lo tanto, en este parámetro se tiene en cuenta estos elementos no estructurales, decorativos o elementos de gran tamaño que a pesar de no pertenecer al sistema estructural pueden provocar víctimas y daños materiales debido a su caída o volcamiento.

Dentro de los elementos no estructurales que se pueden encontrar en las edificaciones antiguas tipo iglesias están los vitrales, yesos, la decoración pictórica de la bóveda y en muchos casos la misma cúpula.

- A.** Edificaciones con elementos no estructurales, de pequeña dimensión y bien conectados a la estructura principal.
- B.** Edificaciones con elementos no estructurales, de pequeña dimensión y mal conectados a la estructura principal.
- C.** Edificaciones con demasiados elementos no estructurales de peso considerable y mal conectados a la estructura principal, que pueden caer en caso de terremoto.
- D.** Edificaciones con elementos no estructurales sin conexión ó elementos montados en etapas posteriores a la de la construcción de la estructura, existiendo por ello un vínculo deficiente de dichos elementos a los muros.

11. Estado de Conservación⁴⁴

La adaptación de este parámetro se realiza teniendo en cuenta los deterioros que generalmente se encuentran en este tipo de edificaciones, ya que estos pueden arriesgar la capacidad del sistema resistente vertical y lateral. Los tipos más comunes de deterioros que se encuentran, son los causados por el agua, el viento, el sol, los elementos vegetales, los animales, el suelo y los desastres naturales.

Asentamientos diferenciales

El concepto de la interacción que existe entre el suelo y la estructura, solo ha sido entendido desde hace poco tiempo. Antes las edificaciones históricas no

⁴⁴ CORTEZ op. cit., p.131-134

tenían en cuenta la condición del suelo, por lo que la cimentación se realizaba teniendo en cuenta el peso y el tamaño de la estructura a ser soportada, presentándose fallas que llegaban a ser graves con el pasar del tiempo.

Deterioro en los muros

La gran mayoría de las fallas que se presentan en los muros se debe a los diferentes agentes patológicos que sobresalen a medida que van pasando los años. Las variaciones, la mala construcción y las modificaciones hechas a las estructuras, alteran el comportamiento estructural de la edificación, generando esfuerzos que no pueden ser soportados por los muros.

Daños en cubiertas

Los daños que se presentan principalmente en las cubiertas se deben a que algunas veces son demasiado pesadas, a que los techos se encuentren mal reforzados, a la debilidad o ausencia total de anclaje con las vigas corona y/o muros y a la mala distribución de las cargas.

Por otro lado, los daños más comunes que se encuentran en este tipo de edificaciones se caracterizan por el deterioro en el pañete, tejas y enmaderado, humedad y la caída de la cubierta parcial o total, esto debido a las fisuras, grietas, caída de material, ataque químico y biológico.

Para la evaluación del estado de conservación se presentan cada una de las siguientes clases:

- A.** Muros y columnas en buena condición, sin daño visible. Cubiertas y techos en excelente estado.

- B.** Muros y columnas con presencia de agrietamientos tipo capilar no extendido en todo el elemento, con la excepción de los casos en que dichos agrietamientos ha sido provocado por terremotos. Caída de pañete y daño de tejas en la cubierta.
- C.** Muros y columnas con grietas de mediano tamaño (2 a 3 mm de espesor) o con agrietamiento tipo capilar de origen sísmico. Estructuras que no presentan agrietamiento, pero que se caracterizan por un estado mediocre de conservación de los muros.
- D.** Muros y columnas que presentan un grave deterioro en las características físicas de los materiales de construcción o con agrietamiento de espesor superior a 3 mm. Gran daño en el sistema de cubierta, presentando zonas que se encuentran muy próximas al colapso.

13. Edad⁴⁵

Aunque este parámetro no se encuentra en el método original, se tendrá en nuestro estudio, ya que esta es una característica de las edificaciones antiguas.

Los materiales de los elementos estructurales cambian sus propiedades físicas a medida que pasa el tiempo, presentando una degradación y pérdida de resistencia. Por otro lado, el cambio que se produce en la distribución de muros tras el pasar de los años, producen una redistribución de esfuerzos en los demás elementos de la estructura, cuando estos se reemplazan por materiales que no son compatibles con los utilizados en el periodo de construcción³⁵.

⁴⁵ CORTEZ op. cit., p.136

- A. Edificación construida después de 1900.
- B. Edificación construida durante el siglo XIX.
- C. Edificación construida durante el siglo XVIII
- D. Edificación construida antes de 1700.

N°	PARÁMETRO	KI(A)	KI(B)	KI(C)	KI(D)	PESO WI
1	Organización del sistema resistente.	0	5	20	45	1,00
2	Calidad del sistema resistente.	0	5	25	45	0,25
3	Resistencia convencional.	0	5	25	45	1,50
4	Posición del edificio y cimentación.	0	5	25	45	0,75
5	Diafragma horizontales.	0	5	15	45	1,00
6	Configuración en planta.	0	5	25	45	0,50
7	Configuración en elevación.	0	5	25	45	1,00
8	Distancia máxima entre los muros.	0	5	25	45	0,25
9	Tipo de cubierta.	0	15	25	45	1,00
10	Elementos no estructurales.	0	0	25	45	0,25
11	Estado de conservación.	0	5	25	45	1,00
12	Edad	0	5	25	45	0,15

Tabla 4.1 Calificación y peso de ponderación de ítems de vulnerabilidad

Como puede verse en la Tabla 4.1, los parámetros 1, 2, 4, 5, 9, 10, 11 y 12 son de naturaleza descriptiva, en cambio, los parámetros 3, 6, 7 y 8 son de naturaleza cuantitativa y requieren de ciertas operaciones matemáticas muy sencillas

Para el parámetro 12, su peso es igual a 0.15, ya que la resistencia de los materiales y su conservación, se han tenido en cuenta en los parámetros de resistencia convencional y estado de conservación⁴⁶.

⁴⁶ Ibid. p 200

4.3 INTERPRETACIÓN DEL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

Con la aplicación de esta metodología que evalúa la vulnerabilidad sísmica de una edificación tipo iglesia, se obtiene una escala de índice de vulnerabilidad que va desde 0 hasta 389.25, donde el último valor corresponde a la situación menos favorable e indica que se pueden presentar mayores daños.

La escala global de vulnerabilidad para las edificaciones históricas tipo iglesia propuesta en la Tabla 4.3, da una idea general del estado de la edificación, lo que ayuda al evaluador a tomar las decisiones pertinentes en futuras intervenciones contribuyendo de alguna manera en el desarrollo de planes de mitigación de desastres.

Una intervención a largo plazo no quiere decir que la edificación deba ser descuidada por un mucho tiempo, sino que en orden de prioridades estas se deben intervenir después de aquellas que se encuentren en peores condiciones.

Valor del índice de vulnerabilidad <i>I_v</i>	Escala global de vulnerabilidad	Tipo de intervención (periodo)
0	Nada vulnerable	A largo plazo
(0-53]	Poco vulnerable	A largo plazo
(53-201.25]	Medianamente vulnerable	A corto plazo
(201.25-389.25]	Muy vulnerable	Inmediata

Tabla 4.3 Escala global de vulnerabilidad.

4.4 FORMULARIO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD PARA EDIFICACIONES ANTIGUAS

No. Edificación	_____	Nombre del Edificio	_____
Dirección	_____	Numero de la Fotografía	_____
Fecha	_____	Nombre del Observador	_____
Observaciones	_____		
1. Organización del sistema resistente	_____		
2. Calidad del sistema resistente	_____		
3. Resistencia Convencional			
Área total de la estructura, At	_____		m ²
Área resistente sentido x, Ax	_____		m ²
Área resistente sentido y, Ay	_____		m ²
Altura media de la edificación, H	_____		m
Peso específico de la mampostería	_____		Ton/m ³
4. Posición del Edificio y Cimentación	_____		
5. Diafragmas Horizontales	_____		
6. Configuración en Planta			
	a/L	_____	
	b/L	_____	
7. Configuración en Elevación			
	T/H	_____	
	± ΔM/M	_____	
8. Distancia máxima entre los muros			
	L/S	_____	
9. Tipo de Cubierta	_____		
10. Elementos no Estructurales	_____		
11. Estado de Conservación	_____		
12. Edad	_____		

Tabla 4.2 Formulario del Índice de Vulnerabilidad para edificaciones antiguas

CAPITULO 5: EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD SISMICA DE LA CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA

5.1 INTRODUCCION

En el capítulo 2 (apartado 2.2.4.2) dentro del estado actual del conocimiento y en el capítulo 4, se presentaron dos métodos generales para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios históricos, uno propuesto dentro del proyecto RISK-UE (Lagomarsino et al., 2003) y el otro una adaptación al método propuesto por Benedetti-Petrini, respectivamente. Dichas metodologías se basan en índices de vulnerabilidad, la primera proporciona el grado de daño esperado y la probabilidad de ocurrencia asociada, mientras que en la segunda a pesar de no contar con funciones de vulnerabilidad para relacionar el índice de vulnerabilidad con el daño de las edificaciones tipo iglesia en Colombia, se puede determinar cualitativamente el estado global en que se encuentra.

Por otro lado cabe mencionar que la propuesta hecha dentro del proyecto RISK-UE, se basa principalmente en investigaciones realizadas en Italia para edificios históricos tipo iglesia de dimensiones reducidas, lo que plantea un gran interrogante referente a si tal metodología es válida para aquellas edificaciones que se encuentren fuera del territorio italiano, condición que se analiza en la presente investigación.

Por tanto en el presente capítulo, se presentará como primera instancia la sismicidad histórica de Bucaramanga para que se pueda tener una idea de cómo ha sido el comportamiento sísmico de la ciudad en el pasado, luego se hará una descripción histórica, arquitectónica y estructural de la Catedral de la Sagrada Familia y por último se estimará la vulnerabilidad sísmica para la Catedral empleando el método de índice de vulnerabilidad propuesto dentro

del proyecto RISK-UE y aplicando la adaptación del método de índice de vulnerabilidad propuesto por Benedetti-Petrini.

5.2 SISMICIDAD HISTORICA DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA⁴⁷

La ciudad de Bucaramanga es una de las regiones más sismoactivas de todo el territorio colombiano y está ubicada como una de las de mayor peligro sísmico en todo el mundo por su alta tasa de producción de sismos (Figura 5.1). Por esta razón se le ha denominado como el “nido” de Bucaramanga (Figura 5.2), el cual se ha convertido en una de las regiones sismoactivas de Colombia mejor monitoreada instrumentalmente para el estudio de los sismos (Tryggvason & Lawson, 1970⁴⁸; Pennington et al., 1981⁴⁹; Gómez-Padilla, 1980⁵⁰; Schneider et al., 1987⁵¹; Rivera, 1989⁵²).

⁴⁷ SALCEDO Elkin. “Sismicidad histórica y análisis macrosísmico de Bucaramanga”. Boletín Geológico. Vol 40 (1). Bogotá, D.C. 2002 p 1-181

⁴⁸ TRYGGVASON, E.; LAWSON, J. E. 1970. The intermediate earthquake source near Bucaramanga, Colombia. Bull. Seism. Soc. Am., 60(1): 269-279. Citado por Elkin Salcedo. p1

⁴⁹ PENNINGTON, W. D.; MOONEY, W. D.; van HISSENHOVENET, R.; MEYER, H. J.; RAMÍREZ, J. E.; MEYER, R. P. 1981. Resultados de un estudio de reconocimiento de microsismos en Bucaramanga, Colombia. En: Investigaciones geofísicas sobre las estructuras océano-continentales del occidente colombiano. Proyecto Nariño II y III,: 49-62. Bogotá. Citado por Elkin Salcedo. p1

⁵⁰ GÓMEZ-PADILLA, J. A. 1980. Actividad sísmica en el Departamento de Santander. UIS, Bol. Geol., 14(28): 3-23. Bucaramanga. Citado por Elkin Salcedo. p1

⁵¹ SCHNEIDER, J. F.; PENNINGTON, W. D.; MEYER, R. 1987. Microseismicity and focal mechanisms of the intermediate-depth Bucaramanga nest, Colombia. J. Geophys. Res., Citado por Elkin Salcedo. p1

⁵² RIVERA, A. 1989. Inversion du Tensor des contraintes et des mecanismes au foyer a partir des donnees de polarite pour une population de seismos (Application a l'Ecude du foyer de seismicite intermeiate de Bucaramanga - Colombia). Tesis doctorado, U. Louis Pasteur, 266 p. Estrasburgo. Citado por Elkin Salcedo. p1

En las obras del Padre Ramírez (1969)⁵³ se recopilan los datos más sobresalientes sobre los sismos ocurridos en el país desde los tiempos de la Conquista (siglo XVI) hasta 1963. De los 597 eventos que se reportaron para todo el territorio nacional, 111 aparecen que tienen epicentro en algún lugar del Departamento de Santander (Gómez-Padilla, 1980)⁵⁴. En la Tabla 5.1 se presentan la distribución del lugar, rango de profundidad donde ocurren estos sismos y la escala de intensidad, usada por Ramírez para especificar la severidad.

Como lo indica Salcedo et al. (1994)⁵⁵, la ausencia de datos de actividad sísmica en la ciudad de Bucaramanga en el período anterior a 1958, se debió, a la escasa cobertura que tenía la red sismológica nacional y, a la falta de suficiente instrumentación para detectar los sismos que allí se presentaban con características especiales en magnitud y profundidad.

En el año de 1976, se registraron 20 eventos, asociados al "nido" de Bucaramanga, cuyas magnitudes fueron menores que 4,2 (Pennington et al., 1981)⁵⁶. Gómez-Padilla (1980)⁵⁷, por su parte, señala que después del año 1972, un importante número de sismos provenientes de diferentes lugares fueron registrados en Colombia; en el período comprendido entre 1978 y 1980 se registraron alrededor de 1.725 sismos, de los cuales 742 corresponden al "nido" de Bucaramanga, con magnitud promedio de 4,7 y a profundidades entre 110 y 160 kilómetros.

⁵³ RAMÍREZ, J. E. 1969, 1975b. Historia de los Terremotos en Colombia, 250 p. Bogotá. Citado por Elkin Salcedo. P36

⁵⁴ SALCEDO, op. cit., p.34

⁵⁵ SALCEDO, E.; ESCALLÓN, J.; ESPINOSA, A.; PARÍS, G.; ROMERO, J.; PINZÓN, J. E.; RIVERA, C. I.; GÓMEZ, A.; GÓMEZ, I. C. 1994. Proyecto Sismotectónica del territorio de Colombia. INGEOMINAS, Informe interno 48. Citado por Elkin Salcedo. P33

⁵⁶ SALCEDO, op. cit., p.34

⁵⁷ SALCEDO, op. cit., p.34

LUGAR	NÚMERO DE SISMOS	INTENSIDAD*	RANGO DE PROFUNDIDAD
Barrancabermeja	35	II	127-200
San Vicente	28	II	35-200
Umpalá	4	I	166-176
Los Santos	3	I	(150)
Betulia	3	I	
Piedecuesta	3	I	143
San Andrés	2	I	221
Aratocha	2	I	108
Zapatoca	2	I	no definida
San Luis	2	I	no definida
Socorro	2	I	no definida
Curití	2	I	no definida
Girón	2	I	no definida
La Gómez	1	I	no definida
San Gil	1	I	no definida
Charalá	1	I	183
El Centro	1	II	150
San José	1	I	no definida
Capitanejo	1	I	no definida
Matanza	2	I	no definida
Güepsa	1	II	150
El Playón	1	I	no definida
Infantas	1	I	no definida
TOTAL	111		

**Correspondiente a una escala triple con equivalencia a la escala de intensidad de Mercalli Modificada, donde I representa los grados III, IV y V; II equivale a VI, VII, VIII*

Tabla 5.1 Terremotos en el Departamento de Santander entre 1566-1963

A partir de las fuentes del año 1566, se encontraron en total 70 noticias sísmicas, que incluyen los dos grandes terremotos ocurridos en Cúcuta el 18 de mayo de 1875 y el 8 de julio de 1950.

En el siglo XX se encuentran muchas un gran número de noticias que se producen por cada año, las cuales varían desde 0, en muchos años, hasta 5, que es el número máximo encontrado en un año.

En la Tabla 5.2 se puede apreciar que el mayor número de noticias encontradas durante el siglo XX se logra en el año 1973 y 1974 en el cual aparecieron 4 noticias sísmicas ocurridas en la región de Bucaramanga. Una representación gráfica de la situación del número de noticias sísmicas encontradas se muestra en el histograma de la Figura 5.3.

En promedio, cada 5 años transcurridos, desde 1930, al menos, ocurren dos sismos que alcanzan a ser sentidos por los ciudadanos, logrando llamar la atención de los comunicadores, lo que los convierte en noticia. El período comprendido entre 1950 y 1976, ha sido el de mayor ocurrencia de sismos que son sentidos por los habitantes de Bucaramanga.

La primera noticia sísmica encontrada es del año 1919, pero, por sus características, ésta deja en duda de que se pueda tratar de un verdadero sismo. Por lo tanto, en 1939 se tiene el primer evento sísmico real registrado.

Según los datos recolectados, en la mayor parte de los casos, la intensidad que se percibe en la ciudad de Bucaramanga es de baja a intermedia. En el evento que se registró el 29 de julio de 1967, el sismo es el más fuerte sentido y llegó a originar una intensidad de VIII en la escala EMS-92. No obstante, en zonas muy próximas a Bucaramanga se han sentido intensidades hasta de IX, como fue el caso del sismo del 16 de enero de 1644 en la ciudad de Pamplona.

Año	Número de noticias	Año	Número de noticias	Año	Número de noticias	Año	Número de noticias
1919	1	1939	1	1959	1	1979	0
1920	0	1940	2	1960	3	1980	0
1921	0	1941	1	1961	2	1981	0
1922	0	1942	0	1962	2	1982	0
1923	0	1943	0	1963	1	1983	0
1924	0	1944	0	1964	1	1984	1
1925	0	1945	3	1965	1	1985	0
1926	0	1946	0	1966	2	1986	1
1927	0	1947	0	1967	3	1987	0
1928	0	1948	0	1968	0	1988	0
1929	0	1949	0	1969	1	1989	1
1930	0	1950	2	1970	1	1990	0
1931	0	1951	0	1971	0	1991	0
1932	1	1952	3	1972	2	1992	0
1933	1	1953	1	1973	5	1993	0
1934	1	1954	1	1974	4	1994	1
1935	0	1955	0	1975	1	1995	1
1936	0	1956	2	1976	2	1996	1
1937	0	1957	2	1977	0	1997	3
1938	0	1958	2	1978	0		
TOTAL	4	TOTAL	20	TOTAL	32	TOTAL	9

Tabla 5.2 Número de noticias sísmicas encontradas en cada año entre 1900 y 1997

Una representación del comportamiento histórico de la sismicidad en la ciudad de Bucaramanga se puede apreciar en la Figura 5.4, allí se muestra, en forma de histograma, las máximas intensidades que se observaron durante cada año en el cual se tiene seguridad sobre la ocurrencia de un sismo en la región.

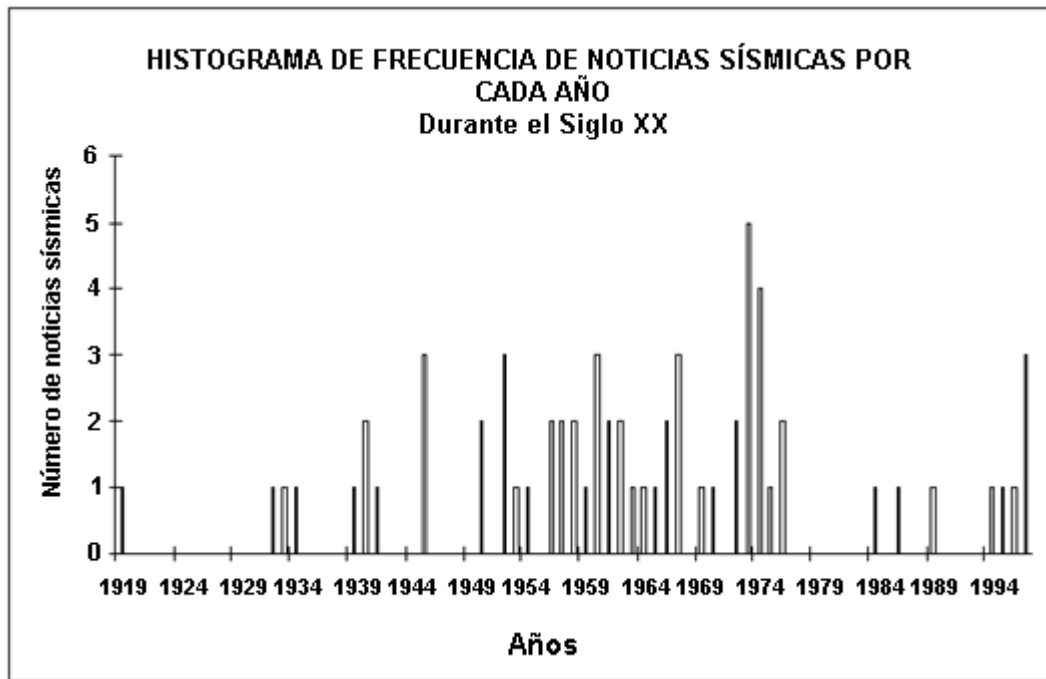


Figura 5.3 Histograma del número de noticias sísmicas encontradas en cada año para la región de Bucaramanga, a partir de 1919, año en que se consigue la primera noticia en este siglo, hasta 1997

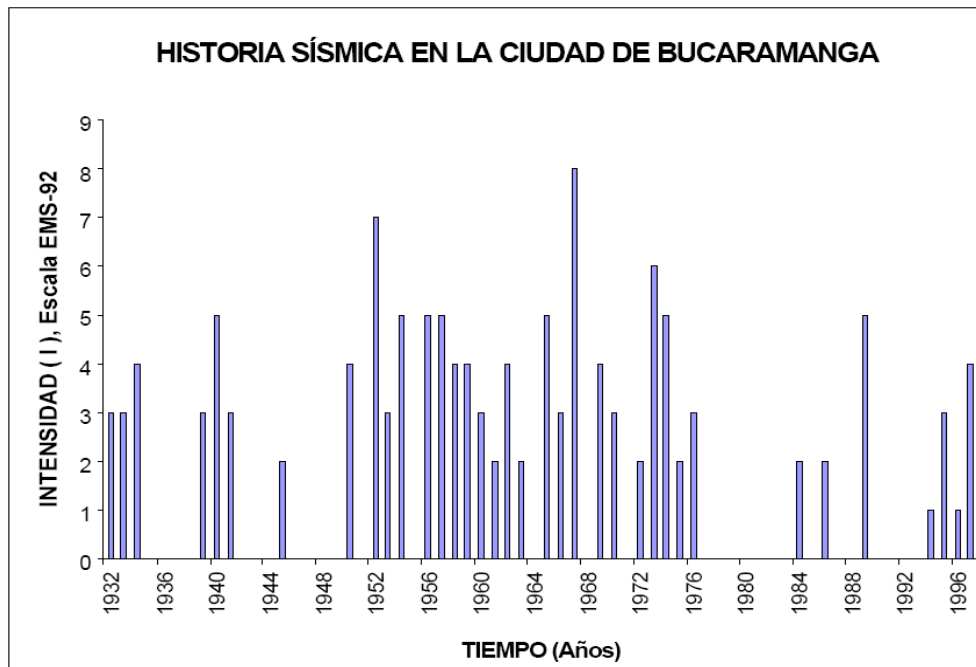


Figura 5.4 Historia sísmica en la ciudad de Bucaramanga; representa la máxima intensidad observada durante cada año, desde 1932 hasta 1997

Los sismos que tienen lugar en el "nido" de Bucaramanga, se identifican porque ocurren en una profundidad, que calculada instrumentalmente, se considera intermedia, es decir, que se ubican entre los 140 y 180 kilómetros (21-III-1967, 29-VII-1967, 7-V-1968, 30-VIII-1973). Estos sismos han llegado a alcanzar una intensidad hasta de VIII en la escala MM en las poblaciones del área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga. Ver Tabla 5.3.

Fecha	Tiempo	Epicentro Instrumental		Profundidad Instrumental (Km)	Epicentro Macrosísmico		Profundidad Macrosísmica (Km)	Mag Ms	Máx. Intensidad Isosistas (MM)	Fuente Mapa de Isosistas
		Lat (N)	Long (W)		Lat (N)	Long (W)				
1	2	3		4	5		6	7	8	9
05 Mayo, 1875	16:15:00	7,9	72,5	20	8,0	72,5	6	7,3	XI	Ramirez, 1975a
29 Abril, 1894	02:45:00	-		20	8,6	71,6	20	7,1	X	Fiedler, 1959
09 Julio, 1950	02:35:34	7,9	72,6	41	7,6	72,8	18	7	X	Ramirez, 1953
21 Abril, 1957	21:12:25	6,9	72,3	Superficial	7,1	72,5	106	6,6	VIII	Sarria, 1985
16 Junio, 1961	10:31:57	8,9	73,4	94	8,9	73,3	36	6,0	VIII	Sarria, 1985
21 Marzo, 1967	18:11:43	6,8	73,0	159	6,7	73,1	41	4,8	V	Sarria, 1985
29 Julio, 1967	10:24:24	6,8	73,1	160	6,4	73,8	106	6,2	VIII	Sarria, 1985
07 Mayo, 1968	09:00:28	6,8	73,0	157	7,2	72,6	70	5,1	VII	Sarria, 1985
30 Agosto, 1973	18:25:42	7,2	72,8	179	7,4	72,9	55	5,4	VIII	Sarria, 1985
26 Nov, 1980	17:35:39	8,1	72,4	40	7,9	72,5	29	4,9	V	Sarria, 1985
17 Octubre, 1981	04:31:02	8,2	72,5	56	8,0	72,3	29	4,8	VII	Sarria, 1985
19 Enero, 1995	15:05:04	5,0	72,9	Superficial	4,8	73,2	22	6,6	VIII	Pulido & Tapias, 1995

Tabla 5.3 Terremotos ocurridos en las vecindades del área metropolitana de Bucaramanga

5.3 DESCRIPCION GENERAL DE LA CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA

5.3.1. Aspectos Históricos

La Catedral de la Sagrada Familia se encuentra ubicada en el Departamento de Santander, en la Ciudad de Bucaramanga; se encuentra ubicada en la calle 36 No. 19-56, frente al parque Santander. (Ver figura 5.5)



Figura 5.5 Vista en planta del centro de la ciudad. En el recuadro se aprecia la Catedral. Fuente: Google Earth

Antes del Templo actual hubo dos construcciones en el mismo lugar. La primera realizada hacia 1770 y la segunda hacia 1785, ambas fueron deterioradas por temblores⁵⁸. A finales del siglo, la casa que fuera del Dr. Eusebio Cadena, se transforma en oratorio. En la remodelación fue encontrada una pequeña imagen de la Virgen de Belén, por tal razón la plaza llevó por muchos años ese nombre⁵⁹.

⁵⁸ PATIÑO Mariana. "Monumentos Nacionales de Colombia". Instituto colombiano de cultura. Editorial Escala. Octubre 1983. Citado por el Ministerio de Cultura: http://www.sinic.gov.co/SINIC/Bienes/Images/1_1_1_3_68_001_02.doc.

⁵⁹ GAVASSA Edmundo. "Fotografía Italiana de Quintilio Gavassa 1878-1958".



Figura 5.6. Vista de antes y después de la Catedral. Fuente: Rivera José.
“Bucaramanga parques/estatuas/símbolos”.

En 1865 se planeó la re-edificación, bajo la dirección del arquitecto antioqueño José María Gómez y con la colaboración del cura párroco Dr. Romero. La campana mayor se fundió en 1870 y en 1893 el carpintero Antonio Ruiz construyó la puerta principal²⁶.

Fue llamada iglesia parroquial hasta 1894, por esa fecha se consagró el municipio de Bucaramanga al sagrado Corazón, lo que puede sugerir la razón para el cambio de su denominación. La Iglesia de la Sagrada Familia fue el tercer templo construido en la ciudad en 1896, hoy es la Catedral Metropolitana⁶⁰. El templo está situado en el costado sur del Parque Santander. Su construcción se inicia con la bendición de la primera piedra en 1896, los trabajos de construcción aparecen solo hasta dos años después en 1898⁶¹.

El 3 de marzo de 1896, frente a la plaza de Belén, se bendijo entre grandes demostraciones de alegría y júbilo la primera piedra del templo. Un lúcido grupo de preciosas jóvenes recolectó dinero entre los asistentes, llegando a

⁶⁰ CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA

⁶¹ ARQUIDIOSECIS DE BUCARAMANGA <http://www.arquidiocesisbucaramanga.org/>

la suma de 550 pesos. El Departamento contribuyó con la suma de 300 pesos para pagar el terreno⁶².

En 1910 se continuó con la construcción del templo (Figura 5.7) debido a que el 8 de febrero de ese año, el Obispo de la época redactó en su visita al oratorio la siguiente acta: “El estado ruinoso y las graves incomodidades que ofrece el edificio que actualmente sirve de Iglesia, hacen que esta no corresponda a la religiosidad, necesidad y categoría de esta parroquia”. Este visitante ordena que se cerque la plaza de Belén (Parque Santander), dejando solamente dos entradas para los fieles, conservando el trazo de las calles adyacentes.



Figura 5.7. La Catedral cuando aún no habían sido terminadas las torres. Fuente: Fotografía Italiana de Quintilio Gavassa 1878-1958

En 1912 la Parroquia obsequia al municipio la Plaza Belén, el 20 de julio se hicieron regocijos públicos para recibir oficialmente la Plaza. El Acuerdo 14 del 6 de mayo de 1914 la denomina Plaza de Santander. En 1921 se inaugura el templo. El 7 de agosto de 1924 se empezó a convertir en Parque. El 8 de octubre de 1922 y con un discurso de Señor Marín Carvajal se inauguraron las torres.

⁶² ARQUIDIOSECIS DE BUCARAMANGA, op. cit

En el año de 1928 ordena al Prelado que una persona experta examine la arquitectura del Templo en Construcción y de su concepto por escrito, sobre la seguridad que ofrezca. En 1929 se estrena la campana de la torre del Oriente, fundida en Piedecuesta (figura 5.8).



Figura 5.8. Campana de la torre oriente. Fuente: <http://www.flickr.com/lauraolejua>

El 28 de febrero de 1941 se estrena el reloj de la torre Obsequiado por la Sociedad de Mejoras Públicas, y construido en los Talleres Robledo de Medellín. En 1943 es declarada Catedral. En Febrero de 1953 se fijó la fundación de la Diócesis y toma de posesión del Obispo. Ya se habían hecho todas las diligencias para dotar su residencia, pues el 4 de febrero se llevó a cabo un “Toque cívico”, para que todos permanecieran en sus casas en Bucaramanga, mientras comisiones de damas y de caballeros visitaban las casas solicitando colaboración para los gastos de instalación de la casa y arreglo de la Catedral, que sería la Iglesia de la Sagrada Familia. Se presentaron fastidios en la nueva Diócesis por la escogencia de la Catedral, pues los Sacerdotes de San Laureano quedaron resentidos, ya que ellos esperaban que serían la Parroquia matriz la elegida, sin pensar en la

comodidad y en otras ventajas .La colecta fue abundante y generosa: llovían regalos de dinero y de electrodomésticos⁶³.



Figura 5.9 Catedral de la Sagrada familia en los años 40's. Fuente: FACEBOOK Grupo: Fotos de Bucaramanga antiguas, modernas y actuales

En 1956 se realizó una remodelación. En el año 1962 Monseñor Álvaro Arenas Trillos reformó artísticamente la Catedral y la dotó de una silla episcopal en mármol de Carrara⁶⁴. En 1963 el Padre Álvaro Arenas Trillos inicia, por medio de la firma Martínez Villalba, la construcción de la nueva casa Curial, un edificio de siete pisos.

El 29 de julio de 1967 un sismo de 6.2 de magnitud y 106Km de profundidad causó una serie de daños notorios en la cúpula de la torre oriente.

El 12 de marzo de 1982 mediante la resolución 002 fue declarada monumento nacional⁶⁵.

A inicios de los 90's se remodela la fachada de la Iglesia con unas losas de mármol que llegan hasta una altura de metro y medio.

⁶³ CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA op. cit.

⁶⁴ ARQUIDIOSECCIS DE BUCARAMANGA, op. cit

⁶⁵ COTE Luis F. "Bucaramanga la Ciudad de la Alegría". Ordenamiento Territorial. p29

En 1996 en conmemoración de su centenario se realizó una restauración y embellecimiento de la Iglesia.

5.3.2. Características Arquitectónicas y Estructurales



Figura 5.10 Catedral de la Sagrada Familia en 1930. Fuente: Q. Gavassa

La iglesia presenta una arquitectura ecléctica poco definida, con una longitud total de 72.20m y un ancho total de 32.50m (figura 5.11), con fachadas de dos cuerpos y dos torres conformadas por tres cuerpos las cuales tienen una altura de 35.0m cada una, y una cúpula de tres cuerpos. La planta original era de tres naves y la actual la conforman 5 naves. La cubierta de la nave central es a dos aguas y las de las naves laterales en cubierta placa plana con nervadura y con casetones decorados.

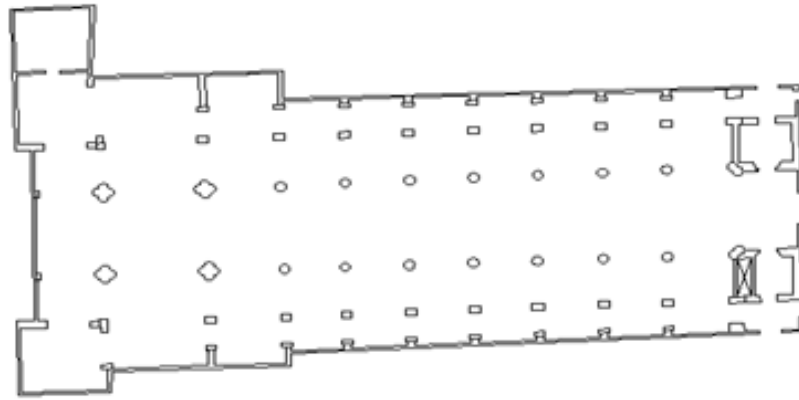


Figura 5.11 Planta general de la Catedral de la Sagrada Familia. Fuente: Las autoras

La Catedral de la Sagrada Familia consta de 5 naves, la nave central con una altura interior y exterior de 11.73m y 14.45m respectivamente está conformada por 14 columnas redondas de 1.0m de diámetro con sus respectivos arcos que soportan la bóveda de cañón corrido de la Iglesia, el presbiterio tiene 4 juegos de 4 columnas de 1.0m de diámetro en que soportan la cúpula esférica, y las naves laterales tienen 42 columnas rectangulares que soportan 4 placas.

La cúpula tiene un domo o cubierta exterior de la nave, su conjunto general encierra el verdadero cimborrio. La pequeña cúpula que está encima de la mayor pertenece a la escuela de Cupulino, pudiéndola llamar la Linterna. Su porción cilíndrica o prismática con aberturas para dar luz, colocadas sobre la cúpula. En los años de 1900 a 1945 se termina su estilo clásico, que es una mezcla de Románico y Griego, obra del Constructor Elías Valdivieso Ortiz. Los tonos del edificio siempre fueron blancos y en su cúpula aparecía la temosa al descubierto, marcando sectores pronunciados de la misma, su decoración interna sobresalía por los nichos y su color blanco.

Sus columnas sobrias y espigadas, cada una con capitel corto y grueso no propiamente del estilo godo de Toledo sino más bien Griego. Las bases de las columnas recuerdan la forma Toscaza, con terminación agolpada en sus ángulos. Sus capillas menores o naves sencillas, respaldadas por los muros robustos, adornados por los mencionados nichos⁶⁶.

La cúpula fue cubierta con losas traídas de Puebla, México. La cúpula coloreada es un símbolo de nuestra identidad bumanguesa. Su color nació como una forma de separar los conflictos políticos de la época, aproximándose cromáticamente a los rojos liberales y azules conservadores, sin marcar específicamente una tendencia (figura 5.12).



Figura 5.12 Cúpula de la Catedral de la Sagrada Familia. FUENTE: FACEBOOK
Grupo: Fotos de Bucaramanga antiguas, modernas y actuales

La Catedral tiene en su cimentación piedra y aproximadamente esta configuración se alza un metro desde el nivel del suelo en toda la edificación, como se ve en la figura 5.13, por encima de este se puede encontrar ladrillo

⁶⁶ CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA op. cit.

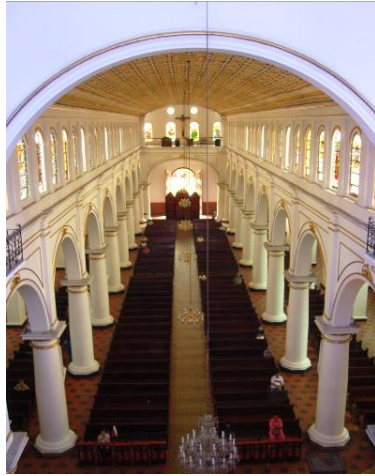
cocido “temosa” material que se encuentra en el resto de la estructura de la Iglesia.



Figura 5.13 Vista de una columna en la parte trasera de la Catedral.
Fuente: Las autoras

Los pisos son en baldosín de cemento, su tapete central con decoraciones florales y geométricas, y el lazo que enmarca el tapete con estrellas de 6 puntas y zócalo con ladrillo a la vista⁶⁷³¹ (ver figura 5.14a). Sobre la nave central se encuentra una bóveda de lámina acanalada de acero pretensado el cual es sostenido por la cercha del techo por medio de tirantes de acero (ver figura 5.14b).

⁶⁷ MINISTERIO DE CULTURA:
http://www.sinic.gov.co/SINIC/Bienes/Images/1_1_1_3_68_001_02.doc.



(a) Vista piso Catedral (b) Bóveda de Lámina acanalada de la nave central

Figura 5.14. Fuente: Las autoras

La iglesia alberga dentro de sus instalaciones hermosas obras pictóricas de artistas locales como Luís Alberto Acuña y Oscar Rodríguez Naranjo, este ultimo participó en la restauración de la imágenes y cuadros de la Catedral. Sus vitrales son famosos en la ciudad por la combinación de colores y el altar es hecho en mármol italiano (ver figura 5.15).



Figura 5.15 Vista de la obra pictórica de la bóveda de lámina acanalada de la nave central. Fuente: Las autoras

5.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD PROPUESTO DENTRO DEL PROYECTO RISK-UE, A LA CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA

Lagomarsino et al. (2003) plantea los valores que se muestran en Tabla 2.3 del capítulo 2 para los índices de vulnerabilidad V_I y el parámetro β (pendiente de la curva de vulnerabilidad). De esa tabla y para la aplicación a la Catedral de la Sagrada Familia, solo se necesitaran de los valores correspondientes a iglesias, indicados en la Tabla 5.4.

Tipología	Valor inferior (V_I)	Valor medio (V_I)	Valor superior (V_I)	β
Iglesias	0.770	0.890	1.260	3.00

Tabla 5.4 Índices de vulnerabilidad para iglesias

Como se explicó antes, los valores de la Tabla 5.4 se deberán modificar en función de las características particulares de la estructura. De las Tablas 2.4 y 2.6 se obtienen los modificadores indicados en la Tabla 5.5.

Conocidos los modificadores anteriores, el índice de vulnerabilidad final para la estructura se obtiene con la siguiente ecuación:

$$V_{I_f} = V_{I_{inicial}} + \sum_{i=1}^n \delta V_i \quad (5.1)$$

donde:

V_{I_f} : Índice de vulnerabilidad final

$V_{I_{inicial}}$: Índice de vulnerabilidad general inicial

δV_i : Factor de modificación específico de la vulnerabilidad

n: Número total de factores de vulnerabilidad

IGLESIA		
Parámetros generales		δV_i
ESTADO DE MANTENIMIENTO	Malo	0,04
	Medio	0
	Bueno	-0,04
NIVEL DE DAÑO	Severo	0,04
	Ligero	0,02
	Despreciable	0
TRANSFORMACIONES ESTRUCTURALES	Si	0,02
	No	0
INTERVENCIONES RECIENTES	Si	-0,02
	No	0,02
CALIDAD DE LA MAMPOSTERIA	Mala	0,05
	Buena	0
MORFOLOGIA DEL SITIO	Arista	0,04
	Inclinado	0,02
	Plano	0
Parámetros específicos		δV_i
TIPOLOGIA DE NAVE	Nave Central	-0,02
	Una sola nave	0
	Tres naves	0,02
DESPLOME DE FACHADA/ ELEMENTOS SOBRESALIENTES EN ALTURA (Agujas, Torres, etc.)	Si	0,04
	No	0
POSICION DE LA IGLESIA	Incluida	-0,02
	Añadida	0,02
	Aislada	0
CUPULAS/BOVEDAS	Si	0,04
	No	0
ALTURA DE PAREDES LATERALES (H)	H < 6m	-0,02
	6 < H < 12 m	0
	H > 12 m	0,04

Tabla 5.5 Modificadores de vulnerabilidad para iglesias

En la Tabla 5.6 se indican los modificadores de vulnerabilidad (generales y específicos) para la Catedral de la Sagrada Familia. En el anexo D se encuentra el formulario utilizado para la categorización cualitativa de los distintos parámetros.

Con los valores de las Tablas 5.4 y 5.6 y aplicando la ecuación 5.4 se obtienen los índices de vulnerabilidad finales que se muestran en la Tabla 5.7.

CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA		
Tipo de modificador general de vulnerabilidad	Condición de la estructura	δV_i
Estado de mantenimiento	Bueno	-0,04
Nivel de daño	Ligero	0,02
Transformaciones estructurales	Si	0,02
Intervenciones recientes	No	0,02
Calidad de la mampostería	Buena	0
Morfología del sitio	Plano	0
Tipología de nave	Tres naves	0,02
Desplome de fachada/elementos sobresalientes	Si	0,04
Posición de la iglesia	Incluida	-0,02
Cúpulas/bóvedas	Si	0,04
Altura de paredes laterales	6 < H < 12 m	0
Σ		0,1

Tabla 5.6 Modificadores de vulnerabilidad

IGLESIA	V_i (Inferior)	V_i (Medio)	V_i (Superior)
Catedral de la Sagrada Familia	0.870	0.990	1.360

Tabla 5.7 Índices de vulnerabilidad finales

Una vez conocidos los índices de vulnerabilidad y la pendiente de la curva de vulnerabilidad, β , mediante la ecuación 5.2 se obtiene el índice de daño medio para la estructura.

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25V_i - 13.1}{\beta} \right) \right] \quad (5.2)$$

donde:

$D\mu$: Índice de daño medio

V_i : Índice de vulnerabilidad, el cual varía de 0 a 1

β : Parámetro que controla la pendiente de la curva de vulnerabilidad

I : Intensidad macrosísmica

Aplicando la ecuación anterior, se obtienen las curvas de vulnerabilidad para la Catedral de la Sagrada Familia (figura 5.16). En esas curvas, se presentan los valores inferior, medio y superior del índice o grado de daño esperado en la estructura, ante un terremoto con la intensidad MSK dada.

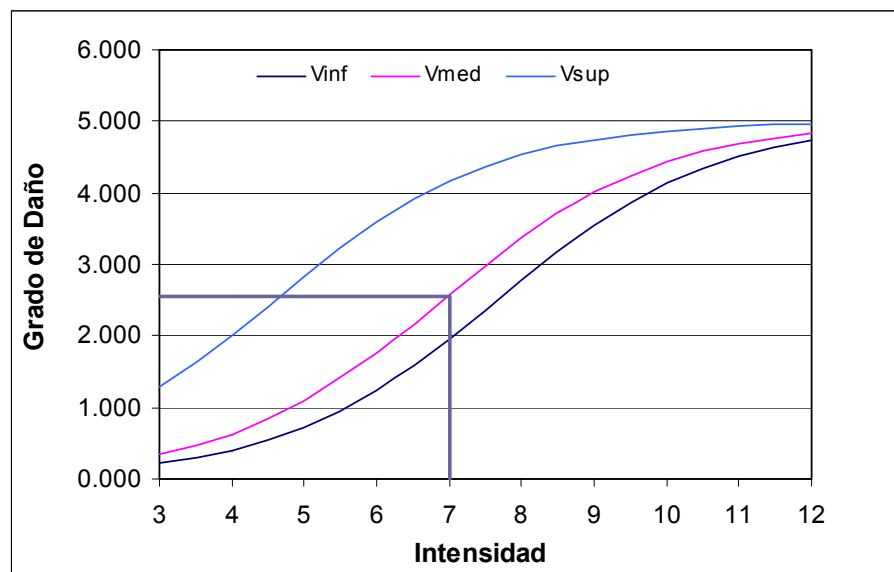


Figura 5.16 Curvas de vulnerabilidad para la Catedral de la Sagrada Familia

Los grados de daño propuestos por Lagomarsino et al., se indican en la Tabla 5.8.

Tipo de daño	Grado de daño
Sin daño	0
Despreciable a ligero	1
Ligero	2
Medio	3
Severo	4
Colapso	5

Tabla 5.8 Grados de daño

Con el índice o grado de daño se determina la probabilidad P_k asociada a un cierto grado de daño k mediante la ecuación 5.3

$$P_k = \frac{5!}{k!(5-k)!} \mu_D^k (1 - \mu_D)^{5-k} \quad (5.3)$$

donde:

P_k : Probabilidad de que se presente un cierto grado de daño k

μ_D : Índice de daño medio

k : Grado de daño = 0, 1, 2, 3, 4, 5

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede finalmente evaluar las matrices de probabilidad de daño. Se presentan entonces las distribuciones de probabilidad de daño para cada una de las intensidades macrosísmicas obtenidas para la Catedral de la Sagrada Familia (Tablas 5.9 a 5.11).

	k = 0	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4	k = 5
I = 5	45,7	38,7	13,1	2,2	0,2	0,0
I = 6	24,0	39,6	26,2	8,6	1,4	0,1
I = 7	8,4	26,9	34,5	22,2	7,1	0,9
I = 8	1,7	10,8	27,1	33,9	21,2	5,3
I = 9	0,2	2,5	12,4	30,2	36,8	17,9
I = 10	0,0	0,4	3,6	17,0	40,5	38,5
I = 11	0,0	0,0	0,8	7,0	32,3	59,9
I = 12	0,0	0,0	0,1	2,4	21,2	76,3

Tabla 5.9 Matriz de probabilidad de daño para la Catedral de la Sagrada Familia utilizando los valores inferiores de μ_D

	k = 0	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4	k = 5
I = 5	29,2	40,8	22,8	6,4	0,9	0,0
I = 6	11,4	31,0	33,7	18,4	5,0	0,5
I = 7	2,7	14,3	30,3	32,1	17,0	3,6
I = 8	0,4	3,8	15,8	32,6	33,6	13,9
I = 9	0,0	0,6	5,1	20,4	41,0	32,9
I = 10	0,0	0,1	1,1	8,9	35,0	54,8
I = 11	0,0	0,0	0,2	3,1	23,9	72,8
I = 12	0,0	0,0	0,0	1,0	14,3	84,7

Tabla 5.10 Matriz de probabilidad de daño para la Catedral de la Sagrada Familia utilizando los valores medios de μ_D

	k = 0	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4	k = 5
I = 5	1,5	10,0	26,2	34,2	22,3	5,8
I = 6	0,2	2,3	11,6	29,5	37,5	19,0
I = 7	0,0	0,3	3,3	16,3	40,2	39,9
I = 8	0,0	0,0	0,7	6,6	31,7	61,1
I = 9	0,0	0,0	0,1	2,2	20,5	77,2
I = 10	0,0	0,0	0,0	0,7	11,9	87,4
I = 11	0,0	0,0	0,0	0,2	6,5	93,3
I = 12	0,0	0,0	0,0	0,1	3,5	96,5

Tabla 5.11 Matriz de probabilidad de daño para la Catedral de la Sagrada Familia utilizando los valores superiores de μ_D

Donde:

I es la intensidad macrosísmica del evento sísmico

K es el grado de daño

Al analizar la Catedral de la Sagrada Familia se toman en cuenta los valores dados en la tabla 5.10, “valores medios de la matriz de probabilidad de daño”. Para verificar si estos valores se ajustan a una ciudad con alta sismicidad como es el caso de Bucaramanga, se tomó como caso particular el evento sísmico del 29 de julio de 1967, suceso de gran importancia debido a que en él se vio afectada la Catedral de la Sagrada Familia y además fue uno de los más grandes movimientos telúricos registrados, como se puede apreciar en la tabla 5.3.

Este evento tuvo una intensidad de VII en la escala MSK-64, según los datos proporcionados por la noticia publicada de este hecho (Ver Anexo E). Dentro de los sucesos descritos en esta noticia se puede observar que el daño sufrido por la Catedral es considerado como Clase 2, según la escala MSK-64 (Ver Anexo F), que corresponde a un Daño moderado.

La Tabla 5.10, nos muestra que existe un 32.1% de probabilidad que se presente un grado de daño 3 que corresponde a un daño medio y un 30.3% de que se presente un grado de daño 2 que corresponde a un daño ligero, ante un sismo de intensidad VII en la escala MSK-64. Este resultado también se puede apreciar en la figura 6.1, en la cual el daño medio es de 2.55 aproximadamente con una intensidad de VII; este dato está ubicado en el intervalo de daño ligero a medio (Ver tabla 5.8).

Por lo tanto, los datos de la tabla 5.10 se ajustan con los hechos descritos en el evento telúrico; por lo que de forma tentativa y para tal fin se puede afirmar que el método de Índice de Vulnerabilidad propuesto dentro del proyecto RISK-UE (Lagomarsino et al., 2003) es aplicable a cualquier ciudad que se encuentre ubicada en una zona de baja, moderada o alta sismicidad; ya que este método solo depende de la intensidad macrosísmica, mas no de la magnitud, ni de la profundidad del sismo.

Después de analizar los resultados de la matriz de probabilidad de daño obtenidos por este método (Ver tabla 5.10), la Catedral de la Sagrada Familia es medianamente vulnerable. Esto se concluyó ya que con una intensidad macrosísmica de VII en la escala MKS-64, los daños presentados fueron de ligero a medio y no de severos.

5.5 APLICACIÓN DEL MODELO ADAPTADO DEL INDICE DE VULNERABILIDAD PROPUESTO POR BENEDETTI-PETRINI A LA CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA

6.3.1 Diligenciamiento del formulario de cálculo de la vulnerabilidad de edificaciones antiguas.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos durante la inspección de la Catedral de la Sagrada Familia (Tabla 5.13) y el procedimiento llevado a cabo para hallar el valor del parámetro 3.

Parámetro 3: Resistencia Convencional

Para la solución de este parámetro se utilizaron los siguientes valores promedio para las propiedades mecánicas de la mampostería de ladrillo (temosa) con mortero de cal:

Peso específico⁶⁸ (γ)= 1.6 t/m³

Esfuerzo cortante ladrillo⁶⁹ = 3 Kg/cm² → 30 t/m²

⁶⁸ MELI, op. cit., p.31. Tabla 2.3

⁶⁹ LORENZO, P. "Tecnologías para viviendas de producción social en América Latina". Ediciones UPC. 2005. p213

Los datos anteriores se tomaron de la bibliografía indicada en cada uno de ellos.

Para calcular el peso de la estructura de una manera aproximada se calculó la altura media del edificio (h) y el área en planta:

Torres = 35m

Naves laterales = 8.23m

Nave Central = 14.45m

Cúpula = 30m

Columnas = 4.67m

$$h = \frac{35 + 8.23 + 14.45 + 30 + 4.67}{5} = 18.5m$$

Área en planta = 158.33m²

Por lo tanto el peso de la edificación sería:

$$W = 1.6t/m^3 \times 18.5m \times 158.33m^2 = 4686.6 t$$

En las figuras 5.17 y 5.18 se muestran las áreas resistentes de muros en las direcciones **x** y **y**, a partir de las cuales se obtuvieron los siguientes datos:

- Área total en planta de los muros resistentes a sismo:

$$A_p = 147.2m^2$$

- Área de muros resistentes a sismo en la dirección “x”:

$$A_{px} = 70.4m^2$$

- Área de muros resistentes a sismo en la dirección “y”:

$$A_{py} = 103.2\text{m}^2$$

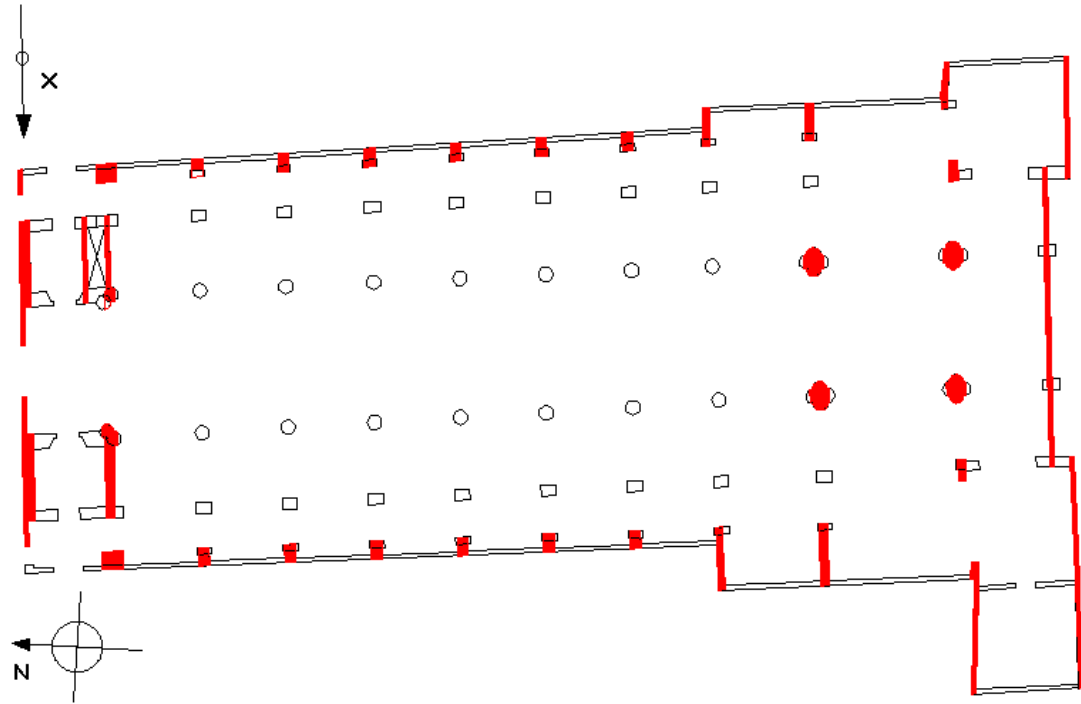


Figura 5.17 Muros resistentes a sismo “x”

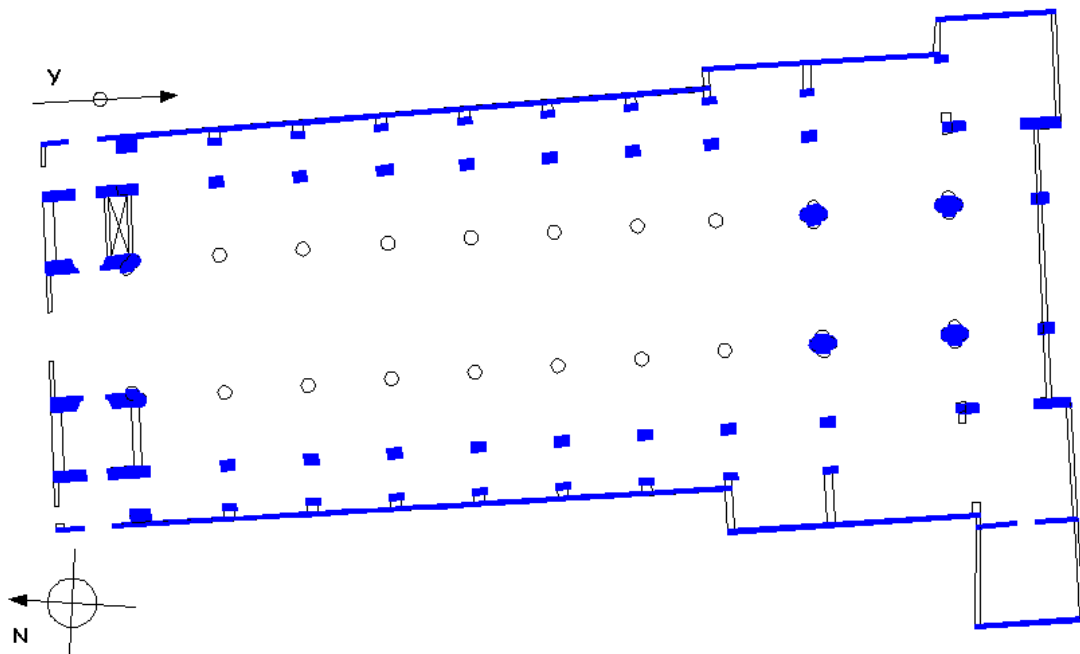


Figura 5.18 Muros resistentes a sismo “y”

Para hallar el coeficiente sísmico se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros (Tabla 5.12):

DEFINICION DE LA ACCION SISMICA⁷⁰	
Localización geográfica:	Bucaramanga
Zona de amenaza sísmica:	Alta
Definición de los mov. Sísmicos de diseño:	
Coeficiente de aceleración (Aa):	0,25
Tipo de perfil del suelo:	S3
Coeficiente de sitio (S):	1,5
Grupo de uso:	II
Coeficiente de importancia (I):	1,1

Tabla 5.12 Definición de la Acción Sísmica

Por lo tanto el Coeficiente sísmico Sa es:

$$S_a = 2.5 * A_a * I = 2.5 * 0.25 * 1.1 = 0.69$$

Aplicando la expresión (4.2), se obtiene:

$$F_s = \frac{V_R}{V_A} = \frac{70.4 * 30}{0.69 * 4686.6} = \frac{2112t}{3233.8t} = 0.65$$

⁷⁰ NSR-98. "Norma Sismorresistente, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá, Colombia. 1998. Título A

No. Edificación	1	Nombre del Edificio	Catedral de la Sagrada Familia
Dirección	Calle 36 No. 19-56	Numero de la Fotografía	_____
Fecha	26 Junio 2008	Nombre del Observador	_____
Observaciones	_____		
1. Organización del sistema resistente		C	
2. Calidad del sistema resistente		B	
3. Resistencia Convencional			
Área total de la estructura, At		158.3	m ²
Área resistente sentido x, Ax		70.4	m ²
Área resistente sentido y, Ay		103.2	m ²
Altura media de la edificación, H		18.5	m
Peso específico de la mampostería		1.6	Ton/m ³
4. Posición del Edificio y Cimentación		A	
5. Diafragmas Horizontales		B	
6. Configuración en Planta			
a/L		0.18	
b/L		1.50	
7. Configuración en Elevación			
T/H		0.76	
± ΔM/M		_____	
8. Distancia máxima entre los muros			
L/S		32.8	
9. Tipo de Cubierta		B	
10. Elementos no Estructurales		D	
11. Estado de Conservación		A	
12. Edad		B	

Tabla 5.13 Formulario del Índice de Vulnerabilidad para edificaciones antiguas

6.3.2 Cálculo del índice de Vulnerabilidad

N°	PARÁMETRO	Ki(A)	Ki(B)	Ki(C)	Ki(D)	PESO Wi
1	Organización del sistema resistente.	0	5	20	45	1
2	Calidad del sistema resistente.	0	5	25	45	0,25
3	Resistencia convencional.	0	5	25	45	1,5
4	Posición del edificio y cimentación.	0	5	25	45	0,75
5	Diafragma horizontales.	0	5	15	45	1
6	Configuración en planta.	0	5	25	45	0,5
7	Configuración en elevación.	0	5	25	45	1
8	Distancia máxima entre los muros.	0	5	25	45	0,25
9	Tipo de cubierta.	0	15	25	45	1
10	Elementos no estructurales.	0	0	25	45	0,25
11	Estado de conservación.	0	5	25	45	1
12	Edad	0	5	25	45	0,15

Tabla 5.14. Cálculo del índice de vulnerabilidad a partir de la escala numérica del índice de vulnerabilidad para edificaciones antiguas tipo iglesia

$$IV = \sum_{i=1}^{12} KiWi \quad (5.4)$$

$$IV = 139.5$$

El valor de Índice de vulnerabilidad de 139.5 nos indica que la edificación en estudio necesita una intervención a corto plazo por ser medianamente vulnerable, como lo indica la Tabla 4.3.

Para realizar una intervención a corto plazo basando en este método, es necesario hacer un análisis más detallado, observando que parámetros están más afectados que otros; esto se muestra en la tabla 5.15, en la que resultado se halló de multiplicar el peso de cada parámetro por la respectiva clase observada en la iglesia.

N°	PARÁMETRO	Ki Wi
1	Organización del sistema resistente.	20
2	Calidad del sistema resistente.	1,25
3	Resistencia convencional.	7,5
4	Posición del edificio y cimentación.	0
5	Diafragma horizontales.	5
6	Configuración en planta.	22,5
7	Configuración en elevación.	45
8	Distancia máxima entre los muros.	11,25
9	Tipo de cubierta.	15
10	Elementos no estructurales.	11,25
11	Estado de conservación.	0
12	Edad	0,75

Tabla 5.15 Calculo del índice de vulnerabilidad de cada parámetro

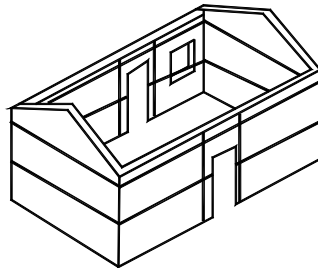
Como se observa en la tabla 5.15, la iglesia presenta falencias en los parámetros 1, 3, 6, 7, 8, 9 y 10, ya que estos obtuvieron los mayores valores de $K_i W_i$. Por lo tanto, se hace necesario realizar algún tipo intervención en la estructura.

Las intervenciones recomendadas teniendo en cuenta las falencias de estos parámetros con respecto a la iglesia son:

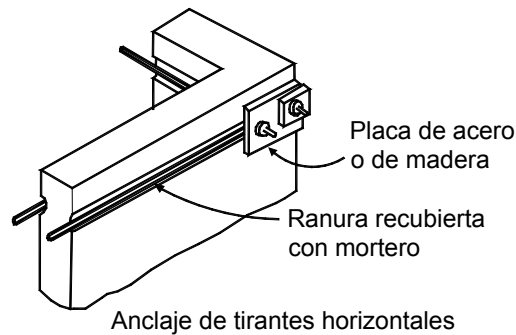
- Refuerzo con tirantes de acero⁷¹: Se recomienda colocar tirantes en forma de anillo en la parte superior e intermedia del muro, para proveerle confinamiento y mantener unidas las partes de la estructura de la mampostería como se muestra en la figura 5.19. Este tipo de refuerzo sirve para mejorar las falencias que existen dentro del parámetro 1

⁷¹ MELI, op. cit., pag. 168,169

“Organización del sistema resistente” y brinda mejoras en las falencias del parámetro 6 y 7 “Configuración en planta” y “Configuración en altura” ya que proporciona rigidez a la edificación.



Posible ubicación de tirantes



Anclaje de tirantes horizontales

Figura 5.19 Refuerzo con tirantes de acero

- Aplanado de cemento con malla anclada al muro⁷²: Se recomienda una capa de mortero de 3 a 6cm de espesor, encima de la malla electrosoldada, como se muestra en la figura 5.20. Esta intervención se realiza para aumentar las cargas axiales y a cortante, como también dar continuidad con otros elementos. Este tipo refuerzo sirve para mejorar las falencias del parámetro 3 y 8 “Resistencia Convencional” y “Distancia máxima entre los muros”, además prevenir los posibles deterioros que aparezcan en el parámetro 2 “Calidad del sistema Resistente”.

⁷² Ibíd. p 155

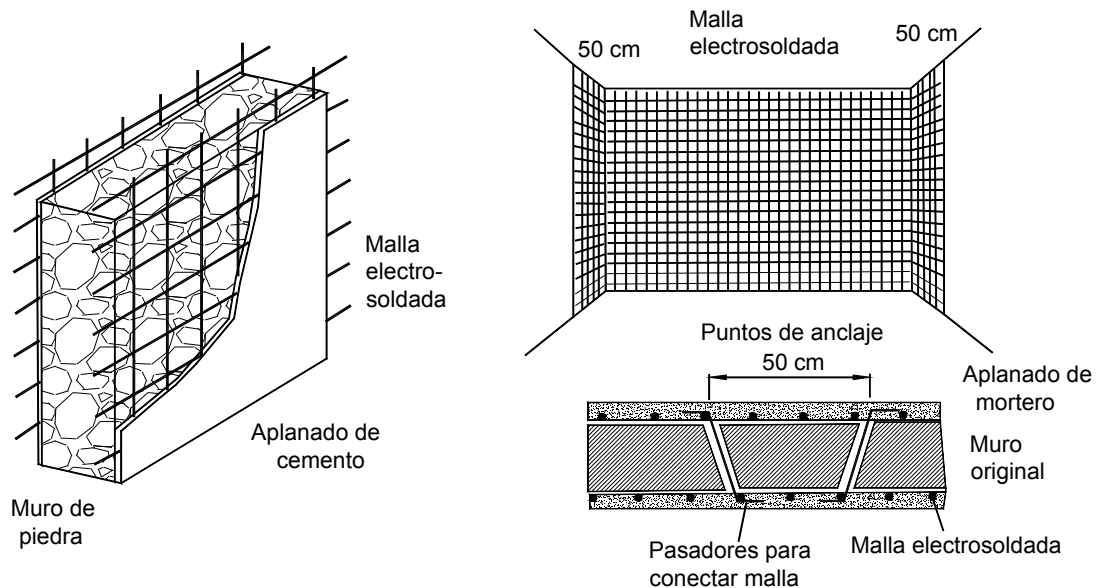


Figura 5.20 Refuerzo con malla electrosoldada

➤ **Mejoramiento de los apoyos de la cubierta:** Se recomienda colocar los apoyos de segundo grado en las cerchas, que sean capaces de soportar las solicitaciones de carga que demanda la cubierta como se muestra en la figura 5.21. El mejoramiento de los apoyos estabiliza la cubierta, ya que las cerchas que forman parte de esta soportan la bóveda de lámina acanalada por medio de tirantes de acero (Ver figura 5.22). Esta intervención sirve para optimizar las falencias del parámetro 9 “Tipo de cubierta”. Además esta intervención mejora las condiciones de soporte de la bóveda de lámina acanalada optimando las falencias del parámetro 10 “Elementos no estructurales”.



Figura 5.21. Ejemplo de apoyo de segundo grado



Figura 5.22 Detalle de la cubierta de la nave central



Figura 5.23 Detalle del apoyo de la cubierta de la nave central

➤ Inyección de Lechada⁷³: Se recomienda inyectar las fisuras y grietas del tambor de la cúpula lechada de agua y cemento con algún aditivo estabilizador, la superficie exterior de la grieta se debe sellar con algún mortero de fraguado rápido que impida la salida de la lechada; la inyección se hace por pequeños tramos de tubo q se insertan en la zona agrietada (Ver figura 5.25). Se emplea tanto para sellar las grietas como para rellenar los huecos internos en los elementos de mampostería (Ver Figura 5.24). Esta intervención mejora la calidad del sistema resistente de la cúpula.



Figura 5.24 Detalle de una de las grietas del tambor en la cúpula

⁷³ Ibid. p 146

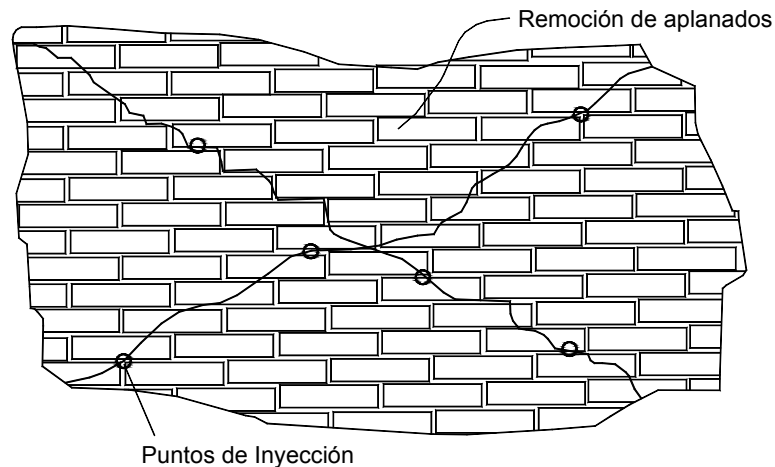


Figura 5.25 Inyección para sellar grietas

5.6 COMPARACIÓN ENTRE LOS DOS METODOS

El método de índice de vulnerabilidad propuesto dentro del proyecto RISK-UE, Lagomarsino et al., 2003, se destaca porque las edificaciones se clasifican mediante tipologías, en la cual se asigna un índice de vulnerabilidad que puede ser modificado en función de las características que puedan afectar su comportamiento sísmico.

En este método se pueden definir las matrices de probabilidad de daño gracias a que se cuentan con numerosos datos estadísticos de daño obtenidos en los terremotos Friuli (1976) y Umbria-Marcas (1996,1997); para el caso particular de este estudio que se enfocó en Iglesias. Estas matrices se pueden definir teniendo en teniendo el valor del índice de daño medio μ_D , el cual depende de la intensidad macrosísmica. Por lo tanto, las matrices nos permiten conocer la probabilidad de daño en la Iglesia ocasionado por un sismo con una determinada intensidad macrosísmica.

Mientras, la adaptación del método de índice de vulnerabilidad propuesto por Benedetti-Petrini realizada en este estudio para edificaciones históricas tipo

Iglesia, se caracteriza por mostrar el estado actual de la estructura por medio de unos parámetros, que representan la predisposición de la edificación a sufrir daño por un evento sísmico. Algunos de estos parámetros describen el comportamiento de los elementos estructurales, mientras que otros describen el comportamiento del conjunto constructivo.

Este método por ser más detallado nos permite dar ciertas recomendaciones en cuanto a intervenciones y rehabilitaciones estructurales que se puedan realizar en la iglesia, teniendo en cuenta las falencias descritas en cada uno de los parámetros del método.

Ambos métodos tiene parámetros fáciles de observar a simple vista. Por tal motivo, se recomienda aplicar los dos métodos para obtener un mejor conocimiento acerca de la vulnerabilidad de la edificación, debido a que ambos se complementan en la realización de un análisis cualitativo.

CONCLUSIONES

SOBRE EL ESTADO DEL CONOCIMIENTO

- ☑ El estudio de la vulnerabilidad sísmica de los edificios históricos no ha recibido la atención adecuado hasta el momento; pero con el método propuesto dentro del proyecto RISK-UE, se establece una de las aportaciones metodológicas más completa para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de tales edificios.
- ☑ Se puede afirmar que el método de Índice de Vulnerabilidad propuesto dentro del proyecto RISK-UE (Lagomarsino et al., 2003) es aplicable a cualquier ciudad que se encuentre ubicada en una zona de baja, moderada o alta sismicidad de Colombia.
- ☑ Como se realizó en el proyecto, el método de índice de vulnerabilidad propuesto por Benedetti-Petrini, se puede adaptar a la zona de estudio, modificando ya sea las instrucciones de las clases, los pesos de cada clase, o agregando o quitando parámetros según la realidad de las estructuras de la zona; por consiguiente es un método que es posible adaptarlo a otras regiones diferentes a las de donde se creó.
- ☑ Una ventaja de las metodologías de ambos métodos es la relativa facilidad con la que se describe la vulnerabilidad de las edificaciones por medio del cálculo del índice de vulnerabilidad, y su empleo constituye una herramienta de decisión en los planes de mitigación de desastres a escala urbana.

- ☑ Una desventaja es que los resultados mostrados no son concluyentes y no se debe asumir que los índices de vulnerabilidad calculados para la iglesia garantizan por su valor numérico, el colapso o no de dicha edificación.

SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA

- ☑ La aplicación de las dos metodologías al caso de la Catedral de la Sagrada Familia ha permitido llevar a cabo una cierta validación de las mismas, habiéndose verificado su aplicabilidad y efectividad en el caso de un edificio histórico de grandes dimensiones.
- ☑ Se ha evidenciado que la dirección más vulnerable de todo el edificio es la transversal, condición atribuible a la existencia de pocos elementos resistentes a las fuerzas cortantes sísmicas, como se observa en la figura 6.2 y en los resultados del parámetro 3: Resistencia Convencional donde FS da menor que 1.
- ☑ Según los resultados obtenidos por ambos métodos, la Catedral de la Sagrada Familia es medianamente vulnerable.
- ☑ La bóveda de lámina acanalada de la nave central, se encuentra mal conectada con la estructura de la cubierta.
- ☑ La calidad del sistema resistente se encuentra en buen estado, lo que garantiza un buen comportamiento de la estructura, y además las personas que se encuentran a cargo de la Catedral se han preocupado por mantenerla conservada con el pasar del tiempo.

RECOMENDACIONES

- El método de Índice de Vulnerabilidad propuesto por Benedetti-Petrini y adaptado para edificaciones antiguas tipo iglesia muestra la predisposición de la edificación a sufrir daño por un evento sísmico, mientras el método de Índice de Vulnerabilidad propuesto dentro del proyecto RISK-UE nos da el grado de daño esperado para una determinada intensidad macrosísmica mediante las matrices de probabilidad de daño; por lo que se recomienda utilizar las dos metodologías como complemento de un análisis cuantitativo.
- De forma tentativa se recomienda que para un grado de daño mayor a medio (igual a 3 en la tabla 6.5) a una intensidad dada en la escala de MKS-64 se deberá proceder a la aplicación de un nivel de estudio más exhaustivo.
- A la Catedral de la Sagrada Familia se le recomienda la realización de un estudio cuantitativo, ya que por su antigüedad y debido a los eventos sísmicos que durante más de 100 años ha soportado, debe tener un mayor conocimiento para realizarle en un periodo no muy lejano una rehabilitación.
- Se recomienda realizar las intervenciones estructurales expuestas en el capítulo 5, apartado 5.3.

BIBLIOGRAFIA

ARQUIDIOSECIS DE BUCARAMANGA:

<http://www.arquidiocesisbucaramanga.org/>

BENEDETTI D, PETRINI V. Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Prioste di un método di valutazione, L'industria delle Costruzioni Roma 1984.

BLASCO, Hugo. Corrientes y la preservación de su patrimonio arquitectónico http://www.ucp.edu.ar/conexionesI2006/pdf/corrientes_y_la_preservacion.pdf

BONETT Ricardo. Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. Barcelona, 2003, 474 p. Tesis de Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela técnica superior de Ingenieros de caminos, canales y puertos.

CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA

CHAVARRIA D.A; GOMEZ D. Estudio piloto de vulnerabilidad sísmica en viviendas de 1 y 2 pisos del barrio cuarto de legua en el cono Cañaveralejo. Santiago de Cali, 2001. Tesis de grado (Ingeniero Civil), Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática.

CORTEZ Wilmer. Desarrollo de una metodología para la evaluación sismorresistente de edificaciones antiguas en tapia pisada y adobe. Bucaramanga, 2002, 236 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil), Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería Civil. Área de Estructuras.

COTE Luis F. "Bucaramanga la Ciudad de la Alegría". Ordenamiento Territorial. p29

GAVASSA Edmundo. "Fotografía Italiana de Quintilio Gavassa 1878-1958".

GOMEZ I. D.; RODRIGUEZ E. J. Generación de funciones de vulnerabilidad para edificaciones de mampostería no reforzada de baja altura utilizando técnicas de simulación. Bucaramanga, 2006, 339 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil), Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Civil. Área de Estructuras

LORENZO, P. "Tecnologías para viviendas de producción social en América Latina". Ediciones UPC. 2005. p213

MARTINEZ Guillermo. Vulnerabilidad Sísmica para Edificios Históricos de Obra de Fábrica de Mediana y Gran Luz. Barcelona, 2007, 454 p. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela técnica superior de Ingenieros de caminos, canales y puertos. Programa de Ingeniería sísmica y Dinámica Estructural.

MELI Roberto. "Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos". 1^{era} Ed. México.

MINISTERIO DE CULTURA:

http://www.sinic.gov.co/SINIC/Bienes/Images/1_1_1_3_68_001_02.doc.

NSR-98. "Norma Sismorresistente, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá, Colombia. 1998. Título A

PATIÑO Mariana. "Monumentos Nacionales de Colombia". Instituto colombiano de cultura. Editorial Escala. Octubre 1983.

SALCEDO Elkin. "Sismicidad histórica y análisis macrosísmico de Bucaramanga". Boletín Geológico. Vol 40 (1) 1-180. Bogotá, D.C. 2002.

ANEXO A

CARTA DE VENECIA, 1964

Definiciones

Artículo 1. La noción de monumento histórico comprende tanto la creación arquitectónica aislada, como el ambiente urbano o paisajístico que constituya el testimonio de una civilización particular, de una evolución significativa o de un acontecimiento histórico. Esta noción se aplica no sólo a las grandes obras, sino también a las obras modestas que con el tiempo hayan adquirido un significado cultural.

Artículo 2. La conservación y restauración de los monumentos constituyen una disciplina que se sirve de todas las ciencias y técnicas que puedan contribuir al estudio y a la salvaguardia del patrimonio monumental.

Finalidad

Artículo 3. La conservación y restauración de los monumentos tiene como finalidad salvaguardar tanto la obra de arte como el testimonio histórico.

Conservación

Artículo 4. La conservación de los monumentos impone ante todo un mantenimiento sistemático.

Artículo 5. La conservación de los monumentos se ve siempre favorecida por su utilización en funciones útiles a la sociedad: tal finalidad es deseable, pero no debe alterar la distribución y el aspecto del edificio. Las adaptaciones realizadas en función de la evolución de los usos y costumbres deben, pues, contenerse dentro de estos límites.

Artículo 6. La conservación de un monumento implica la de sus condiciones ambientales. Cuando subsista un ambiente tradicional, éste será conservado; por el contrario, deberá rechazarse cualquier nueva construcción, destrucción y utilización que pueda alterar las relaciones de los volúmenes y los colores.

Artículo 7. El monumento no puede ser separado de la historia de la que es testimonio, ni del lugar en el que se encuentra. Por lo tanto, el cambio de una parte o de todo el monumento no puede ser tolerado más que cuando la salvaguardia de un monumento lo exija, o cuando esté justificado por causas de relevante interés nacional o internacional.

Artículo 8. Los elementos de escultura, pintura o decoración que son parte integrante del monumento, no pueden ser separados de él más que cuando ésta sea la única forma adecuada para asegurar su conservación.

Restauración

Artículo 9. La restauración es un proceso que debe tener un carácter excepcional. Su finalidad es la de conservar y poner de relieve los valores formales e históricos del monumento y se fundamenta en el respeto a los elementos antiguos y a las partes auténticas. La restauración debe detenerse allí donde comienzan las hipótesis: cualquier trabajo encaminado a completar, considerado como indispensable por razones estéticas y teóricas, debe distinguirse del conjunto arquitectónico y deberá llevar el sello de nuestra época. La restauración estará siempre precedida y acompañada de un estudio arqueológico e histórico del monumento.

Artículo 10. Cuando las técnicas tradicionales se manifiesten inadecuadas, la consolidación de un monumento puede ser asegurada mediante el auxilio de todos los medios más modernos de construcción y de conservación, cuya

eficacia haya sido demostrada por datos científicos y garantizada por la experiencia.

Artículo 11. En la restauración de un monumento deben respetarse todas las aportaciones que definen la configuración actual de un monumento, no importa a qué época pertenezcan, dado que la unidad de estilo no es el fin de la restauración. Cuando un edificio ofrezca varias estructuras superpuestas, la supresión de una de estas etapas subyacentes sólo se justifica excepcionalmente y a condición de que los elementos eliminados ofrezcan poco interés, que la composición arquitectónica recuperada constituya un testimonio de gran valor histórico, arqueológico o estético y que se considere suficiente su estado de conservación. El juicio sobre el valor de los elementos en cuestión y la decisión sobre las eliminaciones que se deban llevar a cabo, no puede depender tan sólo del autor del proyecto.

Artículo 12. Los elementos destinados a reemplazar las partes que faltan deben integrarse armoniosamente en el conjunto, pero distinguiéndose a su vez de las partes originales, a fin de que la restauración no falsifique el monumento, tanto en su aspecto artístico como histórico.

Artículo 13. Las adiciones no pueden ser toleradas si no respetan todas las partes que afectan al edificio, su trazado tradicional, el equilibrio de su conjunto y sus relaciones con el ambiente circundante.

Lugares monumentales (conjuntos histórico-artísticos)

Artículo 14. Los lugares monumentales deben ser objeto de cuidados especiales a fin de salvaguardar su integridad y asegurar su saneamiento, su utilización y su valoración. Los trabajos de conservación y restauración, que se efectúen en ellos, deben inspirarse en los principios enunciados en los artículos precedentes.

Excavaciones

Artículo 15. Los trabajos de excavación deben efectuarse de acuerdo con normas científicas y con la "Recomendación que define los principios internacionales que deben ser aplicados en materia de excavaciones arqueológicas", adoptada por la UNESCO en 1956. La utilización de las ruinas y las medidas necesarias para la conservación y protección permanente de los elementos arquitectónicos y de los objetos descubiertos deberán ser aseguradas. Además, deberán tomarse todas las iniciativas que puedan facilitar la comprensión del monumento descubierto, sin desnaturalizar nunca su significado. Deberá excluirse a priori cualquier trabajo de reconstrucción, considerando aceptable tan sólo la anastilosis o recomposición de las partes existentes, pero desmembradas. Los elementos de integración deberán ser siempre reconocibles y representarán el mínimo necesario para asegurar las condiciones de conservación del monumento y restablecer la continuidad de sus formas.

Documentación y publicación

Artículo 16. Los trabajos de conservación, de restauración y de excavación estarán siempre acompañados por una documentación precisa, constituida por informes analíticos y críticos ilustrados con dibujos y fotografías. Todas las fases de los trabajos de liberación, consolidación, recomposición e integración, así como los elementos técnicos y formales identificados a lo largo de los trabajos, serán allí consignados. Esta documentación se depositará en los archivos de un organismo público y estará a disposición de los investigadores; se recomienda igualmente su publicación.

ANEXO B
FORMATO DE EVALUACIÓN PRELIMINAR DE INDICE DE
VULNERABILIDAD NIVEL 1⁷⁴

→ Descripción de la edificación

1. *Nombre de la edificación*: se debe escribir el nombre o denominación particular del mismo.
2. *Dirección*: se debe describir y anotar detalladamente la localización de la edificación.
3. *Periodo de construcción*: debe anotarse el año en que se construyó la edificación, para esto se debe recurrir a planos, archivos u otros documentos, ya sean privados o gubernamentales. Si no es posible obtener un dato preciso, debe estimarse por sus características constructivas y por el conocimiento de la gente de la región y del propietario o persona a cargo.
4. *Monumento histórico y/o arquitectónico*: si la edificación a la que se le está realizando la inspección es considerada monumento histórico y/o arquitectónico debe marcarse positivamente. Esto nos indica la importancia de preservar la edificación manteniendo sus características arquitectónicas.
5. *Número de niveles*: señalar el número de niveles o pisos de la edificación dentro del formato.

⁷⁴ CORTEZ, Op Cit. p 68-80

6. *Superficie en planta*: anotar la superficie en planta cubierta por la edificación en metros cuadrados —superficie del primer nivel—.

→ **Ubicación de la edificación**

1. *Ubicación en la manzana*

Como se ha visto en las poblaciones en donde se han presentado sismos, el comportamiento de las edificaciones es un poco diferente dependiendo de su posición en la manzana, es por esto, que se debe tener en cuenta al momento de la inspección.

En la metodología de inspección se presentan los cuatro casos más predominantes en la ubicación de la edificación en la manzana, y se debe ubicar la edificación en una de las opciones propuestas.

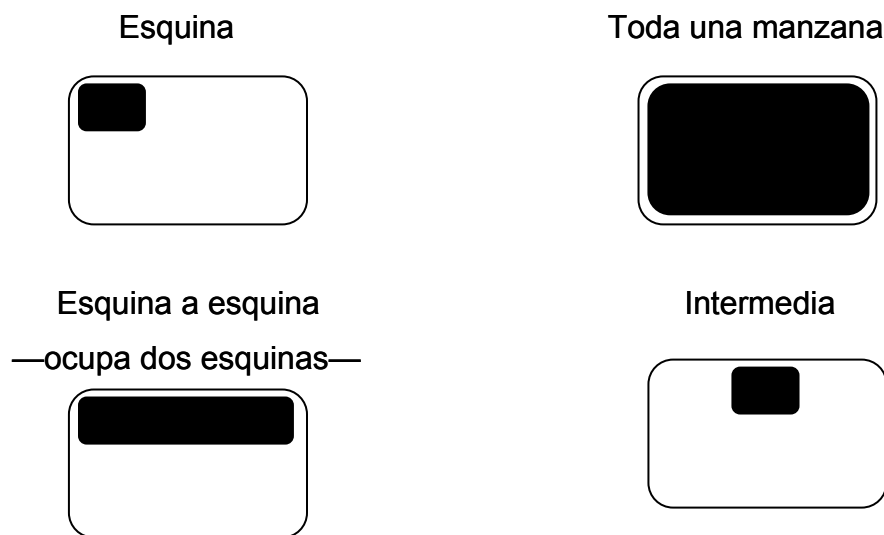


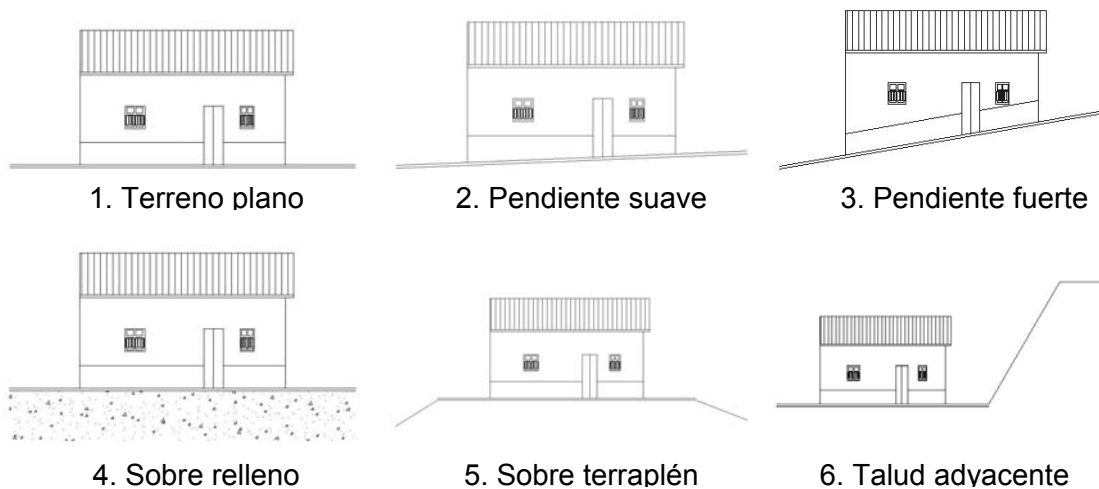
Figura B.1 Ubicación de la edificación dentro de la manzana.

2. Topografía del terreno

Este es un factor importante en la transmisión de fuerzas sísmicas, y en la seguridad de las edificaciones. La topografía del terreno produce efectos locales en la aceleración del suelo causado por las ondas sísmicas. Además se pueden presentar otros fenómenos geotécnicos como derrumbamientos y licuefacción que disminuyen la capacidad sísmica de las edificaciones y colocan en peligro tanto el patrimonio como las vidas humanas.

Las siguientes son las opciones que se presentan durante la inspección:

- 1) Terreno plano — $\theta = 0\%$ —
- 2) Pendiente suave — $\theta < 5\%$ —
- 3) Pendiente fuerte — $\theta > 5\%$ —
- 4) Sobre relleno
- 5) Sobre terraplén
- 6) Talud adyacente
- 7) Corona de talud
- 8) Sobre loma
- 9) Depresión



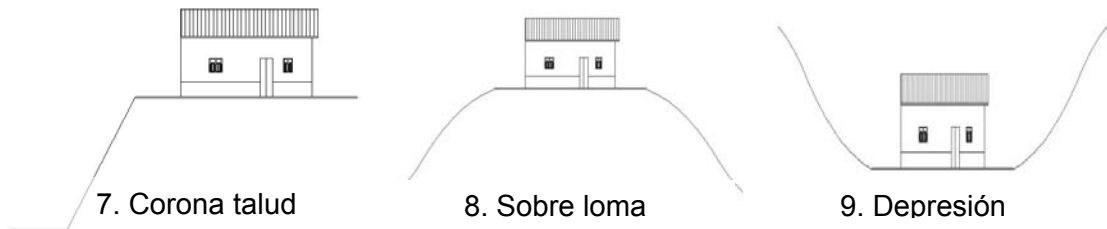


Figura B.2 Topografía del terreno.

3. Edificaciones adyacentes

En este punto se puede identificar cual es la situación de la edificación en estudio con respecto a las edificaciones vecinas. Es importante conocer cuáles son sus características, ya que de estas depende el comportamiento ante un sismo y la probabilidad de daño y colapso.

Los datos que se deben tener de las edificaciones adyacentes son:

- Posición: se refiere a la ubicación con respecto a la edificación en estudio. La forma correcta de anotar la posición es indicando la orientación geográfica de su fachada principal, así: N, S, E, W, NE, SW, etc.

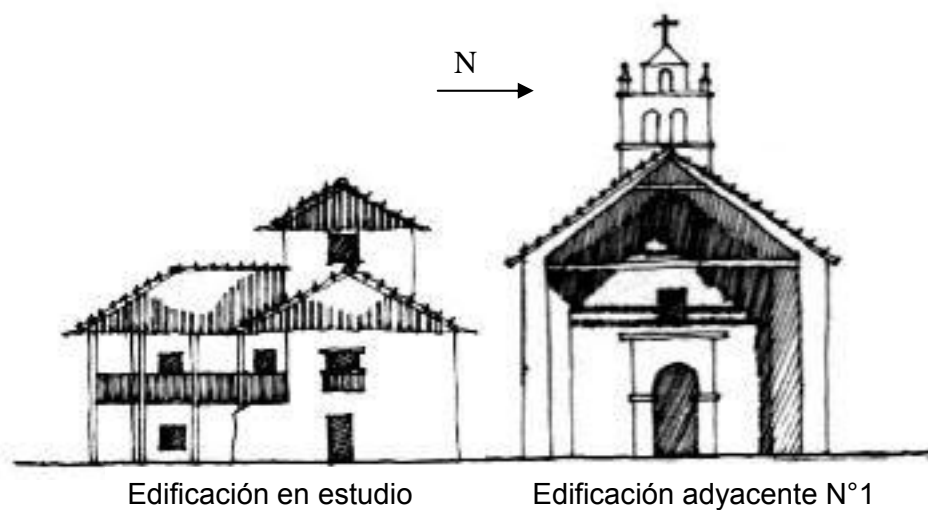


Figura B.3 Posición de una edificación adyacente.

Ejemplo: El edificio adyacente N°1 está ubicado al costado norte de la edificación en estudio.

- Uso: se refiere al uso actual que tiene cada una de las edificaciones, estas pueden ser: vivienda, oficinas, hospedaje, colegio, edificio gubernamental, edificio religioso u otro.
- Número de pisos: es el número de niveles de la edificación adyacente.
- Periodo de construcción: corresponde al año o periodo arquitectónico en el que se construyó la edificación.
- Material: elementos constitutivos principales o predominantes, tales como: tapia pisada, mampostería, concreto, acero, etc.
- Sistema estructural: sistema resistente tanto a fuerzas verticales como a fuerzas horizontales. Estos pueden ser muros de carga, pórtico de acero o concreto, pórticos y muros u otro sistema al cual pertenezca la estructura de las edificaciones adyacentes.
- Tipo de colindancia: se presentan dos opciones: la primera, cuando las edificaciones se encuentran pegadas, y la segunda, cuando las edificaciones se encuentran separadas.



Figura B.4 Tipo de colindancia.

→ Dimensiones

Esta es una parte muy importante de la inspección, ya que nos permite conocer con cierta precisión la ubicación de cada uno de los elementos tanto estructurales como no estructurales.

Lo primero que se debe hacer, es indagar por planos existentes u otros documentos que nos permita conocer las principales dimensiones de la edificación, si estos planos no se encuentran, o no satisfacen las condiciones actuales, se hace necesario realizar un levantamiento con las dimensiones tanto en planta como en perfil de toda la edificación, además se deben incluir los detalles que sean necesarios como: escaleras, balcones, puertas y otros elementos arquitectónicos.

→ Cubierta y entrepisos

Al igual que en el numeral anterior, es importante determinar cada una de las dimensiones de los elementos que constituyen la cubierta y el entrepiso, en ellos se deben incluir los conectores, sus diferentes partes y el sistema de transmisión de cargas. Además se deben anexar los esquemas necesarios para un mayor entendimiento de la estructura.

→ Sistema estructural

Es el conjunto de elementos que conforman una edificación, capaces de resistir tanto fuerzas verticales como fuerzas horizontales, determinando una ruta o sistema de transmisión de cargas.

Los sistemas estructurales que se pueden presentar son los siguientes:

- Muros: Es un sistema estructural en donde las cargas verticales y fuerzas horizontales son resistidas por los muros de carga y/o estructurales.
- Columnas
- Vigas y arcos

Si la edificación no presenta ninguno de los tres sistemas estructurales descritos anteriormente, debe describirse su sistema, identificando cuales son los elementos que están soportando las cargas verticales.

También es importante describir el sistema de transmisión de cargas verticales y fuerzas horizontales en cada uno de los sistemas, mediante el uso de esquemas o simplemente indicándolos en los planos arquitectónicos y de la cubierta.

Otro aspecto que debe tenerse en cuenta, es el tipo de entrepiso que se pueda encontrar. Los diferentes tipos de entrepisos pueden ser los siguientes: vigas de madera con placa plana de ladrillos, y vigas de madera con placa de madera. Además de los anteriores, se pueden encontrar sistemas similares con algunas variantes. En el sistema de entrepiso también se debe incluir el sistema de transmisión de cargas.

Por último cabe anotar que aunque los muros divisorios no estén soportando cargas y no pertenezcan al sistema estructural, la existencia de estos debe ser anotada e inspeccionados con el fin de garantizar su buen comportamiento.

→ **Materiales**

Debe anotarse el tipo de material predominante, presente en los siguientes elementos:

- *Muros de carga:* Los muros de carga que se pueden encontrar en el momento de la inspección de las edificaciones antiguas son: tapia pisada o mampostería, a su vez esta última está constituida de pequeñas unidades de piedra o barro. Se debe anotar el material del muro predominante, es decir, aquel que se encuentra en mayor porcentaje.
- *Columnas:* Si se encuentran columnas o postes —pie derechos—, se debe indicar el material que las constituye dentro de las opciones presentadas, si no se encuentra dentro de la lista, debe indicarse acompañada de una breve descripción.
- *Mortero:* En las edificaciones antiguas el mortero se ha utilizado tanto en pañetes de muros, cubiertas y entrepisos, como en la unión de diferentes elementos. Los morteros están compuestos principalmente de barro, cal, arena, cemento y material orgánico —estiércol de animales—.

→ Cimentaciones

El estado de la cimentación es muy importante, debido a la necesidad de una adecuada transmisión de cargas entre la edificación y el suelo. Además, se pueden presentar fenómenos de hundimientos diferenciales que pueden sobre-esforzar algunos elementos de la estructura.

1. *Capacidad del suelo*

Durante la inspección se hace necesario determinar la capacidad del suelo de una forma cualitativa, siendo los mejores suelos aquellos que están

formados por un lecho rocoso y los peores, aquellos altamente cohesivos — arcillas y limos—.

Es muy importante el criterio del inspector y debe ser registrada el no conocimiento o la incertidumbre sobre la capacidad del suelo.

2. *Material de cimentación*

Esto se refiere al material constitutivo de los elementos de cimentación, tales como: piedra, arcilla, madera u otros.

3. *Tipo de cimentación*

El sistema de cimentación predominante en las edificaciones antiguas es el de zapata corrida para muros de cargas, y algunas veces se utilizaban zapatas aisladas para cimentar las columnas.

Dentro de las opciones presentadas están la zapata individual, zapatas corridas y pilotes de madera. En caso de no encontrarse algún sistema de cimentación o este no tiene las características de alguna de las opciones planteadas, se debe especificar acompañada de una breve descripción.

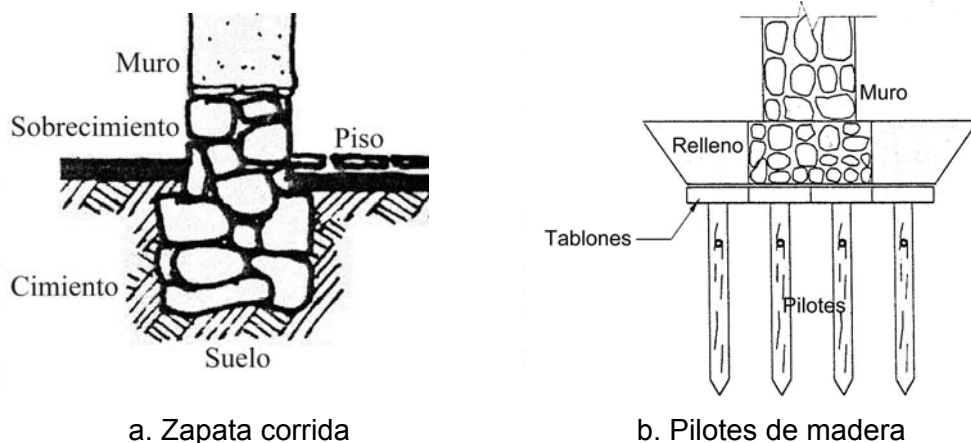


Figura B.5 Tipos de cimentación.

4. *Profundidad de cimentación*

Otro aspecto importante a identificar es la profundidad a la cual se encuentra la cimentación. En muchos casos esto no puede ser determinado fácilmente y se hace necesario la realización de apiques y sondeos dependiendo del tipo y la importancia del proyecto.

→ **Restauraciones, reparaciones y modificaciones**

Muchas de las edificaciones antiguas han cambiado a través del tiempo. Estos cambios van desde sellamiento de pequeñas fisuras hasta la inserción de nuevos elementos estructurales debido a restauraciones y reparaciones que en ocasiones producen concentraciones de esfuerzos, cambios de peso y cambios en el comportamiento estructural de los diversos materiales.

A continuación se hace una descripción de los procedimientos más usados para la restauración y reparación de las edificaciones históricas:

1. *Sellado de grietas*: Es un procedimiento mediante el cual se inserta un material plástico como el mortero para rellenar fisuras y grietas que se presentan en los elementos estructurales. Uno de los métodos más utilizados para el sellamiento de grietas es la inyección de lechada.
2. *Impregnación*: Es un método mediante el cual se aplican por aspersion resinas u otros productos químicos a presión a un elemento para mejorar la resistencia en la capa superficial del material.
3. *Reparación con malla electrosoldada*: Consiste en la inserción de una malla electrosoldada para mejorar la resistencia a tensión y cortante de los materiales.
4. *Sustitución de materiales*: Es el cambio de material original por otro de diferentes propiedades.

5. *Inserción de refuerzo*: Es la inclusión de materiales como barras o platinas de acero, o elementos de madera que permite mejorar la resistencia de los elementos estructurales.
6. *Reconstrucción de los elementos estructurales*: Reparación de elementos estructurales que se encontraban bastante deteriorados y que para su correcto funcionamiento necesitan ser construidos nuevamente casi en su totalidad.
7. *Renivelación de elementos distorsionados*: Proceso mediante el cual se logra una superficie plana –llana— de los elementos tanto estructurales como no estructurales.
8. *Inserción de elementos de unión*: Inclusión de materiales que permiten una mejor unión entre los diferentes elementos estructurales, lo que mejora el comportamiento de la edificación.
9. *Restauración de elementos arquitectónicos*: Es la reparación de los elementos no estructurales con el fin de preservar sus características estéticas.
10. *Inserción de elementos estructurales*: Es la inclusión de nuevos elementos estructurales que mejoren el comportamiento estructural de la edificación.
11. *Tensoros o tirantes*: Se utilizan para evitar el coceo o abertura de muros.
12. *Cambio de pañete*: Cambio en el tipo de mortero utilizado en la superficie de muros, columnas, entrepisos y cubiertas.

ANEXO C
FORMATO DE ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PROPUESTO
POR BENEDETTI Y PETRINI

Parámetros	Clase K_i				Peso W_i
	A	B	C	D	
1. Organización del sistema resistente.	0	5	20	45	1.00
2. Calidad del sistema resistente.	0	5	25	45	0.25
3. Resistencia convencional.	0	5	25	45	1.50
4. Posición del edificio y cimentación.	0	5	25	45	0.75
5. Diafragma horizontales.	0	5	15	45	1.00
6. Configuración en planta.	0	5	25	45	0.50
7. Configuración en elevación.	0	5	25	45	1.00
8. Distancia máxima entre los muros.	0	5	25	45	0.25
9. Tipo de cubierta.	0	15	25	45	1.00
10. Elementos no estructurales.	0	0	25	45	0.25
11. Estado de conservación.	0	5	25	45	1.00

Tabla C.1 Escala de vulnerabilidad de Benedetti-Petrini

Formulario para el levantamiento de la vulnerabilidad

El formulario encuesta que se observa en la Tabla C.2, es una versión modificada por Aguiar *et al*/ del utilizado por el GNDT en Italia. Una de las simplificaciones que se tienen en cuenta es la de no utilizar el primer nivel de aproximación debido a que los datos que provee no influyen directamente en el cálculo del VI. Por otra parte, del segundo nivel se utiliza únicamente la parte correspondiente a edificios de mampostería, debido a que no se conoce bibliografía sobre funciones de vulnerabilidad para edificios de otro tipo.

No. edificio: _____
Dirección: _____
Fecha: _____ d/m/a No. observador: _____
1. Organización del sistema resistente: ____
2. Calidad del sistema resistente: ____
3. Resistencia convencional
1. 1. Número de pisos N: _____
2. 2. Área total cubierta A_t : _____ m ²
3. 3. Área resistente sentido x A_x : _____ m ² sentido y A_y : _____ m ²
1. 1. Resistencia cortante mampostería τ_k : _____ Ton/m ²
2. 2. Altura media de los pisos h: _____ m
3. 3. Peso específico mampostería P_m : _____ Ton/m ³
4. 4. Peso por unidad de área diafragma P_s : _____ Ton/m ²
4. Posición del edificio y de la cimentación: ____
5. Diafragmas horizontales: ____
6. Configuración en planta $\beta_1 = a/L$: ____ $\beta_2 = b/L$: ____
7. Configuración en elevación. Superficie porche %: ____ T/H: ____ $\pm \Delta M/M$ %: ____
8. Distancia máxima entre los muros L/S: ____
9. Tipo de cubierta: ____
10. Elementos no estructurales: ____
11. Estado de conservación: ____

Tabla C.2 Formulario para el levantamiento de la vulnerabilidad de edificios de mampostería.

Instrucciones para el formulario de levantamiento

La asignación de los once parámetros del formulario de encuesta descrito en el apartado anterior, dentro de una de las cuatro clases A, B, C, D se lleva a cabo con la ayuda de las siguientes instrucciones. En éstas se describe de forma muy breve, el fundamento teórico de cada uno de los parámetros con el objetivo de proporcionar al observador de campo un cierto criterio de selección.

1. Organización del sistema resistente

Con este parámetro se evalúa el grado de organización de los elementos verticales prescindiendo del tipo de material. El elemento significativo es la presencia y la eficiencia de la conexión entre las paredes ortogonales con tal de asegurar el comportamiento en "cajón" de la estructura. Se reporta una de las clases:

- A) Edificio construido de acuerdo con las recomendaciones de la norma Española para la construcción sismo-resistente, específicamente del apartado 4.1 de dicha norma.
- B) Edificio que presenta, en todas las plantas, conexiones realizadas mediante vigas de amarre o de adaraja en los muros, capaces de transmitir acciones cortantes verticales.
- C) Edificio que, por no presentar vigas de amarre en todas las plantas, está constituido únicamente por paredes ortogonales bien ligadas.
- D) Edificio con paredes ortogonales no ligadas.

2. Calidad del sistema resistente

Con este parámetro se determina el tipo de mampostería más frecuentemente utilizada, diferenciando, de modo cualitativo, su característica de resistencia con el fin de asegurar la eficiencia del comportamiento en "cajón" de la estructura. La atribución de un edificio a una de las cuatro clases se efectúa en función de dos factores: por un lado, del tipo de material y de la forma de los elementos que constituyen la mampostería. Por otro lado, de la homogeneidad del material y de las piezas, por toda la extensión del muro. Se reporta una de las clases:

- A) Mampostería en ladrillo o bloques prefabricados de buena calidad. Mampostería en piedra bien cortada, con piezas homogéneas y de dimensiones constantes por toda la extensión del muro. Presencia de ligamento entre las piezas.
- B) Mampostería en ladrillo, bloques o piedra bien cortada, con piezas bien ligadas más no muy homogéneas en toda la extensión del muro.
- C) Mampostería en piedra mal cortada y con piezas no homogéneas, pero bien trabadas, en toda la extensión del muro. Ladrillos de baja calidad y privados de ligamento.
- D) Mampostería en piedra irregular mal trabada o ladrillo de baja calidad, con la inclusión de guijarros y con piezas no homogéneas o privadas de ligamento.

3. Resistencia convencional

Con la hipótesis de un perfecto comportamiento en "cajón" de la estructura, la evaluación de la resistencia de un edificio de mampostería puede ser calculada con razonable confiabilidad. El procedimiento utilizado requiere del levantamiento de los datos:

N: número de pisos.

A_t : área total cubierta en (m^2).

$A_{x,y}$: área total de los muros resistentes en el sentido X e Y respectivamente en (m^2). El área resistente de los muros inclinados un ángulo α diferente de cero, respecto a la dirección considerada, se debe multiplicar por $(\cos \alpha)^2$.

τ_K : resistencia a cortante característica del tipo de mampostería en (Ton/m^2). En el caso de que la mampostería se componga de diferentes materiales, el valor de τ_K se determina como un promedio ponderado de los valores de resistencia a cortante para cada uno de los materiales τ_i ,

utilizando como factor de peso el porcentaje relativo en área A_i de cada uno de ellos.

$$\tau_k = \frac{\sum \tau_i A_m}{\sum A_i} \quad (C.1)$$

h: altura media de los pisos en (m).

P_m : peso específico de la mampostería en (Ton/m³).

P_s : peso por unidad de área del diafragma en (Ton/m²).

4. Posición del edificio y de la cimentación

Con este parámetro se evalúa, hasta donde es posible por medio de una simple inspección visual, la influencia del terreno y de la cimentación en el comportamiento sísmico del edificio. Para ello se tiene en cuenta algunos aspectos, tales como: la consistencia y la pendiente del terreno, la eventual ubicación de la cimentación a diferente cota y la presencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén. Se reporta una de las clases:

- A) Edificio cimentado sobre terreno estable con pendiente inferior o igual al 10%. La fundación está ubicada a una misma cota. Ausencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén.
- B) Edificio cimentado sobre roca con pendiente comprendida entre un 10% y un 30% o sobre terreno suelto con pendiente comprendida entre un 10% y un 20%. La diferencia máxima entre las cotas de la fundación es inferior a 1 metro. Ausencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén.
- C) Edificio cimentado sobre terreno suelto con pendiente comprendida entre un 20% y un 30% o sobre terreno rocoso con pendiente comprendida entre un 30% y un 50%. La diferencia máxima entre las cotas de la

fundación es inferior a 1 metro. Presencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén.

- D) Edificio cimentado sobre terreno suelto con pendiente mayor al 30% o sobre terreno rocoso con pendiente mayor al 50%. La diferencia máxima entre las cotas de la fundación es superior a 1 metro. Presencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén.

5. Diafragmas horizontales

La calidad de los diafragmas tiene una notable importancia para garantizar el correcto funcionamiento de los elementos resistentes verticales. Se reporta una de las clases:

- A) Edificio con diafragmas, de cualquier naturaleza, que satisfacen las condiciones:
1. Ausencia de planos a desnivel.
 2. La deformabilidad del diafragma es despreciable.
 3. La conexión entre el diafragma y los muros es eficaz.
- B) Edificio con diafragma como los de la clase A, pero que no cumplen con la condición 1.
- C) Edificio con diafragmas como los de la clase A, pero que no cumplen con las condiciones 1 y 2.
- D) Edificio cuyos diafragmas no cumplen ninguna de las tres condiciones.

6. Configuración en planta

El comportamiento sísmico de un edificio depende de la forma en planta del mismo. En el caso de edificios rectangulares es significativo la relación $\beta_1 = a / L$ entre las dimensiones en planta del lado menor y mayor. También es necesario tener en cuenta las protuberancias del cuerpo principal mediante la

relación $\beta_2 = b / L$. En la Figura C.1 se explica el significado de los dos valores que se deben reportar, para lo cual se evalúa siempre el caso más desfavorable.

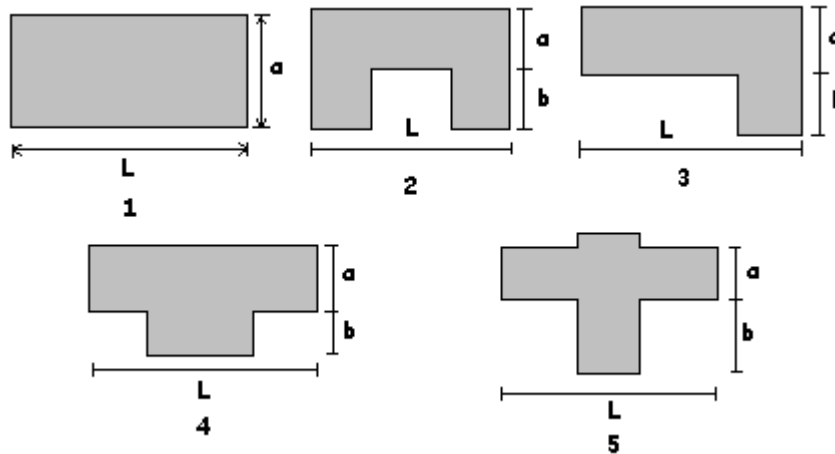


Figura C.1 Configuración en planta de la estructura.

7. Configuración en elevación

En el caso de edificios de mampostería, sobre todo para los más antiguos, la principal causa de irregularidad está constituida por la presencia de porches y torretas. La presencia de porches se reporta como la relación porcentual entre el área en planta del mismo y la superficie total del piso. La presencia de torretas de altura y masa significativa respecto a la parte restante del edificio se reporta mediante la relación T/H, tal como se indica en la Figura C.2 No se deben tener en cuenta las torretas de modesta dimensión tales como chimeneas, escapes de ventilación, etc.

También se reporta la variación de masa en porcentaje $\pm \Delta M/M$ entre dos pisos sucesivos, siendo M la masa del piso más bajo y utilizando el signo (+) si se trata de aumento o el (-) si se trata de disminución de masa hacia lo alto del edificio. La anterior relación puede ser sustituida por la variación de

áreas respectivas $\pm \Delta A/A$, evaluando en cualquiera de los dos casos el más desfavorable.

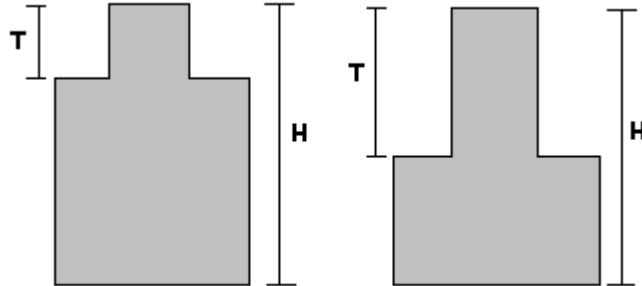


Figura C.2 Configuración en elevación de la estructura.

8. Distancia máxima entre los muros

Con este parámetro se tiene en cuenta la presencia de muros maestros interceptados por muros transversales ubicados a distancia excesiva entre ellos. Se reporta el factor L/S , donde L es el espaciamiento de los muros transversales y S el espesor del muro maestro, evaluando siempre el caso más desfavorable.

9. Tipo de cubierta

Se tiene en cuenta con este parámetro, la capacidad del techo para resistir fuerzas sísmicas. Se reporta una de las clases:

- A) Edificio con cubierta estable y provisto de viga cimbra. Edificio con cubierta plana.
- B) Edificio con cubierta estable y bien conectada a los muros, pero sin viga cimbra. Edificio con cubierta parcialmente estable y provista de viga cimbra.
- C) Edificio con cubierta inestable, provista de viga cimbra.

D) Edificio con cubierta inestable, sin viga cumbreira.

10. Elementos no estructurales

Se tiene en cuenta con este parámetro la presencia de cornisas, parapetos o cualquier elemento no estructural que pueda causar daño a personas o cosas. Se trata de un parámetro secundario, para fines de la evaluación de la vulnerabilidad, por lo cual no se hace ninguna distinción entre las dos primeras clases. Se reporta una de las clases:

- A) Edificio sin cornisas y sin parapetos. Edificio con cornisas bien conectadas a la pared, con chimeneas de pequeña dimensión y de peso modesto. Edificio cuyo balcón forma parte integrante de la estructura de los diafragmas.
- B) Edificio sin cornisas y sin parapetos. Edificio con cornisas bien conectadas a la pared, con chimeneas de pequeña dimensión y de peso modesto. Edificio cuyo balcón forma parte integrante de la estructura de los diafragmas.
- C) Edificio con elementos de pequeña dimensión, mal vinculados a la pared.
- D) Edificio que presenta chimeneas o cualquier otro tipo de elemento en el techo, mal vinculado a la estructura. Parapetos u otros elementos de peso significativo, mal contruidos, que pueden caer en caso de terremoto. Edificio con balcones contruidos posteriormente a la estructura principal y conectado a ésta de modo deficiente.

11. Estado de conservación

Se reporta una de las clases:

- A) Muros en buena condición, sin lesiones visibles.

- B) Muros que presentan lesiones capilares no extendidas, con excepción de los casos en los cuales dichas lesiones han sido producidas por terremotos.
- C) Muros con lesiones de tamaño medio entre 2 a 3 milímetros de ancho o con lesiones capilares producidas por sismos. Edificio que no presenta lesiones pero que se caracteriza por un estado mediocre de conservación de la mampostería.
- D) Muros que presentan, un fuerte deterioro de sus materiales constituyentes o, lesiones muy graves de más de 3 milímetros de ancho.

Cálculos requeridos por los parámetros de naturaleza cuantitativa

Los cálculos requeridos por los parámetros de naturaleza cuantitativa son básicamente de dos tipos: el primer tipo consiste en la aplicación de fórmulas matemáticas sencillas y el segundo tipo consiste en la toma de decisiones con base en condiciones lógicas. Enseguida se explican estos dos tipos de cálculos requeridos por los parámetros 3, 6, 7 y 8. La mayoría de las variables involucradas ya se han explicado.

3. Resistencia convencional

El coeficiente sísmico C, se define como el factor entre la fuerza horizontal resistente al pie del edificio dividido entre el peso del mismo y está dado por la expresión:

$$C = \frac{a_0 \tau_k}{qN} \sqrt{1 + \frac{qN}{1.5 a_0 \tau_k (1 + \gamma)}} \quad (C.2)$$

Donde,

$$A = \min\{A_x; A_y\} \quad (C.3)$$

$$B = \max\{A_x; A_y\} \quad (C.4)$$

$$a_0 = A / A_t \quad (C.5)$$

$$\gamma = B / A \quad (C.6)$$

$$q = \frac{(A + B)h}{A_t} P_m + P_s \quad (C.7)$$

El valor de q representa el peso de un piso por unidad de área cubierta y es igual al peso de los muros más el peso del diafragma horizontal, asumiendo que no existen variaciones excesivas de masa entre los diferentes pisos del edificio.

Finalmente, la atribución de este parámetro dentro de una de las cuatro clases A, B, C, D se hace por medio del factor $\alpha = C / \bar{C}$, en donde \bar{C} es un coeficiente sísmico de referencia que se toma como 0.4.

- A) Edificio con $\alpha \geq 1$.
- B) Edificio con $0.6 \leq \alpha < 1$.
- C) Edificio con $0.4 \leq \alpha < 0.6$.
- D) Edificio con $\alpha < 0.4$.

6. Configuración en planta

La asignación de este parámetro dentro de una de las cuatro clases, se realiza con base en las condiciones:

- A) Edificio con $\beta_1 \geq 0.8$ ó $\beta_2 \leq 0.1$.
- B) Edificio con $0.8 > \beta_1 \geq 0.6$ ó $0.1 < \beta_2 \leq 0.2$.
- C) Edificio con $0.6 > \beta_1 \geq 0.4$ ó $0.2 < \beta_2 \leq 0.3$.
- D) Edificio con $0.4 > \beta_1$ ó $0.3 < \beta_2$.

7. Configuración en elevación

La asignación de este parámetro, dentro de una de las cuatro clases, se realiza con base en las condiciones:

- A) Edificio con $-\Delta M/M < 10\%$.
- B) Superficie porche $< 10\%$ ó $10\% \leq -\Delta M/M < 20\%$.
- C) Superficie porche $= 10\% \cong 20\%$ ó $-\Delta M/M > 20\%$ ó $T/H < 2/3$.
- D) Superficie porche $> 20\%$ ó $\Delta M/M > 0$ ó $T/H > 2/3$.

8. Distancia máxima entre los muros

La asignación de este parámetro, dentro de una de las cuatro clases, se realiza con base en las condiciones:

- A) Edificio con $L/S < 15$
- B) Edificio con $15 \leq L/S < 18$
- C) Edificio con $18 \leq L/S < 25$
- D) Edificio con $L/S \geq 25$

ANEXO D
FORMULARIO DE CATEGORIZACIÓN CUALITATIVA DE DISTINTOS
PARÁMETROS PARA EDIFICACIONES

PARAMETROS CUALITATIVOS	Condición
ESTADO DE MANTENIMIENTO	Deficiente <input type="checkbox"/>
	Medio <input type="checkbox"/>
	Satisfactorio <input type="checkbox"/>
NIVEL DE DAÑO	Severo <input type="checkbox"/>
	Ligero <input type="checkbox"/>
	Nulo <input type="checkbox"/>
TRANSFORMACIONES ESTRUCTURALES	Si <input type="checkbox"/>
	No <input type="checkbox"/>
INTERVENCIONES RECIENTES	Si <input type="checkbox"/>
	No <input type="checkbox"/>
CALIDAD DE LA MAMPOSTERÍA	Mala <input type="checkbox"/>
	Buena <input type="checkbox"/>
MORFOLOGÍA DEL TIPOLOGÍA DE SITIO	Arista <input type="checkbox"/>
	Inclinada <input type="checkbox"/>
	Plano <input type="checkbox"/>
NAVE	Nave central <input type="checkbox"/>
	Una sola Nave <input type="checkbox"/>
	Tres naves <input type="checkbox"/>
DESPLOME DE FACHADA/ ELEMENTOS SOBRESALIENTES EN ALTURA (Agujas, Torres, etc.)	Si <input type="checkbox"/>
	No <input type="checkbox"/>
POSICIÓN DE LA IGLESIA	Incluida <input type="checkbox"/>
	Añadida <input type="checkbox"/>
	Aislada <input type="checkbox"/>
CÚPULAS/BÓVEDAS	Si <input type="checkbox"/>
	No <input type="checkbox"/>
ALTURA DE MUROS LATERALES (H)	H < 6 m <input type="checkbox"/>
	6 < H < 12 m <input type="checkbox"/>
	H > 12 m <input type="checkbox"/>

Tabla D.1 Categorización cualitativa de distintos parámetros

ANEXO E

Ficha No. 44 SISMICIDAD HISTORICA DE BUCARAMANGA⁷⁵

DATOS DE LA FUENTE:

1. **Titulo de la publicación:** Vanguardia Liberal
2. **Ciudad donde se imprime:** Bucaramanga
3. **Tipo de publicación** (marque con x la casilla respectiva):

REVISTA: _____ VOL. _____, No. _____, año comienzo _____, año finalización _____

PERIODICO x : Periodicidad: diaria, año comienzo: 1917, año finalización: 1997

LIBRO _____: Autor y Año:

OTRO _____: Especifique:

4. **Título del Artículo y página(s):** 30 segundos de pánico en Bucaramanga, Página 8.
5. **Día de publicación:** 30 de julio de 1967.
6. **Biblioteca, hemeroteca o archivo donde se encuentra:** Hemeroteca UNAB.

INFORME SOBRE LA NOTICIA SISMOLOGICA (Haga una transcripción fielmente literal):

Hora: 5:25, Día: 29, Mes: 07, Año: 1967

Poblaciones que percibieron el sismo y efectos (en habitantes, edificios, terreno) causados por el sismo. Anote también algunos otros efectos

⁷⁵ SALCEDO, Op Cit, p 134-136

secundarios que pudieron observarse. Si es necesario use otra hoja y péguela a esta ficha.

INTENSIDAD: _____

ESCALA: _____

Descripción:

El medio minuto más largo, lo vivimos ayer los habitantes de esta ciudad del departamento, del país todo y todos los lugares fuera del país que sintieron el intenso pero tal vez no fuerte temblor ocurrido ayer a las 5:25 minutos de la mañana. Alguien nos lo describió gráficamente como un mechoneo airado de Dios a Colombia. Fue un temblor oscilatorio, pues si hubiese sido trepidatorio, la tragedia estaría amontonada sobre este pueblo en pirámides de escombros.

COMO LO SENTIMOS

Algo como un dragón que despierta enfurecido sobre la tierra que pisamos y donde están las casas y edificios que habitamos comenzó a oscilar horriblemente, era un ruido seco de hojarasca, hojalata y chirrido. Tuvimos la sensación exacta de lo que ocurría y esperamos con angustia el tiempo a que estamos acostumbrados en la duración de esta sacudida telúrica. Pero el ruido soterrado espantoso y la oscilación tremenda se prolongaban indefinidamente. Cuando las gentes en las calles gritaban:- Es el fin del mundo; daban una expresión igual a la que no pudimos expresar otros, y esperábamos en los patios de nuestras casas, llegara la hora de la tragedia. Pero Dios es bueno y aplacó su ira. Al fin cesó el medio segundo más largo que hayamos vivido.

PRIMERO LA RADIO

Corrimos al radio, seguros de que hallaríamos noticias de lo ocurrido. En nuestro afán de conocer lo que queríamos oír, fuimos defraudados. No había

energía; el sismo había producido daños que la cortaron, pero fue por breves minutos. Un momento después algunas emisoras, entre estas Caracol, por Teleguía en Bucaramanga, comenzaron a dar noticias que nos serenaron. La voz de los locutores era todavía de susto. Era el contagio general de esto que todos vivíamos.

A LA CALLE

Salíamos a la calle, nos asociamos con colegas, con las autoridades policivas que comenzaban a correr en los autopatrullas de la ciudad y vimos todavía escenas de impresión; 'después escuchábamos los comentarios; cada persona como que deseaba contarnos algo del temblor. Una señorita nos decía: - Cuando me lancé a la calle, casi me vi atropellada por un automóvil, frenó en seco; vi salir al chofer como sonámbulo y arrodillarse en la calle con las manos juntas invocando a la virgen. Me conmoví profundamente y lloré con todos los de mi familia que automáticamente no hicimos otra cosa que imitar al chofer. No faltaron los comentarios profanos para momentos tan serio, ni los chistosos que hicieron reír, cuando las lágrimas estaban vivas. Pero referirlo todo sería largo, por eso entramos a dar datos concretos:

LOS BOMBEROS

Mientras hacíamos el recorrido por el centro de la ciudad, las bocinas de las máquinas del cuerpo de bomberos informaban dando más impresión al momento, que en algún lugar eran necesarios los auxilios de la entidad. Efectivamente con el vaivén del temblor las cuerdas colgantes de la luz se unieron y se formó en la calle 20 con la carrera 20 un corto circuito que amenazó con incendio; el frontis de dos residencias del mismo lugar se cayeron. Otras máquinas fueron llamadas al establecimiento de diversión llamado "El Caney" sobre la carretera al Café Madrid. La niña de una

damisela había sufrido allí graves lesiones al derrumbarse el edificio. También acudieron a otras muchas partes a prestar auxilios.

EDIFICIOS CONOCIDOS AVERIADOS

Un veinte por ciento de los edificios de Bucaramanga sufrieron averías, pero de los más conocidos anotamos los siguientes: Catedral de la Sagrada Familia; Templo de San Pedro Claver; se derrumbó la imagen del Sagrado Corazón que había en la torre en medio de heráldicos ángeles; edificio Turbay y otros.

RESIDENCIAS Y OFICINAS

Sufrieron serías averías el edificio del Permanente Central; la residencia No. 17 - 34, donde sufrió lesiones la señora Vicenta Peñaloza de 60 años; Arrocera Central en la calle 2a. carrera 14, residencia de un señor Antolinez, calle 19 No. 1-27; las de la calle 20 con la carrera 20; residencia en la calle 32 No. 26-00; residencia de Don Vicente Pinto, carrera 21 No. 20-05; Boulevard Santander No. 24-37, residencia de la señora Angélica Figueroa.

HACIA EL NORTE DE LA CIUDAD

Hacia este sector de la ciudad quedaron inhabitables las siguientes casas: Calle 24 No.1-15 de Josefina González V. de Ballesteros; calle 24 No. 5-05 de Bernardo Fiallo; calle 24 No. 17-27 de Cristóbal Roblas; calle 24 No. 4-11 de Manuel Atehortúa; calle 24 No. 4-38 de Leonor Castillo; calle 24 No. 4-27 de Marina V. de Rincón, calle 24 No. 4-19 de Luís Antonio Rincón, calle 24 No. 4-26 de Víctor Manuel Aldana y otras tantas.

PERDIDAS: Se han calculado que las pérdidas causadas por daños en edificios en Bucaramanga se elevan a tres millones de pesos y con las del departamento a unos seis millones.

EN LOS MUNICIPIOS. La oficina de relaciones públicas de la policía atendida por el Teniente Esguerra Vélez nos suministró algunos datos

recibidos por la estación de radio de la entidad de lo ocurrido con el movimiento sísmico en municipios de Santander.

Betulia: Se derrumbaron tres casas y se averiaron las demás; pareció el señor Timoleón Acevedo Vargas y resultaron gravemente heridos Miguel Antonio Orejarena y Benilda vda. De Rueda.

Zapatoca, destruidas unas quince habitaciones y averiadas el 50 por ciento de las restantes.

Rionegro: Destruída la casa de Oliverio Vega No. 15-112 y agrietada el 70 por ciento de las restantes en la población. Destruída la casa de la Hacienda Delicias de don Daniel Ramírez, donde sufrió lesiones la señora Alicia Olivar de Ramírez. En Llano de Palmas daños en la capilla y la casa cural.

Matanza: Daños de consideración en el Templo y la Alcaldía, averías en las habitaciones.

Girón: Daños de consideración en el Templo y en el 15 por ciento de casas. En la vereda Chocoita al caerse la pared de una vivienda atrapó a la niña Mireya de 5 años hija de los esposos don Miguel Antonio Tapias y Beatriz García de Tapias; en las veredas Angulo, Chocoa y Cantaalto se cayeron algunas viviendas.

Piedecuesta: Semidestruídos los edificios de la Normal de Varones, Correccional y casas de Benita Chaparro, Lilia de Tarazona, Constantino Hernández, Juan Gómez, Guillermo Rodríguez y Benita Uribe; el diez por ciento averiadas, las pérdidas dejadas son de dos millones de pesos aproximadamente> La niña de tres años Margarita, hija de don Pedro González y señora Matilde de González, sufrió graves lesiones.

San Gil: Edificios y casas averiadas. En el templo material desprendidas del techo de la nave principal cayeron sobre Ana Dolores Arenas de 50 años y Ana de Dios Hernández de 27 causándoles lesiones.

Barrancabermeja: Averías en edificios y casas, lo mismo que en el templo de la inmaculada.

La Corcova: Se destruyeron tres casas: La habitada por Adelaida Díaz, la habitada por Sebastián Ortega y su familia y la habitada por Julio Suárez. Sufrió lesiones graves la señora Maria Luisa. La escuela quedó averiada.

Floridablanca: Daños de consideración en el templo y averías en algunas casas. Hay un recuadro de fotografía con el siguiente comentario: Víctimas y daños materiales cuya cuantía se eleva a varios millones de pesos causó en Bucaramanga y el resto del departamento el fuerte temblor que en las primeras horas de la mañana de ayer sorprendió en el lecho y las vías públicas a millares de personas, que en un momento creyeron que se trataba del fin del mundo. En la composición gráfica de Carlos Eslava se aprecia el estado en que quedó el establecimiento llamado el Caney, situado en la periferia de la ciudad. En la parte de abajo un niño se sufrió graves heridas al caerle uno de los muros de la edificación. En la foto de la mitad se aprecia la torre de la catedral la Sagrada Familia y una flecha señala los daños que sufrió en la cúpula que al parecer hay necesidad de demoler para volverla a reconstruir. En la foto de la derecha una flecha señala el sitio en donde se hallaba una enorme imagen del Sagrado Corazón en el templo de San Pedro Claver y que a consecuencia del mismo se desplomó, convirtiéndose en una masa de concreto.

ANEXO F
ESCALA DE INTENSIDAD MSK-64⁷⁶

Nivel de Intensidad	DESCRIPCIÓN
I.	La sacudida no es percibida por los sentidos humanos; es detectada y registrada solamente por los sismógrafos.
II.	La sacudida es perceptible solamente por algunas personas en reposo, en particular en los pisos superiores de los edificios.
III.	La sacudida es percibida por algunas personas en el interior de los edificios y sólo en circunstancias muy favorables en el exterior de los mismos. La vibración percibida es semejante a la causada por el paso de un camión ligero. Observadores muy atentos pueden notar ligeros balanceos de objetos colgados, más acentuados en los pisos altos de los edificios.
IV.	El sismo es percibido por muchas personas en el interior de los edificios y por algunas en el exterior. Algunas personas que duermen se despiertan, pero nadie se atemoriza. La vibración es comparable a la producida por el paso de un camión pesado con carga. Las ventanas, puertas y vajillas vibran. Los pisos y muros producen chasquidos. El mobiliario comienza a moverse. Los líquidos contenidos en recipientes abiertos se agitan ligeramente. Los objetos colgados se balancean ligeramente.
V.	a) El sismo es percibido en el interior de los edificios por la mayoría de las personas y por muchas en el exterior. Muchas personas que duermen se despiertan y algunas huyen. Los animales se ponen nerviosos. Las construcciones se agitan con una vibración general. Los objetos colgados se balancean ampliamente.

⁷⁶ GRÜNTAL, G. (Ed.). 1993. European Macroseismic Scale 1992, ud-dated MSK-Scale. Conseil de L'Europe Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 7, 79 p. Luxembourg. Citado por Elkin Salcedo. Anexo 2

Los cuadros golpean sobre los muros o son lanzados fuera de su emplazamiento. En algunos casos, los relojes de péndulo se paran. Los objetos ligeros se desplazan o vuelcan. Las puertas o ventanas abiertas baten con violencia. Se vierten en pequeña cantidad los líquidos contenidos en recipientes abiertos y llenos. La vibración se siente en la construcción como la producida por un objeto pesado que se arrastra.

b) En las construcciones de tipo A son posibles ligeros daños (clase 1)

c) En ciertos casos se modifica el caudal de los manantiales.

VI. a) Lo siente la mayoría de las personas, tanto dentro como fuera de los edificios. Muchas personas salen a la calle, atemorizadas. Algunas personas llegan a perder el equilibrio. Los animales domésticos huyen de los establos. En algunas ocasiones, la vajilla y la cristalería se rompen, los libros caen de sus estantes, los cuadros se mueven y los objetos inestables vuelcan. Los muebles pesados pueden llegar a moverse. Las campanas pequeñas de torres y campanarios pueden sonar.

b) Se producen daños moderados (clase 2) en algunas construcciones de tipo A. Se producen daños ligeros (clase 1) en algunas construcciones de tipo B y en muchas del tipo A.

c) En ciertos casos pueden abrirse grietas de hasta un centímetro de ancho en suelos húmedos. Pueden producirse deslizamientos en las montañas. Se observan cambios en el caudal de los manantiales y en el nivel de agua de los pozos.

VII. a) La mayoría de las personas se aterroriza y corre a la calle. Muchas tienen dificultad para mantenerse en pie. Las vibraciones son sentidas por personas que conducen automóviles. Suenan las campanas grandes.

b) Muchas construcciones de tipo A sufren daños graves (clase 3) y algunas incluso destrucción (clase 4). Muchas construcciones del tipo B sufren daños moderados (clase 2). Algunas construcciones del tipo C experimentan daños ligeros (clase 1).

c) En algunos casos, se producen deslizamientos en las carreteras que transcurren sobre laderas con pendientes acusadas; se producen daños en las juntas de las canalizaciones y aparecen fisuras en muros de piedra. Se aprecia oleaje en las lagunas y el agua se enturbia por remoción del fango. Cambia el nivel del agua de los pozos y el caudal de los manantiales. En algunos casos, vuelven a manar manantiales que estaban secos y se secan otros que manaban. En ciertos casos, se producen derrames en taludes de arena o de grava.

VIII. a) Miedo y pánico general, incluso en las personas que conducen automóviles. En algunos casos se desgajan las ramas de árboles. Los muebles, incluso los pesados, se desplazan o vuelcan. Las lámparas colgadas sufren daños parciales.

b) Muchas construcciones de tipo A sufren destrucción (clase 4) y algunas, colapso (clase 5). Muchas construcciones de tipo B sufren daños graves (clase 3) y algunas, destrucción (clase 4). Muchas construcciones de tipo C sufren daños moderados (clase 2) y algunas graves (clase 3). En ocasiones, se produce la rotura de algunas juntas

de canalizaciones. Las estatuas y monumentos se mueven y giran. Se derrumban muros de piedra.

c) Pequeños deslizamientos en las laderas de los barrancos y en las trincheras y los terraplenes con pendientes pronunciadas. Grietas en el suelo, de varios centímetros de ancho. Se enturbia el agua de los lagos. Aparecen nuevos manantiales. Vuelven a tener agua pozos secos y se secan pozos existentes. En muchos casos, cambia el caudal y el nivel de agua de los manantiales y pozos.

IX. a) Pánico general. Daños considerables en el mobiliario. Los animales corren confusamente y emiten sus sonidos peculiares.

b) Muchas construcciones de tipo A sufren colapso (clase 5). Muchas construcciones de tipo B sufren destrucción (clase 4) y algunas, colapso (clase 5). Muchas construcciones de tipo C sufren daños graves (clase 3) y algunas, destrucción (clase 4). Caen monumentos y columnas. Daños considerables en depósitos de líquidos. Se rompen parcialmente las canalizaciones subterráneas. En algunos casos, los carriles del ferrocarril se curvan y las carreteras quedan fuera de servicio.

c) Se observa con frecuencia que se produce extrusiones de agua, arena y fango en los terrenos saturados. Se abren grietas en el terreno, de hasta 10 centímetros de ancho y de más de 10 centímetros en las laderas y en las márgenes de los ríos. Aparecen, además numerosas grietas pequeñas en el suelo. Desprendimientos de rocas y aludes. Muchos deslizamientos de tierras. Grandes olas en lagos y embalses. Se renuevan pozos secos y se secan otros existentes.

X. b) La mayoría de las construcciones del tipo A sufren colapso (clase 5). Muchas construcciones de tipo B sufren colapso (clase 5). Muchas construcciones de tipo C sufren destrucción (clase 4) y algunas colapso (clase 5). Daños peligrosos en presas; daños serios en puentes. Los carriles de las vías férreas se desvían y a veces se ondulan. Las canalizaciones subterráneas son retorcidas o rotas. El pavimento de las calles y el asfalto forman grandes ondulaciones.

c) Grietas en el suelo, de algunos decímetros de ancho que pueden llegar a un metro. Se producen anchas grietas paralelamente a los cursos de agua. Deslizamientos de tierras sueltas en las laderas con fuertes pendientes. En los ribazos de los ríos y en laderas escarpadas se producen considerables deslizamientos. Desplazamientos de arena y fangos en las zonas litorales. Cambio de nivel de agua en los pozos. El agua de canales y ríos es lanzada fuera de su cauce normal. Se forman nuevos lagos.

XI. b) Daños importantes en construcciones, incluso en las bien realizadas, en puentes, presas y líneas de ferrocarril. Las carreteras importantes quedan fuera de servicio. Las canalizaciones subterráneas quedan destruidas.

c) El terreno queda considerablemente deformado tanto por desplazamientos horizontales como verticales y con anchas grietas. Muchos deslizamientos de terrenos y caídas de rocas. Para determinar la intensidad de las sacudidas sísmicas se precisan investigaciones especiales.

XII. b) Prácticamente se destruyen o quedan dañadas todas las estructuras, incluso las subterráneas.

c) La topografía cambia. Grandes grietas en el terreno, con importantes desplazamientos horizontales y verticales. Caída de rocas y hundimientos en los escarpes de los valles, producidos en vastas extensiones. Se cierran valles y se transforman en lagos. Aparecen cascadas y se desvían los ríos.

Efectos que definen los grados de intensidad MKS

- a) Los fenómenos sentidos por las personas y percibidos en su medio ambiente.
- b) Los daños producidos en las construcciones, según sus diversos tipos.
- c) Los cambios advertidos en la naturaleza.

Tipos de construcciones

- a) *Tipo A*: Con muros de mampostería en seco o con barro, de adobes, de tapial.
- b) *Tipo B*: Con muros de fábrica de ladrillo, de bloques de mortero, de mampostería con mortero, de sillarejo, de sillería, entramados en madera.
- c) *Tipo C*: Con estructura metálica o de hormigón armado.

Términos de cantidad

Los términos de cantidad utilizados en la definición de los grados de intensidad corresponden aproximadamente a los siguientes porcentajes:

Algunos.....5%
Muchos.....50%

La mayoría.....75%

Clasificación de los daños en las construcciones

Clase 1 – Daños ligeros: fisuras en los revestimientos, caída de pequeños trozos de revestimiento.

Clase 2 – Daños moderados: fisuras en los muros, caída de grandes trozos de revestimiento, caída de tejas, caídas de pretilas, grietas en las chimeneas e incluso derrumbamientos parciales en las mismas.

Clase 3 – Daños graves: grietas en los muros, caída de chimeneas de fábrica o de otros elementos exteriores.

Clase 4 – Daños Destrucción: brechas en los muros resistentes, derrumbamiento parcial, pérdida del enlace entre distintas partes de la construcción, destrucción de tabiques y muros de cerramiento.

Clase 5 – Colapso: ruina completa de la construcción.

ANEXO G

PLANO EN PLANTA DE LA CATEDRAL DE LA SAGRADA FAMILIA

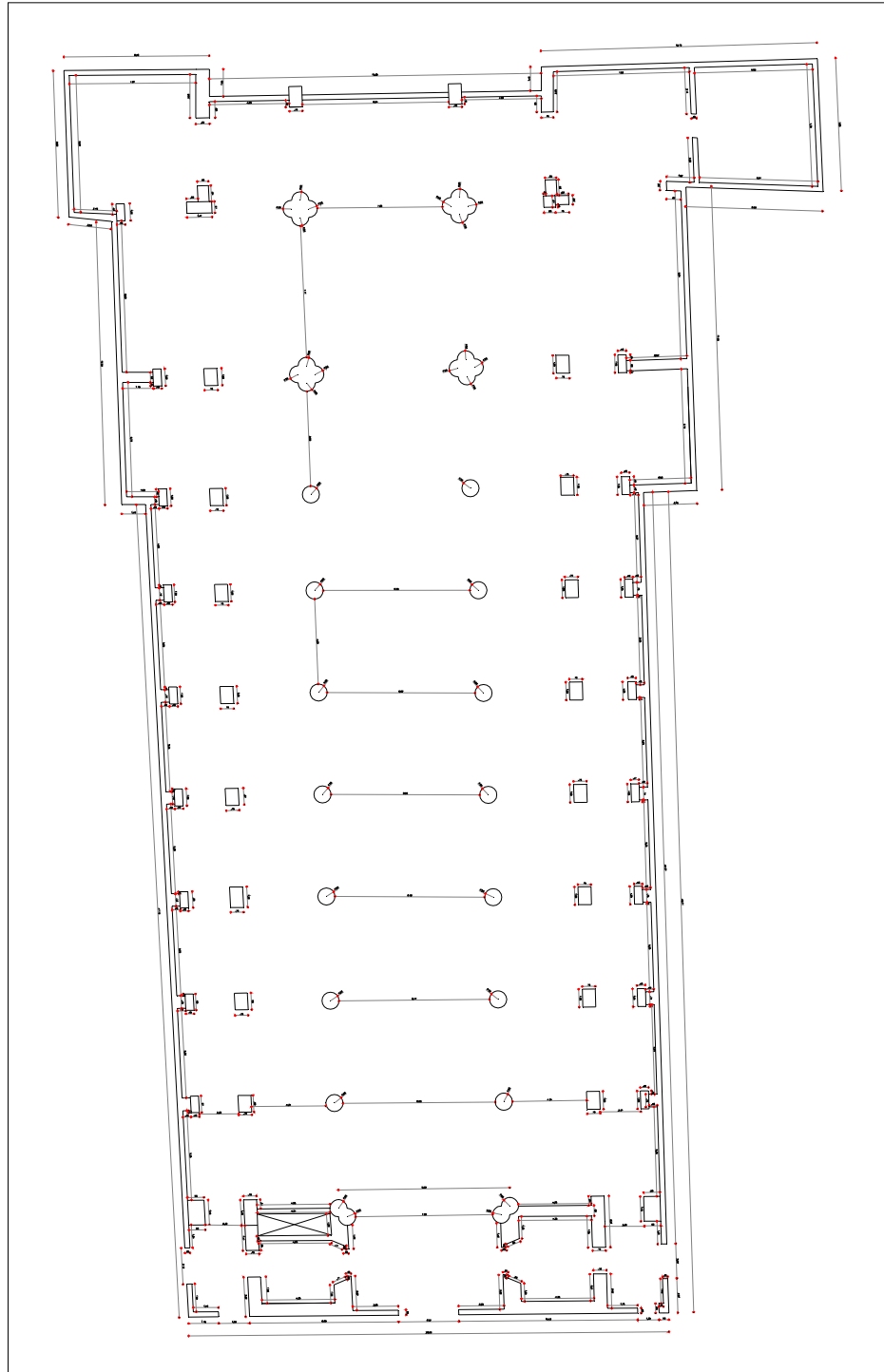


Figura G.1 Vista en Planta Catedral de la Sagrada Familia