ACTUALIZACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE DAÑO POR TERREMOTO PARA BOGOTÁ

TOMO 1. ENFOQUE CONCEPTUAL Y METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN

INFORME FINAL FASE II

ORIGINAL

ÁREA TÉCNICA Y DE GESTIÓN

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

GRUPO DE ESCENARIO DE DAÑOS

DICIEMBRE DE 2010

Nota especial: De acuerdo con el artículo 20 de la ley 23 de 1982, los Derechos de Autor pertenecen al FOPAE. La solicitud de reproducir éste documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE

FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS

GUILLERMO ESCOBAR CASTRO
Director

LUCY GONZÁLEZ MARANTES
Subdirectora Área Técnica y de Gestión

GLADYS PUERTO – LINDON LOSADA
Coordinación de Investigación y Desarrollo

Coordinación del estudio
FERNANDO JAVIER DÍAZ PARRA
Responsable de Escenarios de Daños

Profesionales participantes
Julio 2009 a Diciembre 2010

FERNANDO DÍAZ
IVÁN ORDÓÑEZ
ADRIANA BELTRÁN
ANDREI TORRES
GERARDO RODRÍGUEZ
DIEGO TORRES
HAROLD ÁLVAREZ

RESUMEN

La Coordinación de Investigación y Desarrollo del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias FOPAE, tiene a cargo adelantar diferentes actividades para la Gestión Integral del Riesgo, específicamente en la componente de Identificación del Riesgo se realizan estudios técnicos que mejoren nuestro conocimiento frente a las amenazas naturales y antrópicas no intencionales. Bajo la anterior línea de trabajo, el grupo de escenario de daños del FOPAE ha desarrollado el estudio de actualización y sistematización de escenarios de daño por terremoto para Bogotá, el cual brinda a la ciudad de una herramienta versátil que permite estimar los posibles daños a las edificaciones y líneas vitales y las posibles afectaciones a la población para varios escenarios de amenaza con diferentes intensidades sísmicas.

El estudio de actualización y sistematización de escenarios de daño por terremoto para Bogotá se desarrolló por fases, el presente estudio corresponde a la segunda fase la cual se consolida en tres partes, el primer tomo muestra el enfoque conceptual y metodologías de evaluación aplicadas, el segundo tomo corresponde al informe de ingeniería del software SEDAR (Sistema de Evaluación de Daños para Análisis de Riesgo), y en el tercer tomo se presentan los análisis de la información y de los resultados obtenidos.

El Tomo I del estudio ilustra en el capítulo uno de introducción los antecedentes y justificación del proyecto, los objetivos, alcances y el marco lógico de actividades del proyecto; en el capítulo dos se presenta el enfoque conceptual del sistema en donde se incluye la descripción del problema, metodología general de evaluación de riesgo sísmico y descripción de las componentes del sistema; en el capítulo tres de escenarios de amenaza sísmica resume la información regional y local tenida en cuenta, así como las metodologías aplicadas para determinar los escenarios de amenaza y respuesta sísmica de los terrenos de la ciudad; en el capítulo cuatro de vulnerabilidad sísmica se detallan las metodologías aplicadas para edificaciones y tuberías; en el capítulo cinco y seis de daños iniciales ilustra las metodologías tenidas en cuenta para evaluar daños en las edificaciones y líneas vitales respectivamente; en el capítulo siete de daños iniciales del terreno resume los métodos desarrollados para estimar los efectos asociados por los fenómenos de licuación y deslizamiento en el terreno; finalmente en el capítulo ocho de daños secundarios se encuentra los métodos desarrollados para: mayorar los daños iníciales de edificaciones y líneas vitales por efectos colaterales, estimar las afectaciones a la población y pérdidas económicas directas.

Finalmente, es importante resaltar que todos los métodos, desarrollos y resultados se encuentran totalmente documentados y los soportes de información, código fuente y bases de datos son de propiedad del FOPAE, lo cual facilitará los posteriores análisis y mejoras que se deseen hacer al sistema.

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 1
1.1 ANTECEDENTES 1
1.2 JUSTIFICACIÓN 2
1.3 OBJETIVOS 3
1.4 ALCANCE 3
1.5 MARCO LÓGICO 4
2 ENFOQUE CONCEPTUAL DEL SISTEMA 5
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 5
2.2 METODOLOGÍA DE VALORACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO 7
2.3 METODOLOGÍA GENERAL DE EVALUACIÓN DE DAÑOS POR SISMO 8
3 ESCENARIOS DE AMENAZA SÍSMICA 10
3.1 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN 10
3.2 SISMOS PROBABLES 10
3.2.1 Revisión de la amenaza sísmica nacional 10
3.2.2 Revisión de sismos históricos 14
3.3 RESPUESTA SÍSMICA DEL TERRENO 14
3.3.1 Revisión de la zonificación de respuesta sísmica 15
3.3.2 Cálculo de parámetros espectrales 17
3.3.3 Cálculo de parámetros de intensidad sísmica 18
4 VULNERABILIDAD SÍSMICA 21
4.1 EDIFICACIONES 21
4.1.1 Descripción del método Italiano 21
4.1.2 Adaptación del método Italiano 24
4.1.3 Información para el método Italiano 28
4.2 TUBERÍAS 31
5 DAÑOS INICIALES DE EDIFICACIONES Y LÍNEAS VITALES 34
5.1 EDIFICACIONES 34

5.1.1 Método Italiano 34
5.1.2 Método Miranda 37
5.2 LÍNEAS VITALES 41
5.2.1 Tuberías 43
5.2.2 Cableado 44
5.2.3 Tanques 46
5.2.4 Puentes 47
5.2.5 Vías 50
6 EFECTOS COLATERALES 52
6.1 LICUACIÓN 52
6.1.1 Índice de Potencial de Licuación 53
6.1.2 Zonificación del potencial de licuación 55
6.2 DESLIZAMIENTO 56
6.2.1 Bloque deslizante de Newmark 57
6.2.2 Zonificación del potencial de deslizamiento 58
7 DAÑOS SECUNDARIOS 60
7.1 DAÑOS DE LOS ELEMENTOS POR EFECTOS COLATERALES 60
7.1.1 Edificaciones 61
7.1.2 Tuberías 62
7.1.3 Cables 62
7.1.4 Tanques y Puentes 62
7.1.5 Postes y torres de energía o telecomunicaciones 63
7.1.6 Vías 63
7.2 AFECTACIONES A LA POBLACIÓN Y PÉRDIDAS ECONÓMICAS DIRECTAS 63
7.2.1 Factor de colapso 64
7.2.2 Ocupación de las edificaciones de día y noche 64
7.2.3 Número de afectados de día y noche 65
7.2.4 Pérdidas económicas directas 66
7.3 ÍNDICE DE BLOQUEO DE VÍAS 66
7.3.1 Densidad de bloqueo 66
7.3.2 Índice de bloqueo lateral 67

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 69

9 REFERENCIAS 71

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Definición del problema 5

Figura 2.2. Cadena de acontecimientos que definen el problema 6

Figura 2.3. Tipos de análisis que se desarrollan para afrontar el problema 6

Figura 2.4. Interacción de las componentes del análisis de riesgo sísmico 8

Figura 2.5. Metodología de evaluación de vulnerabilidad y daños por sismo incluyendo efectos colaterales 9

Figura 3.1. Curvas de amenaza para Bogotá curvas de Gallego. (AIS, 2009) 11

Figura 3.2. Curvas de amenaza de distintas fuentes para Bogotá. (Ingeominas & Unal, 2010) 12

Figura 3.3. Comparación de Espectros de Amenaza Uniforme obtenidos por AIS e Ingeominas -IGM 12

Figura 3.4. Mapa de zonificación sísmica de Colombia (AIS, 2009) 13

Figura 3.5. Zonas Geotécnicas de Bogotá (FOPAE, 2010) 15

Figura 3.6. Aceleraciones máximas registradas en superficie por el sismo de Quetame (DPAE, 2008) 16

Figura 3.7. Zonas de Respuesta Sísmica (FOPAE, 2010) 17

Figura 3.8. Método de evaluación de la respuesta sísmica para propósitos de escenario de daños 18

Figura 3.9. Escala de Intensidades Ingenieriles- EEIS. (Freeman et al., 2004) 20

Figura 5.1. Función de vulnerabilidad para edificaciones en mampostería (Mena, 2002) 35

Figura 5.2. Función de vulnerabilidad para edificaciones en concreto reforzado (Mena, 2002) 35

Figura 5.3. Función de vulnerabilidad para edificaciones con reticular celulado (Mena, 2002) 35

Figura 5.4. Función de vulnerabilidad para edificaciones en mampostería 36

Figura 5.5. Función de vulnerabilidad para edificaciones en concreto reforzado 36

Figura 5.6. Función de vulnerabilidad para edificaciones con reticular celulado 36

Figura 5.7. Curva para el cálculo del factor beta 1 38

Figura 5.8. Curva para el cálculo del factor beta 2 39

Figura 5.9. Curvas de vulnerabilidad en función de la deriva (Uniandes, 2005) 41

Figura 5.10. Curvas de vulnerabilidad en función de la aceleración máxima del terreno (Uniandes, 2005) 41

Figura 5.11. Curvas de vulnerabilidad para los elementos expuestos 42

Figura 5.12. Resumen de curvas de vulnerabilidad de tuberías 44

Figura 5.13. Resumen de curvas de vulnerabilidad de postes y cables enterrados 45

Figura 5.14. Curvas de vulnerabilidad para tanques en función del anclaje y nivel de llenado 47

Figura 5.15. Curvas de vulnerabilidad para puentes 50

Figura 5.16. Curvas de daño para líneas vitales (Geo-hazards International, 1999). 51

Figura 6.1. Esquema de las variables involucradas en el cálculo de LPI 53

Figura 6.2. Metodología de zonificación del potencial de licuación 56

Figura 6.3. Analogía realizada por el método del bloque deslizante (Newmark, 1965) 57

Figura 6.4. Metodología de zonificación del potencial de deslizamiento 59

Figura 7.1. Factor de colapso contra índice de daño 64

Figura 7.2. Evaluación del índice de bloqueo lateral en vías 68

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Sismos históricos sentidos en Bogotá (Dimate et al., 2005 y 2006) 14

Tabla 3.2. Intervalos de respuesta sísmica para Intensidad de Mercalli Modificada (fuente USGS) 19

Tabla 3.3. Valores de aceleración y velocidad espectral asociados a la escala EEIS 20

Tabla 4.1. Parámetros para el cálculo del índice de vulnerabilidad en edificaciones frágiles. 22

Tabla 4.2. Parámetros para el cálculo del índice de vulnerabilidad en edificaciones dúctiles. 22

Tabla 4.3. Resumen información empleada para el cálculo del índice de vulnerabilidad 30

Tabla 4.4. Factor de Corrección por Material (C_p) 32

Tabla 4.5. Factor de Corrección por Diámetro (C_d) 32

Tabla 4.6. Factor de Corrección por condiciones del suelo (C_g) 32

Tabla 4.7. Factor de Corrección por posibilidad de licuación (C_l) 33

Tabla 5.1. Escala de daño (Mena, 2002) 37

Tabla 5.2. Valores de la sumidos para las tipologías estructurales presentes en Bogotá 38

Tabla 5.3. Descripción de cada una de las curvas de vulnerabilidad empleadas 43

Tabla 5.4. Resumen de curvas de vulnerabilidad para tuberías 44

Tabla 5.5. Estados de daño en tanques (Hazus, 1997) 46

Tabla 5.6. Criterios de clasificación para puentes 48

Tabla 5.7. Clasificación de puentes por tipología estructural 49

Tabla 5.8. Estados de daño para puentes 50

Tabla 6.1. Factores de corrección por contenido de finos 54

Tabla 6.2. Factores de corrección del resultado del ensayo SPT 54

Tabla 6.3. Grados de daño por licuación basados en valores de LPI. 55

Tabla 6.4. Descripción de los grados de daño. 55

Tabla 6.5. Grados de daño por deslizamiento basados en valores de deslizamiento 58

Tabla 7.1. Elementos expuestos y sus escalas de daño 60

Tabla 7.2. Escala de daño por efectos colaterales 61

Tabla 7.3. Grado de daño total - GDT 61

Tabla 7.4. Factor de densidad de población y porcentajes de ocupación para distintos usos 65

Tabla 7.5. Porcentajes de atrapados según ductilidad 65

Tabla 7.6. Porcentajes de fatalidad según ductilidad 66

GLOSARIO

Acelerógrafo: equipo electrónico de recogida de datos en tiempo real, equipado con sensores que miden la aceleración del terreno.

Acelerograma: registro de la variación temporal de las aceleraciones en un punto y en una dirección. Se obtiene de un acelerógrafo.

Amenaza: condición latente derivada de la posible ocurrencia de un fenómeno físico de origen natural, socio-natural o antrópico no intencional, que puede causar daño a la población y sus bienes, la infraestructura, el ambiente y la economía pública y privada.

Amenaza sísmica: valor esperado de futuras acciones sísmicas y se expresa en términos de sus probabilidades de excedencia.

Amortiguamiento: capacidad de un sistema o cuerpo para disipar energía.

Basamento rocoso: espacio donde se encuentran las formaciones de roca, entendiendo como roca al material de velocidad de onda cortante superior a 750 m/s.

Capacidad de respuesta: capacidad de la sociedad, de las instituciones y de la población para reaccionar adecuadamente en los instantes de emergencia y responder al impacto, controlarlo y recuperarse.

Cortical: relativo a la corteza terrestre.

Daño: materialización del riesgo en el tiempo y en el espacio.

Desastre: interacción entre un fenómeno geofísico extremo y una condición vulnerable, traducido en pérdidas económicas y humanas en una escala totalmente por fuera de las capacidades y recursos de la administración local.

Deslizamiento: conjunto de movimientos descendentes, a diferentes velocidades, de un volumen de roca y/o suelo sobre una o varias superficies de ruptura, bajo la acción de la gravedad, que pueden ser activados por la acción del agua, por sismos o modificaciones realizadas por el hombre a las condiciones de las laderas.

Espectro de respuesta: representación gráfica de los valores máximos de aceleración, velocidad o desplazamiento de osciladores de un grado de libertad para diferentes periodos de vibración.

Factores de amplificación: valor en el cual se modifica la demanda sísmica a causa de los suelos o efectos topográficos, para periodos de vibración cortos (Fa) y otro para periodos de vibración largos (Fv).

Falla: fractura o zona de fractura en rocas a lo largo de la cual los dos lados se han desplazado, uno con relación a otro.

Falla sismogénica: falla en donde se generan sismos de manera recurrente.

Función de transferencia: representación de la respuesta sísmica de un depósito de suelo como medida de la amplificación que ocasiona para diferentes frecuencias de vibración.

Licuación: proceso en el que el suelo se comporta como un fluido denso más que como un sólido húmedo debido al aumento de la presión del agua contenida en el mismo al suceder un evento sísmico, perdiendo así su capacidad portante.

Microtrepidaciones: ensayo geofísico que mide la vibración natural del terreno con sensores tipo acelerógrafos, con este ensayo es posible determinar los periodos de vibración natural de los depósitos.

Microzonificación sísmica: conjunto de actividades necesarias para determinar los niveles de amenaza símica y respuesta sísmica de los terrenos de un área de interés.

Periodo fundamental: tiempo que dura un elemento en hacer una oscilación libre, es función de la rigidez y masa.

Prevención: políticas y acciones que buscan evitar la generación de nuevos riesgos.

Relación espectral: representación de la respuesta sísmica de un depósito de suelo como medida de la amplificación que ocasiona para diferentes periodos de vibración.

Resonancia: aumento de la amplificación por la coincidencia de los periodos de vibración del medio incidente o suelo con el periodo de vibración del elemento o edificación.

Riesgo: conjugación de la amenaza, la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta de la sociedad. Cuanto mayor sean la amenaza y la vulnerabilidad, y menor sea la capacidad de respuesta, mayor es el riesgo.

Vulnerabilidad: característica propia de un elemento o grupo de elementos expuestos a una amenaza, relacionada con su incapacidad física, económica, política o social de anticipar, resistir y recuperarse del daño sufrido cuando opera dicha amenaza.

Zona de subducción: zona larga y angosta en un límite de placas convergentes, donde una placa oceánica desciende insertándose debajo de otra placa; por ejemplo, la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana.

Zona de Benioff: zona estrecha definida por los focos de terremotos, de un espesor de unas decenas de kilómetros, que desciende desde la superficie bajo la corteza terrestre.

Zonificación geotécnica: representación geográfica de áreas de homogéneo comportamiento geotécnico, es decir que guarden similitud de materiales y espesores.

Zonificación respuesta sísmica: representación geográfica de áreas de homogéneo comportamiento ante las ondas sísmicas, es decir que tengan similar amplificación y respuesta espectral.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

La Coordinación de Investigación y Desarrollo del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias FOPAE, tiene a cargo adelantar diferentes actividades para la Gestión Integral del Riesgo, específicamente en la componente de Identificación del Riesgo se realizan estudios técnicos que mejoren nuestro conocimiento frente a las amenazas naturales y antrópicas no intencionales. Bajo la anterior línea de trabajo se ha desarrollado el estudio de actualización y sistematización de escenarios de daño por terremoto para Bogotá, el cual brinda a la ciudad de una herramienta versátil que permite estimar los posibles daños a las edificaciones y líneas vitales y las posibles afectaciones a la población para varios escenarios de amenaza con diferentes intensidades sísmicas.

El estudio de actualización y sistematización de escenarios de daño por terremoto para Bogotá se desarrolló por fases, el presente estudio corresponde a la segunda fase la cual se consolida en tres partes, el primero tomo muestra el enfoque conceptual y metodologías de evaluación aplicadas, el segundo tomo corresponde al informe de ingeniería del software SEDAR (Sistema de Evaluación de Daños para Análisis de Riesgo), y en el tercer tomo se presentan los análisis de la información y de los resultados obtenidos.

El capítulo uno del presente tomo en primera instancia enmarca a la cuidad de Bogotá en la problemática del riesgo sísmico y relaciona los estudios realizados con el tema, a partir de la revisión de los antecedentes se definen las principales necesidades que justifican realizar el proyecto y así definir los objetivos y alcance del estudio que finalmente se conllevan al marco lógico de actividades en el cual se desarrolló el mismo.

1.1 ANTECEDENTES

La ciudad de Bogotá de acuerdo con el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS, 2009), se localiza en una zona de amenaza sísmica intermedia, con una aceleración máxima probable Aa de 0.15 g para un periodo de retorno de 475 años. Las principales fuentes sismogénicas que dominan la amenaza sísmica en la ciudad según este estudio en orden son Frontal cordillera oriental, Benioff y Salinas. Los datos históricos indican que en la ciudad tres sismos han causado daños (1785, 1827 y 1917) cuyos epicentros han sido localizados en el Páramo de Chingaza (Cundinamarca), Timaná (Huila) y Páramo de Sumapaz (Cundinamarca), respectivamente. Recientemente, el sismo de Tauramena ocurrido el 19 de enero de 1995 y de Quetame el 24 de mayo de 2008 fue consecuencia del fracturamiento en el sistema Frontal de la Cordillera Oriental, con magnitudes Ml de 6.5 y 5.7, a una distancia de 130 y 40 km produjeron en Bogotá fracturas en muros y otros daños menores.

Por otro lado, la ciudad presenta un desarrollo heterogéneo de sus construcciones, debido principalmente a que el primer código de construcción sismorresistente fue del año 1984, el cual fue posteriormente actualizado en el año 1998. Además, las condiciones socioeconómicas de la mayoría de los habitantes de la ciudad han llevado a que las viviendas no sean sismorresistentes. Teniendo en cuenta que en la ciudad se encuentra las principales entidades del gobierno nacional, regional y distrital, así como las industrias de producción, bienes y servicios más importantes del país, la posible afectación en estas puede llegar a causar un gran impacto en el desarrollo del país. Con base en el panorama anterior la ciudad de Bogotá presenta un alto grado de vulnerabilidad sísmica, entendido como una baja capacidad de resistir por sus características estos elementos la amenaza que en este caso corresponden a las acciones de un sismo de considerable energía.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario plantear escenarios de daño, que consisten básicamente en proponer panoramas hipotéticos, de acuerdo con los eventos sísmicos probables, que presenten áreas afectadas según las características de las construcciones, edificaciones y líneas vitales, número de afectados (heridas y víctimas) diferenciadas si el evento ocurre de día o de noche, pérdidas económicas directas, entre otros. Este tipo de escenarios son un insumo fundamental para enfocar estrategias de reducción del riesgo, como por ejemplo orientar el ordenamiento territorial, mejorar la percepción del riesgo existente, orientar los planes de respuesta a emergencias, y soporte de los planes de rehabilitación y reconstrucción.

Esta problemática ha llevado a que se adelanten desde hace varios años diversas actividades en torno a la gestión general del riesgo sísmico del área urbana de la ciudad. Con anterioridad a este proyecto se han realizado estudios que han involucrado temas similares como el Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (Ingeominas & Uniandes, 1997), el Estudio para la Prevención de Desastres en el Área Metropolitana de Bogotá (JICA, 2002) y el Estudio de Escenarios de Riesgo y Pérdida por Terremoto para Bogotá (Uniandes, 2005).

En general, cada uno de los estudios relacionados anteriormente presenta un panorama del riesgo sísmico de la ciudad, los cuales han servido para promover los planes de prevención y atención de emergencias. Con base en ellos se desarrolló el Plan de Respuesta por Terremoto, PRT, con las entidades del Sistema Distrital de Prevención y Atención de Emergencias, SDPAE, el cual pretende fortalecer a las entidades del sistema en los temas de prevención y atención en el caso de ocurrir un terremoto.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Después de varios años trabajando en el tema de gestión integral del riesgo sísmico, se ha detectado una serie de necesidades y aspectos que deben contemplar los estudios de escenarios de daño por terremoto, dentro de los cuales se destacan los siguientes aspectos:

- Debido al rápido desarrollo de la ciudad y el conocimiento de nuevos elementos sobre amenaza, vulnerabilidad y riesgo, es necesario establecer escenarios de daños acordes con la Bogotá actual, garantizándose de alguna manera que como procesos dinámicos sea producto de actualización a lo largo del tiempo según el eventual cambio de las condiciones en el Distrito Capital, ya sean estos originados por la modificación en la vulnerabilidad de la infraestructura, la población o sencillamente por la expansión del perímetro urbano entre otros factores.

- La reducción de la vulnerabilidad sísmica se hace evidente a través de los programas de reforzamiento de puentes vehiculares y peatonales (rutas de transmilenio por ejemplo), edificaciones indispensables, hospitales, escuelas, entre otras. Así mismo el crecimiento en áreas subnormales de la ciudad y la continuidad de la construcción informal, imponen mayores vulnerabilidades. De allí la necesidad de contar con un sistema dinámico de cálculo de escenarios de daños.

- Es necesario mejorar los algoritmos empleados para identificar de la base de datos catastral las características estructurales de las edificaciones, información indispensable para estimar la vulnerabilidad sísmica.

- El estudio de Uniandes de 2005 no contempló efectos colaterales, tales como deslizamientos, licuación de terrenos, fallas de represas o jarillones que desencadenen posibles inundaciones y la ocurrencia de incendios por fallas en las redes de suministro de gas domiciliario o en el sector industrial. Los cuales dependiendo de la magnitud del evento pueden llegar a generar daños importantes.

- La actualización de la Microzonificación Sísmica de Bogotá mejoró considerablemente la definición de las zonas de comportamiento sísmico homogéneo, por lo cual es necesario ajustar el escenario de daños a los nuevos valores de amenaza y zonas de comportamiento sísmico.

- La implementación de la telemetría en la Red de Acelerógrafos de Bogotá, RAB, puede llegar a identificar en un breve tiempo las características de un movimiento fuerte sentido en la ciudad, lo cual puede articularse automáticamente para de forma aproximada estimar los efectos producidos por el evento.

- Los planes de respuesta por terremoto y de recuperación, así como las entidades del Sistema Distrital de Prevención y Atención de Emergencias, SDPAE, requieren de un escenario de daños por terremoto que represente las condiciones actuales en que está la ciudad.

- Se requiere un sistema abierto para la Entidad, donde todos los métodos, desarrollos y resultados se encuentren totalmente documentados y los soportes de información, código fuente y bases de datos sean propiedad del FOPAE, lo cual facilitará los posteriores análisis y mejoras que se deseen hacer al sistema.

Todos los anteriores aspectos llevan a la necesidad de adelantar una serie de trabajos y actividades tendientes a actualizar los estudios de riesgo sísmico de la ciudad.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo general del estudio es diseñar e implementar un sistema dinámico de cálculo que permita evaluar los posibles daños a las edificaciones y líneas vitales y las posibles afectaciones a la población por la ocurrencia de un sismo de gran magnitud. Los objetivos específicos de esta fase del estudio se resumen a continuación.

- Concebir un enfoque conceptual y metodológico para desarrollar el sistema de evaluación de daños para análisis de riesgo SEDAR.

- Desarrollar y/o adaptar un método para definir escenarios de amenaza sísmica con base en los resultados de estudios de amenaza sísmica de Colombia y la zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá.

- Desarrollar y/o adaptar metodologías de evaluación de vulnerabilidad sísmica.

- Desarrollar y/o adaptar metodologías de evaluación de daños a edificaciones y líneas vitales.

- Desarrollar y/o adaptar metodologías de evaluación de efectos colaterales, licuación y deslizamiento.

- Desarrollar y/o adaptar metodologías de evaluación de afectaciones a la población y pérdidas económicas directas

- Actualizar la información requerida y solicitar la faltante para consolidar las bases de datos información recopilada.

- Desarrollar un software que permita evaluar la vulnerabilidad y daños en la ciudad para determinados eventos sísmicos a partir de la información recopilada y los métodos seleccionados.

- Realizar los análisis de la información recopilada que describe la amenaza sísmica y las características de los elementos expuestos de la ciudad.

- Realizar los análisis de los resultados de vulnerabilidad y daños obtenidos para cada uno de los escenarios de amenaza definidos y en cada tipo de elemento expuesto.

1.4 ALCANCE

El alcance del proyecto está relacionado directamente con la información recopilada, además el nivel de detalle que se logre dependerá de varios aspectos como: la cantidad y calidad de los datos, la escala de trabajo, las unidades de análisis definidas (predio, manzana, sector, etc.) y las limitaciones propias de los modelos empleados, entre otros.

El software desarrollado pretenderá ilustrar la magnitud de los posibles daños por un terremoto de cierta Magnitud a una distancia del centro de la ciudad que sea representativo de una fuente sísmica y probabilidad de ocurrencia determinada, abarcando en la medida de lo posible todo el sector urbano y rural de la ciudad que cuente con información suficiente para aplicar los modelos.

Los resultados del proyecto no reemplazan los análisis de vulnerabilidad sísmica y estudios detallados para evaluar el riesgo sísmico de estructuras indispensables y líneas vitales. Sin embargo, los resultados servirán para identificar los sectores en mayor riesgo de modo que las entidades a cargo de la infraestructura indispensable de la ciudad puedan priorizar sus planes de mejoramiento y adecuación sismo-resistente.

Se realizará en una etapa posterior a la ejecución de este estudio la divulgación de los resultados y la retroalimentación de que haya lugar con base en las discusiones de los resultados, así mismo por ser un software desarrollado totalmente en la entidad deberá ser mantenido y actualizado conforme los requerimientos que sean necesarios.

1.5 MARCO LÓGICO

La segunda fase del proyecto se desarrolló siguiendo un marco lógico de actividades acorde con las necesidades planteadas en la propuesta de trabajo y los avances obtenidos en la primera fase del proyecto, luego para abordar los objetivos del estudio se plantean cinco actividades generales como se resumen a continuación.

- Revisión de estudios y metodologías: un primer paso para desarrollar el proyecto consiste en la revisión de los principales antecedentes relacionados con el objetivo del proyecto, esta actividad demanda de una exhaustiva investigación de metodologías desarrolladas para afrontar los diferentes temas del proyecto, con ello se logró definir con mayor certeza el alcance del proyecto, así como la información necesaria para el desarrollo de los métodos seleccionados para ser aplicados.

- Recopilación de información: se realiza la recopilación de la información necesaria conforme las metodologías de evaluación revisadas, esta actividad demanda además de la gestión para conseguir la información, la organización de esta en bases de datos y el procesamiento primario para su posterior empleo.

- Desarrollo de los métodos para la evaluación de vulnerabilidad, daños, efectos colaterales, afectaciones y pérdidas: una vez se cuente con una visión clara de las metodologías aplicables y la información disponible, se procede a desarrollar, adaptar o adoptar los métodos detallados en forma de algoritmo de cálculo paso a paso para que puedan ser implementados o sistematizados.

- Desarrollo del sistema de cálculo: tras contar con los requisitos funcionales de cada uno de los algoritmos de los métodos seleccionados para el proyecto se evalúan las diferentes opciones para desarrollar el sistema teniendo en cuenta la plataforma tecnológica de la entidad, la información que se maneja y bases de datos, los métodos que se quieren implementar y la disponibilidad de software.

- Análisis de resultados y recomendaciones para futuros desarrollos: se analizan los resultados obtenidos por el sistema de cálculo y se elaboran las recomendaciones para la gestión integral del riesgo sísmico así como para estudios posteriores.

CAPÍTULO 2

2 ENFOQUE CONCEPTUAL DEL SISTEMA

Para garantizar el éxito de un estudio y que este tenga una visión a largo plazo es necesario contar con un enfoque conceptual claro del problema que estamos abordando, de tal manera que se pueda esquematizar un problema complejo por las partes que lo definen para así poder abordar la solución óptima de acuerdo a los recursos disponibles.

En este sentido, se plantea el enfoque conceptual con el cual se va desarrollar el proyecto, este ha sufrido algunos cambios con respecto a la versión inicialmente planteada en la formulación del estudio, dado que a la luz del conocimiento adquirido en la primera etapa del proyecto, permitió mejorar dicho enfoque conceptual para el sistema. De esta forma se presenta a continuación la definición del problema al que nos afrontamos, luego se ilustra el enfoque conceptual adoptado para realizar la valoración de riesgo sísmico, del cual una es la evaluación de un escenario de daños, por lo que finalmente se explican cada una de las componentes que integran una evaluación de escenario de daños.

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La ocurrencia de un evento sísmico desencadena una serie de acontecimientos o eventos que se ilustran de manera esquemática en la **Figura 2.1**. Cuando las ondas sísmicas llegan a un centro poblado los elementos que la componen experimentan o responden de una manera particular a las ondas, esta respuesta puede llegar a ocasionar daños cuando supera su capacidad, una vez ocurren los daños iníciales por efecto directo de las ondas estos pueden ocasionar efectos secundarios que se pueden llegar a propagar y producir más daños, esta secuencia de acontecimientos se resumen en la **Figura 2.2**, los tipos de análisis que se realizan se pueden llegar a clasificar en análisis de las amenazas, vulnerabilidad y riesgo como se muestra en la **Figura 2.3**.

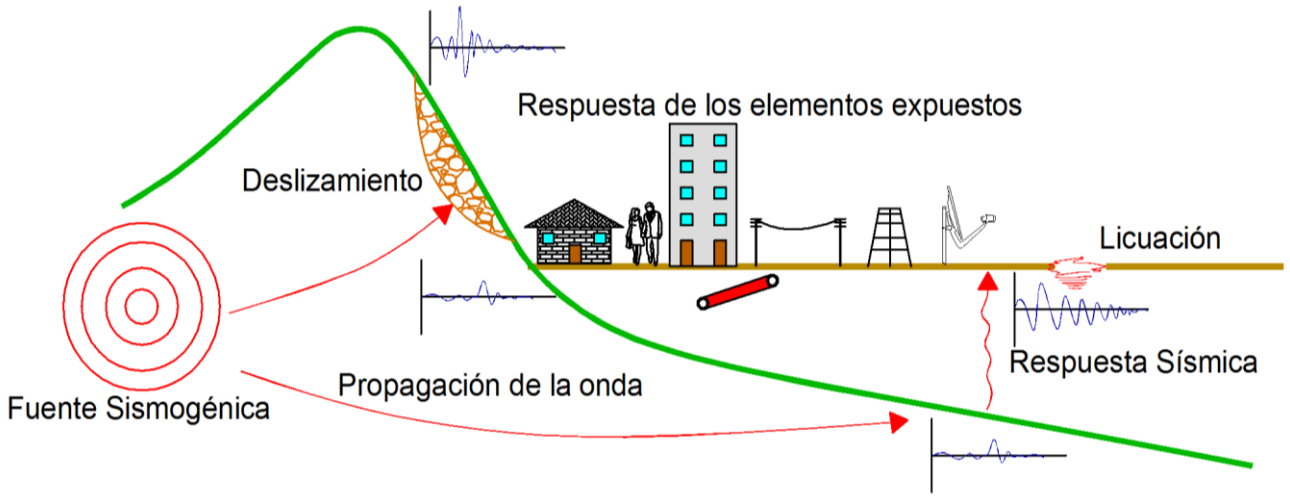

Figura 2.1. Definición del problema

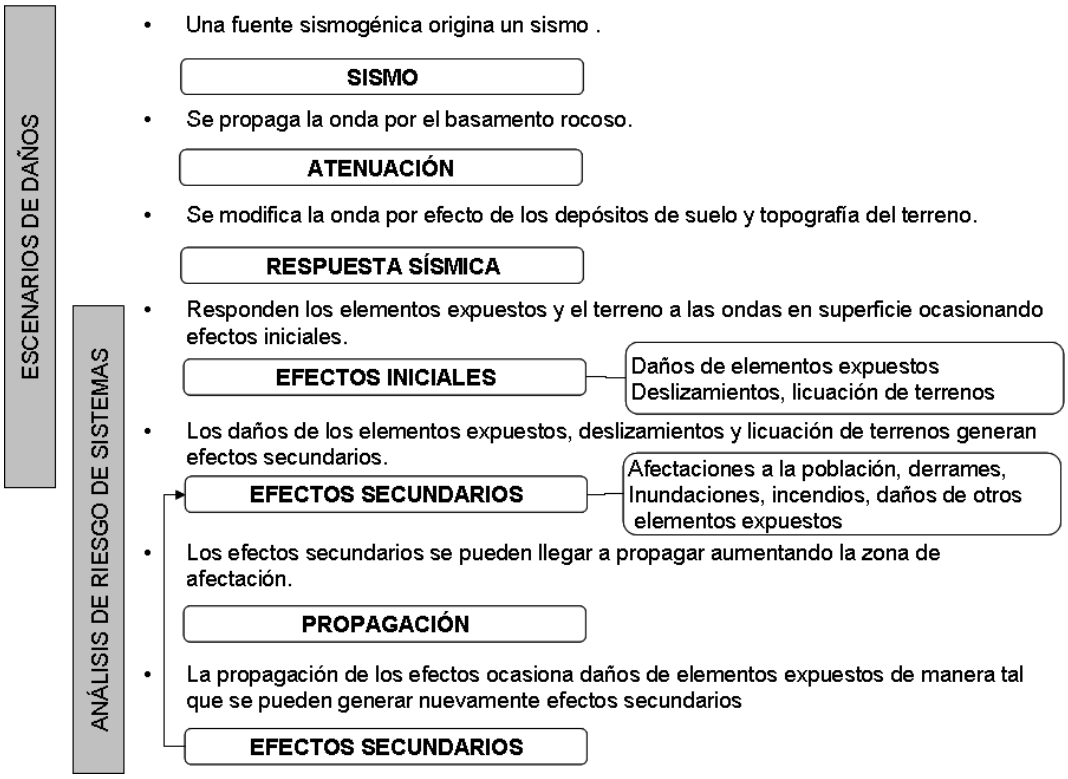

Figura 2.2. Cadena de acontecimientos que definen el problema



Figura 2.3. Tipos de análisis que se desarrollan para afrontar el problema

Es importante destacar que los resultados de riesgo en términos de daños y afectaciones del primer análisis de amenaza y vulnerabilidad, para el siguiente análisis se convierten en las amenazas, es decir que las consecuencias iniciales de un terremoto son detonantes o las causas de otros análisis de riesgo. A manera de ejemplo, para ilustrar la situación,

imaginémonos que ocurre un sismo en la falla frontal (sismo), se propaga la onda sísmica por el basamento rocoso (atenuación), por efecto de los suelos y topografía se amplifica (respuesta sísmica), las ondas en superficie mueven los edificios y le ocasionan daños a las estructuras (repuesta de los elementos – efectos iniciales), el daño de los edificios se convierte en una amenaza potencial para sus residentes y entorno, si llega a colapsar alguna estructura afectaría una zona de impacto (propagación) produciendo daños a otros edificios, redes, afectados y victimas (efectos secundarios), los efectos secundarios se pueden propagar y volver a generar daños, lo cual se puede repetir varias veces.

El anterior panorama describe de manera general los efectos directos que ocasiona un terremoto, adicional a toda la cadena de acontecimientos hay implicaciones indirectas en la sociedad, economía y el desarrollo de la ciudad, las cuales son aún más difíciles de evaluar. Para fines del proyecto de escenarios de daños es imprescindible ilustrar bajo este enfoque el alcance de las evaluaciones que realiza el estudio, las cuales se concentran en la cuantificación de los efectos iníciales y algunos secundarios. Para abarcar las evaluaciones de efectos secundarios es necesario estudiar varios tipos de detonantes (amenazas) por ejemplo: colapso de estructuras, derrames de aguas residuales o líquidos peligrosos, incendios, etc., la manera que se propagan y la vulnerabilidad de los elementos expuestos frente a este tipo de amenazas, siendo entonces un problema aún más complejo que se enmarca en los estudios de análisis de riesgo de sistemas urbanos.

2.2 METODOLOGÍA DE VALORACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

Los análisis de riesgo sísmico a nivel mundial se realizan desde hace ya varias décadas, las diferentes metodologías desarrolladas identifican diferentes componentes que entran a ser valorados en dichas evaluaciones. En general se ha llegado a un consenso para estimar el riesgo sísmico a partir de tres componentes básicas que son la amenaza, la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta, de este modo el riesgo sísmico se define a partir de la **Ec. 1**.

$$\textbf{Ec. 1.}\quad R \approx \frac{A \cdot V}{CR}$$

La amenaza (A) se define usualmente en términos de la probabilidad de ocurrencia, sin embargo también se puede determinar de manera determinística para una fuente sísmica particular, el valor de la amenaza será función principalmente del ambiente sismotectónico de la zona y las condiciones locales de los suelos. Además de los efectos directos sobre una ciudad por la propagación de las ondas de un sismo, éste puede desencadenar otros efectos como deslizamientos, licuación de terrenos, inundaciones, etc., o a consecuencia de los daños de las estructuras pueden ocurrir incendios, de tal manera que la amenaza debería involucrar tanto efectos directos como indirectos (colaterales).

La vulnerabilidad (V) de los elementos expuestos (edificaciones, líneas vitales, población) representa la capacidad del elemento para resistir daño o afectación frente a la amenaza, es decir que un elemento con vulnerabilidad baja es capaz de resistir altos niveles de amenaza, en cambio un elemento con vulnerabilidad alta tiene poca resistencia para absorber la demanda de la amenaza, por lo que puede sufrir daños fácilmente.

Finalmente, la capacidad de respuesta (CR) para efectos del presente estudio hace referencia a la capacidad de la sociedad, instituciones y población, de reaccionar adecuadamente en los instantes de emergencia y responder al impacto, controlarlo y recuperarse, es decir que una sociedad con alta capacidad de respuesta reflejado en su buena preparación, organización, recursos para atender una emergencia, capacidad económica y de gestión para recuperarse, sufrirá un menor impacto que una sociedad con baja capacidad de respuesta, la cual por su falta de preparación, organización, recursos para la emergencia y para recuperarse hacen que el riesgo pueda aumentar.

Las estrategias para reducir el riesgo sísmico bajo el anterior enfoque se pueden agrupar en: iniciativas para la reducción de la vulnerabilidad de los elementos expuestos y gestión para el mejoramiento de la capacidad de respuesta de la sociedad.

En la **Figura 2.4** se ilustran los diferentes componentes y elementos expuestos que se tienen en cuenta para las evaluaciones de riesgo sísmico. La amenaza considera tanto la acción de las ondas sísmicas (respuesta sísmica) como los deslizamientos y licuación de terrenos (efectos colaterales); la vulnerabilidad se evalúa para edificaciones - normales e indispensables y líneas vitales – redes y estructuras esenciales; al conjugar la amenaza y la vulnerabilidad se obtienen indicadores de daño, afectaciones a la población y pérdidas económicas, lo cual se conoce como escenario de daño. La capacidad de respuesta de la sociedad, instituciones y población, se evalúa por medio de indicadores.

Finalmente, se escoge una unidad de análisis de interés para integrar los resultados e indicadores mediante técnicas de evaluación multicriterio para obtener un índice de riesgo sísmico, el cual se puede interpretar más fácil que los resultados dispersos de las evaluaciones puntuales, este índice sirve para orientar a los tomadores de decisiones en la definición y/o mejora de las estrategias de reducción del riesgo sísmico, como por ejemplo los planes de respuesta por terremoto.

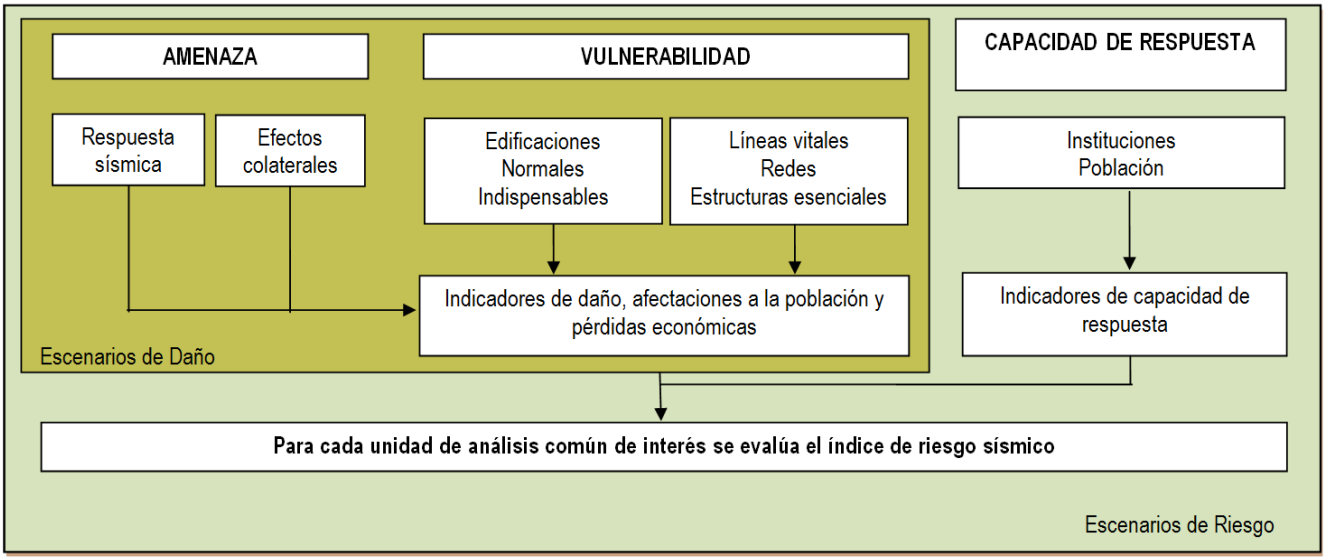

Figura 2.4. Interacción de las componentes del análisis de riesgo sísmico

2.3 METODOLOGÍA GENERAL DE EVALUACIÓN DE DAÑOS POR SISMO

La metodología general propuesta para evaluar los daños mediante el sistema se basa en las componentes y tipos de análisis identificados para afrontar el problema. Básicamente se dividió el problema un cuatro componentes, la primera corresponde al inventario de elementos expuestos, la segunda a la valoración de su vulnerabilidad, la tercera es propiamente la cuantificación de los daños iniciales y la cuarta componente es la evaluación de daños secundarios. Estas componentes se aplican para las tres grandes categorías de elementos, edificaciones, líneas vitales y al terrero, considerado como elemento expuesto a sufrir daños como licuación y deslizamiento. De manera esquemática se puede observar en la **Figura 2.5**.

El flujo de información, evaluaciones y resultados será de la siguiente manera: se identifican y localizan los elementos expuestos, edificaciones, líneas vitales y zonas del terreno potencialmente licuables o susceptibles a deslizamientos; los tipos de elementos que cuenten con métodos de evaluación de vulnerabilidad (básicamente vulnerabilidad física entendida como la resistencia que ofrece para soportar daño) se caracterizan y evalúan; luego con base en los resultados de vulnerabilidad o directamente a partir de las características del elemento y tomando los niveles de amenaza sísmica que define el escenario considerado se estiman los daños iniciales de las edificaciones, líneas vitales y del terreno (zonas que presentan licuación y deslizamientos); los resultados de los daños iniciales de las edificaciones y de las líneas vitales se corrigen o mayoran de acuerdo con los daños del terreno evaluados en la anterior etapa con el fin de obtener los daños

totales que incluyan la licuación del terreno y deslizamientos. Finalmente se calculan la afectación a la población y un estimativo de las pérdidas económicas directas de las edificaciones.

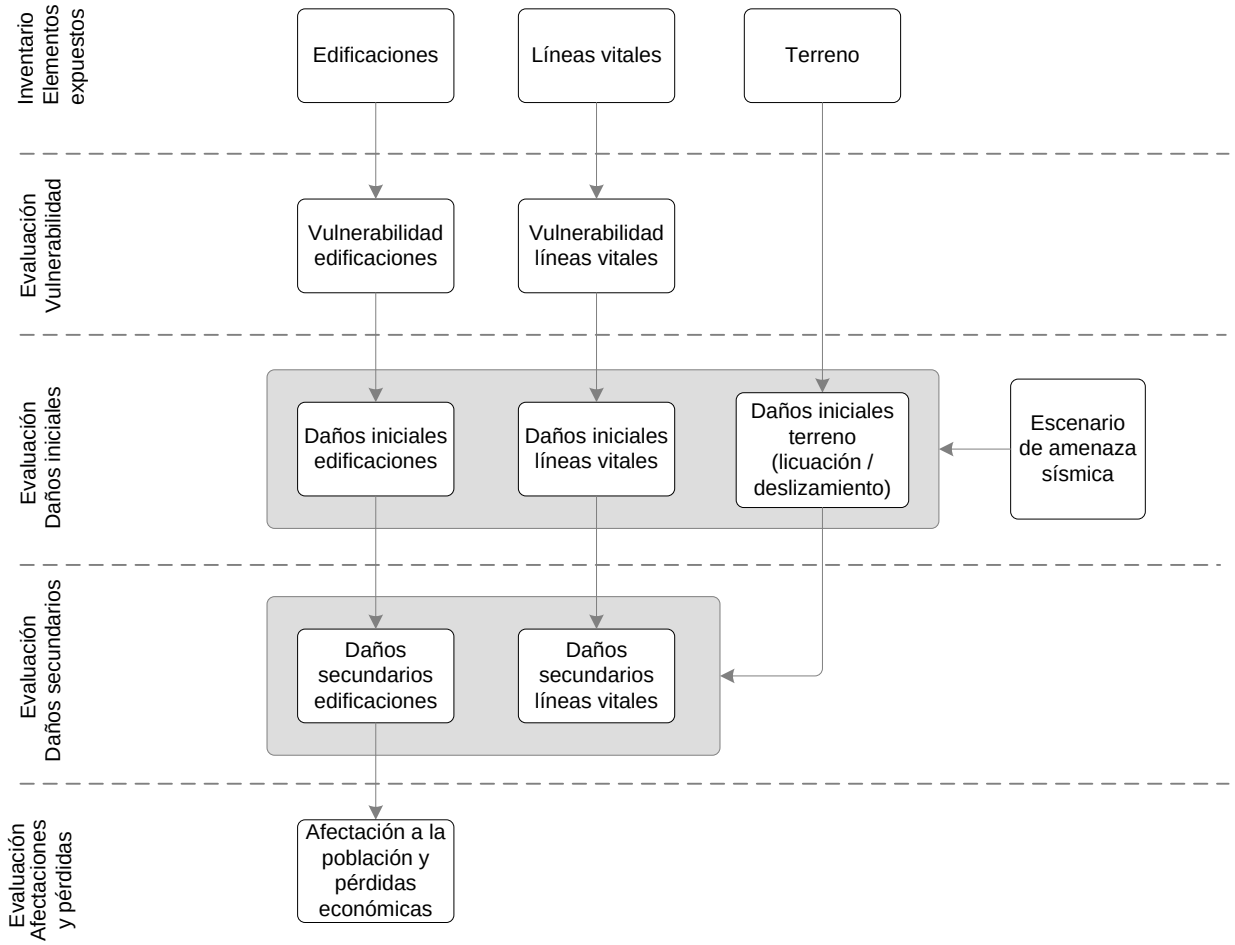

Figura 2.5. Metodología de evaluación de vulnerabilidad y daños por sismo incluyendo efectos colaterales

CAPÍTULO 3

3 ESCENARIOS DE AMENAZA SÍSMICA

El primer componente que requiere el sistema de cálculo de escenario de daños son los escenarios de amenaza. Los escenarios de amenaza se definen a partir de los sismos probables (asociados a una tasa de retorno) en términos de magnitud y distancia a la ciudad y su respectiva intensidad sísmica en cada una de las zonas de respuesta sísmica del área de estudio. Para este fin, en este capítulo ilustra la metodología desarrollada, la información que se tuvo en cuenta de los estudios de amenaza sísmica nacional y el modelo desarrollado para estimar varios parámetros de intensidad sísmica asociados a cada zona de respuesta sísmica.

3.1 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

La metodología desarrollada para definir y caracterizar los posibles escenarios de amenaza sísmica para el estudio consistió en dos actividades generales, la definición de los sismos probables y la modelación de la respuesta sísmica de los terrenos para varios niveles de amenaza.

Para desarrollar la primera actividad se recopiló la información disponible de los estudios de amenaza sísmica de Colombia y demás publicaciones sobre la actividad sísmica en Colombia, con base en estos estudios se identifican y caracterizan las fuentes sismogénicas que pueden producir sismos que afecten a la ciudad, combinado con los antecedentes encontrados de sismos históricos se definen los sismos probables que pueden ocurrir con determinada Magnitud y a cierta Distancia.

Una vez definido el sismo probable (evento hipotético) es necesario modelar la respuesta sísmica de los terrenos particularmente para dicho evento. Para ello se tomó como base los resultados de los estudios de microzonificación sísmica de Bogotá y referencias bibliográficas que recomendaran la forma de caracterizar en términos de parámetros de intensidad sísmica la respuesta de los terrenos de la ciudad. De este modo se pueden obtener niveles de amenaza para cada una de las zonas de respuesta sísmica de la ciudad

Es importarte resaltar que se deben definir varios parámetros de intensidad sísmica, desde los más básicos como la Intensidad de Mercalli Modificada hasta parámetros espectrales de aceleración, velocidad y desplazamiento, ya que los diferentes modelos empleados para estimar daños requerirán un parámetro especifico para su aplicación.

3.2 SISMOS PROBABLES

Un punto muy importante en el proceso de estimar los daños, afectaciones y pérdidas es la correcta definición de los sismos probables. Por un lado estos sismos deben ser consistentes con los resultados de los estudios de amenaza sísmica y por otro lado deben ser representativos de los eventos ocurridos en el pasado o sismos históricos.

3.2.1 Revisión de la amenaza sísmica nacional

Los estudios generales de amenaza sísmica de Colombia definen para las ciudades capitales la amenaza total y desagregada por fuentes sismogénicas. Esta información es primordial para definir el potencial de cada fuente sismogénica y definir así en términos de magnitud y distancia los eventos probables que pueden presentarse y afectar a la ciudad.

Con el fin de actualizar las Normas Colombianas de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (AIS 2010), el comité AIS-300 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica de Colombia realizó el “Estudio General de Amenaza Sísmica de

Colombia 2009". De igual manera INGEOMINAS en convenio con la Universidad Nacional adelantó el "Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia".

El estudio de AIS calcula la amenaza sísmica con las ecuaciones de atenuación modificadas de Campbell (strike) y Campbell (reverse), para ajustar los datos al caso colombiano, y emplearlas para fallas de tipo cortical, subducción y Benioff. De la misma manera se emplearon las ecuaciones propuestas por Gallego, las cuales fueron obtenidas específicamente para el caso colombiano. Para el país se identificaron un total de 35 fuentes sísmicas que contribuyen a la amenaza, cuyas curvas de amenaza de Bogotá se muestran en la **Figura 3.1**.

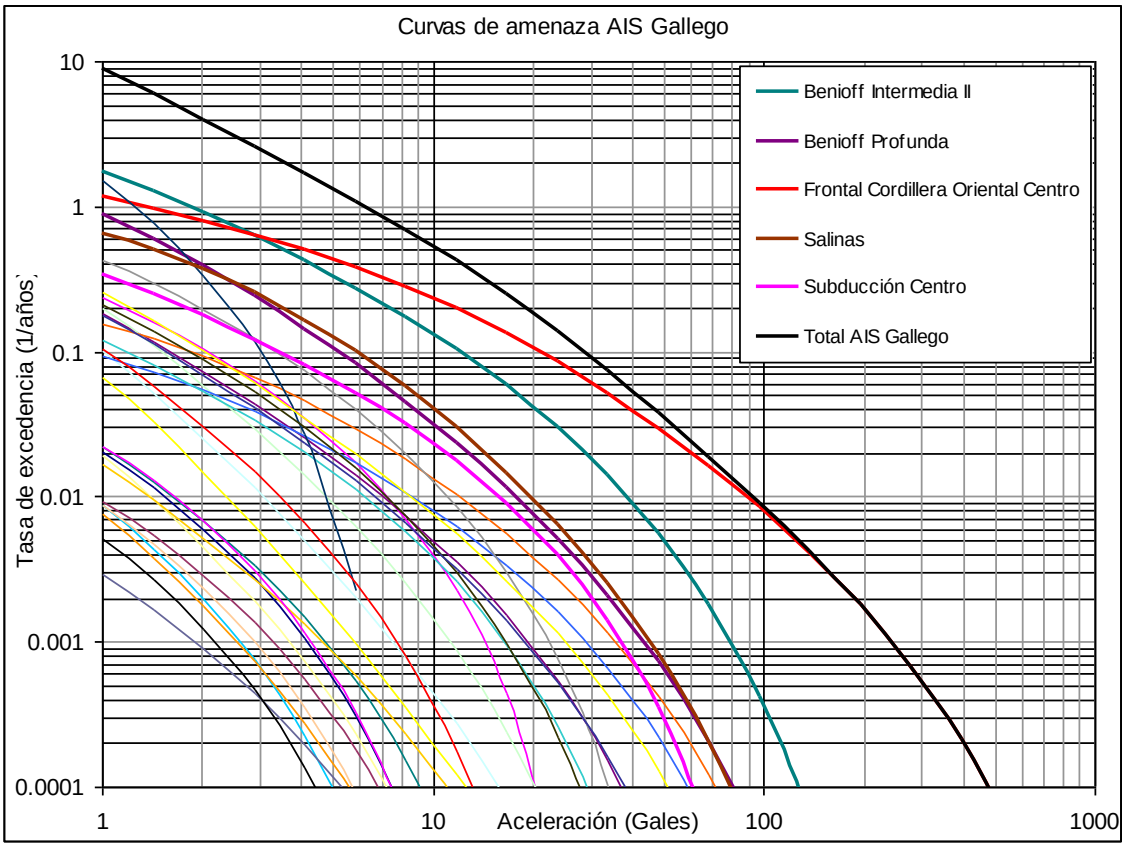

Figura 3.1. Curvas de amenaza para Bogotá curvas de Gallego. (AIS, 2009)

De esas 35 fuentes se identificaron 5 fuentes que se constituyen como las de mayor contribución a la amenaza total en Bogotá; Frontal de la Cordillera Oriental Centro, Benioff Intermedia II, Salinas, Benioff Profunda y Subducción Centro, en donde se puede observar que la amenaza en Bogotá está prácticamente controlada por la actividad de la Falla Frontal.

El estudio de Ingeominas-Unal calcula la amenaza sísmica con varias ecuaciones de atenuación de acuerdo con los tipos de fuentes sísmicas. De acuerdo a este estudio, para Colombia se identificaron un total de 48 fuentes sísmicas que contribuyen a la amenaza, 39 de ellas son de tipo cortical, 3 son de tipo subducción, 4 son profundas y se consideraron 2 fuentes de tipo área. De esas 48 fuentes se identificaron 5 fuentes que se constituyen como las de mayor contribución a la amenaza total en la ciudad de Bogotá, y corresponden a: Guaicaramo Servitá, Quetame Santa María Soápaga, Honda Suarez, Algeciras Altamira y Benioff, de las cuales la amenaza está prácticamente controlada por la actividad de Quetame Santa María Soápaga. En la **Figura 3.2**, se observan las curvas de amenaza correspondientes a cada una de estas fuentes y la amenaza total.

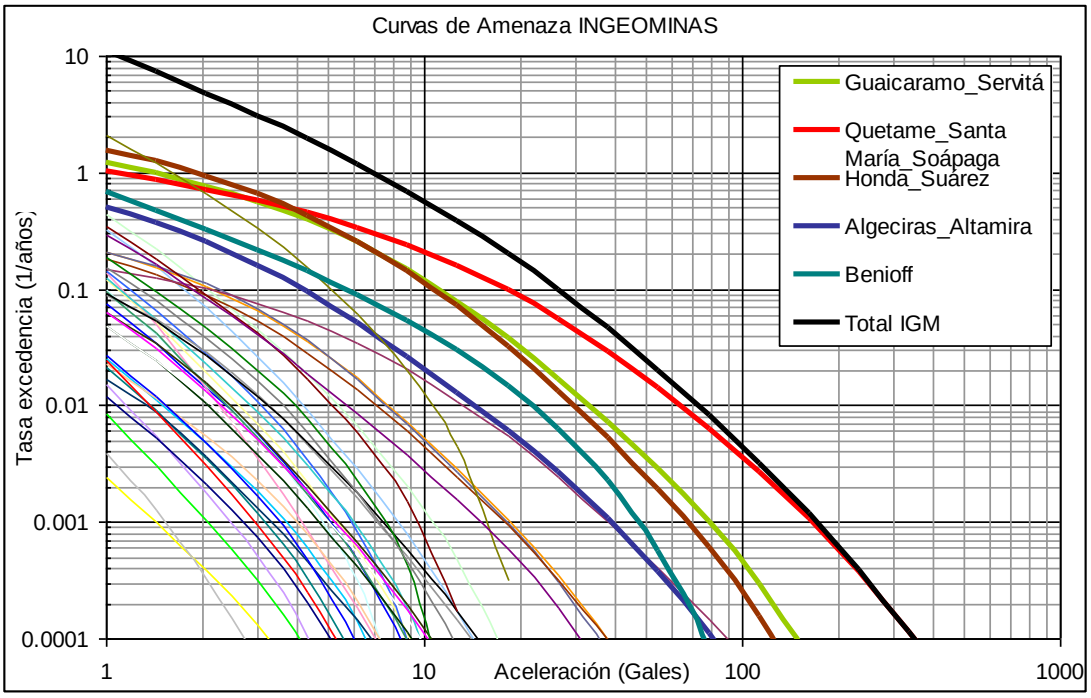

Figura 3.2. Curvas de amenaza de distintas fuentes para Bogotá. (Ingeominas & Unal, 2010)

La **Figura 3.3** presenta los Espectros de Amenaza Uniforme obtenidos por Ingeominas-Unal IGM3, AIS Campbell_García y AIS Gallego para un punto de referencia en la Plaza de Bolívar. Los resultados de los modelos IGM3 y AIS Campbell-García son muy similares. Por otro lado, el espectro obtenido mediante AIS, Gallego, tiene como principal característica, el hecho que genera aceleraciones espectrales más altas para períodos mayores.

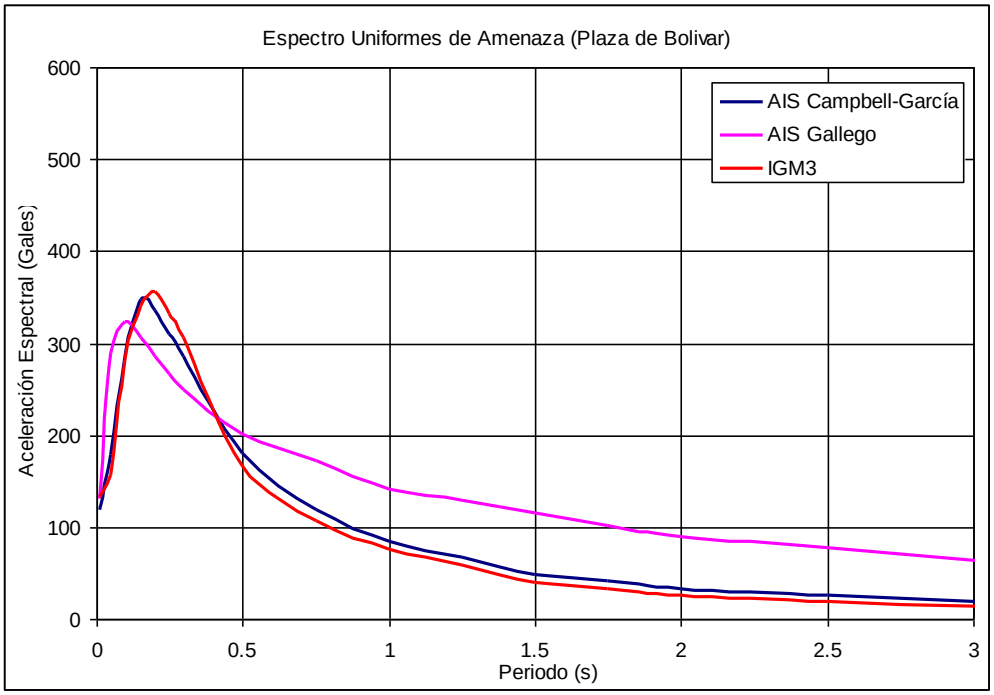

Figura 3.3. Comparación de Espectros de Amenaza Uniforme obtenidos por AIS e Ingeominas -IGM

Finalmente los resultados de estos estudios sirvieron para actualizar el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 el Mapa de Zonificación Sísmica de Colombia que se muestra en la **Figura 3.4**. De acuerdo a esta zonificación sísmica la ciudad de Bogotá (zona urbana) se encuentra en Amenaza Sísmica Intermedia.

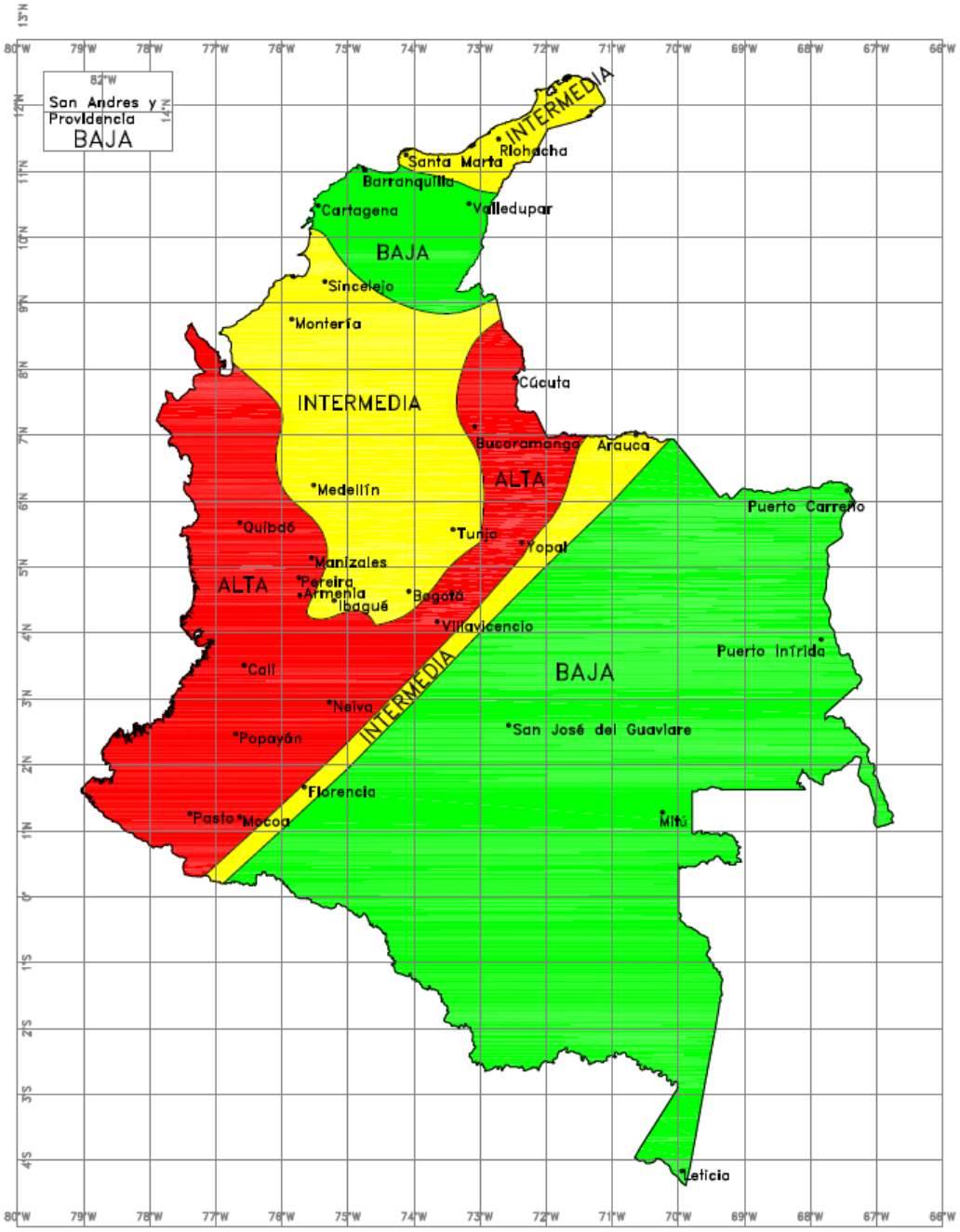

Figura 3.4. Mapa de zonificación sísmica de Colombia (AIS, 2009)

Adicional a la zonificación de amenaza sísmica publicada en el Reglamento NSR-10, se presentan mapas de amenaza para varias tasas de retorno, como 475 años denominado diseño, 225 años asociado a una condición de seguridad limitada y 31 años correspondiente a umbral de daño. Estos mapas de amenaza serán empleados para asociar las afectaciones generales que pueden llegarse a causar por un sismo.

3.2.2 Revisión de sismos históricos

La ciudad de Bogotá ha sido afectada históricamente por la actividad sísmica de la región, registros del siglo XVII a la fecha ratifican que se han sentido en Bogotá por lo menos nueve sismos con intensidad entre VI y VIII en la escala de Mercalli Modificada (desde daños leves a daños moderados). En la **Tabla 3.1** se resumen las intensidades percibidas y afectaciones reportadas por los principales sismos históricos en Bogotá.

Año	Epicentro	Magnitud	Distancia a Bogotá (Km)*	MMI en Bogotá	Afectaciones en Bogotá
1616	Cajicá (Cund)	?	40	?	
1644	Chipaque (Cund)	~6	15	VI	Posible licuación en las márgenes del río Tunjuelo
1646	Sogamoso (Boyacá)	?	180	?	
1724	Chita (Boyacá)	~6¾	250	?	
1743	Páramo de Chingaza (Cund)	~6½	35	VII	Afectó la ermita de Guadalupe, relatos hablan de daños "gravísimos" a iglesias y conventos
1755?	Gámeza (Boyacá)	?	200	?	
1785	Páramo de Chingaza (Cund)?	~6¾ - 7¼	60?	VIII	Afectó la ermita de Guadalupe, relatos hablan de la severidad del evento y de los daños
1805	Honda (Tolima)	~6¾	100	?	
1826	Sopo (Cund)	~6¼	30	VII	
1827	Timaná (Huila)	~7¾	350	VIII	Afectó la ermita de Guadalupe
1917	Páramo Sumapaz (Cund)	~7.1	45	VIII	6 muertos, 12 heridos, 400 casas afectadas y 50 colapsadas, daños a la ermita de Guadalupe y de Chapinero
1923	Gachalá (Cund)	~6¾	70	VII	
1928	Chinavita (Boyacá)	~5¾	100	?	
1967	Los Cauchos (Huila)	7.0	200	VI	13 muertos, 100 heridos, 30 inmuebles afectados, daños a la ermita de Guadalupe
1979	El Cairo (Valle)	7.2	180	VI	
1994	Páez (Cauca)	6.8	290	IV	
1995	Tauramera (Casanare)	6.5	130	V	
1999	Córdoba (Quindío)	6.1	180	III	
2008	Quetame (Cund)	5.7	35	V	Causó daños menores en el edificio de la Lotería de Bogotá y algunos desprendimientos de elementos no estructurales y muros

*Distancia a la Plaza de Bolívar, MMI Intensidad de Mercalli Modificada

Tabla 3.1. Sismos históricos sentidos en Bogotá (Dimate et al., 2005 y 2006)

Como se puede observar en la tabla anterior los sismos que han afectado a la ciudad provienen principalmente del sistema de falla Frontal de la cordillera oriental. En cuanto a las intensidades sísmicas reportadas se deben analizar con cuidado, ya que corresponden a interpretaciones realizadas con base en los reportes de daños en periódicos o libros de la época, limitándose a un valor de intensidad general para la zona urbana de ese entonces de la ciudad.

3.3 RESPUESTA SÍSMICA DEL TERRENO

Los estudios de amenaza sísmica nacional ilustran el panorama general de la intensidad de un sismo a nivel de roca o suelo firme. Adicionalmente a lo anterior, hay que tener en cuenta la respuesta sísmica del terreno, suelos y rocas superficiales, la cual puede llegar a modificar notoriamente la intensidad del sismo, este fenómeno se conoce con el nombre de respuesta sísmica o efectos locales. En términos generales la respuesta sísmica es de dos tipos, una se debe al los cambios de rigidez del medio por el que viajan las ondas sísmicas, produciendo amplificación o de-amplificación de la

onda; el otro se ocasiona por el relieve de la superficie, el cual puede producir el rebote y concentración de las ondas sísmicas a lo cual se denomina efecto topográfico. A continuación se resume la zonificación de respuesta sísmica de la ciudad (FOPAE, 2010) y los métodos desarrollados para evaluar los parámetros de intensidad sísmica para varios escenarios de amenaza.

3.3.1 Revisión de la zonificación de respuesta sísmica

Para conocer la respuesta sísmica de los terrenos de Bogotá el FOPAE realizó el estudio "Zonificación de la respuesta sísmica en Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones", el cual abarca las siguientes temáticas: a) modelo geológico - geotécnico que denota la disposición de los materiales y sus propiedades geomecánicas, b) modelo geofísico que ilustra los espesores y características dinámicas de los depósitos, c) interpretación de los registros de red de acelerógrafos que permite medir la respuesta y calibrar las propiedades dinámicas de los depósitos y, d) modelación de la respuesta de sitio que estima los efectos locales de un sismo de gran magnitud.

El modelo geológico – geotécnico (**Figura 3.5**) de la ciudad define cinco zonas geotécnicas, cerros, piedemonte, lacustre, aluvial y llanura de inundación, de las cuales algunas se subdividen de acuerdo con su estratigrafía manteniendo una definición más de carácter geotécnico que geológico.

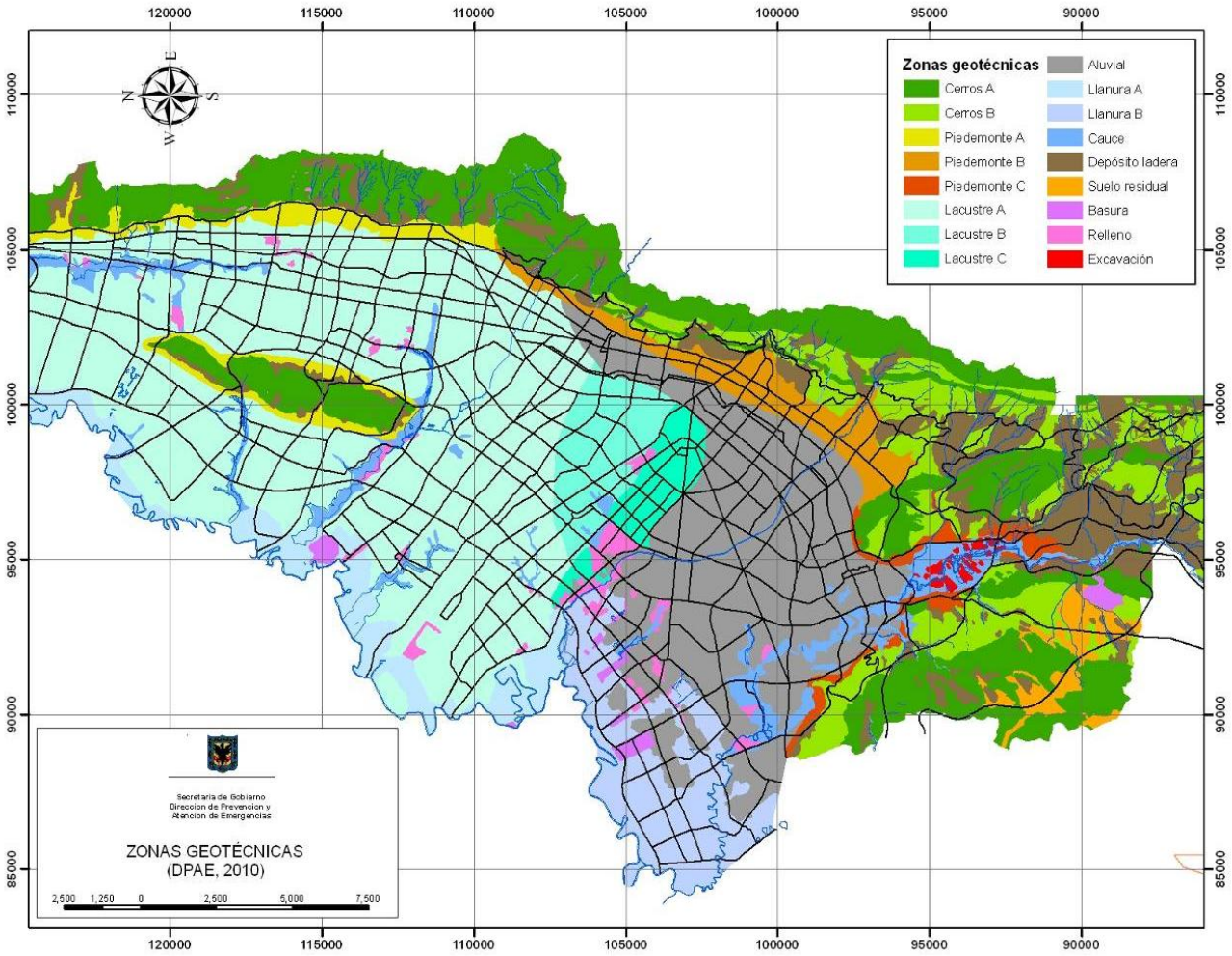

Figura 3.5. Zonas Geotécnicas de Bogotá (FOPAE, 2010)

Mediante el modelo geofísico se estimaron los espesores de los depósitos y la profundidad al basamento rocoso, este modelo muestra la forma en profundidad de la cuenca de la sabana de Bogotá, donde el espesor de los sedimentos varía desde pocos metros en las zonas de piedemonte hasta 500 metros en la parte occidental cerca al río Bogotá, este aspecto tiene gran influencia en la respuesta dinámica.

Los registros de una red de acelerógrafos permiten medir la respuesta y calibrar las propiedades dinámicas de los depósitos, por ello se implementó la Red de Acelerógrafos de Bogotá (RAB) de propiedad del FOPAE. La red cuenta con 30 acelerógrafos digitales marca KINEMETRICS, los cuales fueron distribuidos en toda el área urbana de la ciudad; de estos aparatos, 28 son modelo ETNA y los 2 restantes son modelo K2. El principal evento registrado por la RAB fue el ocurrido el 24 de mayo de 2008 en el municipio de Quetame Cundinamarca, el cual activó todas las estaciones y se obtuvieron registros que permitieron caracterizar la respuesta sísmica. Los valores de aceleración máxima del terreno (Peak Ground Acceleration - PGA) de este sismo se muestran en la **Figura 3.6**, donde se aprecia la correlación con las zonas geotécnicas, puesto que las mayores amplificaciones ocurrieron en las zonas de piedemonte y lacustre, y en menor medida en las zonas de cerros y aluviales.

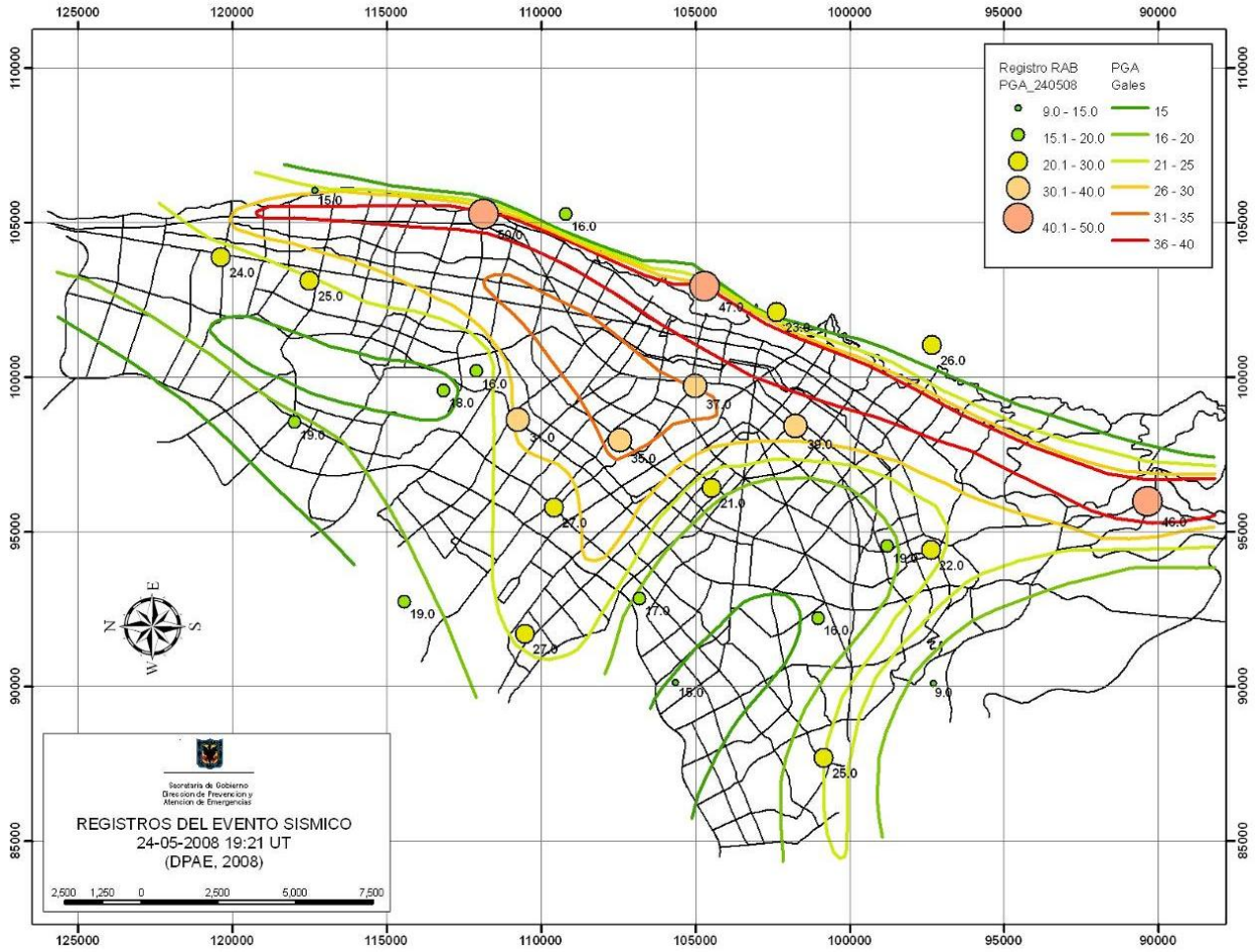

Figura 3.6. Aceleraciones máximas registradas en superficie por el sismo de Quetame (DPAE, 2008)

Mediante la modelación de la respuesta de perfiles unidimensionales y secciones bidimensionales acordes con el modelo geológico, geotécnico y geofísico, con sus propiedades dinámicas de los depósitos que fueron calibradas a partir de los registros de la RAB, se obtuvo la respuesta en superficie para diferentes sismos probables. A partir del análisis de las respuestas obtenidas en la superficie se definieron 15 zonas de respuesta sísmica homogénea y 1 zona de tratamiento

especial (Depósitos de ladera), como se ilustra en la **Figura 3.7**. Las zonas de respuesta sísmica guardan el vínculo con las zonas geotécnicas, destacándose cinco zonas, cerros, piedemonte, lacustre, lacustre-aluvial y aluvial, de las cuales se subdividen las de la zona plana por espesores de depósito. Este mapa define los espectros de respuesta de cada zona que se emplean para el diseño sismo resistente de edificaciones nuevas o el reforzamiento de edificaciones antiguas.

Es importante mencionar que el mapa de zonificación de la respuesta sísmica no se puede categorizar en rangos de amenaza, baja, intermedio o alta, como el mapa nacional de amenaza sísmica, dado que representa la respuesta para todo un rango de periodos de vibración (respuesta espectral), por ende, la intensidad de la amenaza dependerá del periodo de vibración del elemento expuesto. Por ejemplo, un edificio de tres pisos en la zona de piedemonte estará expuesto a mayor intensidad que si estuviera en la zona de lacustre, pero si el edificio es de 20 pisos en la zona lacustre estaría expuesto a mayor intensidad que en la zona de piedemonte, esta dependencia del número de pisos o en términos técnicos del periodo de vibración es la gran diferencia con el mapa de amenaza sísmica nacional, siendo este mucho más preciso al incluir la respuesta sísmica de los terrenos.

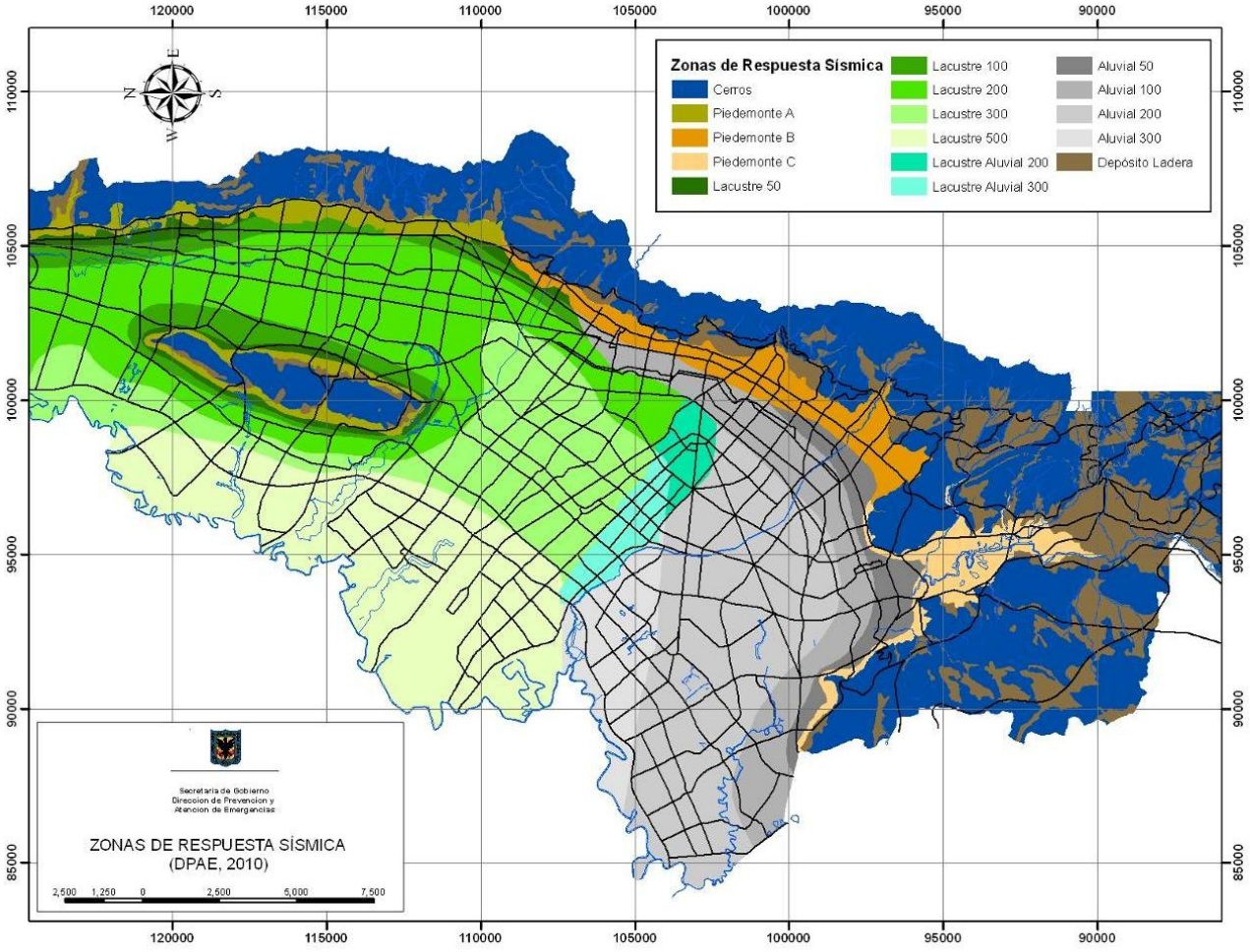

Figura 3.7. Zonas de Respuesta Sísmica (FOPAE, 2010)

3.3.2 Cálculo de parámetros espectrales

La respuesta sísmica de una zona se representa mediante espectros de respuesta que definen la demanda sísmica para varios periodos de vibración (cada elemento expuesto tiene un periodo de vibración propio que es proporcional a su masa y rigidez), los resultados del estudio de Zonificación de la Respuesta Sísmica de Bogotá (DPAE, 2010) da los insumos

necesarios para modelar la respuesta sísmica del terreno para varios niveles de amenaza, de forma esquemática se ilustra en la **Figura 3.8** el procedimiento de cálculo de la respuesta en superficie a partir de espectros uniformes de amenaza y relaciones espectrales de cada zona.

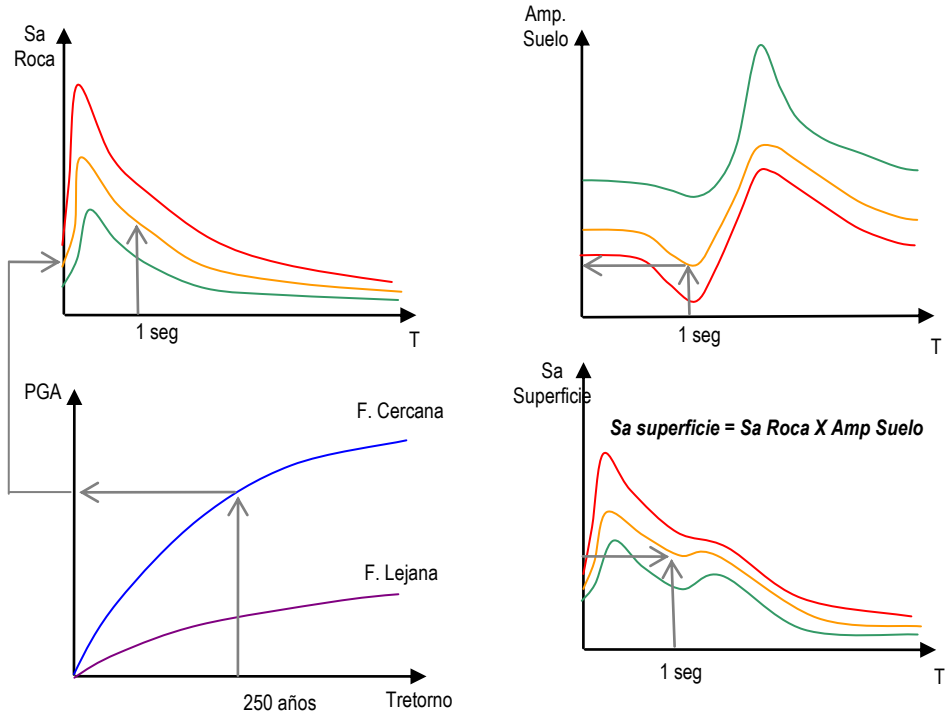

Figura 3.8. Método de evaluación de la respuesta sísmica para propósitos de escenario de daños

Los dos primeros insumos se toman de los estudios de amenaza sísmica de Colombia, por un lado se requieren las curvas de amenaza sísmica de cada una de las fuentes símicas de interés, estas están en términos de aceleración pico del terreno (PGA); el segundo insumo corresponde a los espectros de amenaza uniforme en roca para varios niveles de amenaza.

El tercer insumo son las funciones de transferencia que representen el efecto que produce el suelo o las condiciones topográficas al espectro de amenaza uniforme a nivel de roca, esto se representa mediante las denominadas relaciones espectrales que estiman la amplificación periodo a periodo de una señal de cierto nivel de amenaza, niveles altos de amenaza amplifican menos que los niveles bajos de amenaza por efecto del comportamiento no lineal de los terrenos que al ser sometidos a mayores esfuerzos amortiguan mas y por ende amplifican menos.

Finalmente el modelo calcula la respuesta espectral en superficie del terreno como el producto periodo a periodo entre el espectro uniforme de amenaza en roca por la relación espectral del terreno correspondiente al nivel de amenaza, eso para cada zona de repuesta sísmica.

Este modelo permite entonces establecer en términos espectrales la respuesta sísmica de cada zona de la ciudad para diferentes niveles de amenaza, de tal manera que a partir de la definición del sismo de interés se modela la respuesta sísmica de los terrenos de toda la zona urbana de la ciudad de Bogotá.

3.3.3 Cálculo de parámetros de intensidad sísmica

Los resultados de repuesta sísmica con el modelo anterior permiten definir para un periodo de vibración igual a cero la aceleración pico del terreno PGA, de la cual se pueden estimar otros parámetros de intensidad sísmica necesarios para

aplicar los modelos de daño, a continuación se presentan las ecuaciones aplicadas para obtener estos parámetros que fueron obtenidas con base en las recomendaciones bibliográficas de Newmark y Moraz que establecen parámetros de referencia entre aceleración, velocidad y desplazamiento.

Velocidad y desplazamiento pico del terreno a nivel de roca:

$$PGVr = 122 * PGAr / 981$$

$$PGVr = 92 * PGAr / 981$$

Donde PGAr es la aceleración pico del terreno en roca en Gales, PGVr es la velocidad pico del terreno en roca en cm/s, PGDr es el desplazamiento pico del terreno en roca en cm.

Velocidad y desplazamiento pico del terreno a nivel de superficie:

$$PGV = \frac{Sa(1)}{Sa(1)r} * PGVr$$

$$PGD = \frac{Sa(2)}{Sa(2)r} * PGDr$$

Donde Sa(1)r y Sa(2)r son las aceleraciones espectrales para 1 y 2 segundos en roca, Sa(1) y Sa(2) son las aceleraciones espectrales para 1 y 2 segundos en superficie, PGV es la velocidad pico del terreno en superficie en cm/s, PGD es el desplazamiento pico del terreno en superficie en cm.

Otro parámetro de intensidad sísmica necesario para aplicar algunos de los métodos de daños es la Intensidad de Mercalli Modificada MMI, la cual se establece de acuerdo a la recomendación de la USGS como se ilustra en la **Tabla 3.2**.

PGA Gales	PGV cm/s	MMI
0-1.7	0-0.1	I
1.7-14	0.1-1.1	II-III
14-39	1.1-3.4	IV
39-92	3.4-8.1	V
92-180	8.1-16	VI
180-340	16-31	VII
340-650	31-60	VIII
650-1240	60-116	IX
>1240	>116	X+

Tabla 3.2. Intervalos de respuesta sísmica para Intensidad de Mercalli Modificada (fuente USGS)

Debido a que los modelos de daño de edificaciones trabajan mejor con parámetros espectrales, es decir que tengan en cuenta el periodo de vibración de la estructura, la escala MMI no es adecuada para evaluar el daño de edificaciones altas. Por esta razón, y teniendo en cuenta que la intensidad con la cual es sentido un sismo depende del periodo estructural de la edificación, se optó por utilizar la escala EEIS (Earthquake Engineering Intensity Scale), la cual es definida a partir de las aceleraciones espectrales y la velocidad espectral como se muestra en la **Figura 3.9**.

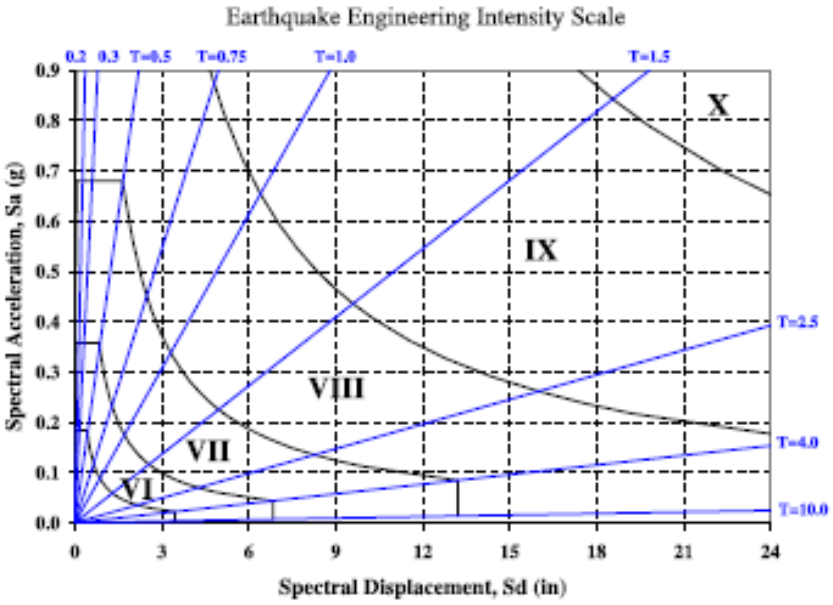

Figura 3.9. Escala de Intensidades Ingenieriles- EEIS. (Freeman et al., 2004)

La escala EEIS define la intensidad en función del periodo de vibración, para edificaciones bajas con periodo menor a 0.5 segundos la intensidad es función de la aceleración espectral, para edificaciones altas con periodo entre 0.5 y 4.0 segundos es función de la velocidad espectral, y para periodos mayores a 4.0 segundos se trabaja con desplazamiento. En la **Tabla 3.3** se presentan los intervalos de aceleración espectral y velocidad espectral asociados a la escala EEIS.

Sa Gales	EEIS T<0.5s	Sv cm/s	EEIS T>0.5s
0.0-3.4	1.0	0.0-0.2	1.0
3.4-15.7	2.0	0.2-1.0	2.0
15.7-28	3.0	1.0-1.9	3.0
28-53	4.0	1.9-3.8	4.0
53-78	4.5	3.8-5.8	4.5
78-131	5.0	5.8-9.8	5.0
131-184	5.5	9.8-13.8	5.5
184-272	6.0	13.8-20.5	6.0
272-360	6.5	20.5-27.2	6.5
360-520	7.0	27.2-40.0	7.0
520-680	7.5	40.0-52.7	7.5
680-990	8.0	52.7-77.4	8.0
990-1300	8.5	77.4-102.0	8.5
1300-1890	9.0	102.0-149.6	9.0
1890-2480	9.5	149.6-197.2	9.5
2480-3000	10.0	197.2-300	10.0

Tabla 3.3. Valores de aceleración y velocidad espectral asociados a la escala EEIS

CAPÍTULO 4

4 VULNERABILIDAD SÍSMICA

La vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca de las estructuras, una característica de su propio comportamiento ante la acción de un sismo descrito a través de una ley causa efecto, donde la causa es el sismo y el efecto es el daño (Sandi, 1986). Esta definición, constituye una clara explicación de la necesidad de evaluar los niveles de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones y líneas vitales en zonas de amenaza sísmica, ya que el nivel de daño en las estructuras repercute directamente sobre las diferentes afectaciones que pueden sufrir las personas que se encuentran dentro o cerca de ellas al momento del evento.

En este capítulo se resume el método para determinar el índice de vulnerabilidad sísmica de edificaciones y el método para estimar un factor de vulnerabilidad para tuberías. Para otras topologías de elementos expuestos no se encontraron en la revisión bibliográfica métodos de cálculo de vulnerabilidad, en estos casos la evaluación se hace directamente a daño.

4.1 EDIFICACIONES

4.1.1 Descripción del método Italiano

Propuesto por Benedetti y Petrini en 1984, define la vulnerabilidad sísmica de un edificio mediante el cálculo de un índice de vulnerabilidad (Iv), el cual es un indicador de la probabilidad que tiene una estructura de sufrir daños ante la acción de un evento sísmico de determinadas características. El cálculo del índice de vulnerabilidad (Iv) se basa en el procesamiento de información de once características específicas de la edificación, consideradas como las más importantes en su capacidad de respuesta sísmica, asignando a cada una de ellas diferentes ponderaciones, según su jerarquía en la aportación a la sismo resistencia de la edificación.

Esta metodología fue desarrollada con base en la observación de los daños producidos a un gran número de edificaciones por diferentes sismos ocurridos en Italia durante la década de los 70 y principios de los años 80, lo que permitió generar diferentes funciones que relacionan directamente las características de la edificación con sus niveles de vulnerabilidad y el potencial de daño generado ante la ocurrencia de un determinado evento sísmico.

Como ya fue mencionado, el índice de vulnerabilidad tiene en cuenta once características propias de la edificación, las cuales constituyen los parámetros considerados más importantes en su capacidad de respuesta y nivel de desempeño ante la acción sísmica, evaluando sus condiciones y estableciendo diferentes posibilidades de calificación para cada uno de estos once parámetros, con cuatro posibilidades de calificación (categorías de desempeño) para edificaciones frágiles (A, B, C, D) y tres para edificaciones dúctiles (A, B, C), que van respectivamente desde las condiciones más favorables (condiciones ideales), a las cuales se asigna con calificación A, hasta aquellas condiciones más desfavorables desde el punto de vista sísmico, a las que corresponderá una calificación de C o D, dependiendo de si se trata de una estructura frágil o dúctil respectivamente.

Esta evaluación asigna a cada uno de los once parámetros un valor numérico Ki, que oscila entre 0 y 45 para edificaciones frágiles y entre -1 y 2 para edificaciones dúctiles, correspondiendo un mayor valor numérico a niveles más desfavorables. Por último la metodología asigna un peso Wi que permite tener presente el nivel de importancia que cada uno de los parámetros evaluados tiene en el desempeño sísmico de la edificación. La **Tabla 4.1** y **Tabla 4.2** muestran los valores de calificación Ki y los pesos Wi respectivos para estructuras frágiles y dúctiles.

I	DESCRIPCIÓN DEL PARÁMETRO	Valor Ki según categoría				Wi
		A	B	C	D	
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	Diafragmas horizontales	0	5	15	45	1 (variable)
6	Configuración en planta	0	5	25	45	0.5
7	Configuración en elevación	0	5	25	45	1 (variable)
8	Separación máxima entre muros	0	5	25	45	0.25
9	Tipo de cubierta	0	15	25	45	1 (variable)
10	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
11	Estado de conservación	0	5	25	45	1

Tabla 4.1. Parámetros para el cálculo del índice de vulnerabilidad en edificaciones frágiles.

I	DESCRIPCIÓN DEL PARÁMETRO	Valor Ki según categoría			Wi
		A	B	C	
1	Organización del sistema resistente	0	1	2	4
2	Calidad del sistema resistente	0	1	2	1
3	Resistencia convencional	-1	0	1	1
4	Posición del edificio y cimentación	0	1	2	1
5	Diafragmas horizontales	0	1	2	1
6	Configuración en planta	0	1	2	1
7	Configuración en elevación	0	1	3	2
8	Conexión entre elementos críticos	0	1	2	1
9	Elementos de baja ductilidad	0	1	2	1
10	Elementos no estructurales	0	1	2	1
11	Estado de conservación	0	1	2	1

Tabla 4.2. Parámetros para el cálculo del índice de vulnerabilidad en edificaciones dúctiles.

Una vez identificados y cuantificados cada uno de los once parámetros se procede al cálculo de índice de vulnerabilidad mediante la ecuación básica del método:

Ec. 2. $$Iv = \sum Ki \cdot Wi \Big/ \sum Ki\max \cdot Wi$$

Cuanto mayor es el índice de vulnerabilidad menor será la capacidad resistente del edificio (mayor porcentaje de daño esperado). Para el presente proyecto, el valor calculado del índice de vulnerabilidad se normaliza para valores de 0 a 100, mediante la utilización de las siguientes ecuaciones, según la tipología de la edificación.

Para edificaciones frágiles:

$$Iv = \frac{\sum Ki \cdot Wi}{\sum Ki\max \cdot Wi} + Fnp$$

Donde Fnp corresponde al Factor de número de pisos que tiene aplicación en este tipo de edificaciones, que en su mayoría corresponderán a mampostería.

Para edificaciones dúctiles:

$$Iv = \frac{\sum Ki \cdot Wi}{\sum Ki\max \cdot Wi}$$

A continuación se presenta un breve resumen de las características que el método considera de cada uno de los once parámetros analizados:

- Organización del sistema resistente: Se evalúa la configuración estructural del sistema resistente principal de la edificación, valorando la continuidad de elementos, estructuración, recorridos de cargas y efectividad de las uniones entre los diferentes elementos del sistema estructural.

- Calidad del sistema resistente: Califica el nivel de desempeño esperado del sistema estructural de la edificación ante un evento sísmico, valorando para ello la forma y disposición del sistema estructural junto con las características de los materiales empleados incluyendo sus niveles esperados de respuesta y resistencia ante solicitaciones dinámicas.

- Resistencia convencional: Busca evaluar la resistencia de la edificación ante la acción de cargas horizontales, mediante una inspección rápida en campo y la utilización de operaciones numéricas simplificadas.

- Posición del edificio y cimentación: Este parámetro evalúa dentro de lo posible por medio de una inspección visual, la influencia del terreno y la cimentación de la edificación en su comportamiento sismo resistente, teniendo en cuenta principalmente aspectos como la capacidad y pendiente del terreno, la acción de empujes o desequilibrios debido a terraplenes y las ubicaciones a diferente nivel de los elementos de cimentación.

- Diafragmas horizontales: Contempla la importancia que tienen los elementos estructurales horizontales en la transmisión de las solicitaciones dinámicas de manera uniforme a los elementos del sistema de resistencia vertical, lo que influye directamente si es monolítico y en la respuesta en conjunto de toda la estructura.

- Configuración en planta: Este ítem busca tener en cuenta aspectos tales como incrementos de acción torsional y concentraciones de esfuerzos cuando los sistemas estructurales en planta presentan asimetrías o configuraciones irregulares.

- Configuración estructural en altura: Al igual que para el caso anterior, aquí se busca calificar la influencia negativa que tienen las configuraciones irregulares y/o discontinuas de los sistemas estructurales, grandes diferencias de masa, pisos débiles y demás aspectos en altura que influyen en la respuesta estructural ante la acción de movimientos sísmicos.

- Separación máxima entre muros: Tiene en cuenta la influencia que la densidad de muros en las dos direcciones principales del sistema estructural tiene en el grado de vulnerabilidad sísmica de la edificación.

- Tipo de cubierta: Se tienen en cuenta con este parámetro la capacidad del techo para resistir fuerzas sísmicas, además de su aportación en la capacidad de la estructura completa.

- Elementos no estructurales: Tiene en cuenta la existencia de diversos elementos no estructurales cuya caída no implique necesariamente daño estructural pero si pueda causar lesiones o afectaciones a las personas o elementos ubicados dentro de la edificación.

- Estado de conservación: Es un parámetro meramente subjetivo que busca evaluar de manera visual la presencia de desperfectos, fallos, deterioros y/o alteraciones en los materiales y elementos componentes del sistema estructural, que puedan incidir de una u otra manera en la capacidad de respuesta frente a un sismo.

La información de los anteriores once parámetros que requiere el método no se tienen directamente en la base de datos catastral de la ciudad, por lo cual es necesario adaptar el método para que a partir de la información disponible se infieran con algoritmos lógicos la información faltante.

4.1.2 Adaptación del método Italiano

En razón a que fue desarrollado inicialmente en Italia, para su ejecución en otros lugares es indispensable adaptar y calibrar el método teniendo en cuenta las características constructivas del sitio y la calidad y tipo de información disponible, en este apartado se describe la forma como se adaptó el método a la ciudad de Bogotá, mencionando y explicando las razones que se tuvieron en cuenta para ello.

El cálculo del índice de vulnerabilidad la metodología utiliza los once parámetros considerados más importantes en la respuesta estructural, clasificándolos en grupos de acuerdo a su comportamiento estructural. A continuación se explica la adaptación de cada uno de los once parámetros para permitir la aplicación del método a la ciudad de Bogotá.

- Organización del sistema resistente

Busca dar una valoración a la capacidad de respuesta de las diferentes tipologías estructurales, teniendo en cuenta la calidad de diseño sismo resistente empleado, aquí se tuvo en cuenta la influencia que la implementación del código y la normativa sismo resistente aporta en el mejoramiento de este aspecto, respecto de las prácticas comunes de diseño y construcción empleadas con anterioridad a su aparición, adicionalmente aquí se da importancia a la existencia o no de un registro del diseño estructural, lo cual en caso de existir permite visualizar la participación al menos en esta etapa de personal calificado.

a) Edificación diseñada y construida bajo los requisitos mínimos establecidos en NSR 98 o CCCSR 84.

b) Edificaciones diseñadas y construidas sin tener en cuanta NSR 98 ni CCCSR 84, pero se cuenta con registro de diseño sistema estructural bien definido.

c) Edificación sin sistema estructural bien definido ni registro de diseño, o con duda o incertidumbre acerca de la calidad del diseño y o la construcción.

d) Todas las demás edificaciones

- Calidad del sistema resistente

Se evalúa considerando la tipología estructural y su nivel esperado de desempeño.

a) Pórticos en acero más divisiones livianas, pórticos en concreto más divisiones livianas, pórticos en concreto más muros de concreto, sistema estructural de muros en concreto reforzado.

b) Pórticos en concreto más divisiones en mampostería, mampostería reforzada, estructuras con sistema mixto (Acero-Concreto), pórticos en acero más divisiones en mampostería, mampostería confinada.

c) Mampostería inconfinada, sistemas estructurales tipo reticular celulado, estructuras prefabricadas, madera.

d) Adobe, tapia pisada, bahareque, y otros sistemas estructurales.

- Resistencia convencional

Busca tener en cuenta un estimativo de la capacidad real de la estructura analizada, por tanto lo ideal sería realizar su evaluación a partir de información primaria tomada directamente en campo.

Para aquellos casos en que no se disponga de información primaria que permita hace una valoración directa de este aspecto (la mayoría de los casos), se propone su cálculo promediando los parámetros organización y calidad, pues estos directamente muestran aspectos tales como si hay o no diseño para fuerzas sísmicas y la capacidad de respuesta del sistema estructural especifico de la edificación.

- Posición del edificio y su cimentación

Evalúa la influencia de la posición del edificio, su sistema de cimentación y la posibilidad de que existan o no empujes generados por terraplenes sobre la estructura, adicionalmente tiene en cuenta el aspecto de obligatoriedad de formar anillos cerrados con los elementos de cimentación impuestos por el código y la normativa sismo resistentes colombianas.

a) Edificio cimentado sobre terreno estable con pendiente menor a 10%, todo el sistema de cimentación a una misma cota y formando anillos cerrados, ausencia de empujes por terraplenes. Se valora en esta categoría aquellos edificios construidos bajo NSR 98 o CCCSR 84, donde la información de topografía y localización de terraplenes lo permitan.

b) Edificio cimentado sobre suelos con pendientes entre el 10% y 20%, no puede garantizarse la formación de anillos cerrados. Se clasificaran aquí aquellas estructuras cuya construcción no se realizó bajo los parámetros NSR 98 ni CCCSR 84, y cimentadas sobre terrenos con pendientes comprendidas dentro del rango mencionado.

c) Edificaciones cimentadas sobre suelos con pendientes entre el 20% y 50%, en los cuales no se puede garantizar la formación de anillos cerrados, adicionalmente presencia de empujes por terraplenes.

d) Todos los demás casos.

- Diafragmas horizontales

Su objetivo es tener en cuenta la influencia que los sistemas de diafragmas horizontales tienen en el comportamiento estructural de las edificaciones. Para considerar este aspecto es deseable la obtención de la información directamente por levantamiento en campo de las características estructurales de la edificación.

Sin embargo como esto casi nunca es posible, para la evaluación de este parámetro se tiene en cuenta información utilizada para la evaluación de parámetros anteriores: Fecha construcción, tipo de entrepiso y pendiente del terreno.

a) Edificios cuyos diafragmas cumplen todas las siguientes condiciones: Placas de concreto con ausencia de planos a desnivel, Deformaciones en el plano de la placa despreciables (Puede garantizarse acción de diafragma rígido), Conexión eficiente entre los diafragmas y el sistema estructural.

b) Edificios cuyos diafragmas no cumplen con alguno de los tres requisitos de la clase a), o aquellos en los cuales existe gran incertidumbre sobre uno de ellos.

c) Edificios cuyos diafragmas no cumplen con dos de los tres requisitos de la clase a), o aquellos en los cuales existe gran incertidumbre sobre dos de ellos.

d) Edificios que no cumplen con ninguno de los requisitos de la clase a) o donde exista incertidumbre acerca de su conformación.

- Configuración estructural en planta

Incluido para valorar la influencia que la configuración estructural en planta tiene sobre los sistemas estructurales. También es ideal su valoración mediante el levantamiento en campo de la información. Debido a la imposibilidad de hacer algún tipo de correlación con la información disponible que permita determinar este tipo de característica de manera indirecta, se ha tomado la determinación de asumir por defecto que todas las edificaciones presentan una configuración estructural con una irregularidad en planta según las consideradas en el Titulo A de la NSR 98 (decisión tomada considerando las tipologías típicas de las edificaciones colombianas).

Esta suposición corresponde entonces a asignar por defecto la categoría B para todos aquellos casos en los que no se disponga de información primaria para determinar este parámetro.

- Configuración estructural en altura.

Similarmente a la consideración hecha para el caso de configuración en planta, este parámetro considera la influencia en el comportamiento de las edificaciones influenciado por la configuración estructural en altura. El tratamiento dado será el mismo que para el caso de irregularidad en planta (considerar que la edificación presenta una condición de irregularidad en altura).

- Estructuración del sistema principal (separación máxima entre muros)

Este corresponde al ítem “Separación máxima entre muros” del método original; se ha decidido renombrarlo para la adaptación del método a la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta que además de contemplar sistemas estructurales a base de muros, se evaluarán otro tipo de sistemas con componentes estructurales diferentes. Este parámetro busca valorar la influencia que la configuración de la estructura principal, sus conexiones y demás elementos brindan o aportan en el sistema de resistencia de la estructura.

Para su valoración se tiene en consideración que la aparición del código colombiano de construcciones sismo resistentes 1984, garantiza de cierta manera que se proyecten sistemas estructurales en las dos direcciones principales con detalles adecuados y diseñados para la acción de efectos sísmicos, lo que supone un mejor comportamiento dinámico que el de la mayoría de las estructuras diseñadas y construidas antes de su entrada en vigencia. Las calificaciones son:

a) Sistema estructural principal actuando en ambos sentidos, con distribución más o menos uniforme. Para aquellos casos en los cuales no se cuente con información primaria de campo, se incluirán dentro de esta categoría de desempeño aquellas edificaciones diseñadas y construidas bajo NSR 98 o CCCSR 84.

b) Sistema estructural principal en ambos sentidos pero con distribución asimétrica o con diferencia de densidades mayor a 70% de la de sentido mayor respecto de la menor.

c) Sistema estructural principal en un solo sentido o losas de entrepiso sistema reticular cedulado, o sistemas combinados con placa de transferencia.

d) Sistema estructural principal en un solo sentido y losas de entrepiso tipo reticular celulado, o completa incertidumbre acerca de la conformación del sistema estructural principal.

- Tipo de cubierta

Considera la influencia que la cubierta tiene en el comportamiento sismo resistente de la edificación, su clasificación se hace de acuerdo a la existencia o no de las características estructurales que se mencionan en cada caso:

a) La edificación evidencia las siguientes características: Cubierta estable, amarrada a la estructura principal por medio de al menos uno de los mecanismos de construcción monolítica con la estructura principal, unión con anclajes mecánicos calificados, se puede garantizar un comportamiento tipo diafragma rígido, vigas de cubierta debidamente arriostradas e interconectadas, y anclaje adecuado de los elementos de cubierta a la estructura de cubierta.

b) Edificio que no cumple con alguna de las características de A.

c) Edificio que no cumple con dos de las características de A.

d) Edificación que no cumple con tres o más de las características de A.

- Elementos no estructurales

Permite evaluar los niveles de daño que el desprendimiento o caída de este tipo de elementos generan sobre las personas y bienes ante la ocurrencia de un evento sísmico.

a) Edificación sin cornisas ni parapetos, con muros anclados a la estructura principal, sin presencia de tanques o depósitos de agua elevados, ausencia total de balcones, muros divisorios perfectamente amarrados o confinados. Toda esta información debe ser claramente verificable.

b) Edificios con cornisas o parapetos perfectamente anclados a la estructura principal, con presencia de tanques de agua o depósitos elevados de pequeña dimensión y peso modesto comparada con la masa del resto de la estructura, sin balcones o con balcones que formen parte integrante de los diafragmas de entrepiso.

c) Edificaciones con escaso o ningún anclaje de elementos no estructurales a la estructura principal, presencia de tanques depósitos elevados.

d) Todos los demás casos.

- Estado de conservación

Finalmente este parámetro tiene en cuenta la influencia que el estado de conservación del sistema estructural ejerce en la capacidad de la edificación.

Como parámetro de análisis para otorgar la calificación se toma la fecha de construcción de la edificación, pues generalmente la edad de la construcción tiene relación directa con el estado de conservación, sin embargo es importante recordar que la edad de la estructura no es el único factor determinante en el estado de conservación de un edificio, razón por la cual la secuencia de programación está diseñada para brindar al usuario la posibilidad de ingresar directamente la calificación del estado de conservación del edificio cuando a su criterio no corresponda con el asignado por defecto.

a) Edificaciones diseñadas y construidas bajo NSR 98, sin presencia de daños evidentes.

b) Edificaciones diseñadas y construidas bajo NSR 98, con leve presencia de daños evidentes o evidencia de reparaciones. Edificaciones diseñadas y construidas bajo CCCSR 84, sin presencia de daños evidentes.

c) Edificaciones diseñadas y construidas bajo NSR 98, con presencia de daños evidentes no graves en el sistema estructural. Edificaciones diseñadas y construidas bajo CCCSR 84, con leve presencia de daños evidentes o evidencia de reparaciones.

d) Todos los demás casos.

- Factor por número de pisos

Debido a que las edificaciones en mampostería constituyen la gran mayoría de las edificaciones de la ciudad, las cuales en un gran número de casos no contaron en ninguna etapa de proyecto con la intervención de profesionales capacitados, se infiere que el número de pisos es un factor determínate en la respuesta sísmica de las edificaciones de mampostería.

Para este proyecto se decidió incluir un factor dependiente del número de pisos (FacNpis), que afecte el índice de vulnerabilidad calculado para edificaciones de mampostería (el proceso de programación permite excluir de esta consideración a otros sistemas estructurales), permitiendo de esta manera tener la posibilidad de contemplar este parámetro dentro del cálculo del Iv de este tipo de edificaciones, se plantean los siguientes casos:

Mampostería reforzada menor de 4 pisos se considera que no influye (FacNpis=0).

Mampostería reforzada entre 4 y 6 pisos se considera que influye medianamente (FacNpis=2).

Mampostería reforzada mayor a 6 pisos se considera que influye bastante (FacNpis=6).

Mampostería simple menor a 2 pisos se considera que no influye (FacNpis=0).

Mampostería simple entre 2 y 3 pisos se considera que influye medianamente (FacNpis=2).

Mampostería simple mayor a 3 pisos se considera que influye bastante (FacNpis=6).

Debido a que el factor propuesto solo contempla la clasificación de mampostería reforzada y mampostería simple, para este caso las edificaciones de mampostería confinada (aquellas que pueden definirse como tales según el titulo E de NSR 98), se cobijan con las especificaciones dadas para los sistemas de mampostería reforzada, puesto que se considera que evaluarlas dentro del grupo de mampostería simple es desconocer los niveles de capacidad que presenta el sistema confinado.

4.1.3 Información para el método Italiano

Uno de los principales inconvenientes cuando se desarrollan proyectos de análisis de características de edificaciones existentes, ya sea en forma individual o por grandes zonas (como este caso), lo constituye la desproporción existente entre la información disponible y la requerida para poder aplicar el método elegido, siendo necesario en algunas ocasiones desarrollar algoritmos que permitan obtener la información no disponible mediante el proceso lógico a partir de información primaria disponible para el análisis .

Para el cálculo del índice de vulnerabilidad según la metodología propuesta se requiere de la información mostrada en la **Tabla 4.3**, donde se puede apreciar (de izquierda a derecha) la siguiente información:

- Información: aquí se menciona la información específica referenciada en la fila correspondiente.
- Observaciones: breve descripción y/o referencia considerada importante con respecto a la información citada.
- Dominio: corresponde a los posibles valores o características de la información a ser utilizada en el cálculo del índice de vulnerabilidad.
- Información indispensable: se indica si la información contenida en la fila es indispensable para el cálculo del Iv (SI), o si por el contrario el proceso de cálculo permite realizar su evaluación a partir del procesamiento lógico de otra información de la cual sí se disponga (NO).

No	Información	Observaciones	Dominio	Información indispensable
1	Uso. (UL)	Corresponde al tipo de uso que se le está dando al lote en la actualidad, permite también diferenciar aquellas edificaciones institucionales de las edificaciones de otro tipo de uso.	No edificado Residencial Comercial y servicios Industrial Dotacional Espacio publico Recreacional y deportivo	SI
2	Fecha de construcción. (AC)	Se referencia el año de construcción de la edificación.	AC>1998 1985<=AC<=1998 AC<1985 Null	SI
3	Registro de diseño. (RD)	Esta casilla se utilizara para registrar la existencia documental de memorias de diseño estructural, aplica especialmente para el análisis de edificaciones indispensables.	Boleano (si/no)	NO
4	Tipología estructural. (TE)	Se refiere al sistema estructural principal de la edificación analizada. (Pórticos en concreto, mampostería reforzada, adobe etc.)	Pórticos en acero Pórticos en concreto Sistema dual Sistema combinado Muros estructurales en concreto reforzado Mampostería reforzada Mampostería confinada Madera estructural Sistemas prefabricados Mampostería inconfinada Adobe Tapia Bahareque	NO
5	Tipo de divisiones. (Dv)	Información acerca de las divisiones de la edificación, incluyendo materiales y su aporte estructural	División liviana Muros estructurales Mampostería Adobe Tapia Bahareque	NO
6	Tipo de entrepiso. (Se)	Corresponde a la descripción general de la tipología de los entrepisos.	Placa aligerada en concreto Lamina colaborante Losa maciza Reticular celulado	NO
7	Pendiente del terreno. (Pt)	Indica la pendiente del terreno en porcentaje donde se ubica la edificación.	Numero en porcentaje	SI
8	Empuje por terraplenes. (Empter)	Este campo indicara la existencia o no de terraplenes que de una u otra manera estén actuando sobre la estructura en estudio. Se espera que estos campos se puedan ir completando con información primaria proveniente de otros estudios puntuales realizados en diferentes sectores de la ciudad.	Boleano (si/no)	NO
9	Irregularidad en planta.(Ipta)	Indica la presencia o no de irregularidades en planta en el sistema estructural de la edificación, según las definidas en el titulo A de la NSR 98.	Irregularidad torsional Retrocesos excesivos en esquinas Discontinuidades del diafragma	NO

No	Información	Observaciones	Dominio	Información indispensable
			Desplazamientos del plano de acción de elementos verticales Sistemas no paralelos	
10	Irregularidades en altura. (Ialt).	Indica la presencia o no de irregularidades en altura en el sistema estructural de la edificación según las definidas en el titulo A de la NSR 98.	Piso flexible. Irregularidad en distribución de masas Irregularidad geométrica Desplazamientos dentro del plano de acción Piso débil	NO
11	Estrato.(Est)	Estrato socioeconómico registrado para la edificación de uso residencial	Numero (1 al 6 y null)	SI
12	Área del lote. (Alt)	Área en metros cuadrados del lote.	Número en m²	SI
13	Área construida.(Acs)	Área en metros cuadrados correspondiente a la edificación.	Número en m²	SI
14	Número de pisos. (Npis)	Número de pisos sobre la rasante que tiene la edificación, este dato junto a la tipología estructural son indispensables en el cálculo del periodo de vibración del edificio.	Número	NO
15	Estado de conservación. (Escv).	Este campo contendrá un indicativo del estado actual de conservación de la estructura.	Evidencia de daños en elementos no estructurales Evidencia de daños en elementos estructurales.	NO
16	Elementos no estructurales	Presencia de tanques o masas elevadas considerables.	Boleano (si/no)	NO
17	Anclaje de elementos no estructurales	Anclaje de elementos no estructurales	Boleano (si/no)	NO
18	Elementos especiales	Presencia de cornisas gárgolas y elementos similares	Boleano (si/no)	NO

Tabla 4.3. Resumen información empleada para el cálculo del índice de vulnerabilidad

A continuación se menciona la información que puede ser obtenida de forma indirecta a la vez que se hace una breve descripción del proceso lógico para su obtención a partir de la información existente:

Tipología estructural: La tipología estructural hace referencia a las principales características de la estructura principal de la edificación, y depende principalmente de variables como la época de construcción, el uso de la edificación y el estrato socioeconómico, por tanto cuando no se cuente con información de primera mano se utilizarán estos parámetros para su ponderación.

Divisiones: La contribución de las divisiones internas de una edificación es muy importante en cuanto a la respuesta de la misma ante excitaciones sísmicas, por tanto es indispensable considerar aspectos como su masa, interacción con la estructura principal, si forman parte o no del sistema estructural principal etc. Las características, tipo y función estructural de las divisiones dependen principalmente de la tipología estructural, época de construcción y uso, aspectos que son tenidos en cuenta para su la obtención indirecta de esta información.

Entrepisos: El tipo y número de entrepisos es factor determinante en la capacidad de respuesta estructural, pues ellos aportan buena parte de la masa de la estructura y pueden facilitar o no la acción de todo el conjunto estructural como un

todo (Diafragma rígido). Para tomar en cuenta esta variable se debe considerar la época constructiva, la tipología estructural, uso de la edificación.

Número de pisos: Estos se calcularon siguiendo la metodología propuesta en el estudio de la Universidad de los Andes, la cual utiliza una relación entre las áreas del lote y la construida para obtener así el número de pisos, aplica cuando los lotes son pequeños (menores a 1000 m²) y no incluyen áreas de cesión, según la siguiente ecuación:

Ec. 3. $$Núm pisos = \frac{ÁreaConstruida}{0.4 * Árealote}$$

Irregularidades en planta y altura: Para evaluar indirectamente este parámetro, se optó simplemente por asumir que todas aquellas edificaciones de las cuales no se tiene ninguna información al respecto presentan al menos una de las diez configuraciones irregulares consignadas en NSR 98, esto debido a que la gran heterogeneidad de edificaciones, construcciones y diseños arquitectónicos hacen imposible el enmarcar este parámetro dentro de algún tipo de proceso lógico.

Tipo de cubierta y elementos no estructurales: Al igual que muchos de los elementos antes mencionados, para este aspecto se tiene en cuenta la época de construcción, el uso, tipología estructural y el estrato socioeconómico.

Estado de conservación: Cuando no se cuenta con esta información de primera mano, se recurre en esta metodología a la utilización de la fecha de construcción como indicador del estado de conservación de la estructura, esto atendiendo a la situación de que a mayor de edad de la estructura se espera un mayor deterioro de la misma y/o una disminución de de sus características de calidad, como el caso de las estructuras de concreto, en las que el aumento de la profundidad de carbonatación (fenómeno que afecta al concreto y es determinante en la posibilidad de corrosión del refuerzo) es proporcional al paso del tiempo.

4.2 TUBERÍAS

Las evaluaciones de los posibles daños en las tuberías de las redes de las líneas vitales se adelantan con base en una metodología general propuesta por “Japan Waterworks Association” que ha sido replicada en los diferentes estudios de escenarios de daño con algunas modificaciones, pero en general conserva el mismo fundamento. Esta metodología se basa en determinar la acción sísmica que actúa sobre el elemento, establecer su vulnerabilidad por medio de factores de corrección y estimar los daños empleando una curva de vulnerabilidad. La vulnerabilidad de la tubería se representa por medio de factores de corrección que tiene en cuenta el diámetro, material, condiciones del suelo y posibilidad de licuación, entre mayor sea el valor de estos factores mayor es su vulnerabilidad.

Ec. 4. $$Fv = C_p * C_d * C_g * C_l$$

Donde:

Fv: Factor de vulnerabilidad

C_p: factor de corrección por material de tubería

C_d: factor de corrección por diámetro de tubería

C_g: factor de corrección por condiciones del suelo

C_l: factor de corrección por posibilidad de licuación

Los factores de corrección para las tuberías se basaron en el trabajo de Kubo y Katayama (1975) adaptados a las condiciones de la ciudad y las características de las tuberías de las redes de acueducto, alcantarillado y gas natural.

La definición de los factores de corrección por material partió del inventario los materiales reportados en las coberturas de las redes de acueducto, alcantarillado y de gas natural, los valores propuestos para este factor están acordes con los estudios de JICA (2002) y Uniandes (2005).

Material reportado en las coberturas de tuberías	Factor de Corrección C_P
Tierra	3.0
Gres Ladrillo	2.0
Concreto	1.5
Asbesto Cemento Concreto Reforzado Cilindro Concreto Americano	1.0
Hierro Fundido	0.8
Poli cloruro de Vinilo	0.5
Acero Hierro Acerado Hierro Galvanizado	0.3
Polietileno de 60 psi	0.1
Otros	1.0

Tabla 4.4. Factor de Corrección por Material (C_p)

Los valores propuestos para el factor de corrección por diámetro están definidos de acuerdo a los estudios de JICA (2002) y Uniandes (2005).

Diámetro	Factor de Corrección C_d
≤ 100 mm	1.6
100 mm – 200 mm	1
200 mm – 500 mm	0.8
≥ 500	0.5

Tabla 4.5. Factor de Corrección por Diámetro (C_d)

La definición de los factores de corrección por condiciones del suelo tiene en cuenta la zonificación geotécnica más reciente propuesta por el FOPAE (2010), los valores propuestos para este factor están conforme a los estudios de JICA (2002) y Uniandes (2005).

Condiciones del suelo	Zonificación Geotécnica	Factor de Corrección C_g
Roca	Cerro A, Cerro B	0.4
Suelos duros y estables	Piedemonte A, Piedemonte B, Piedemonte C, Suelo Residual	1.0
Suelos firmes y estables	Aluvial, Llanura de inundación B, Cauce	1.25
Suelos blandos o inestables	Llanura de inundación A, Lacustre A, Lacustre B Lacustre C, Deposito de Ladera, Relleno de Basura Relleno de Escombro, Excavación Especial	1.5

Tabla 4.6. Factor de Corrección por condiciones del suelo (C_g)

La definición de los factores de corrección por posibilidad de licuación tiene en cuenta la zonificación geotécnica propuesta por FOPAE (2010). El factor de posibilidad de licuación es función del nivel de amenaza sísmica, los factores propuestos corresponderían a escenarios de amenaza fuertes (Magnitud > 6.5 y Distancia < 60 Km), donde este fenómeno se podría presentarse, para escenarios de amenaza moderados a bajos este factor será igual a uno para todas las zonas.

Posibilidad de licuación	Zonificación Geotécnica	Factor de Corrección C_l
Bajo o Nulo	Cerro A, Cerro B, Piedemonte A, Piedemonte B, Piedemonte C, Lacustre A, Lacustre B, Lacustre C Deposito de Ladera, Suelo Residual, Relleno de Basura, Relleno de Escombro, Excavación Especial	1
Medio	Aluvial	1.5
Alto	Llanura de inundación A, Llanura de inundación B, Cauce	2.0

Tabla 4.7. Factor de Corrección por posibilidad de licuación (C_l)

CAPÍTULO 5

5 DAÑOS INICIALES DE EDIFICACIONES Y LÍNEAS VITALES

De acuerdo al enfoque conceptual primero se estiman los daños iniciales debidos al movimiento del terreno por el tren de ondas sísmicas de las edificaciones y líneas vitales, este movimiento del terreno puede ocasionar daños según su nivel de vulnerabilidad a esta acción o fuerza sísmica.

Para las edificaciones se tienen dos métodos que se adaptaron y desarrollaron en el sistema de cálculo de daños, el primero denominado método Italiano trabaja con base en el índice de vulnerabilidad y curvas de vulnerabilidad función de intensidad macro sísmica. El segundo se denomina método Miranda, este método se basa en el cálculo la deriva entre piso de las estructuras y estima el daño con curvas de vulnerabilidad función de la deriva calculada, este método fue aplicado en el estudio de Uniandes 2005. Los dos métodos permitirán que se comparen los resultados, lo cual mejora los criterios para el análisis de los resultados y así mismo se pueden detectar las bondades y limitaciones de cada uno de ellos para ciertos tipos de estructuras.

Para las líneas vitales se estudiaron cinco métodos que se adaptaron y desarrollaron en el sistema de cálculo de daños para estimar los daños de los elementos tipo tuberías, cableados, tanques, puentes y vías vehiculares. Elementos como las torres y postes se asumen que no son afectados por las ondas sísmicas y que los daños se deberán a efectos colaterales, las edificaciones indispensables que hacen parte de las líneas vitales se evalúan con los métodos de edificaciones.

5.1 EDIFICACIONES

5.1.1 Método Italiano

Una vez se tiene calculado el índice de vulnerabilidad (Iv) para cada edificación se estima el nivel de daño esperado mediante la obtención del índice de daño obtenido con las curvas de vulnerabilidad correspondientes al tipo de edificación. Las curvas de vulnerabilidad usadas en el proyecto son las propuestas por Mena (2002) que se componen por familias de curvas en escala de intensidad macrosísmica y unas modificadas por FOPAE en las que se adaptaron a escala de intensidad sísmica para ingeniería EEIS y se adicionaron unas nuevas con el fin de cubrir un mayor número de valores de intensidad.

Otra consideración importante que favoreció la elección de estas curvas de vulnerabilidad es que este estudio propone una diferenciación en los edificios de concreto reforzado dependiendo de si se cuenta o no con sistemas de entrepiso tipo reticular celulado, los cuales son más vulnerables que otro tipo de sistemas de entrepiso.

Para obtener el índice de daño, se entra en las curvas de funciones de vulnerabilidad con el índice de vulnerabilidad normalizado, cortando con la curva de intensidad sísmica correspondiente al sismo de análisis, para finalmente leer en el eje de las ordenadas el índice de daño correspondiente.

A continuación en la **Figura 5.1** a **Figura 5.6**, se muestran las funciones de vulnerabilidad para las tipologías correspondientes a edificaciones de mampostería (frágil), concreto reforzado (Dúctil), concreto reforzado con sistema reticular celulado (Especial) y para las dos escalas de intensidad de trabajo.

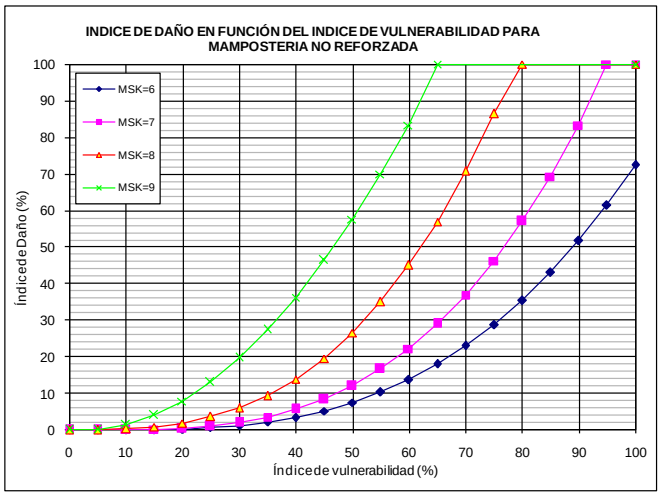

Figura 5.1. Función de vulnerabilidad para edificaciones en mampostería (Mena, 2002)

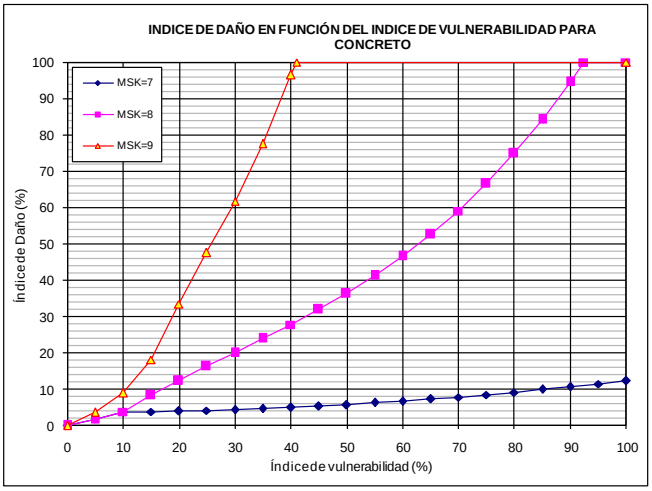

Figura 5.2. Función de vulnerabilidad para edificaciones en concreto reforzado (Mena, 2002)

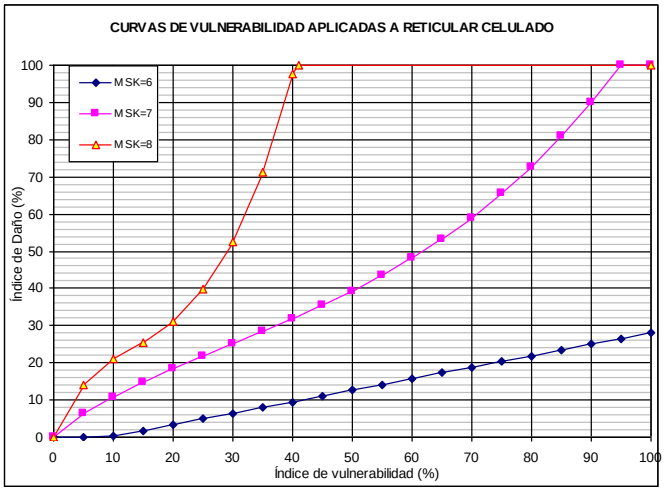

Figura 5.3. Función de vulnerabilidad para edificaciones con reticular celulado (Mena, 2002)

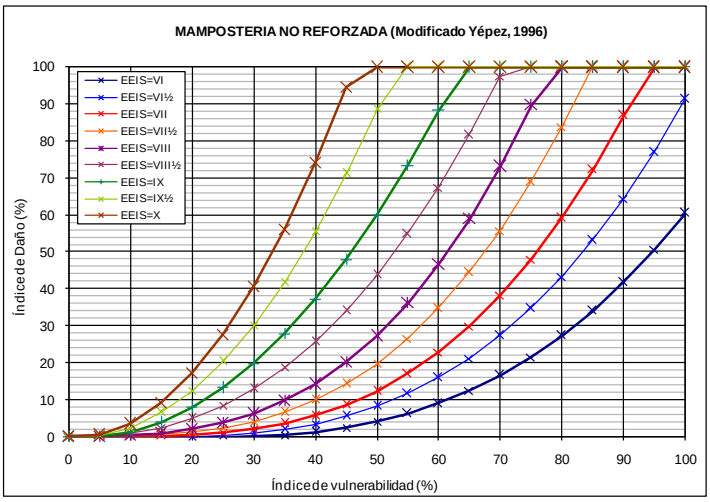

Figura 5.4. Función de vulnerabilidad para edificaciones en mampostería

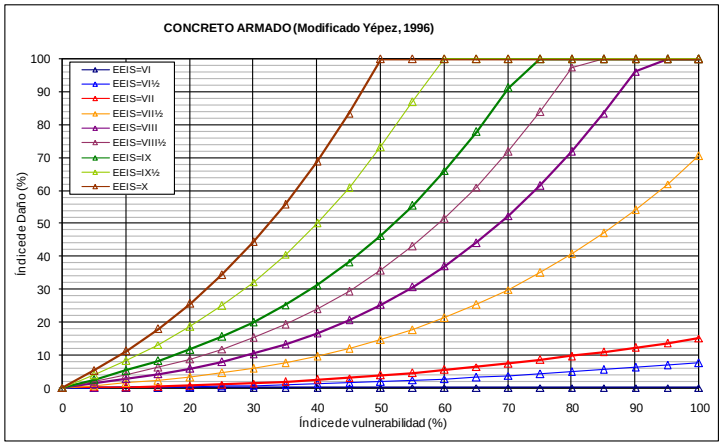

Figura 5.5. Función de vulnerabilidad para edificaciones en concreto reforzado

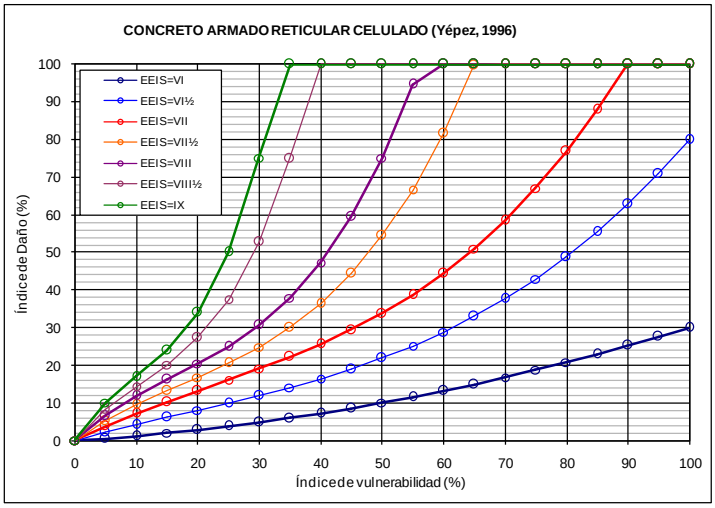

Figura 5.6. Función de vulnerabilidad para edificaciones con reticular celulado

Una vez se tiene el índice de daño se puede asociar a las escalas descriptivas de daño, las cuales permiten obtener una descripción general del daño esperado en una edificación conociendo el índice de daño (**Tabla 5.1**).

Índice de daño	Nivel de daño	Descripción
0<=ID<2.5	Ninguno	No existen daños en elementos estructurales, con poco o ningún daño en elementos no estructurales con efecto despreciable en el comportamiento de la estructura, no requiere de reparaciones.
2.5<=ID<7.5	Bajo	Daño generalizado en elementos no estructurales, posibles desprendimientos de enchapes y apliques, es posible la aparición de pequeñas fisuras en elementos estructurales como muros de carga, columnas, vigas con bajo efecto en el comportamiento de la estructura. Costos de reparación bajos.
7.5<=ID<=15	Moderado	Daños importantes y de alto costo de reparación en elementos no estructurales. Daños considerables en elementos estructurales que afectan en menor medida el comportamiento de la estructura, pero sin comprometer su estabilidad.
15<=ID<30	Considerable	Daños importantes en elementos no estructurales, es probable que se requiera desalojar el edificio. El costo de las reparaciones puede ser un alto porcentaje del costo de la estructura.
30<=ID<60	Fuerte	Grandes daños en elementos no estructurales que pueden comprometer la estabilidad de la estructura, es indispensable el desalojo de la edificación. Los costos de reparación pueden igualar al costo de la estructura por lo que puede ser recomendable su demolición para posterior reconstrucción.
ID>=60	Severo	Edificio colapsado o a punto de colapsar, es necesaria una rápida evacuación, la estructura no es recuperable.

Tabla 5.1. Escala de daño (Mena, 2002)

5.1.2 Método Miranda

Metodología presentada en 1997 por el ingeniero Eduardo Miranda, permite evaluar de forma rápida las distorsiones de entrepiso tanto elásticas como inelásticas en edificios, a partir de un espectro de respuesta elástico lineal mediante la combinación de dos sistemas estructurales acoplados correspondientes la combinación de una viga de flexión con una viga de cortante actuando en voladizo y unidas mediante elementos rígidos biarticulados con capacidad de transmitir únicamente fuerzas horizontales. A partir del análisis de este sistema estructural, Miranda desarrolló una metodología que permite calcular de forma rápida la distorsión máxima de entrepiso por medio de la siguiente Ec. 5.

Ec. 5. $$\gamma_i = \frac{\beta_1 * \beta_2 * \beta_3 * \beta_4 * T^2 * Sa}{4 * \pi^2 * N * h}$$

Donde:

γ_i: Distorsión máxima.

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ Factores de corrección que permiten tener en cuenta las principales características estructurales del sistema en análisis.

Sa: Aceleración espectral, la cual depende de la amenaza sísmica del sitio de emplazamiento de la edificación y de su periodo de vibración.

T: Periodo de vibración del edificio en estudio.

h: altura de entrepiso y *N:* Número de pisos

- Factor β_1.

Para el cálculo del factor β_1, Miranda establece curvas que relacionan el número de pisos y β_1 en función del factor para distribución triangular de carga horizontal. Estas funciones se muestran en la **Figura 5.7**.

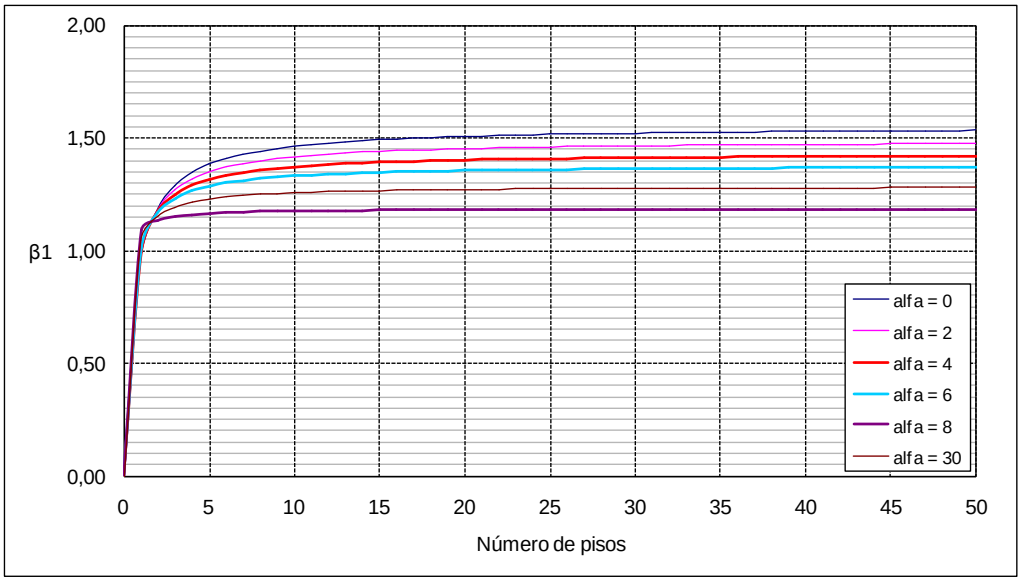

Figura 5.7. Curva para el cálculo del factor beta 1

Para los sistemas estructurales de edificios se tendrán los siguientes valores de α.

0< α<=2 Para sistemas estructurales a base de muros.

1.5<= α<=6 Para sistemas estructurales dual y combinado.

5<= α<=15 Para sistemas estructurales a base de pórticos.

Como es de esperarse, existen zonas de transición del factor α para las cuales un mismo valor está contemplado en dos sistemas estructurales diferentes. La aparición de estas zonas de traslapo o transición es perfectamente normal, quedado a responsabilidad del criterio de cada especialista tomar la decisión acerca de los limites exactos de los sistemas estructurales analizados. Los valores de α adoptados en este proyecto para cada tipología involucrada se presentan en la **Tabla 5.2** y se han escogido en base a consideraciones de comportamiento dúctil considerando la clasificación de sistemas estructurales para edificios considerados en NSR 98 Título A.

TOPOLOGÍA ESTRUCTURAL	VALOR DE α
Pórticos en acero	9
Pórticos en concreto	8
Sistema dual	7
Sistema combinado	6
Muros estructurales en concreto reforzado	5
Sistema reticular cedulado	4
Mampostería reforzada	3
Mampostería confinada	2
Mampostería inconfinada, adobe, bahareque, tapia, otros	1

Tabla 5.2. Valores de la sumidos para las tipologías estructurales presentes en Bogotá

- Factor β_2

El método Miranda propone para su cálculo una familia de tres curvas de carga (Uniforme, parabólica y triangular), que relacionan β_2 con el factor α, como se muestra en la **Figura 5.8**.

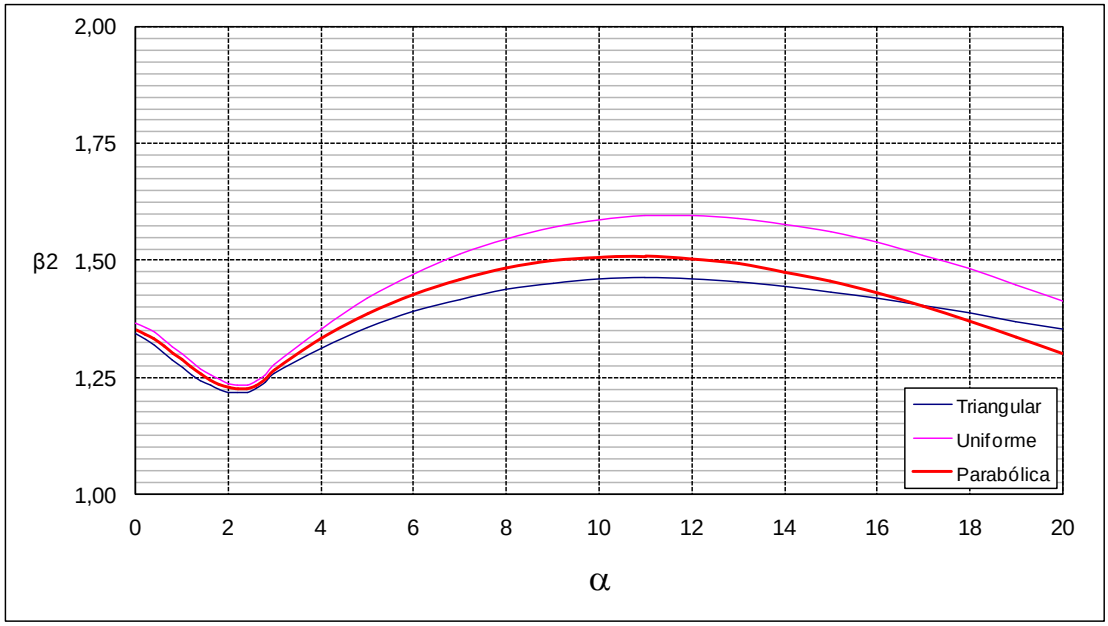

Figura 5.8. Curva para el cálculo del factor beta 2

- Factor β_3

Permite calcular los máximos desplazamientos laterales en estructuras de las que se esperan excursiones en el rango de deformaciones inelásticas resultado de la excitación dinámica, se calcula como la relación existente entre los desplazamientos espectrales de techo elásticos e inelásticos, considerando adicionalmente la capacidad dúctil (μ) del sistema estructural en función del periodo de vibración fundamental de la estructura. El método Miranda expresa el factor β_3 por medio de la Ec. 6 la cual está definida para suelos rocosos y suelos firmes de tipo aluvial.

Ec. 6. $$\beta_3 = \frac{U_{techo(i)}}{U_{techo(e)}} = \left[1 + (1/\mu - 1) * e^{-12*T*\mu^{-0.8}}\right]^{-1}$$

Donde:

$U_{techo(i)}$ = Desplazamiento espectral de techo en el rango inelástico.

$U_{techo(e)}$= Desplazamiento espectral de techo en el rango elástico.

μ= Capacidad dúctil del sistema estructural

T= periodo de vibración fundamental de la estructura.

Teniendo en cuenta los aspectos energéticos, puede decirse que la capacidad sismo resistente de un sistema estructural está relacionada directamente con la ductilidad del mismo, razón que explica la importancia que la capacidad dúctil tiene actualmente en la totalidad de los códigos de diseño sismo-resistente existentes en el mundo. En la NSR 98 la capacidad

dúctil del sistema estructural es considerada mediante el coeficiente de capacidad de disipación de energía R_0 (NSR 98 A.3.1.1), el cual es una medida de la ductilidad de la estructura y por lo tanto está relacionado con la capacidad de disipación de energía (capacidad sismo resistente) de cada sistema estructural.

Adicionalmente R_0 es sensitivo al periodo natural de vibración de la estructura así:

Para periodos largos T>= 1 segundo: $R_0=\mu$

Para periodos intermedios 0.12<=T<1 segundo: $\mu=(R_0^2+1)/2$

Para periodos cortos T<0.12 segundos $R_0= \mu=1$ (Comportamiento elástico, sin capacidad dúctil).

Para adaptar el método Miranda, se propone tomar para cada sistema estructural identificado el valor R_0 correspondiente (NSR 98 A.3.1), clasificando cada uno de ellos como sistemas con capacidad de disipación moderado de energía (DMO) o sistemas con capacidad mínima de disipación de energía (DMI) en función del año de construcción, esto tomando en cuenta que edificaciones construidas antes de 1998 no presentan todas las características de detalle y consideraciones generales de diseño que permitan garantizar la capacidad dúctil definida para estructuras DMO.

En cuanto a las edificaciones con capacidad especial de disipación de energía (DES), estas no son consideradas para Bogotá por estar en una zona de amenaza sísmica intermedia (NSR 98 A.2.3) donde no tiene carácter obligatorio la construcción de estos sistemas estructurales (NSR 98 A3).

- Factor β_4

Este factor permite tomar en cuenta la concentración de distorsiones de entrepiso que ocurre cuando la estructura de un edificio presenta excursiones dentro del rango inelástico de deformaciones al ser sometido a la acción sísmica. Para el cálculo del factor β_4, se emplea la Ec. 7 que está en función de la capacidad dúctil (μ) y del número de pisos N.

Ec. 7. $$\beta_4 = 1 + \frac{\mu}{30} + \frac{N}{200}$$

Donde μ: Capacidad dúctil del sistema estructural.

N: Numero de pisos

La evaluación del daño se realiza con las curvas de vulnerabilidad desarrolladas por la Universidad de los Andes creadas a partir de las características propias de las edificaciones encontradas en la ciudad. Estas curvas de vulnerabilidad fueron empleadas para la predicción del daño en el estudio “Escenarios de riesgo y perdidas por terremoto para Bogotá D.C”.

En dicho estudio se establecieron 18 tipologías estructurales típicas para la ciudad que fueron distribuidas en dos familias de curvas de vulnerabilidad, la primera de las cuales define el porcentaje de daño en función de la deriva (**Figura 5.9**), mientras que la otra relaciona el daño con la aceleración máxima del terreno (**Figura 5.10**).

Según lo reportado en el mencionado estudio, esta división en dos familias de curvas de vulnerabilidad pretende considerar en cada caso el parámetro que mejor relación tiene con el nivel de daño presentado en cada tipología. Teniendo en cuenta que las curvas de vulnerabilidad fueron desarrolladas específicamente para la ciudad de Bogotá, no es necesario hacer ningún tipo de adaptación para su aplicación y sistematización.

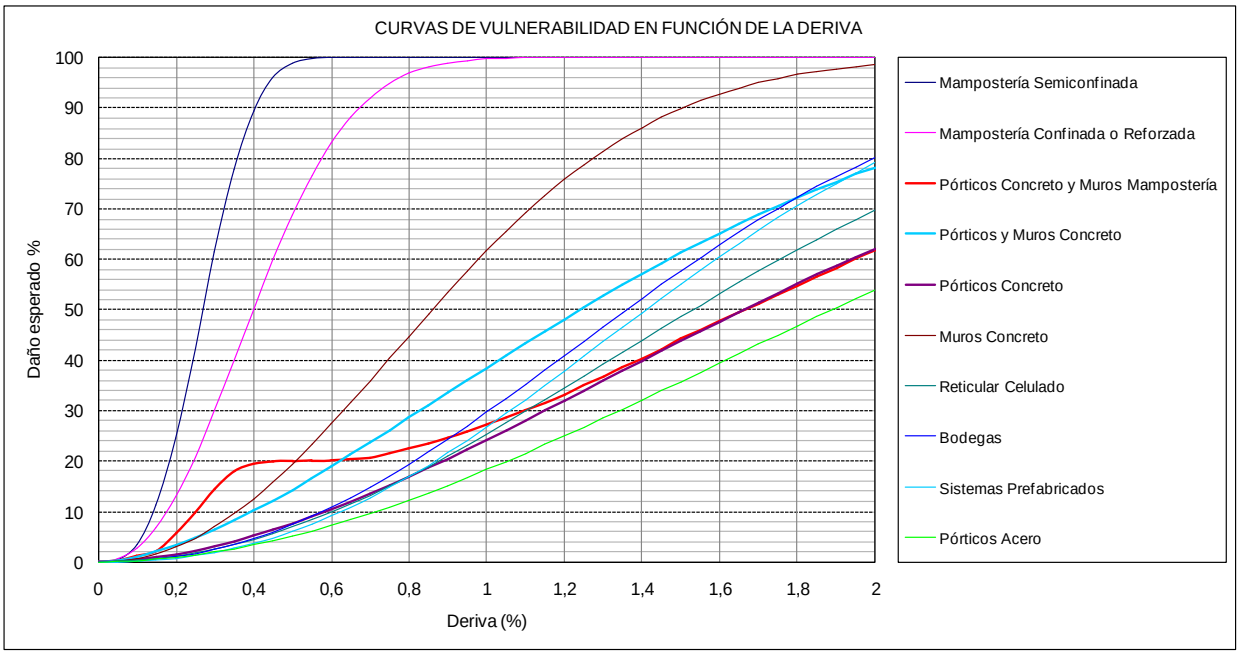

Figura 5.9. Curvas de vulnerabilidad en función de la deriva (Uniandes, 2005)

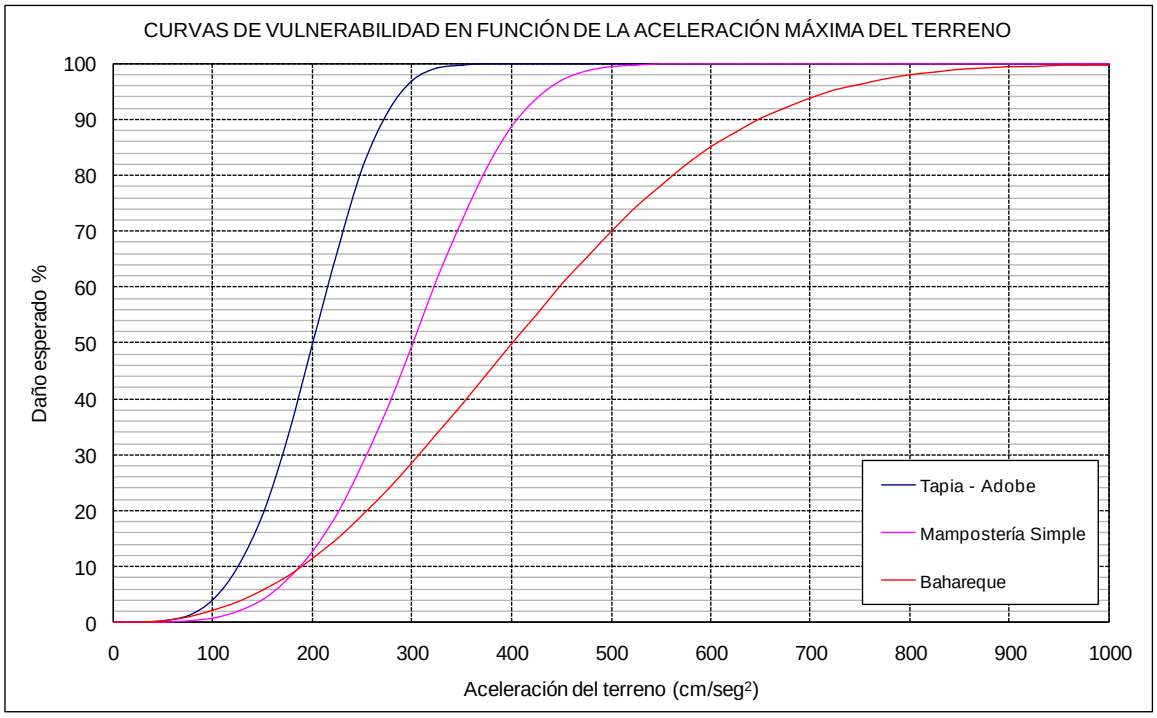

Figura 5.10. Curvas de vulnerabilidad en función de la aceleración máxima del terreno (Uniandes, 2005)

5.2 LÍNEAS VITALES

Para determinar el daño de las líneas vitales de la región que rodea a la ciudad se emplearon curvas de vulnerabilidad recomendadas por RADIUS (1999). RADIUS es una herramienta metodológica sistematizada para la evaluación global de daños por sismo en un área determinada creada por las Naciones Unidas mediante el programa IDNDR (International

Decade for Natural Disaster Reduction). Las curvas de vulnerabilidad de las líneas vitales son establecidas para cada tipo de elemento mediante observaciones efectuadas en eventos sísmicos anteriores o mediante la opinión de expertos.

A pesar de que esta metodología es relativamente sencilla de implementar y de que es posible validar y ajustar resultados mediante la manipulación de los parámetros de evaluación, no siempre es posible contar con observaciones de eventos sísmicos anteriores que permitan elaborar curvas de daño ajustadas a las condiciones locales del área de estudio. Otras limitaciones importantes del método son:

- El parámetro de amenaza sísmica (intensidad sísmica MMI) es una medida cualitativa de la intensidad, lo cual impide establecer y comparar relaciones intensidad-daño para diferentes áreas de estudio de manera objetiva (Tung, 2004).
- No se consideran daños causados por efectos colaterales de licuación o deslizamiento.
- Las curvas de vulnerabilidad empleadas corresponden a una recopilación subjetiva realizada por expertos a partir de información de campo.

A pesar de estas limitaciones estas curvas fueron seleccionadas porque incluyen todos los elementos expuestos seleccionados y por la facilidad que presentan al suministrar el porcentaje de daño para cada caso. Estas curvas relacionan la intensidad de Mercalli (MMI) con un porcentaje de daño para cada uno de los elementos expuestos y se presentan a continuación en la **Figura 5.11** junto con la **Tabla 5.3** que incluye los valores graficados y una descripción del significado de cada una de las curvas.

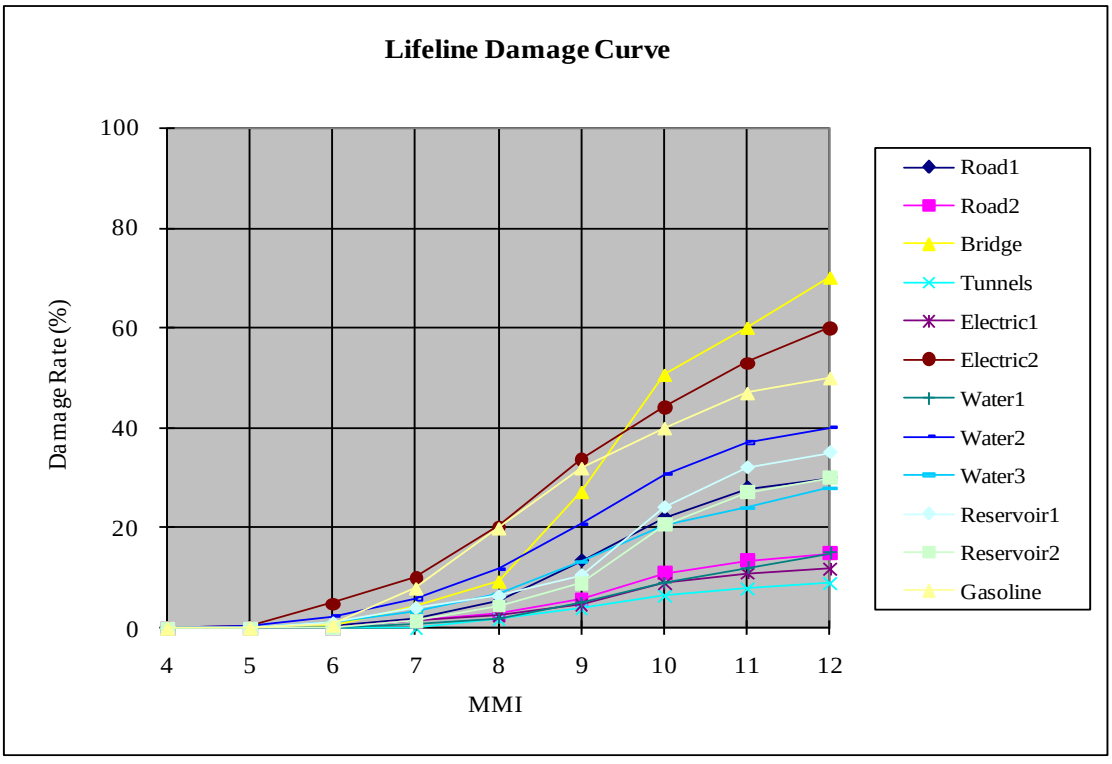

Figura 5.11. Curvas de vulnerabilidad para los elementos expuestos

Curva	Descripción
Road 1 – Vía 1	Curva de vulnerabilidad para vías locales.
Road 2 – Vía 2	Curva de vulnerabilidad para autopistas.
Bridges - Puentes	Curva de vulnerabilidad para puentes de malla vial y férrea.
Tunnels - Túneles	Curva de vulnerabilidad para túneles.
Electric 1 – Electricidad 1	Curvas de vulnerabilidad para torres de transmisión.
Electric 2 – Electricidad 2	Curvas de vulnerabilidad para subestaciones.
Water 1 – Agua 1	Curvas de vulnerabilidad para Líneas de distribución.
Water 2 – Agua 2	Curvas de vulnerabilidad para estaciones de bombeo.
Water 3 – Agua 3	Curvas de vulnerabilidad para plantas de tratamiento.
Reservoir 1 – Reservorio 1	Curvas de vulnerabilidad para depósitos de almacenamiento o presas.
Reservoir 2 – Reservorio 2	Curvas de vulnerabilidad para tanques elevados.

Tabla 5.3. Descripción de cada una de las curvas de vulnerabilidad empleadas

A continuación se presentan los métodos seleccionados para determinar el daño inicial de las líneas vitales que se encuentren en la ciudad.

5.2.1 Tuberías

El cálculo de los posibles daños de las tuberías tiene en cuenta curvas de vulnerabilidad que son función de un parámetro sísmico, por lo general de la aceleración o velocidad pico del terreno. Son numerosas las investigaciones en las cuales se definen estas curvas de vulnerabilidad a partir de los inventarios de daños sufridos en terremotos, sin embargo aún para el medio colombiano no se ha desarrollado una curva representativa. Una aproximación válida la realizó JICA (2002) teniendo como referencia lo ocurrido en el sismo de Armenia de 1999.

Bajo el planteamiento anterior se modifica la expresión propuesta por Kubo y Katayama (1975) para evaluar los daños en tramos de tuberías se presenta a continuación, la cual será aplicada a las tuberías de las redes de acueducto, alcantarillado y gas natural.

$$RR = Fv * RR(pis)$$

Donde:

RR: tasa de daño por unidad de longitud (Roture Rate)

Fv: Factor de vulnerabilidad

RR(pis): tasa de daño estándar por unidad de longitud que se obtiene de la curva de vulnerabilidad con el parámetro de intensidad sísmico (pis)

La selección de la curva de vulnerabilidad tiene gran incidencia en los resultados, luego se presenta a continuación en la **Tabla 5.4** un resumen de las principales características de las investigaciones revisadas y en la **Figura 5.12** se muestran gráficamente. Es importante mencionar que al realizar la revisión de las investigaciones de vulnerabilidad se encontraron un gran número de propuestas desarrolladas para diferentes materiales o empleando factores de corrección diferentes a los previstos en el método adoptado, estas curvas de vulnerabilidad particulares no se muestran puesto que el método tienen en cuenta la diferentes materiales con los factores de corrección, por lo cual solo se debe trabajar con curvas de vulnerabilidad estándar o generales.

Autor	Roturas / km estándar - RR(pis)	Observaciones
Kubo y Katayama (1975)	Correlación determinada con los datos: Para PGA<450 Gales $RR(PGA) = 9 \times 10^{-14} \times PGA^{5.0266}$ Para PGA > 450 Gales RR(PGA) = 2	No presentan ecuación del R(PGA) No se encontraron características
O'Rourke y Ayala (1993)	$RR(PGV) = 1 \times 10^{-4} \times PGV^{2.25}$	Usaron valores estimados de PGV y datos de terremotos en USA, México y Japón
Japan Waterworks Association (1998)	$RR(PGV) = 3.11 \times 10^{-3} \times PGV^{1.3}$ Correlación determinada con los datos: $RR(PGA) = 3.35 \times 10^{-8} \times PGA^{2.6023}$	Se basó en los daños del terremoto de Kobe 1995, No se presenta ecuación de R(PGA)
Eidinger (2001)	Correlación determinada con los datos: $RR(PGV) = 1.7026 \times 10^{-4} \times PGV^{1.9756}$	Se utilizó una curva general de vulnerabilidad para los sistemas de redes propuesta por John M. Eidinger de G&E Engineering Systems Inc. Esta fue empleada por Uniandes (2005). No presentan ecuación de RR(PGV)
JICA (2002)	Correlación determinada con los datos: Para PGA<650 Gales $RR(PGA) = 1.5826 \times 10^{-9} \times PGA^{3.2307}$ Para PGA > 650 Gales RR(PGA) = 2	Análisis con datos de daño de casos colombianos, terremoto de Quindío 1999 (Armenia y Pereira) y basado en el trabajo de Kawakami's (1996). No presentan ecuación de RR(PGA)

Tabla 5.4. Resumen de curvas de vulnerabilidad para tuberías

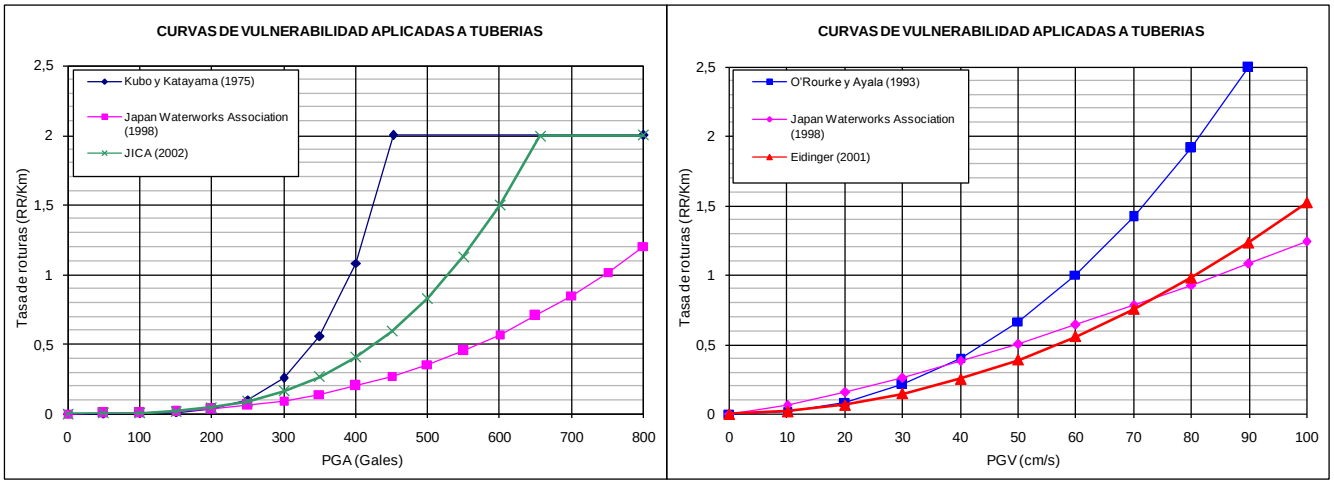

Figura 5.12. Resumen de curvas de vulnerabilidad de tuberías

Una vez considerado los diferentes soportes de las investigaciones que sustentan las curvas de vulnerabilidad, su aplicación en estudios previos y el nivel de representatividad al medio colombiano se recomienda para los análisis emplear la propuesta de JICA (2002) cuando se trabaje con PGA y la propuesta de Edinger (2001) para evaluar con PGV.

5.2.2 Cableado

Las evaluaciones de los posibles daños en los cables colgantes y enterrados de las redes energía eléctrica y de telecomunicaciones se adelantan con base en una metodología propuesta por JICA (2002), en general se estiman los porcentajes de daño de los cables a partir de curvas de vulnerabilidad sin tener en cuenta factores de corrección por las características propias del elemento o del sitio.

En el caso de cables colgantes se emplean curvas de vulnerabilidad con el porcentaje de daño de los postes, el daño a un poste causa daño al cable entre los postes afectados, con ello se estima la cantidad de metros de cableado afectado. Para los cables enterados se emplea la curva de vulnerabilidad de porcentaje de daño del tramo de cableado enterrado, con ello se estima igualmente los metros de cables enterrados afectados. En ambos casos no se afectan por factores de corrección.

Bajo el planteamiento anterior la expresión para evaluar los daños en tramos de cables colgantes y enterrados que será aplicada a las redes de energía eléctrica y de telecomunicaciones de las que se cuenta con información, se presenta a continuación.

Para cables colgantes:

Metros afectados = PD(pis) x longitud total del tramo de cable colgante

Para Cables enterrados:

Metros afectados: PD(pis) x longitud total del tramo de cable enterrado

Donde:

PD(pis): porcentaje de daño que se obtiene de la curva de vulnerabilidad con el parámetro de intensidad sísmico (pis)

Para aplicar la ecuación anterior se requiere seleccionar las curvas de vulnerabilidad que mejor representen las condiciones locales. Sin embargo se tienen disponibles únicamente las curvas para los postes y cables enterrados de energía eléctrica y telecomunicaciones usadas en el proyecto de escenario de daños para Bogotá JICA 2002 que se basan en la experiencia que dejó el terremoto de Kobe de 1995 (ver **Figura 5.13**).

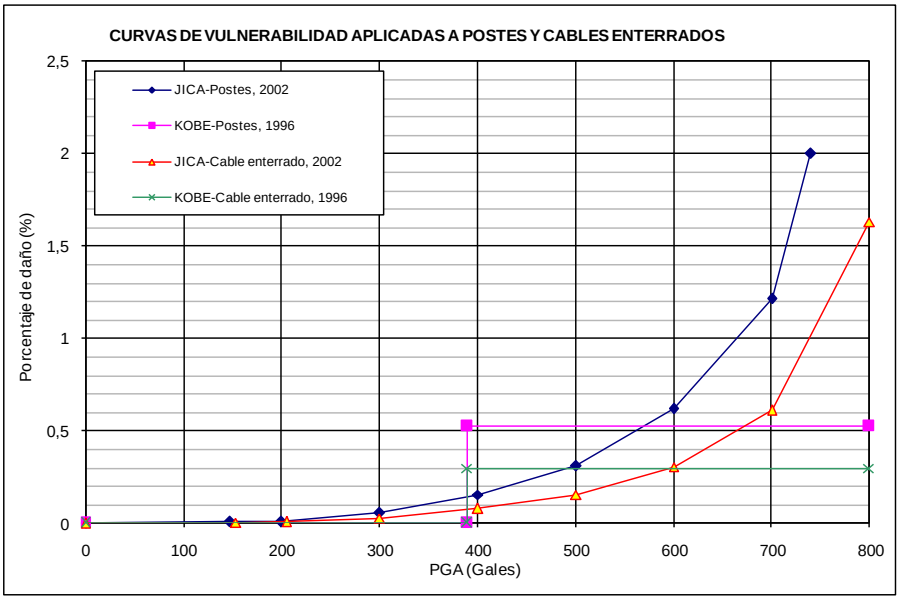

Figura 5.13. Resumen de curvas de vulnerabilidad de postes y cables enterrados

A partir de los datos reportados en el informe de JICA (2002) se estimaron las expresiones para la sistematización del proceso de cálculo como se muestran.

JICA (2002) Porcentaje de daño de cables colgantes:

$$PD(PGA) = 1 \times 10^{-10} \times PGA^{3.5190}$$

JICA (2002) Porcentaje de daño de cables enterrados:

$$PD(PGA) = 6 \times 10^{-11} \times PGA^{3.5336}$$

5.2.3 Tanques

Para el proyecto se ha decidido adoptar una metodología contenida en el documento *Seismic Fragility Formulations For Water System*, publicado en abril de 2001 por American Lifelines Alliance (A.L.A.). La razón de su elección radica en la factibilidad de aplicación para el caso de Bogotá, además de ser una metodología que tiene en cuenta la mayoría de aspectos relacionados con el daño en tanques.

La metodología se basa en la observación analítica de daños observados en estructuras de contención a causa de la acción sísmica de diferentes eventos, contenidos en una base de datos de 532 tanques que sufrieron lesiones al ser sometidos a aceleraciones del suelo de 0.1g o superiores. Esta propuesta contempla 5 estados posibles de daño propuestos por Hazus (1997), las cuales están definidas en función del costo de reparación y la operabilidad del tanque. La descripción de los estados de daño se presenta en la **Tabla 5.5**.

ESTADOS DE DAÑO	DESCRIPCIÓN	PROMEDIO PORCENTAJE DE PÉRDIDAS
DS1	Sin daño.	0%
DS2	Posibilidad de daños en líneas de conducción o cubiertas con presencia de pequeños derrames. Se requieren reparaciones menores. Aunque el tanque no queda fuera de servicio, no puede asegurarse un desempeño funcional adecuado del tanque.	1% a 20%
DS3	Daños en las paredes del tanque con presencia de fisuras en los elementos de concreto y plastificación por pandeo en tanques con paredes de acero (Pata de elefante), se presentan fugas considerables y constantes pero sin vaciado total.	20% a 40%
DS4	Posibilidad de falla por conexiones rígidas, daño en líneas de conducción de de entrada o salida, falla de muros. En cualquiera de estas situaciones o una combinación de las mismas se produce la pérdida completa del contenido del tanque sacándolo de servicio.	40% a 100%
DS5	Colapso completo.	100%

Tabla 5.5. Estados de daño en tanques (Hazus, 1997)

Los efectos dinámicos del contenido influyen en gran medida en la respuesta estructural del tanque, para tomar en cuenta este aspecto, la metodología divide los tanques de la base de datos en grupos de acuerdo al nivel de llenado de cada uno al momento del evento. Se aprecia como era de esperarse la gran influencia que el nivel de llenado tiene en el daño presentado en los tanques, siendo importante visualizar la diferencia existente entre los niveles de daño alcanzados en tanques con bajos niveles de llenado (<50%), respecto de los daños en tanques con altos niveles de llenado (>90%) o en niveles intermedios para condiciones entre (50% y 90%), lo que indica la importancia de conocer este atributo al momento de ocurrido el evento, dato que generalmente no es fácil de conseguir con la precisión requerida, para cuando no se tiene certeza del nivel de llenado a la hora del evento, la metodología recomienda suponer niveles de llenado altos (>90%), recomendación que será adoptada para este estudio, en todos aquellos casos en que no pueda disponerse del dato del nivel de llenado a la hora de ocurrencia del evento.

El anclaje del tanque es otro aspecto que influye en su desempeño sísmico, debido a que los tanques anclados tienden a presentar niveles de daño menores que los tanques no anclados. Por lo anterior y a partir del nivel de llenado y el anclaje

del elemento se asigna a cada uno de los tanques una de las 5 diferentes curvas de vulnerabilidad, que en sus abscisas presenta los valores de la demanda sísmica en función del PGA y que es asignado al elemento geográficamente de acuerdo a su localización y en las ordenadas se establecen los diferentes estados de daño ver **Figura 5.14**.

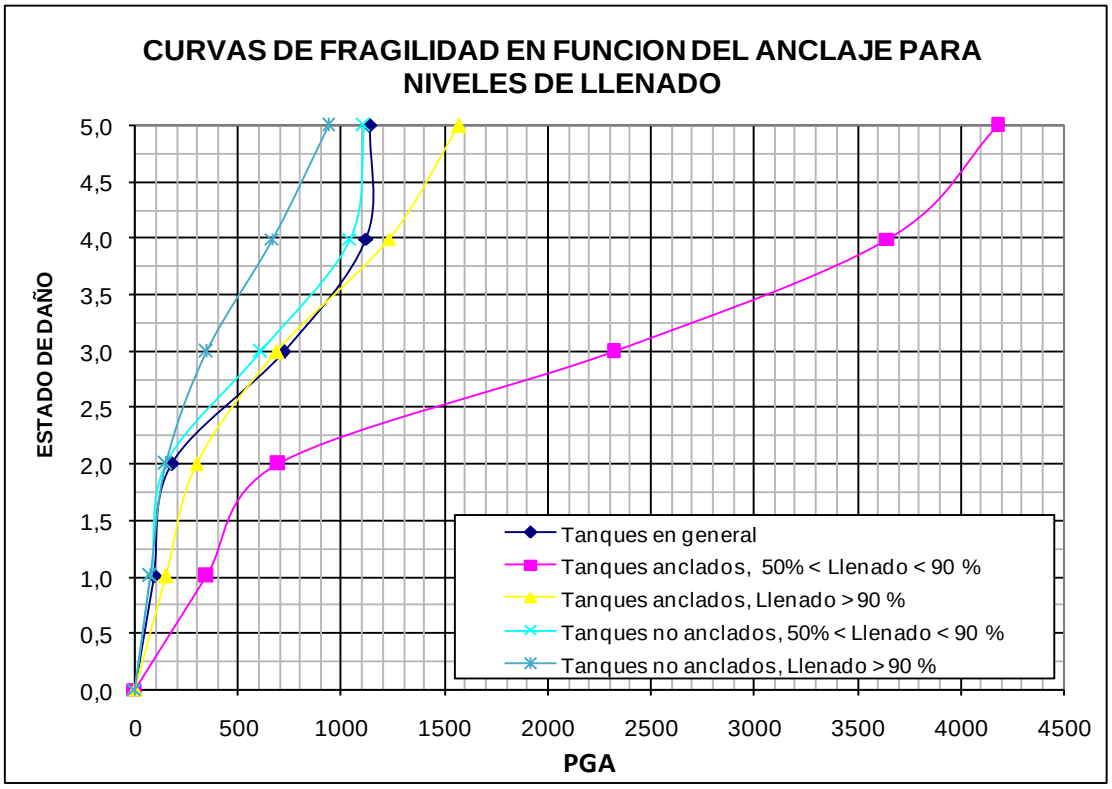

Figura 5.14. Curvas de vulnerabilidad para tanques en función del anclaje y nivel de llenado

5.2.4 Puentes

Para el proyecto se ha decidido adoptar la metodología *Risk Management Solutions Inc (RMS)*, ya que esta permite tomar en consideración algunas de las características estructurales más importantes de los puentes, y es aplicable tanto a puentes vehiculares como a puentes peatonales, tanto urbanos como carreteros. La descripción del método es presentada a continuación.

El método fue publicado en 1997, desarrollado mediante la compilación y refinamiento de metodologías desarrolladas con anterioridad, su principal ventaja radica en que mediante él es posible considerar el comportamiento diferenciado de los diferentes sistemas estructurales de los puentes. Para la predicción del daño, el método utiliza una familia de curvas de vulnerabilidad para diferentes clasificaciones de puentes, las cuales se agrupan teniendo en cuenta sus principales atributos estructurales, permitiendo incluir dentro de ellos la valoración por diseño con criterio sismo resistente o contemplar la ganancia de resistencia cuando se tiene evidencia de puentes viejos originalmente diseñados sin criterio sismo resistente o para requisitos de desempeño sísmico menores a los exigidos en la actualidad.

La respuesta de un sistema estructural tipo puente ante las solicitaciones impuestas por un evento sísmico depende de las características estructurales propias del sistema, lo que indica que los niveles de daño esperados serán diferentes ante una misma solicitación actuando sobre sistemas estructurales con características diferentes. El método tiene en cuenta esta situación mediante la creación de 12 clases diferentes de puentes, que permiten agruparlos según las características estructurales consideradas más importantes en el desempeño y respuesta sismo resistente de este tipo de estructuras. La

Tabla 5.6. Contiene los criterios de clasificación del método y los códigos de clasificación (columna 4), propuestos para el presente estudio.

CRITERIO DE CLASIFICACIÓN	TIPOLOGÍA.	ATRIBUTOS.	CÓDIGO DE CLASIFICACIÓN.	OBSERVACIONES.
Tipo	Grandes puentes	Luces > 150 m.	T1	
	Continuos	Luces <150m, continuos y monolíticos.	T2	
	Simplemente apoyados	Una o varias luces, cada una de ellas inferiores a 150 metros y con apoyos simples	T3	
Calidad de diseño	Puentes con diseño sismo resistente	Año de construcción >1995	D1	Para el caso Bogotá, aquellos puentes que por fecha de construcción hayan sido clasificados como D2, pero que hayan sido sometidos a trabajos de reforzamiento, serán homologados a la categoría D1.
	Puentes sin diseño sismo resistente	Año de construcción <= 1995	D2	
Características especiales de vulnerabilidad	Puentes sin características especiales de vulnerabilidad	Puentes de superestructura regular, con diseño dúctil o con apoyos restringidos.	V0	todos aquellos puentes que no poseen ninguna de las características especiales de vulnerabilidad
	Superestructura Irregular.	Puente curvo con ángulo mayor a 90 grados	V1	Visto en planta
		Puente con ángulo de esviaje mayor a 45 grados.		El ángulo de esviaje medido con relación al eje longitudinal del obstáculo sorteado.
	Puente sin diseño dúctil	Año de construcción<1973		Alta probabilidad de haber sido diseñado con código AASHTO no sísmico
	Puentes simplemente apoyados con más de una luz	Numero de luces >1, simplemente apoyadas.		Se consideran muy vulnerables debido a su escasa redundancia estructural (Poca capacidad de redistribución de esfuerzos).

Tabla 5.6. Criterios de clasificación para puentes

El primer criterio de clasificación, el tipo de puente, considera el hecho que a mayor complejidad de la estructura, generalmente son más estrictos los controles de calidad en los procesos de diseño y construcción de la estructura, lo cual como es de esperarse, influye en su nivel de respuesta sísmica.

El criterio de clasificación correspondiente a calidad de diseño, permite tener en cuenta el importante aumento en la confiabilidad estructural de aquellos puentes con consideraciones de diseño sismo resistente, respecto de las estructuras cuyo diseño no contempla este tipo de solicitaciones. Para el caso de Bogotá, se considera que a partir de la entrada en vigencia del código colombiano de diseño sísmico de puentes en el año de 1995, puede garantizarse que este tipo de estructuras son diseñadas con esta consideración.

En lo concerniente a las características especiales de vulnerabilidad, esta clasificación permite considerar configuraciones estructurales vulnerables y de diseño estructural con filosofías de diseño no dúctiles. La consideración denominada

estructura irregular, tiene en cuenta el aumento en el nivel de vulnerabilidad debido a la no simetría del sistema estructural, lo cual en algunos casos se ve agravado por la aparición de fuerzas con componentes que tienden a aumentar la acción de las fuerzas horizontales, como por ejemplo la acción de la fuerza centrifuga que los vehículos ejercen por fricción sobres la estructura cuando se tienen puentes curvos. Por otro lado, la inclusión de la categoría de puentes sin diseño dúctil utilizando la fecha de 1973, responde a la inclusión de la fecha de variación en la filosofía de diseño de este tipo de elementos en los Estados Unidos, filosofías que generalmente fueron aplicadas por largo tiempo en Colombia ante la ausencia de códigos y especificaciones nacionales. Por último lo referente a la consideración de puentes con elementos simplemente apoyados como consideración especial de vulnerabilidad, permite considerar la escasa capacidad de redistribución de esfuerzos que este tipo de estructuras posee, lo cual obviamente los constituye en elementos mucho más vulnerables que los elementos continuos.

La combinación de estos tres criterios de clasificación da como resultado un grupo de 12 posibles clases de puentes, como se muestra en la **Tabla 5.7**.

No	CLASE	DESCRIPCIÓN
1	T1D1V0	Grandes luces, diseño sismo resistente
2	T1D2V0	Grandes luces, sin diseño sismo resistente.
3	T2D1V0	Elementos continuos con diseño sismo resistente
4	T2D2V0	Elementos continuos, sin diseño sismo resistente.
5	T3D1V0	Elementos simplemente apoyados con diseño sismo resistente
6	T3D2V0	Elementos simplemente apoyados sin diseño sismo resistente
7	T1D1V1	Grandes luces, diseño sismo resistente, configuración vulnerable.
8	T1D2V1	Grandes luces, sin diseño sismo resistente, configuración vulnerable.
9	T2D1V1	Elementos continuos, con diseño sismo resistente, configuración vulnerable.
10	T2D2V1	Elementos continuos, sin diseño sismo resistente configuración vulnerable.
11	T3D1V1	Elementos simplemente apoyados, diseño sismo resistente, configuración vulnerable.
12	T3D2V1	Elementos simplemente apoyados, sin diseño sismo resistente, configuración vulnerable.

Tabla 5.7. Clasificación de puentes por tipología estructural

La metodología propone cinco estados posibles de daño, con las características mostradas en **Tabla 5.8**.

ESTADO DE DAÑO	DENOMINACIÓN.	DESCRIPCIÓN
DS1	Ningún daño	
DS2	Daño menor	Desconchamiento del concreto y fisuraciones menores sin plastificación del refuerzo.
DS3	Daño moderado	Fisuras y desconchamiento apreciables del concreto de la estructura sin plastificación del refuerzo. Posibilidad de asentamientos en los accesos, fisuras en llaves de cortante y plastificación de algunos conectores mecánicos.
DS4	Daño generalizado	Daño generalizado, descascaramiento del concreto de la estructura y plastificación del refuerzo pero sin colapso, las conexiones pierden casi completamente su capacidad y existen asentamientos importantes en los accesos.
DS5	Daño total	Colapso parcial o total de la estructura. Trabajos de recuperación costosos y probablemente inviables

Tabla 5.8. Estados de daño para puentes

Las de curvas de vulnerabilidad para puentes están resumidas en la **Figura 5.15**, nótese que los valores de aceleración del terreno corresponden a un valor medio.

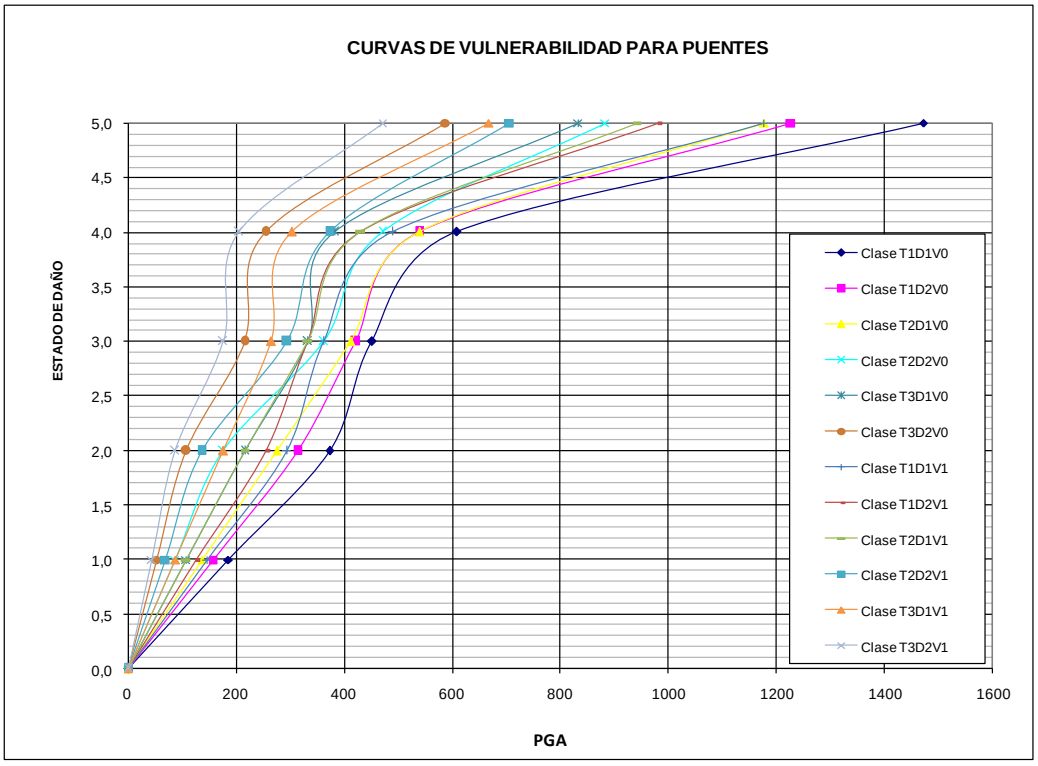

Figura 5.15. Curvas de vulnerabilidad para puentes

5.2.5 Vías

La metodología propuesta incluye la evaluación del daño directo causado por el movimiento sísmico. Se excluye del análisis la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de las vías desde el punto de vista operativo y la interdependencia entre vías y otros elementos de la infraestructura de transporte de la ciudad.

La metodología en general se propone: 1) la elaboración de un mapa de intensidad sísmica (escala modificada de Mercalli) a partir de la zonificación sísmica vigente (FOPAE, 2010) y un escenario de amenaza dado; 2) determinar la intensidad sísmica en cada tramo de vía de acuerdo con su ubicación geográfica; 3) evaluar la tasa de daño en cada tramo de vía a partir de curvas de daño en función de la intensidad sísmica.

Las curvas de vulnerabilidad representativas para las vías son establecidas mediante observaciones efectuadas en eventos sísmicos anteriores o mediante la opinión de expertos (ver **Figura 5.16**).

A pesar de que esta metodología es relativamente sencilla de implementar y de que es posible validar y ajustar resultados mediante la manipulación de los parámetros de evaluación, no siempre es posible contar con observaciones de eventos sísmicos anteriores que permitan elaborar curvas de vulnerabilidad ajustadas a las condiciones locales del área de estudio. Otras limitaciones importantes del método son:

- El parámetro de amenaza sísmica (intensidad sísmica MMI) es una medida cualitativa de la intensidad, lo cual impide establecer y comparar relaciones intensidad-daño para diferentes áreas de estudio de manera objetiva (Tung, 2004).

- No se consideran daños causados por efectos colaterales de licuación o deslizamiento.
- No se consideran las características particulares de cada tipo de vía.

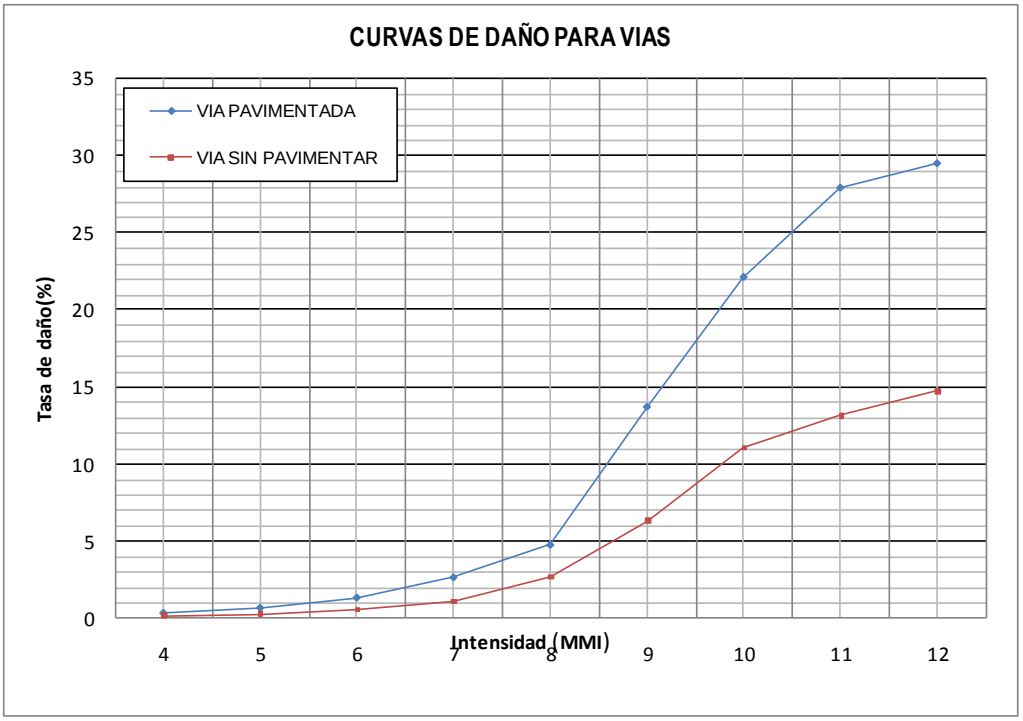

Figura 5.16. Curvas de daño para líneas vitales (Geo-hazards International, 1999).

CAPÍTULO 6

6 EFECTOS COLATERALES

Un sismo no solamente afecta a las edificaciones y líneas vitales, las ondas sísmicas pueden causar daños importantes a la superficie del terreno, suelos y rocas, los cuales a su vez pueden causar daño a las edificaciones y líneas vitales que se encuentren en los terrenos afectados, a estas afectaciones o daños del terreno se les denomina efectos colaterales.

La determinación de las áreas donde pueden ocurrir fenómenos de licuación o deslizamientos durante un evento sísmico es parte fundamental en el análisis de escenario de daño de cualquier ciudad en el mundo. Las evidencias muestran que los daños causados por los efectos colaterales ocasionan un gran número de pérdidas humanas y económicas, en algunos casos incluso mayores que las pérdidas registradas por daños estructurales. Por tal razón, es muy importante cualquier esfuerzo que se haga con el fin de estimar los posibles daños causados tanto por licuación como deslizamiento inducidos por sismos.

A continuación se describen las metodologías seleccionadas para identificar las zonas susceptibles a licuación o deslizamiento y el método seleccionado para estimar los daños por estos efectos colaterales inducidos por un sismo.

6.1 LICUACIÓN

Anteriormente, la licuación no era particularmente considerada por los ingenieros porque la mayoría de pérdidas humanas registradas en sismos se debían principalmente a fallas estructurales de edificaciones y obras civiles. Sin embargo, este fenómeno llamó la atención de expertos alrededor del mundo por sus devastadores efectos ocurridos durante los terremotos Good Friday en Alaska y Niigata en Japón. A partir de ese momento, la licuación ha sido estudiada extensivamente alrededor del mundo con el fin de entender cómo se genera y así mismo como establecer medidas que permitan prevenirla.

Los principales efectos que se presentan como consecuencia de la licuación son: pérdida de la capacidad portante del suelo, subsidencia en terraplenes, diques de ríos, casas y edificios, desplazamiento lateral de muros de contención o de taludes licuables y afectación de cimentaciones profundas principalmente. Todos estos daños ponen en riesgo la vida de personas y pueden suponer grandes pérdidas económicas.

Por lo general, la licuación se presenta en zonas tales como canales de antiguos cauces, llanuras aluviales o en rellenos antrópicos, áreas en las cuales anteriormente no se presentaba mucha actividad humana. Sin embargo, el reciente desarrollo de las ciudades se ha dirigido a este tipo zonas, lo que ha ocasionado un mayor número de la población habite o desarrolle actividades en zonas potencialmente licuables.

El término licuación fue inicialmente utilizado por Mogami y Kubu en 1953, quienes emplearon este término para definir las deformaciones causadas por cargas monotónicas, transientes o repetidas sobre suelos no cohesivos saturados bajo condiciones no drenadas. La licuación es un fenómeno que consiste en la pérdida de resistencia de suelos causada por el incremento en la presión de poros. Durante la ocurrencia de un sismo, la presión de poros aumenta, lo cual reduce el esfuerzo efectivo y por tanto el módulo de corte del material. El esfuerzo efectivo puede ser entendido como la fuerza de contacto que existe entre los granos de suelo, por lo que cuando la presión de poros aumenta este contacto entre granos desaparece ya que los granos quedan suspendidos en el agua y el suelo se convierte en una especie de lodo. Así, el material pierde su resistencia y por lo tanto se presentan grandes deformaciones ante cualquier tipo de esfuerzo.

La susceptibilidad de estratos ante licuación se determina mediante el Procedimiento Simplificado desarrollado por los profesores Seed e Idriss (1964). Este método calcula el factor de seguridad ante licuación (FS_L) como el cociente entre la resistencia ante la licuación CRR (Cyclic Resistance Ratio) y la demanda sísmica provista por un sismo CSR (Cyclic Stress Ratio). El Procedimiento Simplificado tan solo predice que pasará en una capa de suelo ubicada a una determinada profundidad. Por este motivo, Iwasaki et al. (1978) desarrolló el Índice de Potencial de Licuación (LPI) que permite establecer el comportamiento de una columna de suelo ante licuación y por consiguiente, el daño probable en superficie lo cual permite realizar mapas cuantitativos del potencial de licuación de una determinada zona. El LPI se calcula teniendo en cuenta la profundidad, el espesor acumulado y el factor de seguridad de los estratos licuables que es obtenido mediante el Procedimiento Simplificado; adicionalmente, se califica en un rango de valores que va desde 0 a 20, en donde valores menores representan un bajo potencial de falla por licuación y valores mayores corresponden a un alto potencial de falla por licuación.

6.1.1 Índice de Potencial de Licuación

Esta metodología está basada en el cálculo del un índice de potencial de licuación (LPI), desarrollado por Iwasaki et al. (1978) en capas de suelo entre 0 y 20m de profundidad. El LPI está definido con la Ec. 8 de acuerdo al modelo mostrado en la **Figura 6.1**.

$$\textbf{Ec. 8.}\quad LPI = \sum_{i=1}^{n} G_i W_i H_i$$

Donde G_i es la intensidad de la licuación expresada como $G_i=1-FS_L$. donde FS_L es el factor de seguridad de licuación, W_i es una función de ponderación expresada como $W_i=10-0.5z$, donde z es la profundidad media del estrato analizado en metros y H_i es el espesor del estrato considerado en metros, donde i es el numero de la capa y n el número total de capas.

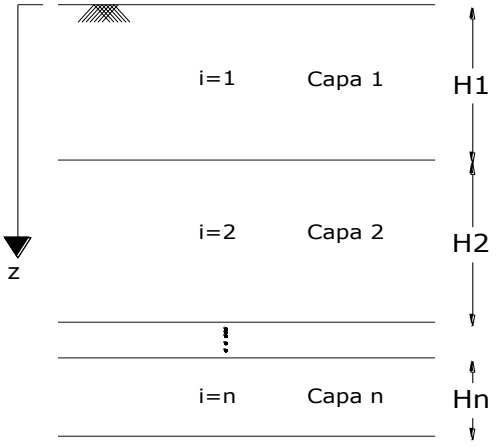

Figura 6.1. Esquema de las variables involucradas en el cálculo de LPI

El factor de seguridad de licuación FS_L es una comparación entre la resistencia cíclica del suelo (CRR) y los esfuerzos cíclicos generados por el sismo (CSR). La determinación de CRR depende del ensayo con el cual se determinan las propiedades del suelo, siendo los más comúnmente empleados SPT y CPT. Así, con el CRR y CSR el factor de seguridad ante licuación FS_L se determina mediante la Ec. 9.

$$\textbf{Ec. 9.}\quad FS_L = \frac{CRR}{CSR}$$

Con base en los resultados del ensayo SPT se evalúa mediante la Ec. 10 y Ec. 11 la resistencia cíclica CRR de la siguiente forma:

$$\textbf{Ec. 10.}\quad CRR = \frac{10^{2.54}}{Mw^{2.56}} \cdot CRR_{7.5}$$

$$\textbf{Ec. 11.}\quad CRR_{7.5} = \frac{1}{(34-(N_1)_{60CS})} + \frac{(N_1)_{60CS}}{135} + \frac{50}{(10*(N_1)_{60CS})} - \frac{1}{200}$$

Donde Mw es la Magnitud de momento del sismo y $(N_1)_{60cs}$ es el número de golpes normalizado y corregido por el porcentaje de finos, este se obtiene mediante la Ec. 12.

$$\textbf{Ec. 12.}\quad (N_1)_{60CS} = \alpha + \beta * (N_1)_{60}$$

Los valores de alfa y beta dependerán del contenido de finos presente en el material (ver **Tabla 6.1**).

Contenido de finos, FC (%)	α, alfa	β, beta
Menor o igual a 5%	0	1
Entre 5% y 35%	$e^{1.76-(190/FC^2)}$	$0.99+\frac{FC^{1.5}}{1000}$
Mayor o igual al 35 %	5	1.2

Tabla 6.1. Factores de corrección por contenido de finos

$(N_1)_{60}$ es el número de golpes normalizado mediante la Ec. 13 de acuerdo con los factores resumidos en la **Tabla 6.2**.

$$\textbf{Ec. 13.}\quad (N_1)_{60} = N_m * C_N * C_E * C_B * C_R * C_S$$

Factor	Descripción del factor	Expresión o valor empleado
C_N	C_N es un factor para normalizar el esfuerzo efectivo a una presión aproximada de 100 kPa la cual se expresa dentro de la ecuación como Pa.	$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}}\right)^{0.5}$
C_E	C_E es un factor de corrección de energía aplicada por el martillo durante la ejecución de la prueba. Se empleo el valor empleado para el caso colombiano	0.83
C_B	C_B es un factor de corrección debido al diámetro de la perforación. Se considero el menor factor posible dentro del rango de opciones.	1
C_R	C_R es un factor de corrección por la longitud de la cuerda. Se considero el menor factor posible dentro del rango de opciones.	0.75
C_S	C_S es un factor de corrección debido al tipo de muestreador. Se considero el tipo estándar de muestreador.	1

Tabla 6.2. Factores de corrección del resultado del ensayo SPT

El esfuerzo cíclico generado por el sismo CSR depende de la amenaza sísmica y del estado de esfuerzo, el cual se obtiene mediante la Ec. 14.

$$\textbf{Ec. 14.}\quad CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 * \frac{a_{\max}}{g} * \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} * r_d$$

Donde a_{max} es la aceleración pico en superficie en gravedades, g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2), σ_{vo} es el esfuerzo total vertical inicial a la profundidad en consideración en KPa, σ'_{vo} es el esfuerzo efectivo vertical inicial a la profundidad en consideración en KPa y r_d es el coeficiente de reducción del esfuerzo que se calcula mediante la Ec. 15.

Ec. 15.
$$z \le 9.15 \rightarrow r_d = 1.0 - 0.00765z$$
$$9.15 < z \le 23 \rightarrow r_d = 1.174 - 0.0267z$$

La evaluación del daño en términos del LPI está basada en análisis probabilísticos detallados, en la **Tabla 6.3** se incluyen la relación entre el LPI, el potencial de falla por licuación y el grado de daño por licuación y en la **Tabla 6.4** se presenta una descripción de los grados de daño relacionados.

LPI (SPT)	Potencial de falla por licuación	Grado de daño por licuación (LQ)
LPI=0	Nada extremadamente bajo	0
0<LPI<5	Bajo	1
5≤LPI≤15	Moderado	2
LPI>15	Alto-Muy alto	3

Tabla 6.3. Grados de daño por licuación basados en valores de LPI.

Estado de daño	Grado de daño
No hay daño	0.0
D1 (ligero)	1.0
D2 (moderado)	1.5
D3 (fuerte)	2.0
D4 (colapso parcial)	2.5
D5 (colapso total)	3.0

Tabla 6.4. Descripción de los grados de daño.

6.1.2 Zonificación del potencial de licuación

La metodología del Índice de Potencial de Licuación se evalúa para perfiles de suelo, por lo cual es necesario determinar zonas con perfiles homogéneos para aplicar este método por áreas y no de manera puntual. Para este fin se desarrollo una metodología de zonificación de potencial de licuación tomando como base el planteamiento de calcular un índice que represente la resistencia cíclica del depósito de suelo, el cual es intrínseco del sitio de acuerdo con las características del perfil analizado. Una vez calculado este índice de resistencia cíclica del terreno para las perforaciones localizadas en las áreas aluviales, de llanura o rellenos que son susceptibles a este fenómeno, se procede a realizar análisis geo-estadísticos para determinar espacialmente zonas de similar resistencia y así zonificar, de manera esquemática este procedimiento se ilustra en la **Figura 6.2**.

De acuerdo a la metodología el índice de resistencia cíclica I_{CRR} se calcula mediante la Ec. 16.

Ec. 16. $$I_{CRR} = \sum_{i=1}^{n} CRR_i W_i H_i$$

Donde CRR_i es el valor del CRR calculado para las capas de arenas licuables, W_i es una función de ponderación de la profundidad expresada como W_i=10-0.5z, H_i es el espesor de la capa considerada, z es la profundidad del suelo e, i es el numero de la capa.

Una vez calculado el I_{CRR} se realizan los procesos de interpolación espacial para determinar la variación de este índice dentro de las diferentes zonas geotécnicas consideradas. Finalmente, con base en los resultados de las interpolaciones se definen las zonas y perfiles típicos.

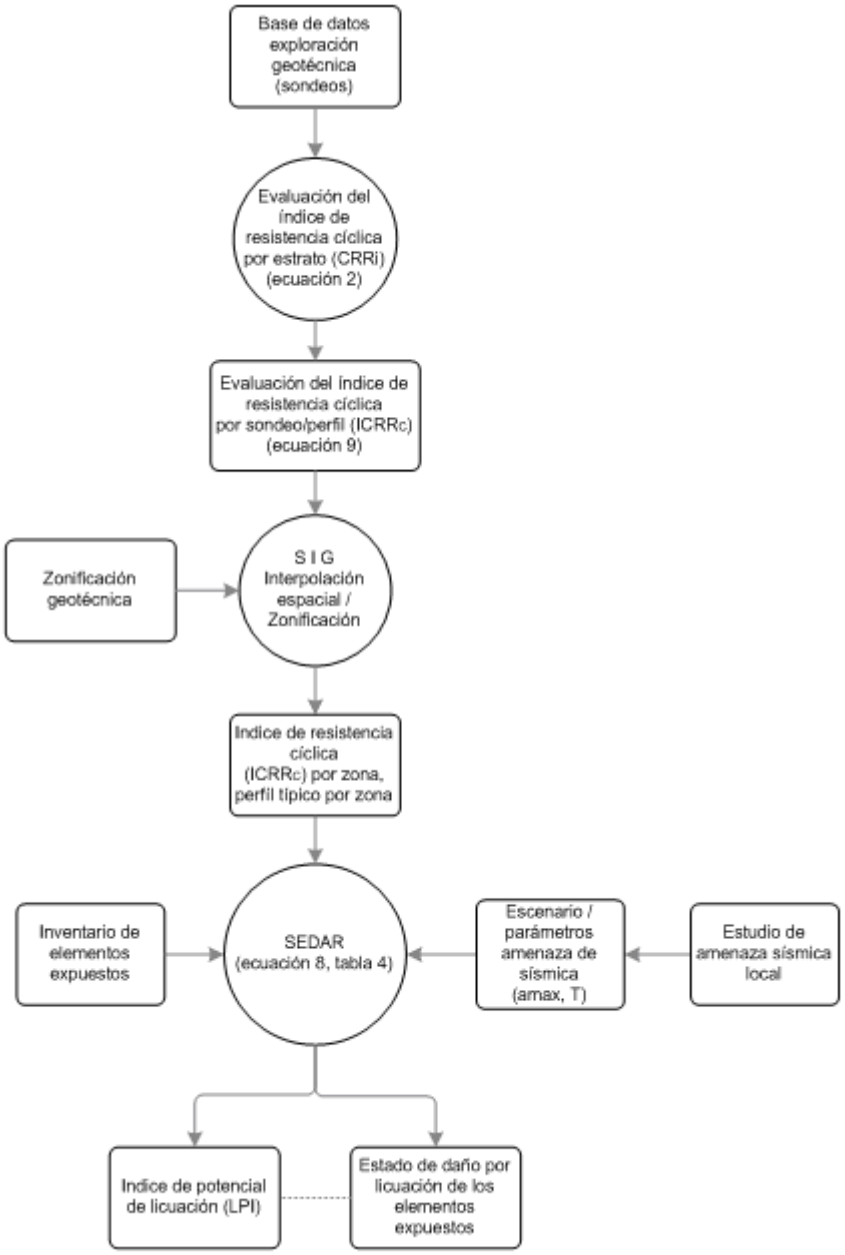

Figura 6.2. Metodología de zonificación del potencial de licuación

6.2 DESLIZAMIENTO

Los deslizamientos causados por eventos sísmicos producen grandes pérdidas humanas y económicas. En la mayoría de los casos este tipo de amenaza natural es subestimada y sus efectos devastadores no son considerados. Varios investigadores han encontrado que en los deslizamientos inducidos por sismo causan incluso más daños que otras amenazas sísmicas combinados. Por ejemplo, Kobayashi, 1981 encontró que más de la mitad de las muertes producidas

en grandes terremotos (M>6.9) en Japón entre 1964 y 1980 fueron causados por deslizamientos y en el caso del terremoto ocurrido en Alaska en 1964 el 56% del total del costo de los daños fue causado por deslizamientos inducidos por terremotos, por lo que la evaluación de la estabilidad sísmica de taludes es una de las más importantes actividades en el ámbito de evaluación de amenaza sísmica.

Para evaluaciones preliminares de estabilidad sísmica, conocer las condiciones bajo las cuales este tipo de deslizamiento han ocurrido es muy útil. Es lógico esperar que para sismos con mayor magnitud haya mayor cantidad de deslizamientos o que la afectación causada por un sismo dependa de la distancia a su fuente. Un estudio realizado por Keefer en 1984 mostró que para sismos locales, pueden desencadenar deslizamientos para magnitudes mayores a 4. La estabilidad de taludes es influenciada por muchos factores y para una completa evaluación de estabilidad sísmica es necesario evaluar los efectos de cada uno de ellos. En términos generales, los factores que más inciden en la estabilidad sísmica de un talud son la geología, hidrología, topografía y características mecánicas de los materiales presentes. Además, el análisis sísmico de estabilidad de taludes debe considerar los esfuerzos dinámicos inducidos por la vibración causada por el terremoto y los efectos de los esfuerzos dinámicos sobre la resistencia y el comportamiento esfuerzo deformación de los materiales del talud. Es así que, la estabilidad sísmica de taludes se divide en dos categorías basadas en los efectos predominantes en un talud determinado; 1. Análisis de estabilidad inercial y 2. Análisis de estabilidad por debilitamiento del material.

Existen varias metodologías de análisis de estabilidad inercial entre las que se encuentran los análisis pseudos-estáticos, el bloque del método deslizante de Newmark, Análisis de Makdisi-Seed y análisis de esfuerzo–deformación. De estos métodos, el único que provee información acerca de las deformaciones asociadas con la falla de un talud por que considera un umbral de aceleración a partir del cual se producirán desplazamientos, es el método del bloque deslizante de Newmark.

6.2.1 Bloque deslizante de Newmark

El método del bloque deslizante de Newmark establece una analogía entre la masa de suelo sobre una superficie de falla y un bloque deslizante sobre una superficie inclinada (Ver **Figura 6.3**) por lo que si las fuerzas actuantes sobre la masa de suelo son tan grandes que exceden las fuerzas resistentes disponibles el factor de seguridad será menor que 1, por lo que el bloque se moverá. Para determinar los daños causados el desplazamiento por este método existen varias metodologías, algunas de las cuales serán ampliadas en la siguiente sección.

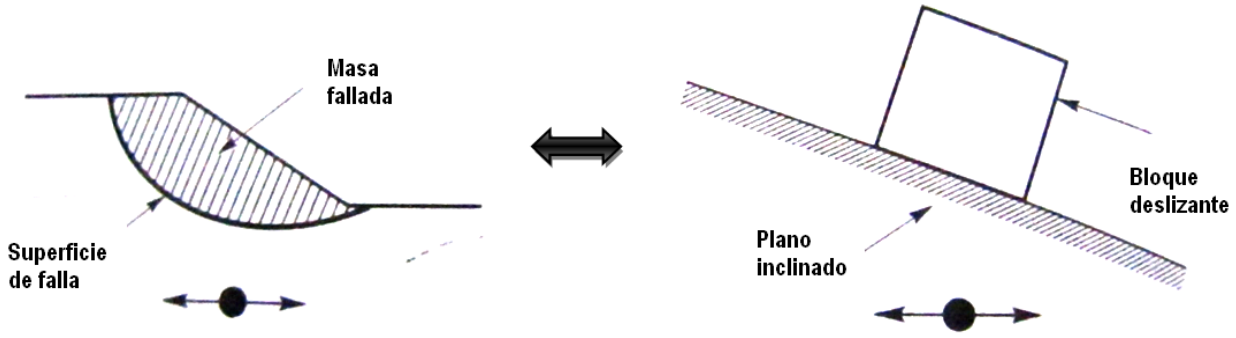

Figura 6.3. Analogía realizada por el método del bloque deslizante (Newmark, 1965)

El factor de seguridad estático obtenido a partir del análisis estático del bloque deslizante de Newmark se obtiene de la Ec. 17.

Ec. 17. $$FS = \frac{c}{\gamma * espesor - sen\beta} + \frac{\tan(\phi)}{\tan(\beta)} - \frac{m*10*\tan(\phi)}{\gamma*\tan(\beta)}$$

Donde *c* es la cohesión del material, γ es el peso unitario del material, ϕ es el ángulo de fricción interna del material, β es la inclinación del talud y *m* es la altura de la lámina de agua desde la superficie de falla. Su valor será supuesto a 0.5 con el fin de considerar una condición parcialmente saturada y *espesor* es el espesor del material sobre la superficie de falla o la altura del bloque deslizante.

Con el factor de seguridad, se procede a calcular la aceleración crítica (a_{crit}) mediante la Ec. 18, es decir el nivel de aceleración en el cual se puede activar el movimiento del terreno.

Ec. 18. $$a_{crit} = (FS - 1) * 980 * sen\beta$$

Donde *FS* factor de seguridad del talud y β es la inclinación del talud.

El desplazamiento en centímetros es calculado mediante el modelo propuesto por Yegian et al (1991) mediante la Ec. 19.

Ec. 19. $$D = \left(a_{\max} * N_{eq} * T^2\right) * 10^{0.22 - 10.12*\left(\frac{a_{crit}}{a_{\max}}\right) + 16.38*\left(\frac{a_{crit}}{a_{\max}}\right)^2 - 11.48*\left(\frac{a_{crit}}{a_{\max}}\right)^3}$$

Donde a_{max} corresponde a la aceleración pico del terreno en superficie, N_{eq} es el número de ciclos equivalente del sismo, *T* es el periodo dominante de la señal sísmica. Estos parámetros se obtienen del escenario de amenaza que se esté considerando.

La cuantificación del daño en función del desplazamiento permanente del deslizamiento, basado en el trabajo de Wilson y Keefer (1985), quienes definieron el desplazamiento crítico en 10 cm, más allá del cual se esperaría un daño significativo en fundaciones típicas de casas. Un trabajo posterior de Jibson et al (1998) definió una probabilidad de falla del 30% para un desplazamiento de 10 cm del talud. La Tabla 6.5 presenta la estimación del daño en función del desplazamiento calculado.

Desplazamiento esperado debido a deslizamiento	Descripción	Grado de daño por deslizamiento
D=0	Daño en terreno no observado	0
0<D≤5cm	Daños menores al terreno	1
5<D≤10cm	Daños moderados al terreno	2
D≥10cm	Daños severos al terreno	3

Tabla 6.5. Grados de daño por deslizamiento basados en valores de deslizamiento

6.2.2 Zonificación del potencial de deslizamiento

Para aplicar la metodología anterior es necesario determinar en primera instancia las zonas de potencial deslizamiento, para ello se requiere información geológica, geotécnica de parámetros de resistencia al corte del suelo y rocas, y el mapa de pendientes de la zona a analizar. Con lo cual se obtiene el mapa de susceptibilidad a deslizamiento en términos de aceleración crítica, este resultado se calibra con base en un inventario de deslizamientos y estudios de amenaza por remoción en masa. Finalmente en el sistema de cálculo se realiza la evaluación de los desplazamientos para cada escenario de amenaza, la metodología completa de cálculo se presenta en la **Figura 6.4**.

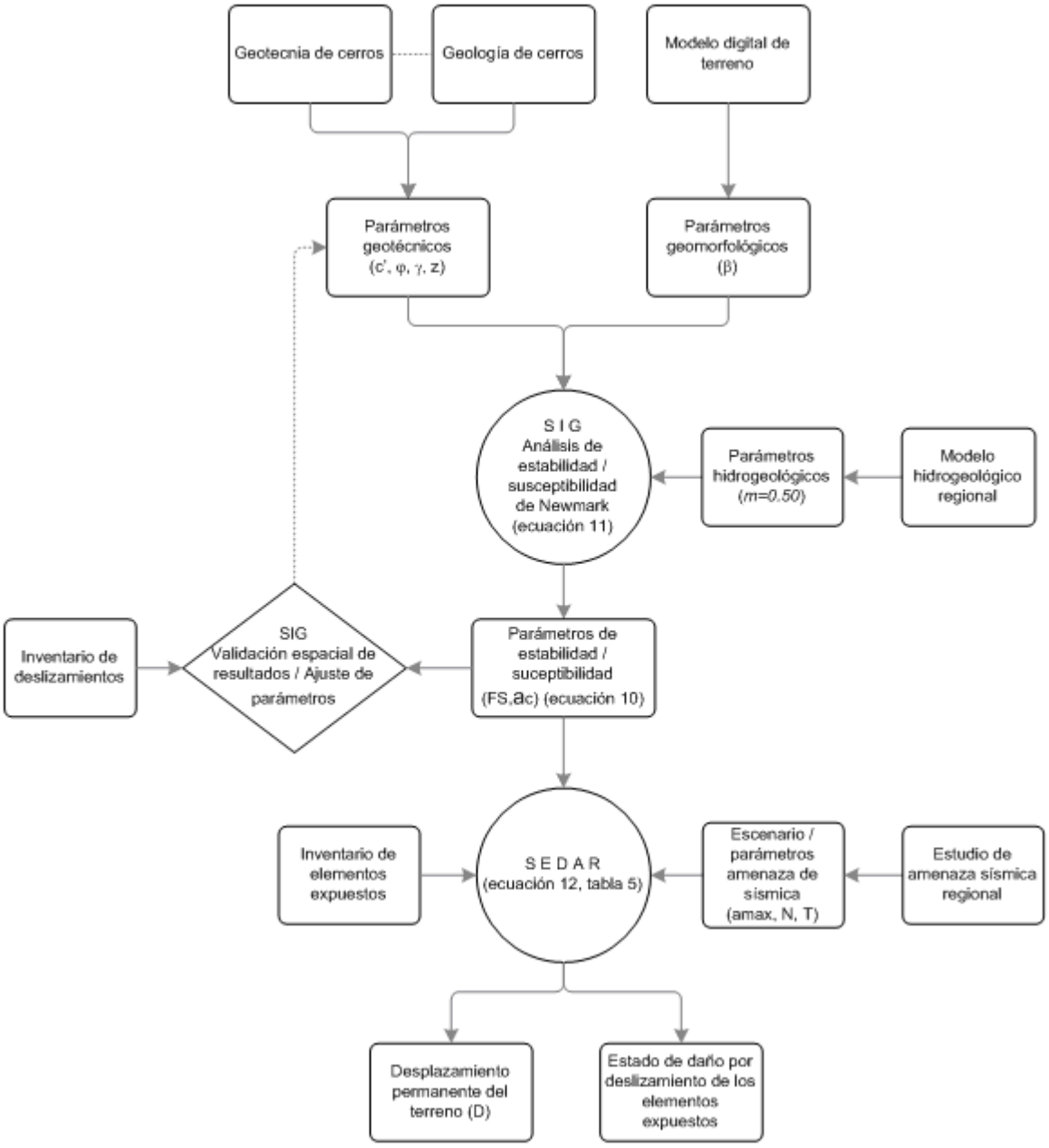

Figura 6.4. Metodología de zonificación del potencial de deslizamiento

CAPÍTULO 7

7 DAÑOS SECUNDARIOS

De acuerdo al enfoque conceptual desarrollado en este estudio se consideran daños secundarios a aquellos causados por el daño o afectación inicial de los elementos expuestos o del terreno. Se desarrolla un método para aumentar los daños de los elementos expuestos, edificaciones y líneas vitales, a causa de los efectos colaterales, licuación y deslizamiento. Otro método para estimar la afectación a la población y las pérdidas económicas directas debidas al daño de las edificaciones y se plantea un método para estimar las afectaciones a las vías vehiculares en forma de bloqueo a causas de los daños de las edificaciones.

7.1 DAÑOS DE LOS ELEMENTOS POR EFECTOS COLATERALES

Los daños iniciales de los elementos expuestos se evalúan en términos de indicadores de daño, estos buscan representar de manera descriptiva o cualitativa el nivel de daño estructural del elemento. Se tiene indicadores como el índice de daño de edificaciones, la tasa de roturas por kilómetro de tuberías, el porcentaje de daño de cables y vías y el estado de daño de tanques y puentes. Un resumen de los indicadores de daño empleados se presenta en la **Tabla 7.1**.

Elemento expuesto	Indicador de daño	Unidad	Rango	Escala Cualitativa
Edificaciones	Índice de daño ID	%	0-100	0≤ID<2.5 - Sin daño 2.5≤ID<7.5 – Bajo 7.5≤ID<15 - Moderado 15≤ID<30 - Considerable 30≤ID<60 - Fuerte ID≥60 – Severo
Tuberías	Tasa de roturas RR	Número de roturas por Km	0-5	0<RR<0.1 - Sin daño 0.1<RR<0.5 - Bajo 0.5≤RR<1.0 - Considerable RR≥1.0 - Fuerte
Cables	Porcentaje de daño DP	%	0-2	0≤DP<0.01 - Sin daño 0.01≤DP<0.1 - Bajo 0.1≤DP<0.5 - Considerable DP≥0.5 - Severo
Vías	Porcentaje de daño DP	%	0-30	0≤DP<1 - Sin daño 1≤DP<5 - Bajo 5≤DP<10 - Considerable DP≥10 - Severo
Tanques	Estado de daño DS	Adimensional	1 - 5	DS=1 - Sin daño DS=2 - Bajo DS=3 - Moderado DS=4 - Fuerte DS=5 - Severo
Puentes	Estado de daño DS	Adimensional	1 - 5	DS=1 - Sin daño DS=2 - Bajo DS=3 - Moderado DS=4 - Fuerte DS=5 - Severo

Tabla 7.1. Elementos expuestos y sus escalas de daño

De manera similar a los elementos expuestos, los métodos que evalúan los efectos colaterales clasifican el nivel de daño en función del índice de potencial de licuación y del desplazamiento del terreno como se explico en el capítulo anterior. De esta manera se tienen cuatro diferentes grados de daño establecidos que se muestran en la **Tabla 7.2**.

Efecto colateral	Indicador de daño	Unidad	Rango	Escala Cualitativa
Licuación	Grado de daño licuación (GDL)	Adimensional	0-3	GDL=0 - Sin daño GDL=1 – Bajo GDL=2 – Moderado GDL=3 - Fuerte-severo
Deslizamiento	Grado de daño deslizamiento (GDD)	Adimensional	0-3	GDD=0 - Sin daño GDD=1 – Bajo GDD=2 – Moderado GDD=3 - Fuerte-severo

Tabla 7.2. Escala de daño por efectos colaterales

Debido a que se evalúan dos efectos colaterales, licuación y deslizamiento, es necesario calcular un grado de daño total GDT que reúna ambas condiciones, para tal efecto se propone en la **Tabla 7.3** una matriz que combina el grado de daño por licuación GDL con el grado de daño por deslizamiento GDD para obtener el GDT.

GDL \ GDD	0	1	2	3
0	0	1	2	3
1	0	1	2	3
2	1	2	3	3
3	2	3	3	3

Tabla 7.3. Grado de daño total - GDT

Se debe tener en cuenta que para el método de tuberías ya se encuentra incluido un factor de afectación por licuación en la evaluación del factor de vulnerabilidad y no es consistente que se corrija el daño por este efecto, por consiguiente se asigna a el factor de corrección por licuación el valor de la unidad "C_l=1", esto para no afectar el factor de vulnerabilidad "Fv" por efectos de licuación, por consiguiente el método planteado considerara este efecto.

Finalmente, a partir de los descriptores de daño inicial de los elementos expuestos y el grado de daño total por efectos colaterales se proponen una serie de ecuaciones que permiten aumentar los daños iniciales si el sitio donde se ubica el elemento está afectado por licuación o deslizamiento. La metodología de corrección consiste en asignar un valor de corrección y operarlo con el grado de daño total y este producto adicionarlo al indicador de daño inicialmente calculado, se debe tener una consideración adicional y es que el valor máximo que puede tomar el indicador de daño será el máximo permitido para cada una de las escalas descriptivas de daño. A continuación se presentan las expresiones y las variables correspondientes para cada uno de los métodos.

7.1.1 Edificaciones

En el cálculo de los daños iniciales en edificaciones se obtiene el índice de daño "ID" expresado en porcentaje, el cual representa la afectación de la edificación, que es función de variables como el número de pisos, la ductilidad del sistema resistente, la pendiente del terreno y del escenario de daño planteado para la evaluación entre otros. El grado de daño total "GDT" como se presentó anteriormente representa el nivel de daño adicional por los efectos colaterales de licuación y deslizamiento, luego se asigna el valor de corrección "VC" que cumple la función de cuantificar el daño adicional entre cada uno de los grados de daño y su valor es fijado por opinión de expertos, por último se operan los valores anteriormente

mencionados como se indica en la Ec. 20 para obtener el índice de daño corregido que contempla los daños de segundo orden.

Ec. 20. $$IDc = ID + GDT * VC$$

Donde IDc: índice de daño corregido, ID: índice de daño, GDT: grado de daño total, VC: valor de corrección VC=10%.

7.1.2 Tuberías

Para el caso de las tuberías la metodología pretende calcular una tasa de roturas en relación a la longitud de la conducción a partir de características del elemento y su entorno tales como el diámetro y el material de la tubería, topografía del terreno, zona de respuesta sísmica en la que se localice y susceptibilidad de licuación, este último factor de licuación no se tendrá en cuenta dado que el método de corrección de los daños lo contempla. A partir de estos datos se calcula la tasa de roturas inicial "RR", posteriormente es asignado el grado de daño total "GDT" según sean las condiciones de exposición del elemento a los fenómenos de licuación y deslizamiento, para operar junto con el valor corrección "VC" que cumple la función de cuantificar el daño adicional entre cada uno de los grados de daño, para obtener así la tasa de roturas corregida "RRc".

Ec. 21. $$RRc = RR * (1 + GDT * VC)$$

Donde RRc: tasa de roturas corregida, RR: tasa de roturas, GDT: grado de daño total y VC: valor de corrección VC=0.33.

7.1.3 Cables

El procedimiento para la evaluación de los daños en cables es similar al de tuberías excepto que en este solo se tiene en cuenta la zona de respuesta sísmica y sus parámetros de intensidad asociados, Ver Ec. 22.

Ec. 22. $$DPc = DP * (1 + GDT * VC)$$

Donde DPc: porcentaje de daño corregido, DP: porcentaje de daño, GDT: grado de daño total y VC: valor de corrección VC=0.1.

7.1.4 Tanques y Puentes

En lo relacionado con estos elementos el daño inicial se caracteriza con el parámetro adimensional "estado de daño", el cual se clasifica en cinco diferentes niveles, en lo relacionado con tanques el estado de daño se obtiene a partir de parámetros como el anclaje y el nivel de llenado.

El estado de daño en puentes se caracteriza a partir de parámetros como longitud de la luz más larga, año de construcción, curvatura y continuidad de la superestructura entre otros. A partir de la caracterización del estado de daño se procede a asignar el grado de daño total "GDT" según sean las condiciones de exposición de los elementos frente a licuación y deslizamiento y de igual forma a los procedimientos anteriores se procede con el valor de corrección que se fijó para así obtener un aumento del daño por efectos colaterales. Ver Ec. 23.

Ec. 23. $$DSc = DS + GDT * VC$$

Donde DSc: Estado de daño corregido, DS: estado de daño, GDT: grado de daño total y VC: valor de corrección VC=1. Si DSc da mayor a 5 se deja como 5.

7.1.5 Postes y torres de energía o telecomunicaciones

Para la evaluación de los daños en elementos puntuales se parte de que por efecto directo o inicial de las ondas sísmicas estos no sufren afectaciones, pero por efectos colaterales si. De modo que el estado de daño corresponderá al mismo valor del grado de daño total combinado ver Ec. 24.

Ec. 24. $$DS = GDT$$

7.1.6 Vías

El procedimiento para la evaluación de los daños secundarios en vías es similar al de tuberías excepto que en este solo se tiene en cuenta la zona de respuesta sísmica y sus parámetros de intensidad asociados, Ver Ec. 22.

Ec. 25. $$DPc = DP * (1 + GDT * VC)$$

Donde DPc: porcentaje de daño corregido, DP: porcentaje de daño, GDT: grado de daño total y VC: valor de corrección VC=10.

7.2 AFECTACIONES A LA POBLACIÓN Y PÉRDIDAS ECONÓMICAS DIRECTAS

Las causas por las cuales un sismo produce afectados se resume en cuatro fuentes, la primera originada por causas individuales como infartos, arrojos desde altura, caídas en intentos de evacuación y pánico grupal; la segunda causa está asociada en razón de la caída o volcamiento de los elementos no estructurales o del mobiliario de las viviendas como caída de muros, estantes y rotura de vidrios entre muchos otros. La tercera asociada a colapso parcial o total de las edificaciones, La cuarta y última asociada a los efectos colaterales como lo son deslizamientos, derrumbes, licuación y tsunami.

Entendiendo que las ciudades no son otra cosa que un gran conglomerado de estructuras diversas, en las que se agrupan permanentemente las personas, por tanto es lógico suponer que ante la acción de un evento sísmico cualquier tipo de afectación que puedan sufrir las estructuras de la ciudad repercutirá directamente sobre las personas que en ella habitan. Tomando en cuenta este último aspecto, es evidente que para calcular las afectaciones que un sismo causa sobre la población residente en la ciudad donde se manifiesta el evento, es necesario primero conocer los niveles de daño que las estructuras de la ciudad llegan a sufrir a causa del sismo, para poder luego continuar con la etapa de evaluación de la afectación directa sobre la población. El aspecto relacionado con el daño de las estructuras ya ha sido cubierto mediante las metodologías adaptadas para tal fin tal y como se describe en los numeral anteriores de este documento.

El desarrollo de un método para la evaluación de las afectaciones sobre la población es una tarea de gran envergadura, debido principalmente a la imposibilidad de predecir los sismos y el nivel de ocupación y las condiciones que determinada estructura estará soportando en el instante de ocurrencia del evento. Este hecho obliga a que las metodologías desarrolladas para la evaluación de la afectación sobre las personas tengan en cuenta por lo menos el tipo de uso de la estructura, la posible cantidad de ocupantes, la tipología estructural y hasta la hora de ocurrencia del evento.

Para el presente estudio se ha hecho una simbiosis entre dos metodologías, aprovechando la relativa facilidad de aplicación de la ecuación propuesta por Corbun y Spence en 1992, y utilizando los ajustes y calibraciones que la Universidad de los Andes que realizó anteriormente sobre diversos parámetros para la ciudad de Bogotá. En todo caso el método propuesto emplea varios factores que tienen gran incertidumbre, razón por la cual los resultados obtenidos se deben interpretar como valores indicativos.

7.2.1 Factor de colapso

El cálculo de las afectaciones a la población parte del principio que estos efectos son causados principalmente por aquellas edificaciones que presentan algún grado de colapso estructural, dicho daño estructural se representa con el factor de colapso, que es expresado como una función del índice de daño, el cual representa el límite inferior con el cual las edificaciones presenta algún tipo de colapso estructural (ver **Figura 7.1** y Ec. 20), para el cual dicho límite se encuentra en el valor numérico de 0.5, lo que quiere decir que para valores mayores a este límite se presentan afectados, los cuales son proporcionales al nivel de ductilidad del sistema estructural.

$$\textbf{Ec. 26.}\quad Fcps = 1 - 0.5^{\left(\frac{ID\%}{CFc}\right)^{fm}}$$

Donde Fcps: Factor de colapso, representa el punto en el cual el daño en la edificación se ve reflejado en afectaciones a sus ocupantes, su valor se encuentra entre 0 y 1, ID%: Índice de daño en edificaciones, representa el nivel de deterioro que presenta la estructura después de someterse a la solicitación sísmica y puede provenir del uso del Método italiano ó Miranda, se mide en escala porcentual variando entre 0 y 100, CFc: Coeficiente de factor de colapso, este corresponde a un valor de índice de daño el cual es configurable y representa el valor con el cual la relación ID% y CFc tiende a uno lo que arroja un Fcps igual a 0.5 y fm: Factor de forma, este valor hace que la curva representada sea más o menos pendiente. Para el estudio se recomienda emplear como CFc un 30% y un fm de 3.

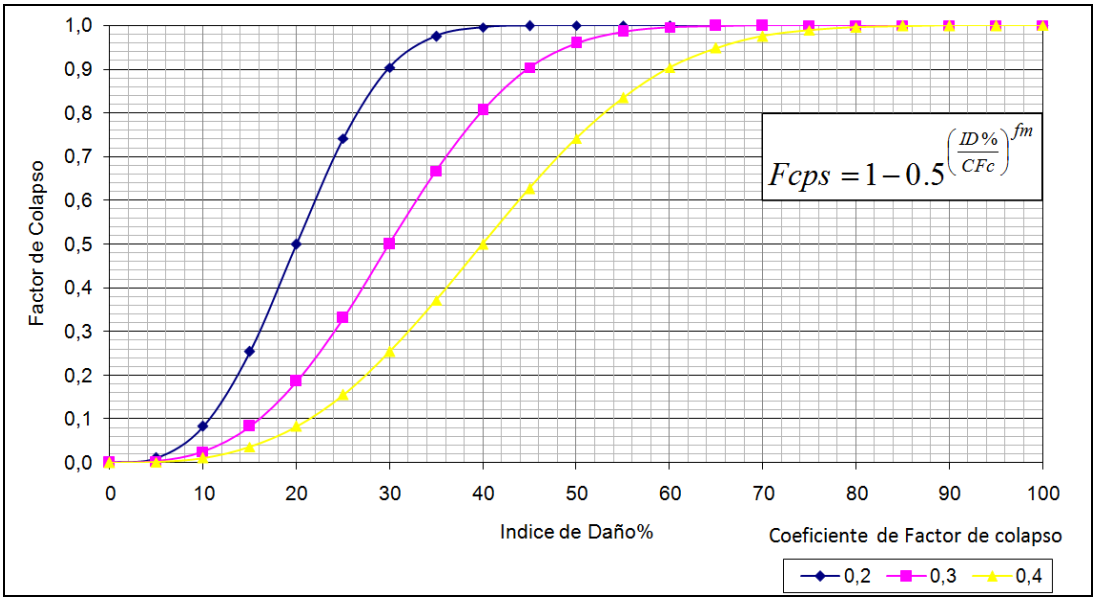

Figura 7.1. Factor de colapso contra índice de daño

7.2.2 Ocupación de las edificaciones de día y noche

La metodología planteada considera dos modos de distribución de la población, la primera es la distribución horaria la cual es dependiente del uso de la edificación, es decir en usos netamente residenciales la población en la noche será un porcentaje muy alto de la población censal, caso opuesto a lo que ocurrirá en horas del día. Para usos no residenciales como los comerciales, industriales, dotacionales, etc., la distribución será por el contrario muy alta en horas del día y muy baja en horas de la noche y esta diferirá de la determinada por el censo habitacional, para tener en cuenta este comportamiento se definieron factores de densidad y porcentajes de ocupación de día y noche para el cálculo del número de ocupantes como se muestra en la **Tabla 7.4,** Ec. 27 y Ec. 28.

Ec. 27. $$Nocup(noche) = \frac{\%ocupnoche}{100} * hab$$

Ec. 28. $$Nocup(dia) = \frac{\%ocupdia}{100} * \frac{denpob * Fden * Acman}{1*10^6}$$

Donde *Nocup (noche)* es el número de ocupantes de noche, *%ocupnoche* es el porcentaje de ocupación de noche, *hab* corresponde al número de habitantes, *Nocup(dia)* es el número de ocupantes de día, *%ocupdía* es el porcentaje de ocupación de día, *denpob* corresponde a la densidad de población, *Fden* es el factor de densidad que es función del uso y *Acman* es el área construida por manzana que corresponde a la unidad de análisis de este método.

Grupo de uso	Factor de densidad	% Ocupación día	% Ocupación noche
No edificados, espacio público o rural	0	0	0
Residencial	1	20	80
Comercial menor	2	80	20
Comercial mayor	4	80	20
Industria	2	80	20
Dotacional	3	0.8	20
Recreacional y Deportivo	0.5	20	80

Tabla 7.4. Factor de densidad de población y porcentajes de ocupación para distintos usos

7.2.3 Número de afectados de día y noche

Las afectaciones a la población pueden clasificarse en cuatro grupos, el primero que estima el número de heridos leves que son aquellos que requieren atención en el sitio, el segundo que estima el número de heridos que requieren atención hospitalaria pero su condición de salud no pone en riesgo su subsistencia, el tercero agrupa a los heridos graves que son aquellos que requieren atención inmediata de los servicios especializados de urgencias, el cuarto se encuentran las víctimas fatales. Para estimar estos afectados se debe calcular primero las personas atrapadas en los escombros de las edificaciones que serán proporcionales a los afectados de cada tipo.

Para estimar el número de atrapados se tiene en cuenta el número de ocupantes, el factor de colapso y el porcentaje de atrapados que es función del tipo de estructura como se ilustra en la Ec. 29 que se aplica para las condiciones de día y noche. El porcentaje de atrapados es función de la ductilidad de la estructura se define en la **Tabla 7.6**.

Ec. 29. $$\#Atrapados = Nocup * \frac{\%atrapados}{100} * Fcps$$

Ductilidad	% Atrapados
Estructura dúctil	30
Estructura frágil	5

Tabla 7.5. Porcentajes de atrapados según ductilidad

Por medio de las siguientes expresiones se estiman los tipos de afectados que tienen en cuenta el porcentaje de fatalidad que tiene la estructura donde se encuentren tal como se resumen en la **Tabla 7.6**.

Ec. 30. $$Heridos_leves = \#atrapados * 0.4 * \left(1 - \frac{\%Fatalidad}{100}\right)$$

Ec. 31. $$Heridos_atencion = \#atrapados * 0.33 * \left(1 - \frac{\%Fatalidad}{100}\right)$$

Ec. 32. $$Heridos_graves = \#atrapados * 0.27 * \left(1 - \frac{\%Fatalidad}{100}\right)$$

Ec. 33. $$Muertos = \#atrapados * \left(\frac{\%Fatalidad}{100}\right)$$

Ductilidad	% Fatalidad
Estructura dúctil	50
Estructura frágil	15

Tabla 7.6. Porcentajes de fatalidad según ductilidad

7.2.4 Pérdidas económicas directas

La evaluación de los costos económicos directos asociados a los daños por el sismo en una ciudad constituye un parámetro de difícil evaluación, debido al gran número de variables involucradas y su alto grado de incertidumbre. Para este proyecto se realizará la evaluación de costos teniendo como base el indicador de daño de mayor valor numérico entre el índice de daño y el factor de colapso, el cual se opera con el área construida y el valor por metro cuadrado construido. Este análisis no involucra los costos por afectaciones de los contenidos de las edificaciones dañadas ni el lucro cesante por la pérdida de su funcionalidad. De esta manera el costo económico por unidad de análisis se calcula con la Ec. 34.

Ec. 34. $$Perdidas = Indicador_daño * Aconstruida * valor_m^2 construccion$$

7.3 ÍNDICE DE BLOQUEO DE VÍAS

La metodología para la evaluación de la pérdida del nivel de servicio está basada en la metodología de indicadores de bloqueo de vías urbanas (Tung, 2004). Se proponen dos indicadores: densidad de bloqueo e índice de bloqueo lateral los cuales se evalúan a nivel de UPZ.

7.3.1 Densidad de bloqueo

El índice de bloqueo se estima en función de la densidad y del estado de daño de las edificaciones esperado en la unidad de análisis. La información requerida es la siguiente:

- Resultados de daño en edificaciones para el escenario de daño seleccionado (incluye identificador de la edificación y estado de daño).
- Unidades de análisis (UPZ).
- Proceso de evaluación

A continuación se presenta la descripción del proceso de evaluación propuesto:

- Seleccionar un escenario de amenaza símica.
- Seleccionar los resultados de daño en edificaciones para el escenario de daño seleccionado.

- Establecer una tasa de daño para la cual se considera que las edificaciones alcanzan el estado de colapso. Se adopta un valor por defecto del 65% (Mena, 2002).
- Identificar el número de edificaciones que han alcanzado el estado de colapso dentro de la unidad de análisis.
- Identificar el número de total edificaciones que existen dentro de la unidad de análisis.
- Establecer el área de la unidad de análisis.
- Evaluar el indicador densidad de bloqueo de acuerdo con:

$$\textbf{Ec. 35.}\quad densBlq = \frac{NoEdClp}{NoEd} * Aup$$

Donde dens*Blq:* Densidad de bloqueo por escombros de la unidad de análisis (UPZ), *NoEdClp:* Número de edificaciones colapsadas en la unidad de análisis (UPZ), *NoEd:* Número total de edificaciones en la unidad de análisis (UPZ), *Aupz:* Área total de la unidad de análisis (UPZ) en metros cuadrados.

7.3.2 Índice de bloqueo lateral

El índice de bloqueo lateral se evalúa en función del estado de daño de las edificaciones, material de construcción, del espacio libre entre edificaciones y del ancho de las vías. Se calcula a nivel de tramos de vía en cada unidad de análisis. La información requerida es.

- Resultados de daño en edificaciones para el escenario de daño seleccionado (incluye identificador de la edificación, altura, material de construcción y estado de daño).
- Localización geográfica de las vías vehiculares (identificador de la vía, ancho de la vía, clasificación).
- Unidades de análisis (UPZ).

A continuación se presenta la descripción del proceso de evaluación propuesto:

- Seleccionar un escenario de amenaza símica.
- Seleccionar los resultados de daño en edificaciones para el escenario de daño seleccionado.
- Establecer una tasa de daño para la cual se considera que las edificaciones alcanzan el estado de colapso.
- Establecer la altura típica de las edificaciones que han alcanzado el estado de colapso dentro de la unidad de análisis.
- Establecer el material típico de las edificaciones que han alcanzado el estado de colapso dentro de la unidad de análisis.
- Evaluar el indicador índice de bloqueo de la UPZ de acuerdo con:

$$\textbf{Ec. 36.}\quad IBLqUpz = hEdClp * \tan\alpha * m$$

Donde *IBlqUpz:* Es el índice de bloqueo por escombros de la unidad de análisis (UPZ), *hEdClp:*Es la altura típica de las edificaciones colapsadas en la unidad de análisis (UPZ) en metros, α*:* Es el ángulo (en grados) que forma el depósito de

escombros respecto a la fachada de la edificación (ver **Figura 7.2**). *m:* Es un factor de corrección por el tipo de material de construcción de la edificación. Por defecto m=1.3 para edificaciones en concreto y m = 1.1 para edificaciones en mampostería (Tung, 2004).

- Determinar el ancho de una vía *i* ubicada en la unidad de análisis (UPZ).

- Calcular la distancia libre entre edificaciones mediante:

Ec. 37. $$dEd = anchoVia * gV$$

Donde *dEd:* Distancia libre entre edificaciones en metros, *anchoVia:* Ancho de la vía en metros, *gV:* Es un factor de corrección según el tipo de vía.

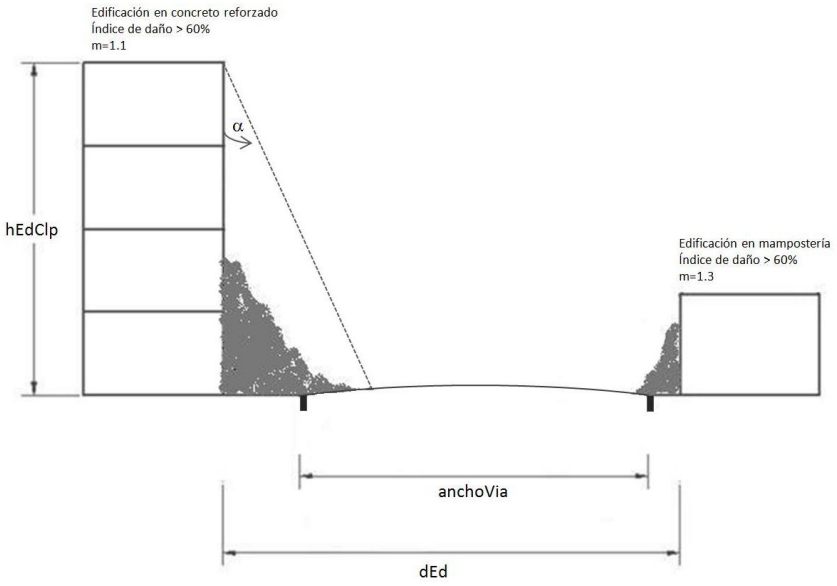

Figura 7.2. Evaluación del índice de bloqueo lateral en vías.

Calcular el índice de bloqueo lateral de la vía como la relación entre el índice de bloqueo lateral de la UPZ calculado en el literal anterior y la distancia libre entre edificaciones calculado según:

Ec. 38. $$IblqVia = \frac{dEd}{IBlqUpz}$$

Donde *iBlqVia:* Es el índice de bloqueo de la vía, *dEd:* Distancia libre entre edificaciones en metros, *IBlqUpz:* Es el índice de bloqueo por escombros de la unidad de análisis (UPZ).

CAPÍTULO 9

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La escogencia y aplicabilidad de las metodologías expuestas en el presente informe están ligadas fundamentalmente a la disponibilidad de la información requerida o bien al nivel de representatividad con que la metodología puede ser aplicada al entorno colombiano.

Se logró definir en primera instancia un enfoque conceptual adecuado para el sistema de cálculo con el cual se estructuró la forma con la cual se escogieron las metodologías para evaluar la amenaza, vulnerabilidad, daño inicial, efecto colateral y daño secundario.

Para evaluar la amenaza sísmica y la respuesta sísmica de los terrenos de la ciudad se tuvieron en cuenta los resultados del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia del año 2009 y del Estudio de Zonificación de Respuesta Sísmica de Bogotá del año 2010. Con base en estos se lograron definir los sismos probables y aplicando un modelo sencillo de respuesta sísmica basado en relaciones espectrales se pueden determinar parámetros de intensidad sísmica máximos y espectrales para cada zona de la ciudad.

De las metodologías desarrolladas para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones se adaptó para Bogotá el método Italiano del índice de vulnerabilidad, dado que permite analizar zonas urbanas de gran extensión, como el caso de la ciudad de Bogotá, hace un adecuado y rápido manejo de la información y brinda en los procesos de cálculo resultados con un nivel de confiabilidad que se ajusta a los requerimientos propios del estudio. Sin embargo, el principal inconveniente del método es la información necesaria para su aplicación, especialmente porque es de gran dificultad obtener la información primaria del 100% de las edificaciones analizadas debido al tamaño de la ciudad, lo que condiciona directamente la calidad de los resultados obtenidos.

Para el cálculo del índice de daño en edificaciones se trabajaron dos metodologías, la primera es el método italiano el cual caracteriza el daño sufrido a partir de la intensidad sísmica y características estructurales tales como la organización del sistema resistente, tipología estructural, estado de conservación, entre otros. Esta metodología tuvo que ser adaptada desde el punto de vista de la información requerida y hubo la necesidad de transformar las curvas de fragilidad de escala macrosísmica a escala de intensidad de ingeniería. La segunda metodología usada fue la de Miranda, la cual caracteriza el daño en función de la deriva de entrepiso y el tipo de sistema de resistencia sísmica, aunque existen tres excepciones para sistemas estructurales en adobe, bahareque y mampostería simple donde el daño es función de la aceleración máxima.

El método Japonés se escogió para la evaluación de la vulnerabilidad y daños iniciales en tuberías y cableado, es ampliamente usado en investigaciones a nivel mundial y tiene a su favor que la información requerida constituye la más relevante y básica de las redes lo que posibilita su aplicación, adicionalmente se observa que se ha trabajado en la documentación y la calibración de las curvas de fragilidad a partir de los efectos observados en las redes a partir de sismos reales.

El cálculo de los posibles daños de las tuberías y cables tiene en cuenta curvas de vulnerabilidad que son función de un parámetro sísmico, por lo general de la aceleración o velocidad pico del terreno. Son numerosas las investigaciones en las cuales se definen estas curvas de vulnerabilidad a partir de los inventarios de daños sufridos por terremotos, sin embargo aún para el medio colombiano no se ha desarrollado una curva representativa, una aproximación válida la realizó JICA (2002) teniendo como referencia lo ocurrido en el sismo de Armenia de 1999, por lo cual se debe acudir a las referencias internacionales. Una vez considerados los diferentes soportes de las investigaciones que sustentan las curvas de

vulnerabilidad, su aplicación en estudios previos y el nivel de representatividad al medio colombiano se recomienda para los análisis emplear la propuesta de JICA (2002) cuando se trabaje con PGA y la propuesta de Edinger (2001) para evaluar con PGV.

La metodología para evaluar el daño de las vías es similar a la de los cables, trabaja con una curva de vulnerabilidad que en este caso es función de la intensidad sísmica.

La evaluación de los daños en los elementos puntuales de las líneas vitales tales como tanques y puentes se efectúa a partir de modelos semidetallados, los cuales categorizan las afectaciones de los elementos en cinco diferentes estados de daño, que se obtienen en el caso de los primeros en función de los niveles de anclaje y llenado y en los segundos se caracterizan teniendo en cuenta la continuidad de la superestructura, la longitud de las luces, si en el diseño tienen integradas metodologías de diseño sísmico, el tipo de restricción en los apoyos y el estado de reforzamiento entre otros.

La metodología del Índice de Potencial de Licuación permite cuantificar para un perfil de suelo su potencial de licuación. A partir de este método se desarrolló una metodología de zonificación de potencial de licuación tomando como base el planteamiento de calcular un índice que represente la resistencia cíclica del depósito de suelo, el cual es intrínseco del sitio de acuerdo con las características del perfil analizado. Una vez calculado este índice de resistencia cíclica del terreno para las perforaciones localizadas en las áreas aluviales, de llanura o rellenos que son susceptibles a este fenómeno, se procede a realizar análisis geo-estadísticos para determinar espacialmente zonas de similar resistencia y así zonificar.

La metodología del bloque deslizante permite establecer para un talud su potencial falla y desplazamiento con base en parámetros de resistencia de los materiales y geometría del talud. Para obtener las zonas de potencial deslizamiento se requiere información geológica, geotécnica de parámetros de resistencia al corte del suelo y rocas, y el mapa de pendientes de la zona a analizar. Con lo cual se obtiene el mapa de susceptibilidad a deslizamiento en términos de aceleración crítica, este resultado se calibra con base en un inventario de deslizamientos y estudios de amenaza por remoción en masa.

La corrección de los daños iniciales por efectos colaterales se efectuó a partir de una metodología desarrollada por el proyecto, la cual busca integrar los efectos ocasionados por los fenómenos de licuación y deslizamiento en un valor que modifique los daños iníciales en forma proporcional a la magnitud del fenómeno o de los fenómenos presentados en caso que exista simultaneidad en los eventos y a partir de esta información estime la mayoración de los daños de acuerdo a la localización geográfica del elemento expuesto y del comportamiento esperado de terreno.

El método usado para el cálculo de afectaciones y perdidas es una adaptación de las metodologías usadas en estudios anteriores, para lo cual se trabajó en mejorar la distribución de la población de acuerdo con la hora de ocurrencia del evento sísmico y el uso de la edificación. Así mismo se tuvo en cuenta el índice de daño y el factor de colapso de edificaciones en el cálculo de las afectaciones a la población y pérdidas económicas.

Dada la heterogeneidad de la calidad de la información recopilada se recomienda que desde el grupo de información y sistemas de la entidad se trabaje en la centralización de toda la información geográfica para fines de trabajos desarrollados por la entidad, en los cuales se requiere del acceso a las bases de datos geográficas y una estructura geomática definida, esto es diferente al sistema actual para consulta que se realiza por Internet.

Debido a las condiciones halladas en el presente estudio, es recomendable proponer proyectos de investigación que permitan desarrollar funciones de vulnerabilidad propias para las edificaciones y líneas vitales de la ciudad, junto con metodologías para la evaluación rápida de edificaciones y líneas vitales basadas en las características propias de nuestras construcciones, lo que puede ir encaminado a desarrollar un método colombiano de análisis de vulnerabilidad y daño de edificaciones que permita su aplicación en todo el territorio nacional, no solo en grandes ciudades sino a nivel de cualquier zona de concentración de personas sin importar su tamaño, como un aporte a la disminución del riesgo sísmico en todo el territorio nacional.

9 REFERENCIAS

AIS300 Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica, (2010). Normas Colombianas de diseño y construcción sismo resistentes, ley 400 de 1997, Decreto 926 de 2010.

ALA (2001). Seismic Fragility Formulations for Water Systems. Part 1 – Guideline. American Lifelines Alliance (ALA). ASCE-FEMA, 104 p.

Alexoudi, M. (2004). Seismic vulnerability assessment of utility systems. PhD Thesis, Civil Engineering Department, Aristotle University of Thessaloniki, Greece.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, (1998). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR 98, Ley 400 de 1997, Decreto 33 de 1998.

Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica AIS, (2007). Estudio de Amplificación Sísmica en los Sitios Establecidos por la DPAE a través de Análisis Unidimensional, Transportando en un Análisis no Lineal por etapas la Señal desde la Roca a la Superficie. Convenio interadministrativo FOPAE-AIS No 487 de 2006.

ATC 40 (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Applied technology council redwook city, California USA.

ATC-13 (1985). Earthquake damage evaluation data for California. Applied Technology Council (ATC). Redwood City, California.

ATC-25 (1991). Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States. Applied Technology Council (ATC). Redwood City, California.

Ballantyne, D. B. (2003). Water and Wastewater Systems. In: Chen, W. and Scawthorn, C. (Editors), Earthquake Engineering Handbook, CRC Press, Chapter 24.

Banai, R. (1993): “Fuzziness in Geographical Information Systems: contributions from the analytic hierarchy process”, International Journal of Geographical Information Systems, 7, 4, pp.315-329.

Barbat, A. H. (2003). Vulnerability and holistic risk indices from engineering perspective and holistic approach to consider hard and soft variables at urban level. IADB/IDEA Program of Indicators for Disaster Risk Management, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. http://idea.unalmzl.edu.co (consultado Julio 2008)

Barredo, J. (1996). Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio. Editorial RA-MA, España. 261 pp.

Basoz, N. and Kiremidjian, A. S. (1998). Evaluation of Bridge Damage Data from the Loma Prieta and Northridge, California Earthquake. Technical Report MCEER-98-0004, State University of New York, Buffalo.

Bennedetti, D. & Petrini, V. (1984). Sulla Vulnerabilitá Sísmica di Edifici in Muratura: Prioste di un Método di Valutazione. Roma: Lindustria delle Costruzioni.

Bommer J. J., (2005). Seismic Hazard analysis for engineering design and earthquake loss estimation. Congreso Chileno de Sismología e ingeniería Antisísmica.

Bommer J. J., Scott S. G. & Sarma S. K., (2000). Hazard consistent earthquake scenarios. Soil Dynamics and Earthquaçke Engineering No19, 219-231.

Bonham-Carter, G.F., (1996) Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon, Elsevier Science Ltd. 338 p.

Botero, Verónica. 2009. Geo-information for measuring vulnerability to earthquakes. Enschede : ITC - University of Utrecht, 2009.

Buckle, I. and Cooper, J. (1995). Mitigation of Seismic Damage to Lifelines: Highways and Railroads. In: Schiff, A. and Buckle, I. (Editors), Critical Issues and State-of-the-Art in Lifeline Earthquake Engineering. Monograph No. 7, TCLEE/ASCE, October 1995, 70-87.

Burrough, P.A (1992).: Possibilities and constraints of GIS applications in developing countries; Possibilities and constraints of GIS applications in developing countries; Teefelen,v.P; Gustavson, V.L.; Verkoren, O (ed), Utrecht, pp.17-25.

Cardona, O. D. (2001). Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Universidad Politécnica de Cataluña, PhD thesis, Barcelona, España.

Carreño, M. L. (2005). Seismic risk evaluation fon an urban centre. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, Spain.

Carver, S. J., (1991). Integrating multi-criteria evaluation with Geographic information systems, Int. Jour. Remote Sensing, 5, 3, 321-339.

Cinicioglu, S. F., Bozbey, I., Oztoprak, S., kelsoglu, M.K., (2007). An integrated earthquake damage assessment methodology and its application for two districts in Istanbul, Turkey. Engineering Geology 94 pp 145-165.

Coburn, A. y Spence, R. (1992). Earthquake Protection. Jonh Wiley & Sons, Chinchester, England. 355 pp.

Eastman, J. R. (1995): Idrisi for windows, version 2 – User´s guide. Worcester, Clark University.

Eidinger, J. (1998). Lifelines, Water Distribution System in the Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989, Performance of the Build Environment-Lifelines. US Geological Survey Professional Paper 1552-A, edited by A. Schiff, A63-A80.

Eidinger, J. and E. Avila (1999). Guidelines for the Seismic Upgrade of Water Transmission Facilities. Monograph No. 15, TCLEE/ASCE.

FEMA. (2003). HAZUS MH - Multi-hazard loss estimation methodology . Eashington D.C.

FOPAE. (2009). Actualización y sistematización de escenario de daños por terremoto para Bogotá Fase 1. Bogotá Colombia.

FOPAE. (2010). Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño de sismoresistente de edificaciones. Bogotá Colombia.

Freeman, S.A., Irfanoglu, A., Paret T.F. Earthquake Engineering Intensity Scale:A template with many uses (2004). 13th World Conference on Earthquake Engineering.

Geo-hazards International. (1999). RADIUS - Guidelines for the implementation of earthquake risk management projects.

Grady Booch, James Rumbaugh, Ivar Jacobson, (2007). El Lenguaje Unificado de Modelado. Manual de Referencia. PEARSON EDUCATION. España. 638 Paginas.

Honegger, D. G. and Eguchi, R. T. (1992). Determination of the Relative Vulnerabilities to Seismic Damage for Dan Diego Country Water Authority (SDCWA). Water Transmission Pipelines.

Ingeominas & Universidad de los Andes (1997). Microzonificación sísmica de Bogotá. Colombia.

Isoyama, R., Ishida, E., Yune, K. and Shirozu, T. (1998). Seismic damage estimation procedure for water supply pipelines. Proceedings, Water and Earthquake '98 Tokyo, IWSA International Workshop, Anti-Seismic Measures on Water Supply, International Water Services Association and Japan Water Works Association, Tokyo, Japan.

Iwasaki, T., Tatsuoka, T., Tokida, K.I., Yasuda, S.A. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential base on case studies at various sites in Japan. Proceeding of the second international conference on microzonation, San Fransisco, pp 885-896.

Japan Waterworks Association (1998). Damage estimation of water supply pipeline due to earthquake.

Jibson, R. W., Harp., E. L., Michael., J.A. (2000). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. Engineering Geology 58 pp 271-289.

Jibson, R.W., (1993) Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis. Transport. Res. Rec. 1411, 9-17.

Jibson, R.W., Harp, E.L., Michael, J.A. (1998). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: An example from the Los Angeles Califirnia area. US Geol.Surv. Open-File Rep. 98-113 17pp.

JICA, (2002). The Study on Disaster Prevention in the Bogota Metropolitan Area in the Republic of Colombia. Japan International Cooperation Agency, Pacific Consultants international, OYO Corporation.

Katayama, T., K. Kubo, and N. Sato, (1975). "Earthquake Damage to Water and Gas Distribution Systems," Proceedings of the First U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA.

Krinitzsky E. L., (2002). How to obtain earthquake ground motions for engineering design. Engineering Geology, No 65, 1-16.

Kubo & Katayama (1975) Damage estimation of underground water suplí pipeline.

Lantada, M. (2007). Evaluación del Riesgo Sísmico Mediante Métodos Avanzados y Técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona. Tesis doctoral en Ingeniería. Barcelona España.

Malczewski, J., (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis, John Wiley and Sons, 392 pp., New York, NY,.

Maldonado G, Chio G, y Gómez I. (2007). Índice de Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones de Mampostería Basado en la Opinión de Expertos. Universidad Industrial de Santander Articulo de investigación. Bucaramanga Colombia.

Mander, J. and Basoz, N. (1999). Seismic fragility curve theory for highway bridges. In: M. Elliot and P. McDonough (Editors), Proceedings, 5th US Conference on Lifeline Earthquake Engineering, TCLEE/ASCE, Monograph No.16, 31–40.

Martínez A., Alvarado C, Rubiano D. (2002). Selección de señales de diseño consistentes con el escenario regional de amenaza sísmica: casos aplicados a Colombia. IX Congreso y IV Seminario Colombianos de Geotecnia. Medellín-Colombia.

Mena, U. (2002). Evaluación de Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas. Tesis doctoral en Ingeniería sísmica y Dinámica estructural. Universidad politécnica de Cataluña Barcelona España.

Mendoza, G.A., Prabhu, R., (2000). Development of methodology for selecting criteria and indicators for sustainable forest management: A case study on participatory assessment. Environmental Management 26 (6), 659–673.

Miranda, E (1999), Approximate seismic lateral deformation demands on multistory buildings. Journal Structural Enginering. Eng, vol 125 No 4, 417 – 425.

Monge, O., Alexoudi, M. and Argyroudis, S. (2003). An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Vulnerability assessment of lifelines and Essentials facilities (WP06): basic methodological handbook. Report n°GTR-RSK 0101-152av7, 71 p

Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S. and Masure, P. (2004). The European RISKUE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada, paper 3329 (CD-Rom).

Newmark, N.M., (1965). Effects of earthquakes on dam and embankments. Fifth Ranking lecture. Geotechniques 15(2), 139-193.

NIBS, National Institute of Building Science. (1997, 1999 and 2002). Earthquake loss estimation methodology. HAZUS. Technical manuals. Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, Vol. 1, 2, 3. (http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus/index.shtm)

NIBS, National Institute of Building Science. (1999). Direct physical damage to lifelines-transportation systems-utility systems. In: Earthquake loss estimation methodology. HAZUS. Technical manuals.

O'Rourke, M. J and Ayala G. (1993). Pipeline damage due to wave propagation. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 119, No.9.

O'Rourke, M. J. (2003). Buried Pipelines. In Earthquake Engineering Handbook, W.Chen and C. Scawthorn (Editors), CRC Press, Chapter 23.

O'Rourke, T. D., Erdogan, F. H., Savage, W. U., Lund, L. V. and Manager, A. T. (2000). Water, gas, electric power, and telecommunications performance. Earthquake Spectra, Suppl. A to Vol.16, 1999 Kocaeli, Turkey, Earthq. Reconnaissance Rep., 377-402.

Oliveira C.S., Roca A., and Goula X. (2006). Assessing and Managing Earthquake Risk. Springer. Netherlands.

Pereira, J. M. C., Duckstein, L. (1993): "A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation", International Journal of Geographical Information Systems, 7, 5, pp. 407-424.

Porter, K. (2003). Seismic Vulnerability. In Earthquake Engineering Handbook. W. Chen and C. Scawthorn (Editors), CRC Press, Chapter 21.

RADIUS (1999). Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas Against Seismic Disasters. Involved cities: Tijuana-Mexico, Guyaquil-Ecuador, Antofagasta-Chile, Skopje-FYROM, Izmir-Turkey, Addis Ababa-Ethiopia, Tachkent-Ouzbekistan,

Bandung-Indonesia, Zigong-China. Report United Nations Initiative towards Earthquake Safe Cities, 1999, http://www.geohaz.org/contents/projects/radius.html, (consultado Julio 2004).

Risk Management Solutions Inc., (1997) Earthquake loss Estimation Methodology – HAZUS 97 Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, Washington , D.C. , USA.

Safina, S. (2002). Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones Esenciales Análisis de su Contribución al Riesgo Sísmico. Tesis doctoral en Ingeniería sísmica y Dinámica estructural. Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona España.

Sociedad Colombiana de Geotecnia, (2007). Modelo Geotécnico de La Sabana de Bogotá y Caracterización Dinámica Bidimensional de los Suelos de Bogotá. Convenio interadministrativo FOPAE-SCG No 460 de 2006.

Schiff, A. J. (2003). Electrical Power Systems. In: W.Chen and C. Scawthorn (Editors), Earthquake Engineering Handbook, CRC Press, Chapter 25.

Seed, H.B., & Idriss I.M., (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE, Vol 97, No. SM9.

Shinozuka, M., Feng, M. Q. Kim, H.-K, Uzawa, T. and Ueda, T. (2003). Statistical Analysis of Fragility Curves. Technical Report MCEER-03-0002, State University of New York, Buffalo.

Sousa C, Roca A y Golua X., (2005). Assessing and Management Earthquake Risk. Netherlands.

Toprak, S. (1998). Earthquake Effects on Buried Lifeline Systems, PhD Thesis, Cornel University. Tralli, D. M. (2000). Assessment of advanced technologies for loss estimation. MCEER, Buffalo Univeristy, Ney Jersey.

Tung, Pho Thanh. 2004. Road vulnerability assessment for earthquakes. Enschede : International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation, 2004.

UNIANDES Universidad de los Andes, (2005). Escenarios de Riesgo y Pérdidas por Terremoto para Bogotá, Centro de Estudios e investigaciones sobre Riesgo. Bogotá.

UNIANDES Universidad de los Andes, (2006). Innovación e Investigación Tendientes a la Actualización de la Información Sísmica de la Ciudad De Bogotá. Convenio interadministrativo FOPAE-UNIANDES No 667 de 2005.

Van Westen, J.C. (1993). Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS based hazard zonation. Geol Rundsh, 86: 404-414

Vielma Pérez, J., (2008). Caracterización del Comportamiento Sísmico de Edificios de Hormigón Armado Mediante Respuesta No Lineal. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona España.

Voogd, H., (1983). Multi-criteria evaluations for urban and regional planning, London Princeton University

W.L. Wang, T.T. Wang, J.J. Su, C.H. Lin, C.R. Seng and T.H Huang. Assesment of damages mountains tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake. Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipey, Taiwan.

Weerakon, K. G. P. K. (2002): “Integration of GIS based suitability analysis and multicriteria evaluation for urban land use planning; contribution from the Analytic Hierarchy Process”, en: 3rd Asian Conference on Remote Sensing. Nepal, Asian Association on Remote Sensing

Wieczorek, G.F., Wilson, R.C., Harp, E.L. (1985). Map showing slope stability during earthquakes in San Mateu County California. US Geol. Surv. Misc. Invest. Map I-1257-E.

Wilson, R.C., Keefer, D.K., (1983). Dynamic analysis of a slope failure from the 6 august 1979 Coyote Lake, California, earthquake. Seismol. Soc. Am. Bull. 73, 863-877.

Wilson, R.C., Keefer, D.K., (1985) Predicting areal limits of earthquake induced landsliding. In: Ziony, J.I. (Ed), evaluating earthquake hazards in Los Angeles region - An earthScience perspective. US Geol. Surv. Prof. Paper 1360, 316-345

Yamazaki, F., Hamada, T., Motoyama, H. Yamauchi, H. (1999). Earthquake damage assessment of expressway bridges in Japan. In: W. Elliott and P. McDonough (Editors), Proceedings, 6th US Conference on Lifeline Earthquake Engineering, TCLEE/ASCE, Monograph No.16, 361-370.

Yegian, M.K., Marciano, E., Ghahraman, V.G., (1991). Earthquake induced permanent deformations: probabilistic approach. ASCE Journal of Geotechnical Engineering.