

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



**“EVALUACIÓN PRELIMINAR DE RIESGO SÍSMICO EN LAS
INSTALACIONES DEL CAMPUS CENTRAL DE LA
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR”**

PRESENTADO POR:

MARVIN ANTONIO NAVARRO LARIOS

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 2014

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR :

DR. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título

:

**“EVALUACIÓN PRELIMINAR DE RIESGO SÍSMICO EN LAS
INSTALACIONES DEL CAMPUS CENTRAL DE LA
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR”**

Presentado por

:

MARVIN ANTONIO NAVARRO LARIOS

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores

:

DR. MANUEL ALFREDO LÓPEZ MENJIVAR

DR. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

San Salvador, Abril de 2014

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

DR. MANUEL ALFREDO LÓPEZ MENJIVAR

DR. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por llenar mi vida de muchos caminos y ser mi guía para escoger el mejor.

A mi madre y padre, por darme el amor, la comprensión, y el inquebrantable apoyo que me han dado para poder estar escribiendo estas líneas.

A mis hermanos, José Reynaldo, Alex Enrique y Alfredo Ernesto, por su apoyo y perseverancia en el logro de mis metas y sueños.

A la Universidad de El Salvador, a los docentes, compañeros y demás personal, por permitirme formarme como profesional, contribuir con mi desarrollo personal y por brindarme la mejor experiencia universitaria.

A mis asesores Dr. Manuel Alfredo López Menjivar y Dr. Edgar Armando Peña Figueroa, por brindarme sus excelentes asesorías y dedicación dada a la realización de este trabajo.

Doy gracias a los docentes que con sus recomendaciones y/o con información contribuyeron al desarrollo del presente trabajo, en especial a:

- Ing. Rodolfo Nosiglia,
- Ing. Manuel Gutiérrez,
- Ing. Joaquín Serrano Choto.

A la Unidad de Desarrollo Físico y a los departamentos de Recursos Humanos, Administración Académica y Financiera de las diferentes Facultades del Campus Central, por los documentos y datos compartidos.

DEDICATORIA

A mi madre, Gloria de Navarro y a mi padre Reyes Navarro, por darme la vida, su apoyo incondicional y su confianza, pues son quienes han estado conmigo en las buenas y en las malas, entregando parte de su vida para el éxito de la mía, se lo orgulloso que están de mi, por eso es que a los dos en especial les dedico este éxito. Gracias a los dos soy el hombre que soy.

A mis hermanos José Reynaldo, Alex Enrique y Alfredo Ernesto, por darme fuerzas para alcanzar las metas que me he propuesto y estar siempre animándome.

A mis abuelos y tía Mery por darme su cariño y confianza.

INDICE GENERAL.

CAPÍTULO I GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCION.....	2
1.2. ANTECEDENTES.	4
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	5
1.4. OBJETIVOS.....	7
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	7
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
1.5. ALCANCES.....	7
1.6. LIMITACIONES.....	8
1.7. JUSTIFICACION.....	9
CAPITULO II MARCO TEORICO	11
2.1. RIESGO, EVALUACIÓN Y PÉRDIDAS.....	12
2.1.1. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGO.	20
2.1.2. PERDIDAS.	23
2.2. AMENAZA SISMICA.	28
2.2.1. EVALUACIÓN DE AMENAZA SÍSMICA EN EL SALVADOR.	30
2.2.2. AMENAZA SÍSMICA EN SAN SALVADOR.....	40
2.2.3. SISMOS MÁS DESTRUCTORES DE EL SALVADOR.....	49
2.2.4. REGLAMENTOS PARA DISEÑO SISMORRESISTENTES EN EL SALVADOR.....	58
2.3. EXPOSICIÓN SÍSMICA.....	63
2.3.1. INVENTARIO ESTRUCTURAL.....	64
2.4. VULNERABILIDAD.....	67
2.4.1. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LA ESTRUCTURA.	72
2.4.2. CURVAS DE CAPACIDAD Y CURVAS DE FRAGILIDAD.	78
2.5. ZONA DE ESTUDIO: UES.....	81
2.5.1. RESEÑA HISTÓRICA. (Fuente: Wikipedia)	82

2.5.2.	UBICACIÓN.....	85
2.5.3.	CARACTERISTICA MÁS RELEVANTES DE LOS SISMOS MÁS DESTRUCTORES EN EL CAMPUS.	87
CAPITULO III ANALISIS DE LA EXPOSICION		93
3.1.	TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE INFORMACION.	94
3.1.1.	POBLACIÓN USUARIA.	94
3.1.2.	ESTRUCTURAS.....	97
3.2.	BASE DE DATOS E INVENTARIO DE EDIFICACIONES.	103
3.2.1.	INTRODUCCIÓN.....	103
3.2.2.	INVENTARIO DE LAS EDIFICACIONES.....	104
3.2.3.	DISTRIBUCIÓN DE LOS EDIFICIOS POR TIPO DE CÓDIGO SÍSMICO.....	116
3.2.4.	DISTRIBUCIÓN DE LOS EDIFICIOS DE ACUERDO AL NÚMERO DE PISOS.....	117
3.2.5.	ALTURA DE ENTREPISOS.....	119
3.2.6.	DISTRIBUCIÓN DE LOS EDIFICIOS POR SU SISTEMA ESTRUCTURAL.....	120
3.3.	BASE DE DATOS DE POBLACION USUARIA.	121
3.3.1.	BASE DE DATOS DE LA POBLACIÓN USUARIA DE CADA UNA DE LAS EDIFICACIONES.	122
3.3.2.	BASE DE DATOS DE LA POBLACIÓN USUARIA DE CADA UNA DE LAS FACULTADES.	123
3.3.3.	BASE DE DATOS DE LA POBLACIÓN USUARIA EN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.....	124
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD		127
4.1.	VULNERABILIDAD SISMICA.	128
4.2.	CLASIFICACION DE LOS EDIFICIOS POR SU TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	129

4.2.1. DISTRIBUCIÓN DE LOS EDIFICIOS POR SU TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	132
4.3. DEFECTOS ESTRUCTURALES.....	137
4.3.1. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN:	139
4.3.2. DETALLES DE LOS POSIBLES DEFECTOS ESTRUCTURALES. ..	142
4.3.3. POSIBLES DEFECTOS ESTRUCTURALES POR TIPOLOGÍAS.	143
4.4. CURVAS DE CAPACIDAD Y CURVAS DE FRAGILIDAD.	146
4.4.1. OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD.....	148
4.4.2. OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD.	152
4.5. OBTENCIÓN DE DATOS DE DAÑOS Y PÉRDIDAS.	155
4.5.1. MODELO DE PÉRDIDAS HUMANAS.	155
4.5.1. MODELO DE PÉRDIDAS ECONÓMICAS.	158
CAPÍTULO V ANÁLISIS DE RIESGO SÍSMICO.....	162
5.1. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL RIESGO SISMICO.....	163
5.2. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS DE DAÑOS Y PÉRDIDAS SÍSMICAS. 164	
5.3. CALCULOS DE LOS ESCENARIOS DE RIESGO SISMICO.	165
5.3.1. ESCENARIOS DE UN TERREMOTO DETERMINISTA PARA EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.	165
5.3.2. CONDICIONES LOCALES PARA EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.....	167
5.4. RESULTADOS DE DAÑOS Y PÉRDIDAS PARA LOS DIFERENTES ESCENARIOS DETERMINISTAS.	169
5.4.1. FUNCIONES QUE DESCRIBEN LOS DAÑOS DE EDIFICIOS.	169
5.4.2. DAÑO GENERAL Y ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS EN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.....	173
5.4.3. DISTRIBUCIÓN DE DAÑOS Y PÉRDIDAS EN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.....	174
CAPÍTULO VI	179
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	179

6.1. CONCLUSIONES.....	180
6.2. RECOMENDACIONES.....	181
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	183
ANEXOS.....	194
ANEXO A.....	195
MDR PARA LAS 12 COMBINACIONES DE EVENTOS SÍSMICOS	195

INDICE DE TABLAS.

Tabla 2. 1. Pérdidas económicas directas ocasionadas por terremotos, 1972-1990. Producto Nacional Bruto correspondiente al año en que ocurrió el sismo. Fuente: Coburn y Spence (1992).	32
Tabla 2. 2. Sismos destructores en El Salvador en el último Siglo. Fuente: SNET, 2012.	51
Tabla 2. 3. Estados de Daños de las Edificaciones.	88
Tabla 2. 4. Estados de Daños de las Edificaciones.	89
Tabla 3. 1. Evolución de Códigos en El Salvador. Fuente: CAPRA, Modelación Probabilista de Escenarios de Riesgo Sísmico, 2012.	100
Tabla 3. 2. Descripción de los sistemas Estructurales.	102
Tabla 3. 3. Sistemas Estructurales no Evaluadas.	103
Tabla 3. 4. Descripciones de las Etiquetas por Geounidades y Facultad.	106
Tabla 3. 5. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Medicina.	106
Tabla 3. 6. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Odontología.	107
Tabla 3. 7. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Química y Farmacia.	108
Tabla 3. 8. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Ciencias Agronómicas.	109
Tabla 3. 9. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.	110
Tabla 3. 10. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática.	111
Tabla 3. 11. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Jurisprudencia y Ciencias Sociales.	112
Tabla 3. 12. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Ciencias Económicas.	113
Tabla 3. 13. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Ciencias y Humanidades.	114
Tabla 3. 14. Edificaciones Administrativas a Evaluar.	115
Tabla 3. 15. Distribución numérica de las edificaciones por tipos de Códigos Sísmicos.	116
Tabla 3. 16. Distribución numérica de las edificaciones de acuerdo al Número de Pisos.	118

Tabla 3. 17. Altura de Entrepisos de los Sistemas Estructurales.....	119
Tabla 3. 18. Distribución Numérica de las edificaciones por su Sistema Estructural. ..	120
Tabla 3. 19. Población Usuaría del Edificio “B” de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.....	122
Tabla 3. 20. Población Usuaría de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.....	123
Tabla 3. 21. Población Usuaría de la Universidad de El Salvador.....	124
Tabla 4. 1. Sistemas Estructurales.....	129
Tabla 4. 2. Número de Pisos.....	130
Tabla 4. 3. Tipos de Modelos de Edificios del Campus Central de la Universidad de El Salvador.....	131
Tabla 4. 4. Códigos Sísmicos.	132
Tabla 4. 5. Tipologías Estructurales por cada Edificación.....	133
Tabla 4. 6. Tipologías Estructurales por cada Edificación.....	134
Tabla 4. 7. Distribución de Edificios por su Tipología Estructural.	135
Tabla 4. 8. Defectos Estructurales.	138
Tabla 4. 9. Defectos Estructurales de las edificaciones del Campus.....	143
Tabla 4. 10. Defectos Estructurales de las edificaciones del Campus.....	144
Tabla 4. 11. Posibles Defectos Estructurales por Tipologías.	145
Tabla 4. 12. Emparejamiento de tipologías estructurales en el Campus Central con las tipologías estructurales definidas por HAZUS (FEMA 2003).....	147
Tabla 4. 13. Sub-clasificación de las 16 principales tipologías estructurales predominantes en el Campus Central de la Universidad de El Salvador y la asignación de los conjunto de DF por HAZUS (FEMA, 2003).....	148
Tabla 4. 14. Características de las curvas de capacidad para las tipologías en el Campus Central de la Universidad de El Salvador.	150
Tabla 4. 15. Parámetros característicos (desviaciones típicas β_i y valores medios S_{di}) de las curvas de fragilidad para los tipologías estructurales analizadas para los 4 estados de daño.....	154

Tabla 4. 16. Distribución de la población para las 68 geounidades del Campus.	156
Tabla 4. 17. Porcentajes de la población en los tres momentos del día del Campus Central.	157
Tabla 4. 18. Descripción de de los Niveles de Severidad con sus respectivos ejemplos. Fuente: HAZUS-MR.	158
Tabla 4. 19. Los costos de construcción (dólares por metro cuadrado) dependiendo de la Tipología Estructural.	159
Tabla 4. 20. Relaciones de costos para los diferentes tipos de modelos de edificios y los estados de daños según lo definido por HAZUS-MH.	160
Tabla 4. 21. Costo total de cada Geounidad del Campus Central.	161
Tabla 5. 1. Detalles de las 12 combinaciones de escenarios de terremotos usados para calcular los daños y perdidas en el Campus Central.	167
Tabla 5. 2. Información general de predicciones de pérdidas económicas y humanas para las 12 combinaciones de escenarios de terremotos del Campus Central de la Universidad de El Salvador.	174
Tabla 5. 3. Pérdidas Económicas y Humanas del Campus Central de la Universidad de El Salvador, tomando la Combinación 12.	178

INDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Frecuencia de muerte individual en cualquier año debido a diferentes causas. Fuente: Coburn y Spence, 2002.....	16
Figura 2. 2. (a) Curva de riesgo sísmico de un edificio de mampostería no reforzada con muros de carga, y de baja altura (ATC-13, 1985), localizado en la prefectura de Tokio, Japón (Ishii et al, 2007); (b) Curva de riesgo sísmico de la ciudad de Cologne, Alemania (Grünthal et al, 2006).....	17
Figura 2. 3. Mapa de pérdidas sísmicas anualizadas en millones de dólares de Estados Unidos (excepto Alaska y Hawaii), por estado (FEMA-366, 2008).	17
Figura 2. 4. Crecimiento de las poblaciones urbanas y rurales en el mundo, y crecimiento estimado de dichas poblaciones para las próximas décadas (UN-DESA, 2007; 2006)...	18
Figura 2. 5. Principales pasos en la estimación del riesgo sísmico de edificios en términos de frecuencias de excedencia del daño. Fuente: McGuire, 2004.	23
Figura 2. 6. Sismos que han generado las mayores pérdidas reportadas en California, USA, en el periodo 1970-2000. Fuente: Rowshandel et al, 2007.	24
Figura 2. 7. Número de fallecimientos en importantes sismos de California. Fuente: Todd et al, 1994; Utsu, 2002.	25
Figura 2. 8. Tectónica de placas en Centroamérica. Fuente: Weyl, 1980; como se referencia en Bommer, Salazar y Samayoa, 1998.	34
Figura 2. 9. Corte en la fosa de subducción para la región Centro Americana Los círculos indican los focos de los terremotos y la línea punteada la parte superior de la placa de Cocos. Fuente: White y Harlow, 1993; como se referencia en Bommer, Salazar y Samayoa, 1998).	35
Figura 2. 10. Sistema de fallas en El Salvador. Fuente: http://mapas.snet.gob.sv/geologia/sismicidad.phtml	38
Figura 2. 11. Mapas de peligrosidad sísmica para El Salvador. Las curvas de isoaceleración se encuentran como proporción de la gravedad (g) y corresponden a un período de retorno de 475 años. Fuente: Bommer y otros, 1996.....	40
Figura 2. 12. AMSS: Espesor de tierra blanca. Fuente: Rymer, 1987.....	43

Figura 2. 13. El Salvador: Sismos superficiales de intensidad mayor que VII, desde 1900. Fuente: Harlow y otros, 1993.	44
Figura 2. 14. Mapa de isosistas del sismo del 7 de septiembre de 1915. Fuente: Grases, 1994.....	46
Figura 2. 15. Mapa de isosistas del sismo del 19 de junio de 1982. Fuente: Álvarez, 1982.....	46
Figura 2. 16. Mapas de contornos de isosistas con intensidad mayor o igual que VII MM para los años: 1700-1799 (A), 1800-1899 (B), 1900-1990 (C). Fuente: Harlow y otros (1993).....	48
Figura 2. 17. Registros de movimiento fuerte obtenido en San Salvador para el terremoto de la subducción del 19 de junio de 1982 (izquierda) en el Observatorio Sismológico y el terremoto del 10 de octubre de 1986 (derecha) en el Instituto Geográfico Nacional. Componente longitudinal (arriba), vertical (al medio), transversal (abajo). Fuente: Bommer y otros (1997).....	49
Figura 2. 18. Sismos destructivos de los Siglos XX y XXI en El Salvador. Fuente: SNET, 2004.....	50
Figura 2. 19. Máximas intensidades sísmicas observadas y curvas de Isosistas.	52
Figura 2. 20. Área afectada por el sismo del 3 de mayo de 1965. Fuente: Lomnitz y Schulz, 1966.....	53
Figura 2. 21. Aceleraciones del terreno registradas durante el sismo de 1986. Fuente: Bommer y Ledbetter (1987).....	56
Figura 2. 22. El Salvador: Zonificación sísmica 1966, 1989 y 1994. Fuente: Bommer y otros, 1996.....	59
Figura 2. 23. Mapa de máximas intensidades sísmicas observadas. Fuente: Aguilar, 1986.....	60
Figura 2. 24. Planteamiento Conceptual del “Pushover”. Fuente: FEMA (1997).....	79
Figura 2. 25. Curvas de Fragilidad. Fuente: HAZUS, Technical Manual.	81

Figura 2. 26. Limitaciones del Campus de la Universidad de El Salvador. Fuente: Google Earth, 2013.	85
Figura 2. 27. Ubicación del Campus de la Universidad de El Salvador. Fuente: Google Earth, 2013.	86
Figura 3. 1. Edificaciones a Evaluar. Fuente: Google Earth, 2014.	105
Figura 3. 2. Edificaciones de la Facultad de Medicina. Fuente: Google Earth, 2013. ..	107
Figura 3. 3. Edificaciones de la Facultad de Odontología. Fuente: Google Earth, 2013	107
Figura 3. 4. Edificaciones de la Facultad de Química y Farmacia. Fuente: Google Earth, 2013.....	108
Figura 3. 5. Edificaciones de la Facultad de Ciencias Agronómicas. Fuente: Google Earth, 2013.	109
Figura 3. 6. Edificaciones de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Fuente: Google Earth, 2013.	110
Figura 3. 7. Edificaciones de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática. Fuente: Google Earth, 2013.	111
Figura 3. 8. Edificaciones de la Facultad de Jurisprudencia y Ciencias Sociales. Fuente: Google Earth, 2013.	112
Figura 3. 9. Edificaciones de la Facultad de Ciencias Económicas. Fuente: Google Earth, 2013.....	113
Figura 3. 10. Edificaciones de la Facultad de Ciencias y Humanidades. Fuente: Google Earth, 2013.	114
Figura 3. 11. Edificaciones Administrativas. Fuente: Google Earth, 2013.....	115
Figura 3. 12. Distribución numérica de las edificaciones por tipos de Códigos Sísmicos.	116
Figura 3. 13. Distribución porcentual de las edificaciones por tipos de Códigos Sísmicos.	117
Figura 3. 14. Distribución numérica de las edificaciones de acuerdo al Número de Pisos.	118

Figura 3. 15. Distribución porcentual de los edificios de acuerdo al Número de Pisos.	119
Figura 3. 16. Distribución Numérica de los edificios por su Sistema Estructural.	120
Figura 3. 17. Distribución porcentual de los edificios por su Sistema Estructural.	121
Figura 3. 18. Población Usuaría de la Universidad de El Salvador.	125
Figura 3. 19. Distribución porcentual de la Población Usuaría en la Universidad de El Salvador.	126
Figura 4. 1. Comparación de espectros de diseño 1966 vs 1994. Fuente: MARN, 2012.	130
Figura 4. 2. Codificación de las Tipologías Estructurales.	132
Figura 4. 3. Distribución Numérica de los edificios por Sistemas de Marcos de Concreto.	136
Figura 4. 4. Distribución Numérica de los edificios por Sistema Dual.	136
Figura 4. 5. Distribución Numérica de los edificios de Tipologías restantes.	136
Figura 4. 6. Definición de la curva de capacidad. Fuente: Moreno y Bairán, 2010.	149
Figura 4. 7. Curvas de Capacidad para SMC en formato Sd-Sa.	151
Figura 4. 8. Curvas de Capacidad para SD en formato Sd-Sa.	151
Figura 4. 9. Curvas de Capacidad para PCR, PMR y PreCR formato Sd-Sa.	152
Figura 4. 10. Definición de los umbrales de los estados de daño a partir del espectro de capacidad. Fuente: Lagomarsino et al. (2002).	153
Figura 5. 1. Pérdidas Económicas Medias Total para una magnitud de momento (Mw) 6.6, tomando una Combinación 12.	170
Figura 5. 2. Pérdidas Económicas Medias Total para una magnitud de momento (Mw) 6.6, tomando una Combinación 6.	170
Figura 5. 3. MDR para una magnitud de momento (Mw) 6.6, tomando una Combinación 12.	171
Figura 5. 4. Relación Media de Daños (MDR) para las edificaciones del Campus Central para un Mw 6.6, ubicado en Ciudad Delgado (Combinación 6).	172

Figura 5. 5. Distribución Grafica de las pérdidas económicas medias para un escenario de terremoto, tomando la combinación 12. Fuente: Google Earth (2014), RISE. 175

Figura 5. 6. Distribución Grafica de las pérdidas humanas acumuladas para un escenario de terremoto, tomando la combinación 12. Fuente: Google Earth (2014), RISE. 176

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCION.

Los estudios de riesgo sísmico se han convertido en una herramienta excelente para predecir y gestionar los efectos catastróficos de los terremotos en ambientes urbanos. Sin duda alguna, el Siglo XX ha contemplado el crecimiento de la población mundial y las grandes aglomeraciones humanas y el estilo de vida moderno aumentan el riesgo. En el mundo, durante este Siglo XX han ocurrido más de 1.100 terremotos fuertes que han causado más de millón y medio de víctimas (Moreno, 2012). Ejemplos de terremotos que produjeron grandes pérdidas, solo en el último cuarto de siglo, son, entre otros, Perú (1970, 2007), China (1976, 2008), Rumania (1977), Italia (1980, 2009), Chile (1985), México (1985), Ecuador (1987), Armenia (1988), Estados Unidos (1987, 1989, 1994), Japón (1995, 2011), Venezuela (1967, 1997), Colombia (1983, 1999), Turquía (1999), El Salvador (2001), India (2001), Irán (2003), el terremoto de Indonesia (2004), con más de 250.000 víctimas producidas por el tsunami generado por la magnitud del sismo y el reciente devastador terremoto en Haití (2010) y Chile (2010). A las pérdidas de vidas humanas deben añadirse las también cuantiosas pérdidas debidas a la interrupción de la actividad económica, de las líneas de comunicación y de los servicios públicos. La principal causa de pérdidas humanas y económicas que se producen en el mundo debido a los terremotos es el comportamiento sísmico inadecuado de las estructuras. Concretamente, la causa del mayor número de víctimas es el colapso de edificios que produjo el 75% de las pérdidas humanas por terremotos en el mundo en el Siglo XX. Si el grado de daño físico sufrido por los edificios durante los terremotos es el que más contribuye a las pérdidas económicas en una zona urbana, el número de víctimas está fuertemente relacionado el número de edificios que colapsan en la zona (Barbat, 2004).

Los avances que se realizan continuamente en el diseño de estructuras se aplican básicamente a las estructuras nuevas y en menor medida a la rehabilitación de estructuras existentes. Sin embargo, el número total de estructuras existentes es muy grande en comparación con el número de estructuras en construcción. Consecuentemente, para reducir las pérdidas debidas a los sismos, es necesario mejorar también el comportamiento de las estructuras antiguas. Tal mejora requiere una evaluación previa de su comportamiento sísmico esperado, lo que sienta las bases de los estudios de vulnerabilidad sísmica. Estos están orientados hacia la predicción de daños esperados en estructuras, en el supuesto de que ocurra un evento sísmico de una cierta peligrosidad. A partir de dicha predicción, pueden definirse soluciones de reducción de la vulnerabilidad estructural y, en consecuencia, de las pérdidas esperadas, es decir del riesgo sísmico (Yépez, 1996).

En los últimos años se ha intentado definir el riesgo sísmico para poder realizar su gestión a fin de reducir los desastres económicos, sociales y ambientales que puedan producir. Para estimar el riesgo es necesario tener en cuenta, desde un punto de vista multidisciplinar, no solamente el daño físico esperado, el número de víctimas o las pérdidas económicas, sino también factores sociales, organizacionales e institucionales, relacionados con el desarrollo de las comunidades. La vulnerabilidad como factor interno de riesgo debe relacionarse no solamente con la exposición del contexto material o su susceptibilidad física de ser afectado, sino también con las fragilidades sociales y la falta de resiliencia de la comunidad propensa. La falta de organización institucional y comunitaria, las debilidades en los preparativos para la atención de emergencias, la inestabilidad política y la falta de salud económica de un área geográfica contribuyen a tener un mayor riesgo. Por lo tanto, las consecuencias

potenciales no sólo están relacionadas con el impacto del suceso, sino también con la capacidad para soportar el impacto y las implicaciones del impacto en el área geográfica afectada. (Barbat, Pujades, 2004)

1.2. ANTECEDENTES.

Se puede definir el riesgo sísmico, de manera gruesa, como la probabilidad de pérdidas humanas, sociales, físicas o económicas resultantes por la ocurrencia de un terremoto. La evaluación del riesgo sísmico involucra muchas disciplinas, tales como: la sismología, la ingeniería geotécnica, la ingeniería estructural, la geología, la sociología y la aseguración. Su principal propósito es predecir, de la manera más confiable, el daño físico y las pérdidas relacionadas a este daño. Sus aplicaciones son dentro del contexto humano (mitigación y respuesta a desastres y la ayuda humanitaria) y el campo de las aseguraciones (optimización de pólizas y deducibles de seguros por desastres y reducir el riesgo del asegurador). Sin embargo, todo lo anterior envuelve un dilema: La retribución por la reducción en el riesgo sísmico posiblemente se obtenga después de un largo periodo de tiempo y será en términos de aquello que no sucedió.

En general, el riesgo sísmico es función de tres factores: la amenaza sísmica, que representa la probabilidad de ocurrencia de un sismo, potencialmente destructivo, en un lugar y en un tiempo determinado; la exposición, constituido por la población, la infraestructura y las actividades productivas de una región; la vulnerabilidad, que se define como la probabilidad de excedencia de un nivel de daño dado por los elementos que conforman la exposición durante un terremoto.

$$\text{Riesgo Sísmico} = f(\text{Amenaza, Exposición, Vulnerabilidad})$$

Se debe tener presente que una región que posea un alta amenaza sísmica no poseerá, automáticamente, un alto riesgo sísmico. El requisito más importante para el riesgo sísmico lo representa la exposición, es decir donde las personas viven y las zonas en las cuales se pueden tener las mayores pérdidas.

¿Por qué hacer una evaluación del riesgo sísmico y por consiguiente una proceso de evaluación de pérdidas? ¿Por qué tratar de predecir las futuras perdidas?, la respuesta: porque evaluar el riesgo es la única manera de establecer las bases racionales para tomar decisiones respecto al efecto de posibles terremotos en, el cual, la reducción de futuras pérdidas se puede hacer a través de:

- Incrementar el nivel de atención y preparación a estos eventos,
- Mejorar los procesos constructivos y diseño de estructuras,
- Mejorar la respuesta a emergencias,
- Mejorar el acceso a las aseguraciones.

El análisis de daños y pérdidas puede ser efectuado para una estructura individual, un negocio, una comunidad (vecindario, ciudad, país, región, etc.). Se deberá distinguir entre pérdidas monetarias, producidas por el costo de reparación y la pérdida de ganancias (si se interrumpe alguna actividad económica); y pérdidas no monetarias que involucra muertos, heridos o inválidos.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En El Salvador, de los tres factores que componen el riesgo sísmico el más estudiado, hasta la fecha, ha sido la Peligrosidad Sísmica con al menos una media docena de publicaciones (Bommer et al, 1996; Rose et al, 2004 y Benito et al, 2005) que dan fe de ello; sin embargo, de los otros dos componentes, la exposición y la

vulnerabilidad, virtualmente no se cuenta con ninguna compilación sólida. Por ejemplo, actualmente, no hay un inventario de las tipologías de edificios de ningún centro urbano en El Salvador, asimismo no se han desarrollado curvas de vulnerabilidad para ninguna tipología estructural presente en el país. Por lo tanto, la necesidad de tener una base de datos de población y edificaciones así como la evaluación de la vulnerabilidad de éstas últimas es claramente necesaria. Han existido intentos precisos de compilar tales datos (RESIS II, 2007), sin embargo, las políticas de confidencialidad de las instituciones que poseen las diversas piezas de información, así como, el nivel de precisión de esta, han obligado a obtener compilaciones de datos con un nivel de confiabilidad cuestionable.

De igual manera como sucede a nivel nacional, no existen estudios concretos a gran escala para la evaluación de los tres componentes, mencionados anteriormente, para el caso de la Universidad de El Salvador; por lo tanto, y considerando el gran número de la población usuario con que cuenta esta institución, las heterogéneas tipologías estructurales, así como el alto grado de amenaza sísmica que afronta se hace imperioso una evaluación, al menos de tipo preliminar, sobre el nivel de riesgo sísmico de esta Universidad, presentada a través de diferentes escenarios de probabilidad de eventos.

Por lo anterior, la pregunta de investigación es: ¿Cuáles son los niveles de riesgo sísmico, del campus central de la Universidad de El Salvador, obtenidos a partir de la determinación de los niveles de vulnerabilidad estructural y exposición bajo la acción de diferentes esquemas de demandas sísmicas?

1.4. OBJETIVOS.

1.4.1. OBJETIVO GENERAL.

- Evaluar el Riesgo Sísmico de manera preliminar de las instalaciones del Campus Central de la Universidad de El Salvador a través de la cuantificación de la vulnerabilidad estructural y el inventario de población y edificios así como de la aplicación de diferentes esquemas de demandas sísmicas que generarán diversos escenarios de probabilidad de daños y pérdidas.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Caracterizar la distribución de población usuario y edificios en el campus central de la Universidad de El Salvador, cuya representación se efectuará a través de bancos de datos de población y estructuras, georeferenciados.
- Definir las tipologías estructurales comunes, en el campus central de la Universidad de El Salvador, que serán presentadas en bancos de datos de edificios, georeferenciados.
- Evaluar la vulnerabilidad de manera preliminar de las tipologías estructurales cuyo resultado se ilustrará por curvas de vulnerabilidad y fragilidad según las tipologías de edificios.

1.5. ALCANCES.

- Para la evaluación del riesgo sísmico se considerará las pérdidas causadas por la vibración del terreno, efecto que se considera produce la mayor cantidad

muerdes y daños; y no considera las pérdidas por daños producidos por otros acciones tales como cedencia del terreno, licuefacción o deslizamientos, temática sin duda importante que podría considerarse en proyectos específicos futuros.

- El área de estudio será la sede central de la Ciudad Universitaria en San Salvador.
- La amenaza (o peligrosidad) sísmica no será evaluada, en vez de ello, se utilizará información de otros trabajos para su determinación (Bommer et al, 1996; Rose et al, 2004 y Benito et al, 2005).

1.6. LIMITACIONES.

- El período al cual está limitada la investigación y la obtención de resultados está conformado por 8 meses.
- El estudios presentado en esta investigación es en función de la información recopilada de una muestra de 68 edificios formales ubicados en el Campus Central de la Universidad de El Salvador, dentro de esta muestra de edificaciones se encuentran construcciones de uso de oficinas e institucionales.
- El carácter determinista de esta investigación sobre la evaluación de los de 68 edificios, establece una serie de consideraciones y simplificaciones adoptadas en función de la información recopilada de los datos suministrados por los ocupantes y en varios casos de los archivos no actualizados de las diferentes Facultades.

- La validez de los datos proporcionados por las Curvas de Capacidad y Fragilidad será a cálculos y deducciones, con su relativa incerteza lo cual incide en la probabilidad de pérdidas cuando se haga la evaluación del Riesgo Sísmico del área sujeta a estudio.

1.7. JUSTIFICACION.

En el Campus Central de la Universidad de El Salvador no existen estudios concretos a gran escala para la evaluación de riesgo sísmico, por lo tanto, no cuenta con un plan de prevención y mitigación en el evento de ocurrencia de un evento sísmico de carácter potencialmente destructivo.

Uno de los factores del riesgo sísmico en el Campus Central lo representa la exposición, debido a la cantidad de población usuaria, lo que potencialmente incrementa el nivel de riesgo sísmico; así mismo las edificaciones, debido a sus procesos constructivos y diseños estructurales, presentan un heterogéneo grado de vulnerabilidad, pero hasta el presente, no hay un banco de datos que condensen esta información para la Ciudad Universitaria. Por lo anterior, primeramente, se deberá adquirir, ordenar y compilar la información sobre la exposición y la vulnerabilidad de esta institución.

Un estudio de riesgo sísmico, aun cuando sea éste preliminar, del Campus Central de la Universidad de El Salvador, es necesario, para evaluar la magnitud de potenciales pérdidas económicas y sociales, ante diversos escenarios de ocurrencia de excitaciones sísmicas. Como un resultado inmediato de este estudio puede servir para que se establezcan lineamientos para un plan de gestión de riesgo sísmico, que pudiese preparar a la población usuaria ante la ocurrencia de un evento de esta

naturaleza; por otra parte, el poseer la información de población usuaria y estructuras en un Sistema de Información Geográfica puede servir como base para otros estudios de riesgos del Campus a diversos fenómenos naturales.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. RIESGO, EVALUACIÓN Y PÉRDIDAS.

Riesgo sísmico es la probabilidad de una pérdida causada por un sismo durante un tiempo definido. Esta pérdida puede ser medida en términos humanos, económicos o sociales y la escala escogida define el costo de la pérdida que da una medida del riesgo. Por ejemplo, se podría expresar el riesgo en términos del número de muertos o en términos de un costo económico, que puede incluir elementos directos (bienes destruidos) e indirectos (interrupción de comercio, etc.).

Algunas definiciones del riesgo son las siguientes:

- Riesgo es la probabilidad de sufrir una pérdida debida a un evento peligroso (FEMA 366, 2000).
- Riesgo se define como el potencial de consecuencias negativas de eventos peligrosos que pueden ocurrir en una específica unidad de área y en un determinado período de tiempo (Giovinazzi, 2005).
- Según varios comités y trabajos científicos como son el Instituto de Investigaciones de Ingeniería Sísmica (EERI), la Asociación Europea de Ingeniería Sísmica (EAEE). La Comisión de Seguridad Sísmica de California (CSSC), el Servicio Geológico de los E.U. (USGS), y trabajos científicos como el del Ingeniero Fabricio Yépez, definen el Riesgo Sísmico como “las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un terremoto, como resultado de la falla de estructuras cuya capacidad resistente fue excedida por el terremoto”. (Mena, 2002).

Bommer (1989) explica el riesgo y sus componentes en los siguientes párrafos. La probabilidad de una pérdida causada por un sismo depende de dos factores, la amenaza sísmica y la vulnerabilidad (Fourier d'Albe, 1988):

$$\text{Riesgo Sísmico} = f(\text{Amenaza Sísmica, Vulnerabilidad}).$$

La amenaza sísmica es la probabilidad de que ocurra un **movimiento Ps sísmicos** de cierta intensidad en una zona determinada durante un tiempo definido. La amenaza también puede incluir otros efectos que el mismo sismo genera, como derrumbes y licuefacción de suelos. La vulnerabilidad representa el daño que se puede esperar en una estructura sujeta a un movimiento sísmico de cierta intensidad. Entonces la vulnerabilidad refleja la falta de resistencia de un edificio frente a las sollicitaciones sísmicas.

La amenaza sísmica refleja características de la naturaleza que generalmente no pueden ser modificados, como son la sismicidad y la geología de una región. En cambio, la vulnerabilidad sí puede ser modificada y por lo tanto la única forma de disminuir el riesgo sísmico para una instalación es reduciendo la vulnerabilidad a través del diseño y la construcción adecuados. Dada la alta incidencia de la intervención humana en la vulnerabilidad, que es determinante para el riesgo sísmico, aunque los sismos son un fenómeno natural, los desastres resultantes, cuando ocurren, no pueden ni deben considerarse como “desastres naturales”.

Por ejemplo, el terremoto de la república de Armenia en diciembre de 1988 afectó una zona donde había muchos edificios altos de baja resistencia sísmica y quedaron sin vida más de 25,000 personas (Bommer y Ambraseys, 1989). En contraste, en el siguiente año hubo un terremoto de mayor magnitud en California donde se aplican

normas exigentes para el diseño sismorresistentes y murieron tan sólo 70 personas (Elnashai y otros, 1989).

A nivel mundial, el número de muertos provocados por terremotos es creciente (Bertero, 1994). Esto no se debe al aumento de la actividad sísmica, para la cual no hay ninguna evidencia. Principalmente se debe al crecimiento de la población y la expansión urbana, especialmente en aquellos lugares donde son débiles la gestión urbana y los mecanismos de seguridad sísmica. Según Bilham (1988) para el año 2000 habrá más de 100 “superciudades” (con más de 2 millones de habitantes) en el mundo y 41 de estas (que en su conjunto tendrán una población total de 292 millones) se encontrarán en zonas sísmicas, y el 80% de ellos serán del Tercer Mundo. En vista de estos patrones, se puede modificar la definición de Fourier d’Albe (1988) para el riesgo sísmico para incluir el factor de la densidad de población:

Riesgo Sísmico = f (Amenaza Sísmica, Exposición, Vulnerabilidad, Costo).

La exposición se puede expresar en términos del número de edificios o personas en una zona, o el valor productivo de la industria y comercio concentrada en un lugar. El costo sería el número de personas albergadas en cada edificio o un valor monetario asociado con cada edificio o unidad industrial. Entonces, si ocurre un sismo mar adentro o en una zona totalmente despoblada - donde la exposición es nula -, el riesgo sísmico que representa es cero. Igualmente, una ciudad grande en una zona sin actividad sísmica, aunque tiene gran exposición tiene muy bajo riesgo debido al bajo nivel de amenaza sísmica. En las ciudades en zonas sísmicas, donde existe la amenaza sísmica y alta exposición, el nivel de riesgo sísmico está controlado por la vulnerabilidad de los edificios y la infraestructura.

Esta nueva expresión entonces permite ver claramente, que la expansión urbana en sí, aún con la misma calidad de construcción, automáticamente conlleva un aumento del riesgo sísmico. Al mismo tiempo, señala la urgencia de controlar tanto la urbanización como la calidad de la construcción para mitigar efectivamente el riesgo sísmico.

En este Trabajo de Graduación, se considera el nivel de riesgo sísmico en el Campus Central de la Universidad de El Salvador, obteniendo así una probabilidad de daños y pérdidas tras una amenaza sísmica. En este segundo Capítulo se presenta el marco global para el estudio en términos de sismicidad y el impacto de los terremotos.

Según Coburn y Spence (2002) en la figura 2.1 se muestra la frecuencia anual de que una persona muera debido a **tres causas:**

- 1) que la persona fume más de 10 cigarrillos al día;
- 2) que la persona viva en Irán y ocurra un sismo y;
- 3) que la persona viva en California y ocurra un sismo.

Es importante destacar que las frecuencias indicadas en la Figura 2.1 deben considerarse como estimaciones que tienen asociadas muchas incertidumbres, y que además no son estimaciones recientes. **Por lo tanto, en el trabajo dicha información se incluye únicamente con la finalidad de mostrar un claro ejemplo de los términos en que es posible expresar el riesgo sísmico.**

Las estimaciones de muertes probables asociadas a la ocurrencia de sismos, involucran muchas variables entre las que destacan el número de edificios que se han colapsado en sismos previos, y el número de edificios que se estima pueden colapsarse en futuros sismos. En relación a este tema se ha estimado que en el siglo

XX, cerca del 75% de las muertes de personas atribuidas a sismos, fueron causadas por el colapso de edificios (Coburn y Spence, 2002).

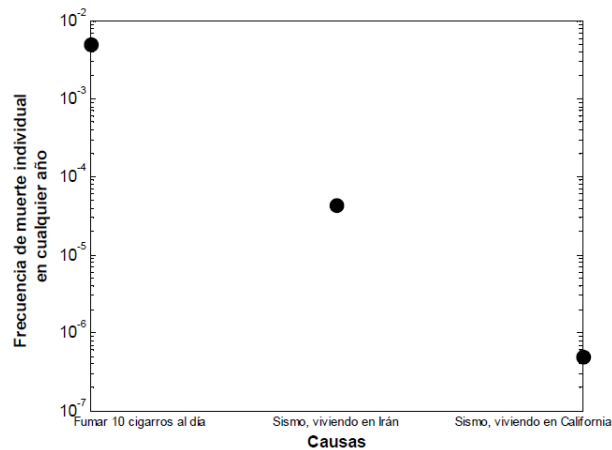


Figura 2. 1. Frecuencia de muerte individual en cualquier año debido a diferentes causas. Fuente: Coburn y Spence, 2002.

Riesgo sísmico de edificios.

Según Coburn y Spence (2002) el riesgo sísmico de un edificio indica los daños o pérdidas sísmicos que pueden generarse en el edificio, en un intervalo de tiempo determinado. Dicho riesgo se expresa en diferentes maneras, sin embargo, algunas de las formas más comunes de expresar el riesgo sísmico son las siguientes:

Curvas de frecuencia anuales de excedencia de daño o pérdidas (Figura 2.2), y Mapas de daño o pérdidas sísmicos (Figura 2.3).

Según Aguilar (2011) de acuerdo con datos de la ONU en 2006 la mitad de la población mundial vivía en ciudades, mientras que para el año 2030, tres de cada cinco personas en el mundo muy probablemente residirán en centros urbanos (UN-DESA, 2007; 2006). Adicionalmente, en la Figura 2.4 se puede observar el crecimiento que han experimentado las poblaciones rurales y urbanas en las últimas décadas, y la estimación del aumento de las mismas para los próximos años.

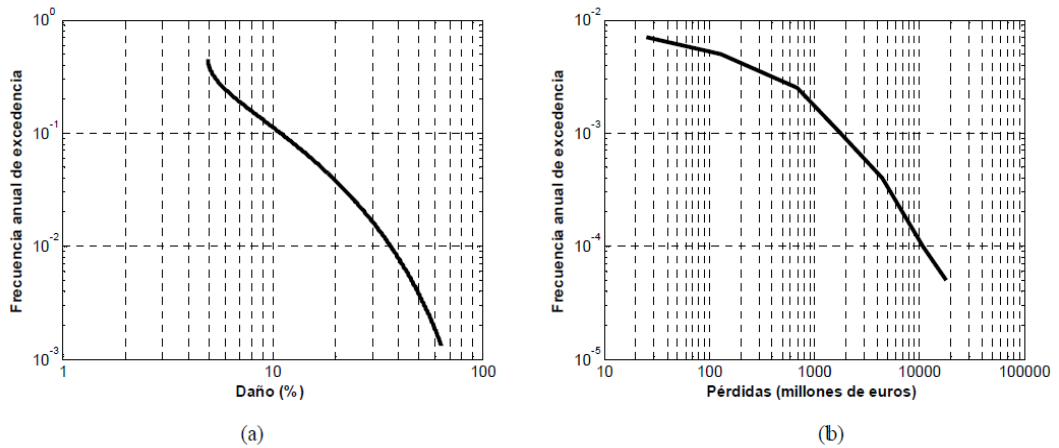


Figura 2. 2. (a) Curva de riesgo sísmico de un edificio de mampostería no reforzada con muros de carga, y de baja altura (ATC-13, 1985), localizado en la prefectura de Tokio, Japón (Ishii et al, 2007); (b) Curva de riesgo sísmico de la ciudad de Cologne, Alemania (Grünthal et al, 2006).

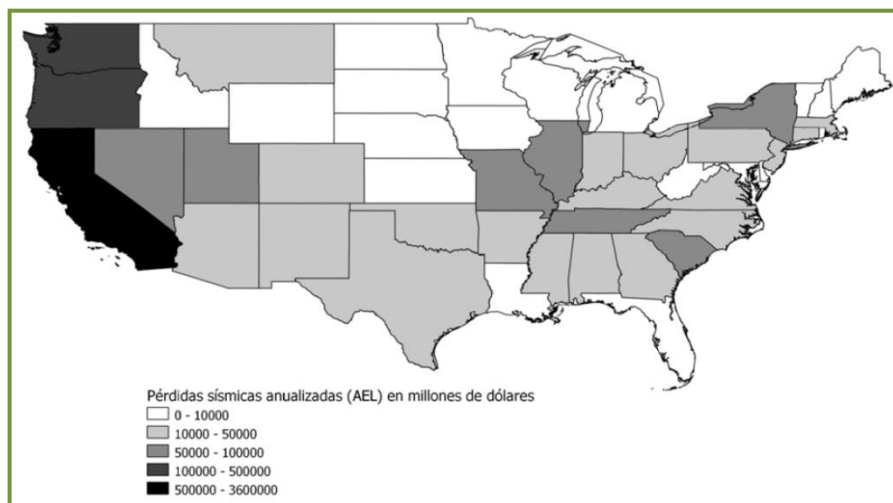


Figura 2. 3. Mapa de pérdidas sísmicas anualizadas en millones de dólares de Estados Unidos (excepto Alaska y Hawaii), por estado (FEMA-366, 2008).

Importancia de los estudios de riesgo sísmico.

De manera que, dado que las poblaciones urbanas seguirán aumentando, es necesario mejorar la gestión del riesgo en las zonas urbanas, para evitar que sigan ocurriendo

desastres como los generados durante la ocurrencia del sismo del 12 de enero de 2010 en Haití (USGS/EERI, 2010), del sismo del 27 de febrero de 2010 en Chile (Bray y Frost, 2010), y del sismo del 11 de marzo de 2011 en Japón (USGS, 2011).

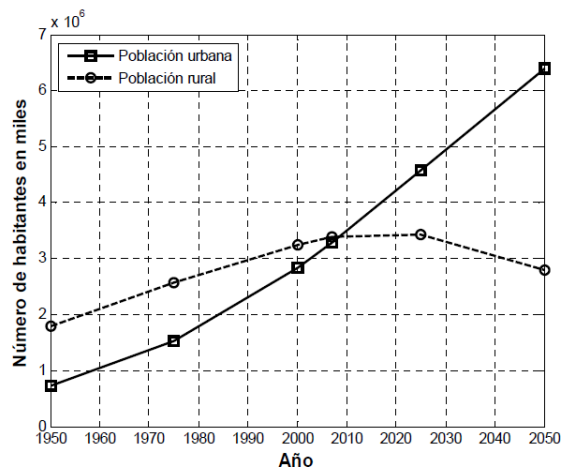


Figura 2. 4. Crecimiento de las poblaciones urbanas y rurales en el mundo, y crecimiento estimado de dichas poblaciones para las próximas décadas (UN-DESA, 2007; 2006).

Según National Research Council (1989), algunos de los más importantes objetivos por los que se realizan estimaciones de pérdidas sísmicas son los siguientes:

- Identificar las áreas geográficas especialmente peligrosas;
- Identificar grupos de edificios u otro tipo de estructuras especialmente peligrosos;
- Ayudar en el desarrollo de planes de atención de la emergencia;
- Evaluar el impacto económico global;
- Ayudar en el cálculo de estimaciones rápidas del impacto aproximado de un sismo cuando apenas han transcurrido pocas horas desde que ocurrió el sismo;

- Estimar las consecuencias esperadas de un sismo previsto.

Además, en el documento del National Research Council, se reconoce que la estimación de las pérdidas sísmicas potenciales es una tarea esencial para estimular y guiar, las acciones de mitigación del riesgo asociado a la ocurrencia de sismos (National Research Council, 1989).

Gestión urbana y reducción del riesgo sísmico en San Salvador.

Según Bommer (1996) los tres factores que tienen mayor peso en determinar el nivel de riesgo sísmico en San Salvador, a corto plazo, son la calidad de la vivienda informal, la ubicación de construcciones en terreno inestable y el estado actual de edificios existentes, especialmente los que han sido debilitados por sismos anteriores. La reducción del riesgo en estas tres áreas representa un gran desafío en el corto plazo debido a lo siguiente:

- la calidad de la vivienda informal y marginal es más bien un problema social que técnico y necesitaría una enorme inversión por parte del gobierno;
- la estabilización del terreno inestable es técnicamente complicada y muy costosa, además la identificación de ciertas zonas como inestables tiene consecuencias económicas;
- la evaluación de la vulnerabilidad de un edificio exige una inspección detallada que el propietario quizá no permitiría. Además, reforzar una estructura existente para lograr una resistencia sísmica adecuada es costoso y requiere de una ingeniería muy especializada.

A mediano y largo plazo la reducción del riesgo sísmico debe formar parte de la gestión urbana, bajo una concepción integral del desarrollo de la ciudad, donde la

zonificación de la Región Metropolitana de San Salvador por amenazas naturales así como la regulación del uso del suelo y de la construcción han de ser instrumentos importantes.

Es necesario construir la institucionalidad para la gestión del desarrollo territorial y urbano (Lungo y otros, 1996). Al mismo tiempo, es urgente desarrollar y fortalecer la ingeniería sísmica y de riesgos en general, en las universidades y gremios profesionales, aunque es de mencionar que éste es un proceso que ya ha sido iniciado.

Otro esfuerzo importante que se ha venido desarrollando tiene que ver con la formulación de códigos para el diseño sismorresistentes, aunque como se discute a continuación dicho proceso adolece de limitaciones importantes.

2.1.1. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGO.

Según Aguilar (2011) actualmente, no hay una metodología estándar para estimar riesgo sísmico. Esto último se debe principalmente, al hecho de que aún hay significativas incertidumbres en los principales elementos que determinan el riesgo sísmico de un edificio. Es decir, las incertidumbres asociadas a las estimaciones del peligro sísmico, de la vulnerabilidad sísmica y del daño sísmico, todavía son importantes. Por tal motivo, los modelos probabilistas son una opción apropiada para estimar el riesgo sísmico de edificios.

2.1.1.1. Metodología del Trabajo de Graduación.

Actualmente, el programa HAZUS integra diferentes metodologías, que permiten estimar diversos tipos de riesgo (sismos, inundaciones, huracanes), presentes en las

zonas urbanas de Estados Unidos. Sin embargo, en el presente trabajo de graduación se harán principalmente referencias a las metodologías usadas en HAZUS para estimar riesgo sísmico.

Se aplica una metodología para la evaluación del riesgo sísmico de edificios. El procedimiento en este estudio se describe brevemente a continuación:

- 1) La estimación de la amenaza sísmica se realizó mediante métodos determinísticos.
- 2) Una vez establecida la Amenaza sísmica sobre el campus, se evalúa la Exposición, en esta se presentan los resultados estadísticos asociados a características específicas inventariadas a través de las inspecciones de campo de cada una de las edificaciones.
- 3) Obtenida la Exposición, se debe evaluar la Vulnerabilidad, esto es la afectación o daño que van a tener las estructuras ante la ocurrencia del sismo. Se presentan los resultados corresponden a la distribución de años de construcción de las edificaciones evaluadas, número de niveles, tipología estructural, configuración en planta y elevación, las irregularidades identificadas y el tipo de uso actual de las edificaciones.
- 4) Se determinan las curvas de capacidad y fragilidad, las cuales son funciones que representan la probabilidad de que la respuesta de un sistema estructural exceda un estado límite bajo una excitación sísmica.
- 5) Obtención de Daños y Pérdidas.
- 6) Se construyen los escenarios de Riesgo Sísmico, el análisis de riesgo sísmico está basado principalmente en la metodología HAZUS.

- 7) Los resultados presentados se muestran con gráficos y mapas de distribución numérica, porcentual y espacial de vulnerabilidad, riesgo sísmico, empleando una representación planimétrica de riesgo sísmico con la ayuda del Sistema de Información Geográfica.

2.1.1.2. Estimación del riesgo.

Según Aguilar (2011) la estimación del riesgo se puede realizar mediante diferentes metodologías. Por ejemplo, en el caso de riesgos en los que hay importante número de datos, se emplean con mayor frecuencia los métodos estadísticos. Esto último se debe al hecho de que las estimaciones estadísticas que se basan en importante número de datos representativos y confiables, suelen tener un alto nivel de confianza. Por citar un caso, en la estimación del riesgo que tienen las personas de sufrir ciertos tipos de enfermedades, se emplea con mucha frecuencia los métodos estadísticos.

Por otra parte, para estimar el riesgo sísmico anualizado es posible emplear los pasos indicados en la Figura 2.5, donde en el primer paso se realiza una estimación probabilista del peligro sísmico que puede presentarse en el campus, donde el edificio se localiza. Dicho peligro corresponde a una descripción probabilista (una frecuencia de excedencia) de un parámetro sísmico, como los grados de intensidad macrosísmica (McGuire, 2004). En el segundo paso se estima la vulnerabilidad sísmica del edificio o su capacidad sismorresistentes. En el tercer paso se estiman probabilidades de que se origine un nivel de daño sísmico determinado, con diferentes tipologías estructurales (añadiéndoles los defectos estructurales si es que los hay), durante la ocurrencia de movimientos sísmicos del terreno. En el cuarto

paso se trasladan la peligrosidad sísmica y la vulnerabilidad sísmica en riesgos sísmicos (frecuencias de daño) mediante el empleo de funciones de daño.

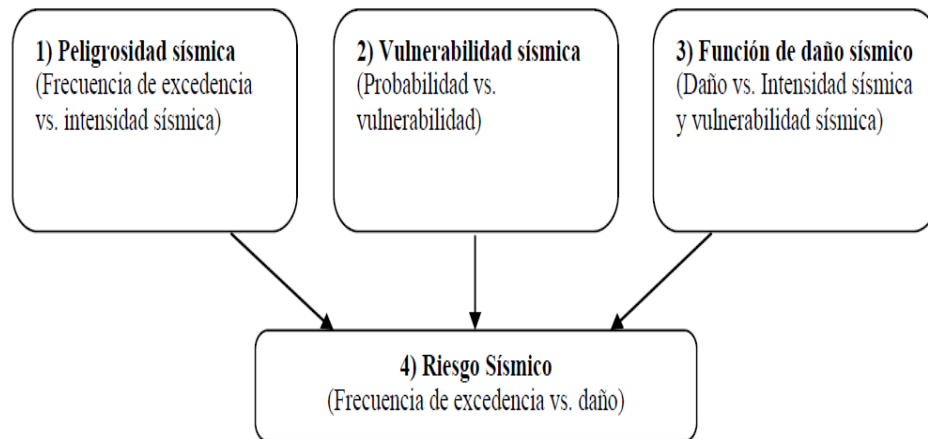


Figura 2. 5. Principales pasos en la estimación del riesgo sísmico de edificios en términos de frecuencias de excedencia del daño. Fuente: McGuire, 2004.

2.1.2. PERDIDAS.

2.1.2.1. Pérdidas sísmicas.

Según Aguilar (2011) el concepto de pérdidas sísmicas suele emplearse para indicar pérdidas económicas asociadas a los daños sísmicos directos, indirectos o ambos. Además, las pérdidas sísmicas pueden referirse al daño sísmico de un edificio o de muchos edificios, e incluso pueden estar asociadas a la totalidad del daño generado por un sismo en una ciudad, estado o país. Las pérdidas sísmicas pueden ser muy importantes incluso en sismos de magnitud moderada. Por ejemplo, las pérdidas totales generadas por el sismo de Northridge de 1994, excluyendo efectos indirectos, ascendieron a más de 40 mil millones de dólares (Eguchi et al, 1998), cantidad que superó en forma significativa las pérdidas asociadas a otros sismos importantes de California (Figura 2.6). Tales pérdidas fueron también cerca de la mitad de las

pérdidas económicas que generó el huracán Katrina en 2005 (Kunreuther y Pauly, 2006), el cual es considerado como el desastre natural que ha generado las mayores pérdidas en la historia de Estados Unidos (Viscusi, 2006). En el caso de las pérdidas de Northridge las mismas produjeron un perjuicio significativo en el sistema internacional de seguros, porque tales pérdidas superaron en mucho las previsiones hechas.

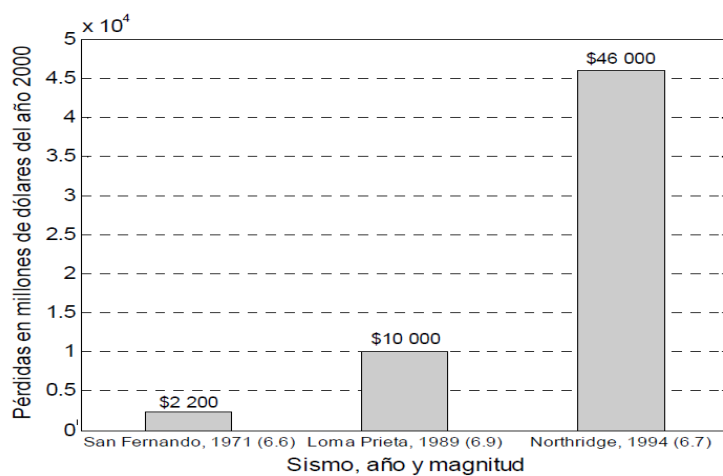


Figura 2. 6. Sismos que han generado las mayores pérdidas reportadas en California, USA, en el periodo 1970-2000. Fuente: Rowshandel et al, 2007.

Por otra parte, es importante destacar que a pesar del gran tamaño de las pérdidas en Northridge, el número de víctimas mortales fue relativamente pequeño. Esta última afirmación se apoya en el hecho de que las 58 muertes atribuidas al sismo de Northridge, fue una cantidad similar a las atribuidas al sismo de San Fernando y al sismo de Loma Prieta (Figura 2.7). Adicionalmente, se reportó que del total de muertes debidas a Northridge, únicamente 22 fueron causadas por fallas estructurales de los edificios. El sismo de Northridge confirmó la importancia de generar nuevo conocimiento sobre el comportamiento sísmico de edificios, que permitiese tener

edificios capaces de soportar sismos de magnitud moderada como el de Northridge, sin sufrir colapso ni daño físico excesivo (Todd et al, 1994).

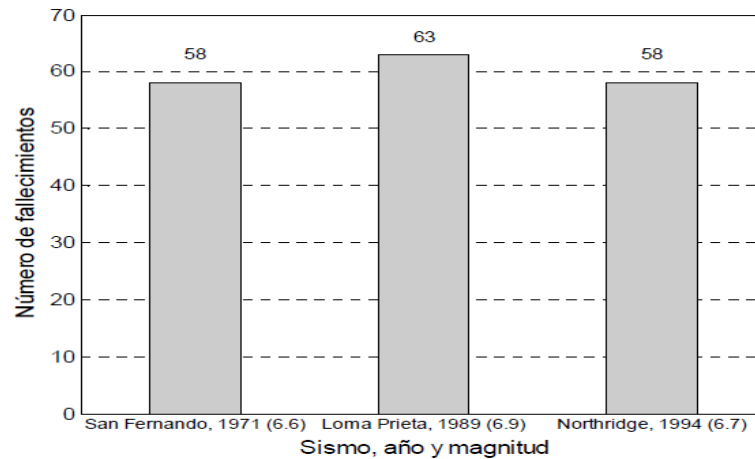


Figura 2. 7. Número de fallecimientos en importantes sismos de California.

Fuente: Todd et al, 1994; Utsu, 2002.

2.1.2.2. Pérdidas económicas por daño físico en edificios.

Según Aguilar (2011) en general, cualquier daño físico en edificios tiene asociada una pérdida económica, la cual suele deberse al costo de reparación del daño físico y al costo de la interrupción de las actividades productivas o comerciales que se desarrollaban normalmente en los edificios. Por otra parte, expresar el daño físico en edificios en términos de unidades monetarias, facilita la toma de decisiones relacionadas con dicho daño (Kleindorfer et al, 2005; ATC-58-1, 2002).

Para fines de identificación se suele distinguir entre diferentes tipos de pérdidas económicas, no todas las edificaciones tendrán el mismo tipo de pérdidas, ya que algunas edificaciones dentro del campus no depende de actividades productivas o comerciales, son edificaciones educacionales y varían en tipología estructural y niveles de pisos. Un ejemplo, será la pérdida económica asociada al costo de reparación del daño físico que se ha presentado en un edificio, se suele identificar

como pérdida económica directa. Mientras que una pérdida económica indirecta puede corresponder a las pérdidas asociadas a la interrupción de las actividades productivas o comerciales que se desarrollaban normalmente en un edificio.

Pérdidas Materiales.

Según Jaramillo (2006) las pérdidas materiales totales se calculan como el producto del costo de los elementos estructurales por el porcentaje de pérdidas de los elementos estructurales, más el costo de los elementos no estructurales por el porcentaje de pérdidas para los elementos no estructurales. Para este cálculo se tiene en cuenta la matriz que relaciona el costo del m² de reposición con el tipo y la edad de la construcción. Esta matriz debe ser obtenida localmente según los costos y topologías estructurales. Se asocian a esta matriz variables como: Edad de la edificación, localización, uso, tipología estructural, número de pisos y otras que puedan tener una incidencia significativa en el valor del área de construcción.

De este costo una fracción es estructural y la otra corresponde a elementos no estructurales.

Pérdidas Materiales Estructurales.

De acuerdo a Jaramillo (2006) las pérdidas materiales estructurales se calculan de la siguiente manera:

$$Perd\ est = m_{const}^2 * IDE * \$/m^2 * valor\ parte\ est.$$

Donde:

Perd est.= Perdida estructural.

m² const = metros cuadrados construidos.

IDE = Índice de daño estructural.

\$/m² = costo por metro cuadrado.

Pérdidas Materiales No Estructurales.

Las pérdidas materiales no estructurales se calculan de la siguiente manera:

$$Perd\ Nest = m_{const}^2 * IDNE * \$/m^2 * valor\ parte\ No\ est.$$

Donde:

Perd Nest.= Perdida No estructural.

$m^2\ const =$ metros cuadrados construidos.

IDNE = Índice de daño no estructural.

$\$/m^2 =$ costo por metro cuadrado.

2.1.2.3. Obtención de los Índices de Daño.

Según Jaramillo (2011) para la obtención de las pérdidas (Riesgo), es necesario evaluar individualmente los índices de daño, en tal sentido se hace necesario evaluar los desplazamientos que tendrá la estructura y compararlos con los desplazamientos límites para cada nivel de daño.

Daño económico.

Según Hernández (2002) el daño económico se resume a relacionar el daño estructural con las pérdidas económicas de un edificio producto de un evento sísmico. Para lo cual se requiere saber el costo de reposición global en términos financieros, asociándolo a un índice de daño económico global que involucre los anteriores.

Generalmente se define de la siguiente manera:

$$\text{Índice de daño económico} = \frac{\text{coste de reparación del daño}}{\text{coste de reposición}}$$

En donde, el coste de reparación es una suma ponderada de los costes parciales de reparación, tanto de los elementos estructurales como no estructurales, por lo que se

deben relacionar los costes con los indicadores de daño. El Índice de Daño Económico se denomina “Cost Ratio” en HAZUS-MR. Existen muchos investigadores que utilizan esta definición de daño económico como son: Tatsumi, Kappos y Yépez (Hernández, 2002).

2.2. AMENAZA SISMICA.

Según Caballero (2007) se entiende por amenaza sísmica de una zona cualquier descripción de los efectos provocados por terremotos en el suelo de dicha zona. Estos efectos pueden venir representados mediante aceleración, velocidad, desplazamiento o por la intensidad sentida en el lugar y para evaluarlos es necesario analizar los fenómenos que ocurra desde la emisión de ondas sísmicas en el foco hasta que dichas ondas alcanzan el lugar en cuestión.

El concepto amenaza sísmica suele emplearse en las dos acepciones siguientes:

- 1) La amenaza sísmica es cualquier fenómeno físico asociado con un sismo (v.g., movimiento del terreno, falla del terreno, licuefacción y tsunamis), y sus efectos sobre el uso del suelo, las estructuras hechas por el hombre, y los sistemas socioeconómicos, que tienen el potencial de producir una pérdida (Aki y Lee, 2003). De manera similar McGuire (2004) define el peligro sísmico como “una propiedad de un sismo que puede causar daño o pérdida. Ejemplos son la amplitud del movimiento sísmico en cierto intervalo, las olas inducidas por un tsunami que alcanzan cierta elevación en un puerto”.
- 2) La amenaza sísmica indica la probabilidad de que ocurra un nivel determinado de movimiento sísmico del terreno, en un punto específico, dentro de cierto periodo de tiempo (Aki y Lee, 2003; Thenhaus y Campbell,

2003). En este caso, el peligro sísmico suele ser calculado como la frecuencia (número de veces por unidad de tiempo), en que una amplitud del movimiento sísmico del terreno será mayor que un valor especificado (McGuire, 2004).

Según Quintero y Rojas (2011) las características de los mismos dependerá de diversos factores, entre los cuales destaca, las características geotécnicas y geológicas, así como las particularidades del terremoto, es decir, magnitud, intensidad, duración, hipocentro, etc. Debido a esto, se han realizado trabajos de microzonificación sísmica, siendo un paso fundamental al momento de estudiar los terremotos.

Generalmente, en su evaluación se utilizan métodos o modelos probabilísticos simplificados de cálculo para definir el comportamiento sísmico de una zona, las fuentes sísmicas y la atenuación del movimiento del suelo, expresando los resultados en forma de probabilidad de ocurrencia de los distintos tamaños de los terremotos, la probabilidad de excedencia de distintos niveles de intensidad del movimiento o a los valores máximos de aceleración esperados en un lugar y en un intervalo de tiempo determinado. Sin embargo, estos modelos involucran una gran cantidad de incertidumbres lo que lleva, inevitablemente, a ser calculados a partir de la extrapolación de datos y a la adaptación de estudios de otras regiones para que estos modelos sean completamente funcionales y en muchos casos a la simplificación de los mismos (Hernández, 2002).

Según Hernández (2002) la estimación de la amenaza sísmica se puede realizar mediante métodos probabilísticos (también existen metodologías determinativas) teniendo en cuenta variables como:

- Tipo y características de las fuentes sismogénicas que pueden potencialmente producir sismos que afecten la ciudad, estudios geológicos, sismológicos y geotectónicos aportan información en este contexto.
- Sismicidad Histórica de la Zona.
- Aspectos como magnitudes máximas de acuerdo a las fallas y longitudes de ruptura probables.
- Distribución espacio-temporal de los sismos en o cerca de la zona a estudiar.
- Atenuación de las ondas sísmicas.
- Registros acelerográficos disponibles.

Existen en la actualidad metodologías aceptadas que involucran en mayor o menor grado cada una de las anteriores variables o características, para la evaluación de la amenaza sísmica. Es importante aclarar en este punto que la intensidad del sismo esperable en el sitio debe ser entendida en términos generales como los valores de aceleración, velocidad, desplazamiento o coordenadas espectrales de cualquier variable que permita inducir sobre la estructura solicitaciones que requieran su respuesta ante ella dinámicamente.

2.2.1. EVALUACIÓN DE AMENAZA SÍSMICA EN EL SALVADOR.

El Salvador se encuentra ubicado en el “anillo de fuego”, la zona de actividad sísmica y volcánica que bordea la cuenca del océano Pacífico e incluye toda la costa

occidental del continente americano, Japón, Filipinas y Nueva Zelandia. En esta sección se explica brevemente las causas físicas de la elevada sismicidad que afecta a Centro América y a El Salvador y se presenta un resumen de la historia sísmica del país. También se presentan los diferentes estudios que se han llevado a cabo de la amenaza sísmica en El Salvador y se examina la correlación entre sus resultados y las observaciones históricas de los terremotos en el país. En sección 2.2.3 de este Capítulo se estudio el impacto de los sismos en la Región Metropolitana de San Salvador (RMSS) para identificar los patrones de daños y los factores que contribuyen a su alto nivel de riesgo sísmico. (Bommer, Salazar, Samayoa, 1998).

Según Bommer et al. (1998) en el siglo XX los terremotos provocaron la muerte de casi 3,000 salvadoreños (White y Harlow, 1993; Ambraseys y Adams, 1996). Esta cifra es pequeña en comparación con el número de personas que han perdido la vida por causa de enfermedades tropicales, violencia y accidentes de tránsito, pero el impacto humano de un terremoto es muy fuerte por la naturaleza repentina y concentrada de la catástrofe.

En efecto, el impacto social y económico de los terremotos en El Salvador es muy fuerte. La tabla 2.1 muestra las pérdidas económicas ocasionadas por sismos en diferentes países durante las décadas de los setenta y los ochenta. También se presenta la pérdida económica como porcentaje del PIB de cada país en el mismo año que el terremoto y se ve que los tres sismos con mayor impacto al nivel nacional han ocurrido en Centro América.

Según Bommer et al. (1998) estos datos reflejan la alta sismicidad del istmo y la fragilidad de las economías pequeñas y concentradas de la región. Los efectos de un terremoto sobre el desarrollo de un país pueden ser grandes: estudios han mostrado

que el deterioro de la economía de Nicaragua durante las décadas de los setenta y los ochenta tenía sus raíces en la deuda creada por el terremoto de Managua en 1972 y el manejo del desastre por la dictadura somocista (Bommer, 1985).

Tabla 2. 1. Pérdidas económicas directas ocasionadas por terremotos, 1972-1990. Producto Nacional Bruto correspondiente al año en que ocurrió el sismo.

Fuente: Coburn y Spence (1992).

Ciudad, País y Año	Perdidas (Billones de US\$\$)	PNB* (Billones de US\$\$)	Perdida/PNB (Porcentaje)
Managua, 1972	2.0	5.0	40.0
San Salvador, 1986	1.5	4.8	31.3
Guatemala, 1976	1.1	6.1	18.0
Montenegro, Yugoslavia, 1979	2.2	22.0	10.0
Manjil, Irán, 1990	7.2	100.0	7.2
Campania, Italia, 1980	45.0	661.8	6.8
Bucarest, Rumania, 1977	0.8	26.7	3.0
D.F., México, 1985	5.0	166.7	3.0
Armenia, Ex-URSS, 1988	17.0	566.7	3.0
Luzón, Filipinas, 1990	1.5	55.1	2.7
Kalamata, Grecia, 1986	0.8	40.0	2.0
Tangshang, China, 1976	6.0	400.0	1.5
Loma Prieta, EE.UU., 1989	8.0	4705.8	0.2

*Producto Nacional Bruto correspondiente al año en que ocurrió el sismo.

2.2.1.1. Tectónica y Sismicidad.

El estudio de Bommer, Salazar y Samayoa (1998), afirman que los sismos se manifiestan como vibraciones en la corteza terrestre que pueden ser clasificados como entre-placas e intra-placas. Los primeros son originados en los límites de las placas tectónicas como resultado de su movimiento relativo, un ejemplo de este tipo de sismos son los que se originan en el sistema de fallas de Guatemala. Los segundos son los que ocurren lejos de los límites de las mismas y probablemente se deban a

una reducción local de la resistencia del material de la litosfera que a un aumento del esfuerzo, siendo un ejemplo los sismos que ocurren en la Depresión de Honduras.

El concepto o parámetro que actualmente se utiliza para cuantificar el nivel de actividad sísmica de una región, a través del registro de los sismos en el espacio y en el tiempo, es decir que se determina al identificar donde ocurren los sismos, que magnitud tienen y con qué frecuencia ocurren, se conoce como sismicidad. Según Bommer, Salazar y Samayoa (1998), San Salvador y por ende el campus central de la Universidad de El Salvador está afectado por 5 fuentes generadoras de sismos:

1. Al observar la Figura 2.8 nos percatamos que la tectónica de América Central y el Caribe es el resultado de la interacción de cinco placas tectónicas importantes, las cuales son la del Pacífico, la de Norte América, la de Cocos, la de Nazca y la de Sur América. Además nos damos cuenta que la fuente principal de sismos que afecta a nuestro país es la fosa de subducción, localizada a unos 125 km. de la costa, que se forma por la interacción de la placa de Cocos que se introduce debajo de la placa del Caribe (Figura 2.9), alcanzando profundidades hasta arriba de 300 km. por debajo del istmo centroamericano (Dewey y Suárez, 1991, como se referencia en Bommer, Salazar y Samayoa, 1998). En esta zona se pueden generar eventos con magnitudes cercanas a 8.0, aunque el nivel de actividad sísmica frente a las costas de nuestro país es menor que frente a las costas de Guatemala y Nicaragua (Ambraseys y Adams, 1996, como se referencia en Bommer, Salazar y Samayoa, 1998). Dos sismos (el del 7 de septiembre de 1915 con el epicentro situado debajo del occidente del país con una magnitud de 7.7 y el del 19 de junio de 1982 frente a la costa, con una magnitud de 7.3 (Bommer,

Salazar y Samayoa, 1998) asociados con esta fuente han causados daños considerables en el país durante el siglo pasado.

En el estudio realizado por White y Harlow en 1993 y por Ambraseys y Adams en 1996, (como se referencia en Bommer, Salazar y Samayoa, 1998) se evidenció que en el siglo pasado los sismos que afectaron nuestro país habían provocado la muerte de casi 3,000 salvadoreños.

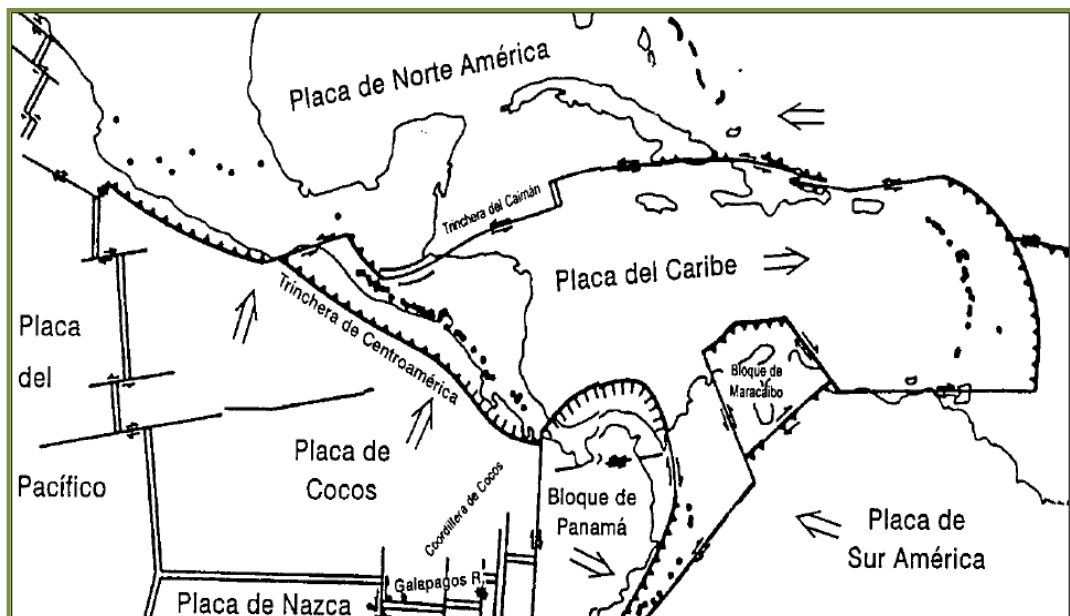


Figura 2. 8. Tectónica de placas en Centroamérica. Fuente: Weyl, 1980; como se referencia en Bommer, Salazar y Samayoa, 1998.

2. Otra fuente de actividad sísmica importante es la relacionada con la cadena volcánica en Centro América la cual corre paralelamente a la fosa de subducción, debido a que es la subducción la que produce el magma que ha dado origen a esta cadena y es por ello que corre paralela a ésta con una longitud total de aproximadamente 1,060 km. Esta se extiende desde el volcán de Tacaná al este de Guatemala, hasta el volcán Irazú en la parte

central de Costa Rica (Stiober y Carr, 1974; como se referencia en Bommer, Salazar y Samayoa, 1998). La distancia promedio entre los 42 volcanes activos es de 25 km, encontrándose entre los más cercanamente espaciados en el mundo, con alturas desde menos de 1,000 m. hasta de 3,300 m. Debido a fuerzas generadas por una componente de colisión oblicua en la zona de subducción, los sismos, originados en la cadena son generalmente considerados como de origen tectónico (White, 1991; como se referencia en Bommer, Salazar y Samayoa, 1998) aunque en algunos casos han sido acompañados por erupciones volcánicas, como los sismos de San Salvador de 1671 y 1917.

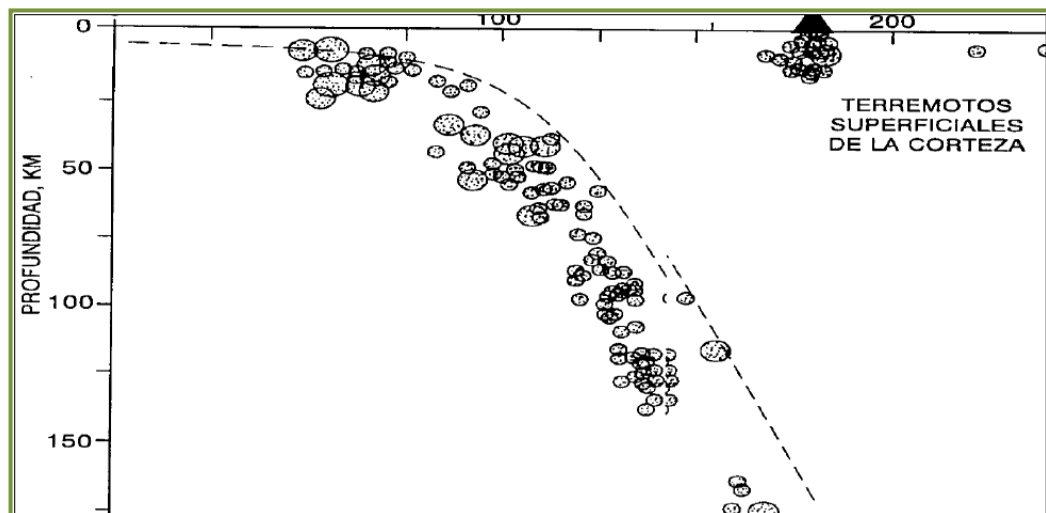


Figura 2. 9. Corte en la fosa de subducción para la región Centro Americana
Los círculos indican los focos de los terremotos y la línea punteada la parte superior de la placa de Cocos. Fuente: White y Harlow, 1993; como se referencia en Bommer, Salazar y Samayoa, 1998).

Estudios realizados (Bommer, Salazar y Samayoa, 1998) expresan que en esta zona los sismos no alcanzan magnitudes por arriba de 6.5, pero son los

que más destrucción han ocasionado debido a su foco superficial (menor de 25 km) y su coincidencia con centros de población urbana. En Centroamérica alrededor del 50% de la población reside a lo largo de la cadena volcánica (Harlow y otros, 1993; como se referencia en Bommer, Salazar y Samayoa, 1998). Los últimos sismos que han causado grandes daños en San Salvador asociados a esta fuente han sido los del 3 de mayo de 1965 y del 10 de octubre de 1986 con magnitud de 6.3 y 5.4 respectivamente.

3. Otra causa de actividad sísmica es la frontera entre la placa del Caribe y la de Norte América, donde esta última se está moviendo hacia el oeste, mientras la placa del Caribe se mueve hacia el este. Esta frontera cruza toda la parte central de Guatemala formando el sistema de fallas que se conoce como Motagua y Chixoy-Polochic, continuando en el mar del Caribe en la trinchera del Caimán. Existen otras fallas presentes como la de San Agustín y Jocotán-Chamelecón, las que a pesar de no haber aún evidencias geológicas de movimientos de desgarre resientes, se consideran que forman parte de la frontera entre estas dos placas (White, 1991; como se referencia en Bommer, Salazar y Samayoa, 1998).
4. Otra fuente generadora de sismos que afecta al país es la depresión de Honduras, la cual contiene pequeños segmentos de fallas normales. Los sismos en esta zona son superficiales y poco frecuentes, y no representan una amenaza sísmica importante para nuestro país (Sutch Osiecki, 1981; como se referencia en Bommer, Salazar y Samayoa, 1998).
5. Existe también un área de sismicidad poco frecuente fuera de los límites entre placas, que es asociada con una zona de extensión tectónica la que está

limitada al suroeste por la cadena volcánica, por el sistema de fallas de Guatemala al norte y por la depresión de Honduras al este, en la cual se han producido dos sismos con magnitudes mayores a 7 grados en el siglo XVIII. A pesar que la sismicidad de esta área es baja, pero mayor con respecto a la depresión de Honduras, puede causar efectos importantes en la zona norte del país, en los departamentos de Santa Ana y Chalatenango, no así para la ciudad de San Salvador (Bommer y Otros; 1997b, como se referencia en Bommer, Salazar y Samayoa, 1998).

Según Marroquín y Benito (2009) y representado en la Figura 2.10 se muestran el sistema de fallas que se encuentran en nuestro país. El sistema con orientación NE-SO constituye el sistema principal y se caracteriza por desplazamientos verticales, dentro de este sistema se reconocen 5 ejes, los cuales se describen a continuación, tomando en cuenta la información que se presenta en la página oficial del SNET. (<http://mapas.snet.gob.sv/geologia/sismicidad.phtml>).

- Primer eje: Está formado por el límite sur de las montañas que se encuentran en la zona norte de nuestro país (como se muestra en la Figura 2.10) y está representado por dislocaciones verticales de alrededor de 1000 m.
- Segundo eje: Lo conforma los volcanes terciarios de la zona central del país (Guazapa, Ilopango, Coatepeque, como se muestra en la Figura 2.10), es decir por un vulcanismo individual apagado.
- Tercer eje: Está formado por dislocaciones tectónicas, la principal de ellas atraviesa el país formando la fosa central, forma parte también los volcanes cuaternarios, considerados como el vulcanismo joven, tales como el volcán

de San Salvador o Quezaltepeque, el volcán da San Vicente, el volcán de Santa Ana (Iamatepec), el volcán de Izalco entre otros. También se encuentran depresiones volcano-tectónicas y cúpulas de lava. Los eventos sísmicos que aún ocurren en esta zona, indican que los movimientos tectónicos continúan.

- Cuarto eje: Se localiza en el Océano Pacífico a una distancia de 25 Kms de la costa salvadoreña, se caracteriza por una actividad sísmica frecuente y forma parte de la fosa Mesoamericana.
- Quinto eje: Se encuentra más al Sur, formando una fosa marina que corre paralela a la costa salvadoreña y muestra cierta actividad sísmica. Existen elevaciones de forma cónica que se levantan desde más de 3000 mts de profundidad hasta el nivel del mar, considerándose estos como volcanes.

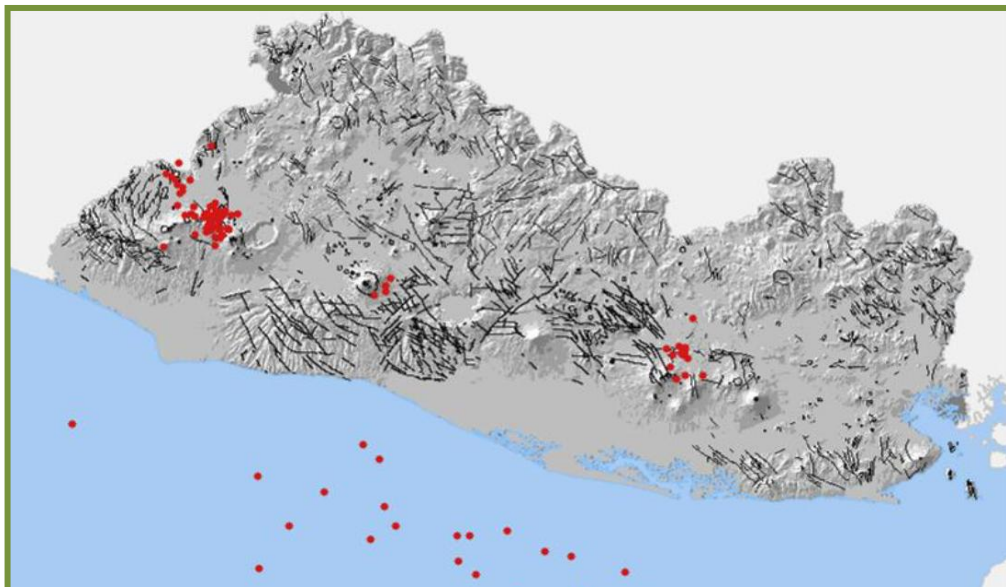


Figura 2. 10. Sistema de fallas en El Salvador. Fuente:

<http://mapas.snet.gob.sv/geologia/sismicidad.phtml>.

2.2.1.2. Estudios de la amenaza sísmica en El Salvador.

Según Bommer, Salazar y Samayoa (1998), Hasta el momento se han desarrollado seis estudios de amenaza sísmica para El Salvador, elaborando mapas de iso-valores para la aceleración máxima del terreno (Figura 2.11). Existen grandes diferencias entre los seis estudios tanto en la distribución geográfica y el nivel de amenaza sísmica, por ejemplo, se observa que el nivel de amenaza para San Salvador y Perquín que proporciona el estudio de Singh y otros (1993) en la Universidad Autónoma de México (UNAM) excede en dos y tres veces el valor que da el estudio de Algermissen y otros (1988) en el U.S. Geological Survey (USGS) respectivamente. Entre el estudio de Alfaro y otros (1990) realizado en la Universidad de Stanford, y el estudio de Lindholm y otros (1995) financiado por el Norway Seismic Array (NORSAR) y el Centro de Prevención para los Desastres Naturales en Centroamérica (CEPRENAC), se observan también grandes diferencias en el nivel de amenaza para San Salvador, siendo tres veces mayor el nivel que propone el primer estudio al que propone el segundo.

Una revisión comparativa de estas evaluaciones de amenaza muestra que las diferencias entre ellos se deben a las incertidumbres asociadas con los datos de entrada, es decir, con la base de datos de movimientos fuertes y los datos sismológicos disponibles para Centroamérica (Bommer y otros, 1996). La falta de calidad de los datos para Centroamérica incide en las incertidumbres para la derivación de las relaciones de atenuación para el movimiento fuerte, la delimitación de las fuentes sismogénicas y la selección de valores apropiados de las magnitudes máximas (Bommer y otros, 1996). Ninguno de estos estudios ha considerado las

características y los efectos de sitio y además no reflejan la actividad sísmica concentrada en el territorio debido a los sismos de la cadena volcánica.

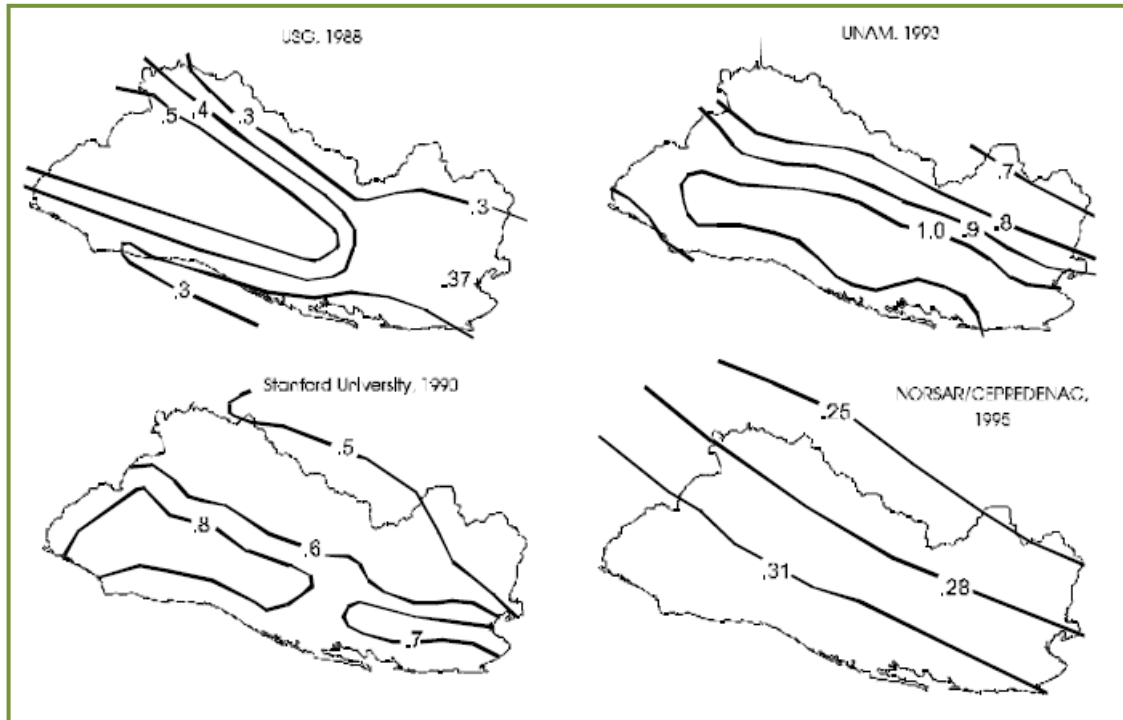


Figura 2. 11. Mapas de peligrosidad sísmica para El Salvador. Las curvas de isoaceleración se encuentran como proporción de la gravedad (g) y corresponden a un período de retorno de 475 años. Fuente: Bommer y otros, 1996.

2.2.2. AMENAZA SÍSMICA EN SAN SALVADOR.

San Salvador fue fundada en su lugar actual en 1545 y el año siguiente recibió el título de ciudad. Su primera ruina sísmica ocurrió el 23 de mayo de 1575. Tan elevada ha sido la frecuencia de los sismos que han afectado a San Salvador desde entonces, que en los últimos tres siglos la ciudad ha sido gravemente dañada por lo menos 14 veces (Bommer, 1996). De esos eventos de destrucción, nueve se han debido a sismos locales de la cadena volcánica sobre la que se ubica San Salvador, y

cinco han sido ocasionados por sismos en la fosa de subducción del Océano Pacífico que corre paralela a unos 50 km. de las costas del Pacífico de Centro América.

Según Bommer (1996) los terremotos locales de la cadena volcánica en la mayoría de los casos no alcanzan magnitudes mayores de 6.5 pero son la principal causa de destrucción en El Salvador debido a su coincidencia con las principales concentraciones urbanas. Es evidente que la envolvente de estas áreas cubre casi toda la Región Metropolitana de San Salvador (RMSS) a excepción de su extensión suroccidental. Los intervalos entre los sismos locales destructores de la cadena volcánica han variado entre los 2 y los 50 años, con un promedio de unos 30 años (Harlow y otros, 1993). Esto significa que es casi seguro que cada vivienda y edificio en San Salvador experimentará los efectos de un sismo fuerte durante su vida útil. (Bommer, 1996)

Según Bommer (1996), Al comparados con los sismos locales de la cadena volcánica, los sismos generados en la fosa de subducción pueden alcanzar magnitudes de casi 8.0 en la escala Richter, aunque la fosa parece estar localmente menos activa frente a la costa de El Salvador, donde el sismo más grande que ha ocurrido en este siglo fue el del 19 de junio de 1982, con una magnitud de 7.3 (Ambraseys y Adams, 1996). Sin embargo, como los terremotos originados en la fosa de subducción sacuden un área muy amplia, no alcanzan niveles muy altos de intensidad en el territorio debido a la lejanía de la fuente de liberación de energía sísmica. Por ejemplo, el sismo de 1982 causó solamente 8 muertos y dañó 1,630 viviendas en todo el país (Álvarez, 1982), mientras el de 1986 causó 1,500 muertos y 100,000 damnificados.

No obstante, Bommer (1996) afirma que una amenaza asociada a los terremotos de la fosa de subducción son los maremotos que ocurren cuando la ruptura de una falla en el suelo oceánico llega a la superficie del lecho marino, desplazando súbitamente una gran cantidad de agua. En septiembre de 1992 un maremoto produjo daños graves en las costas de Nicaragua y existe la posibilidad de que zonas costeras de El Salvador puedan ser afectadas por un maremoto parecido.

2.2.2.1. Características de los suelos y peligrosidad sísmica en San Salvador.

El estudio de Bommer (1996), afirma que la peligrosidad sísmica puede evaluarse con base en información sobre la sismicidad de una zona y las características del movimiento sísmico. Sobre esa base se construyen mapas de peligrosidad que identifican las áreas de mayor peligro para fines de planificación y de diseño sísmico. Por otra parte, en la elaboración de esos mapas (Figura 2.11), si bien se consideran los parámetros que representan la fuente sísmica y la trayectoria entre la fuente y el lugar de interés (distribución, magnitud y frecuencia de los sismos, así como la atenuación con la distancia de las aceleraciones generadas en el terreno) se han ignorado las características y efectos locales del sitio.

Esto último es un aspecto crucial, porque se ha observado en muchas partes del mundo que los depósitos de suelos blandos y los puntos de relieve topográfico pueden ampliar y prolongar el movimiento sísmico, haciendo así mucho más dañina la sacudida.

En el caso concreto de San Salvador se ha observado el efecto amplificador de la capa de ceniza volcánica que cubre casi toda la ciudad. El primer depósito es una ceniza conocida como "tobas color café" originado por erupciones del volcán de San

Salvador y alcanza espesores de 25 metros. El segundo depósito, más joven y menos consolidado, es la "tierra blanca", que proviene del centro volcánico que ahora está sumergido en el lago de Ilopango (Schmidt-Thomé, 1975). Debido a su falta de compactación, la tierra blanca es la causa de mucha amplificación. El espesor de este depósito varía desde casi 50 metros en la orilla del lago hasta 2 ó 3 metros en las faldas del volcán de San Salvador (Figura 2.12).

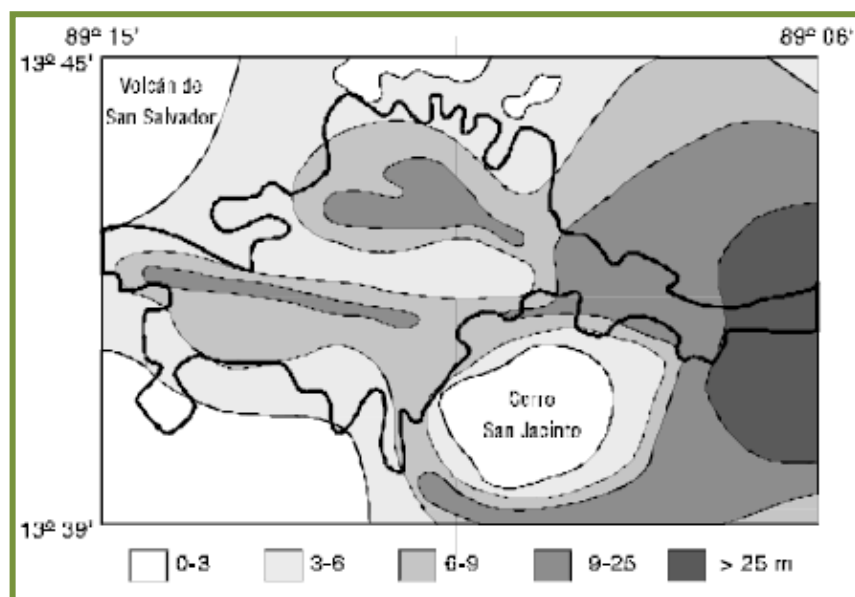


Figura 2. 12. AMSS: Espesor de tierra blanca. Fuente: Rymer, 1987.

En países de alta actividad sísmica es común preparar mapas no solamente de zonificación sísmica (peligrosidad sísmica), sino también de microzonificación para centros urbanos importantes.

Estos mapas de microzonificación muestran la variación local de la peligrosidad debida a la presencia de fallas geológicas y de los depósitos de suelos. En el caso del AMSS, después del sismo de 1986, una misión italiana llevó a cabo un excelente estudio de microzonificación de la zona sur-occidental, pero por limitaciones de

tiempo y financiamiento no pudo cubrir toda el área metropolitana (Faccioli y otros, 1988).

2.2.2.2. Los sismos en El Salvador.

En esta sección se presenta un resumen de los sismos que han causado graves daños en El Salvador en este siglo, proporcionando para cada uno de ellos la fecha, la ubicación del epicentro, la profundidad, el origen tectónico (fuente), la magnitud, la intensidad máxima observada en la escala Modificada de Mercalli (MM), y una breve descripción de los daños ocasionados.

En la Figura 2.13, se muestra un mapa de curvas de isosistas, zonas que experimentan la misma intensidad durante un terremoto, intensidad VII MM para terremotos de foco superficial. Claramente los focos de estos sismos coinciden con estructuras volcánicas, y por ende con las zonas cafetaleras del país (Rosa y Barry, 1995).

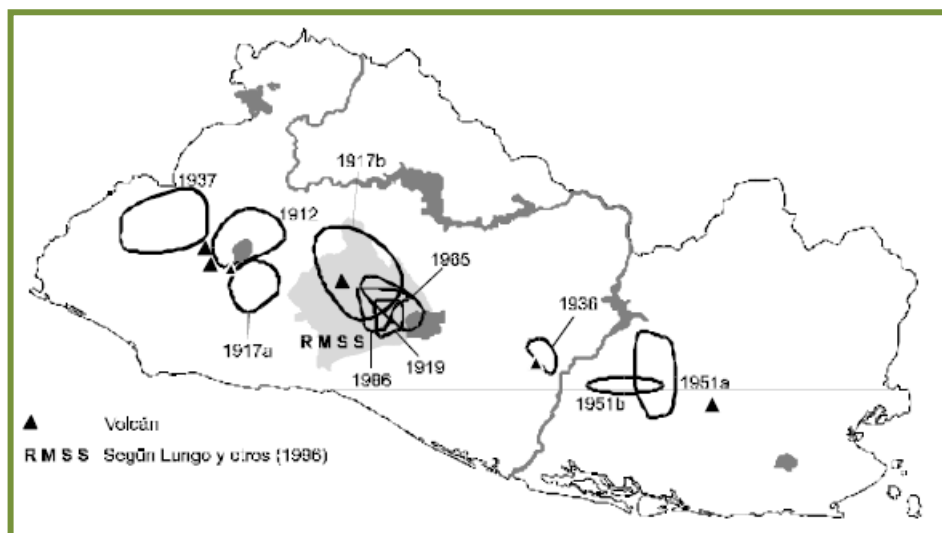


Figura 2. 13. El Salvador: Sismos superficiales de intensidad mayor que VII, desde 1900. Fuente: Harlow y otros, 1993.

Según Bommer (1996) se observa que la actividad sísmica a lo largo del territorio en este siglo ha estado concentrada en áreas en ciertas zonas, al norte del departamento de Ahuachapán, en los alrededores del Lago de Coatepeque, en la capital de San Salvador y sus alrededores, cerca de la ciudad de San Vicente y entre el departamento de Usulután y San Miguel en las ciudades de Jucuapa y Chinameca.

Según Meyer-Abich (1952), esta última zona fue destruida por un terremoto en 1878 al igual que San Salvador que ha sufrido grandes daños en cinco ocasiones entre los años 1700-1900 debido a terremotos superficiales originados en la cadena volcánica.

En las Figura 2.14 y 2.15 se muestran un mapa de isosistas para dos terremotos de la subducción en este siglo con fechas del 7 de septiembre de 1915 y del 19 de junio de 1982. Estos dos sismos son representativos de las dos secciones de la fosa de subducción que ha sido identificado por Ambraseys y Adams (1996). En la zona frente a Guatemala ocurren sismos de elevada magnitud, como el sismo de 1915, que pueden generar intensidades altas dentro de El Salvador. A diferencia, la sección de la fosa frente a El Salvador y el Golfo de Fonseca es de mucha menor actividad y además los focos de los sismos están más remotos del territorio nacional; por tanto, los sismos grandes en esta zona, como el de 1982, no generan elevadas intensidades en El Salvador, aunque son sentidos más ampliamente que los sismos de la cadena volcánica.

En cambio, los sismos de la cadena volcánica representan una amenaza muy elevada en zonas alrededor de los centros volcánicos y en general esta amenaza es de mayor importancia que la presentada por los sismos de la subducción. La excepción es la parte sur-occidental del país donde inciden los sismos generados en la sección guatemalteca de la fosa de subducción (Bommer y otros, 1997).

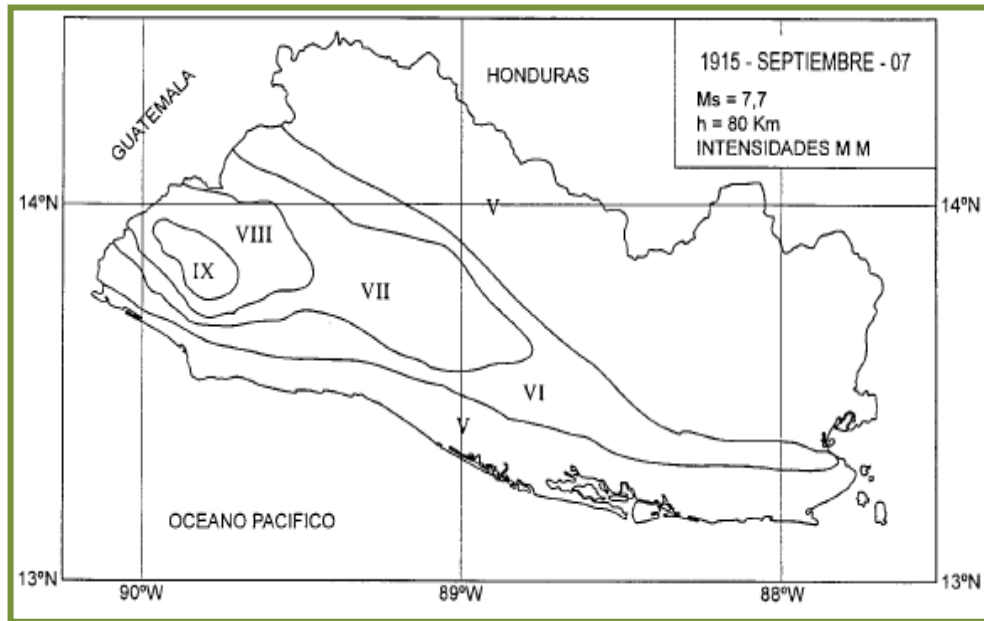


Figura 2. 14. Mapa de isosistas del sismo del 7 de septiembre de 1915. Fuente: Grases, 1994.

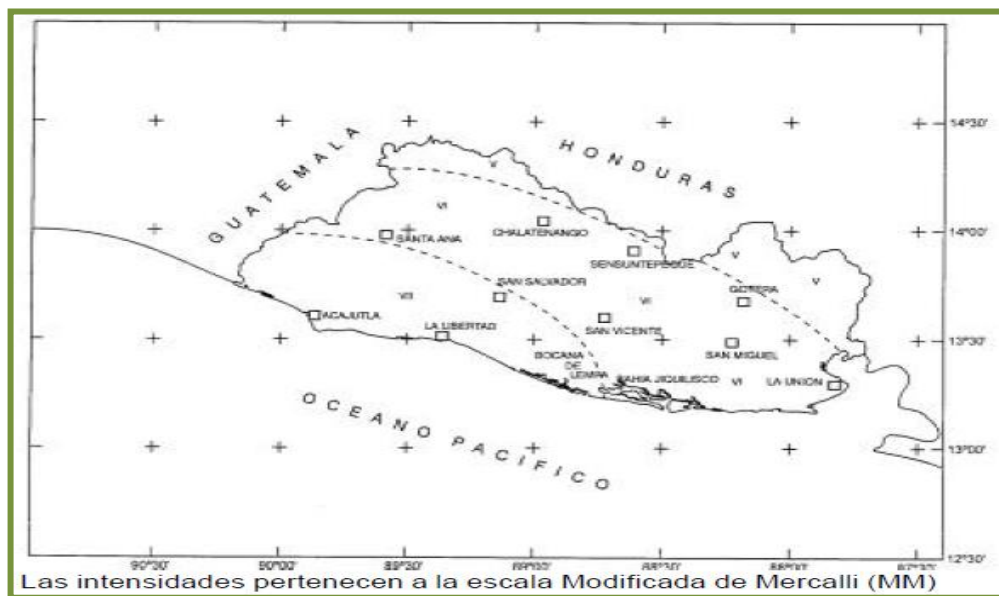


Figura 2. 15. Mapa de isosistas del sismo del 19 de junio de 1982. Fuente: Álvarez, 1982.

Según Harlow et al. (1993) y presentado en la figura 2.16 se muestran los mapas de isosistas de sismos de foco superficial que han causado graves daños en San Salvador

y sus alrededores de foco superficial desde 1700, observándose la alta concentración de actividad sísmica en esta región, con intervalos entre 2 y 50 años con un promedio de 30 años. Se observa que el patrón en las ubicaciones de los sismos destructores para este siglo para la parte central del país no cambia mucho con respecto a las ubicaciones de sismos destructores del siglo pasado (Figura 2.16B), confirmando que los sismos no están distribuidos aleatoriamente a lo largo del eje volcánico, sino que están asociados directamente con los centros volcánicos. La zona de Jucuapa y Chinameca, fue destruida por un terremoto en 1878 (Meyer-Abich, 1952), cuya isosista VII es idéntica a la del primer sismo de 1951, confirmándose de nuevo la concentración de la sismicidad en los centros volcánicos (Bommer y otros, 1997b). La ciudad de San Salvador y el área que linda con el Lago de Ilopango han sufrido grandes daños en nueve ocasiones entre los años 1700-1900 debido a terremotos superficiales originados en la cadena volcánica.

Sin embargo, White y Harlow (1993), afirman que el número de muertos provocados por los sismos de la zona de subducción es mucho menor que los causados por los sismos de la cadena volcánica, tanto en El Salvador como en otros países del istmo.

Los terremotos originados en la zona de subducción como el de 1982, producen movimientos del terreno de relativamente de baja amplitud, pero de larga duración, mientras los originados en la cadena volcánica como los sismos de 1965 y 1986 producen movimientos de poca duración pero generan amplitudes apreciables.

En la Figura 2.17, se muestran los registros de movimientos fuertes obtenidos en San Salvador para los sismos del 19 de junio de 1982 y el 10 de octubre de 1986, mostrando las diferencias entre los dos tipos de movimiento.

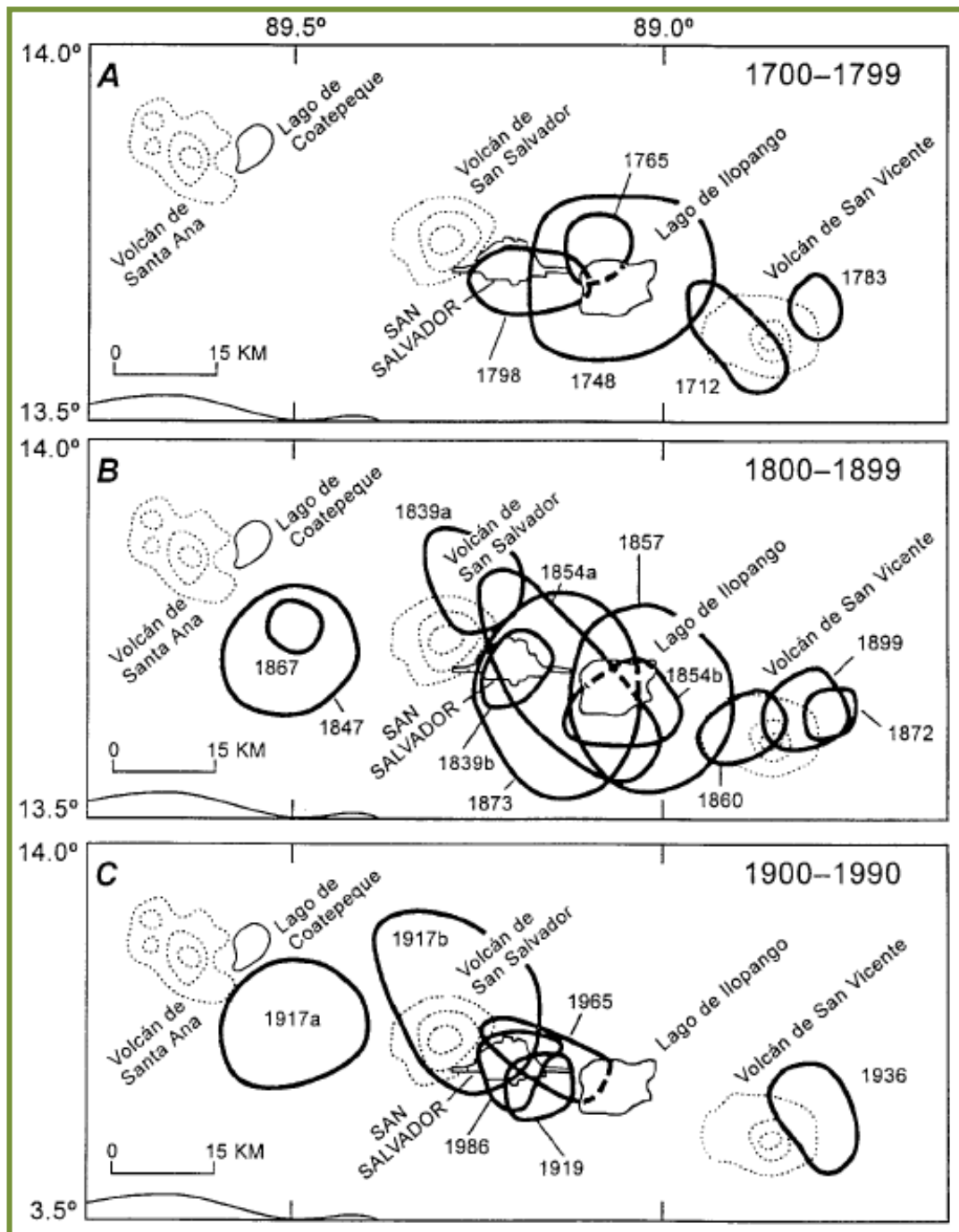


Figura 2. 16. Mapas de contornos de isosistas con intensidad mayor o igual que VII MM para los años: 1700-1799 (A), 1800-1899 (B), 1900-1990 (C). Fuente: Harlow y otros (1993).

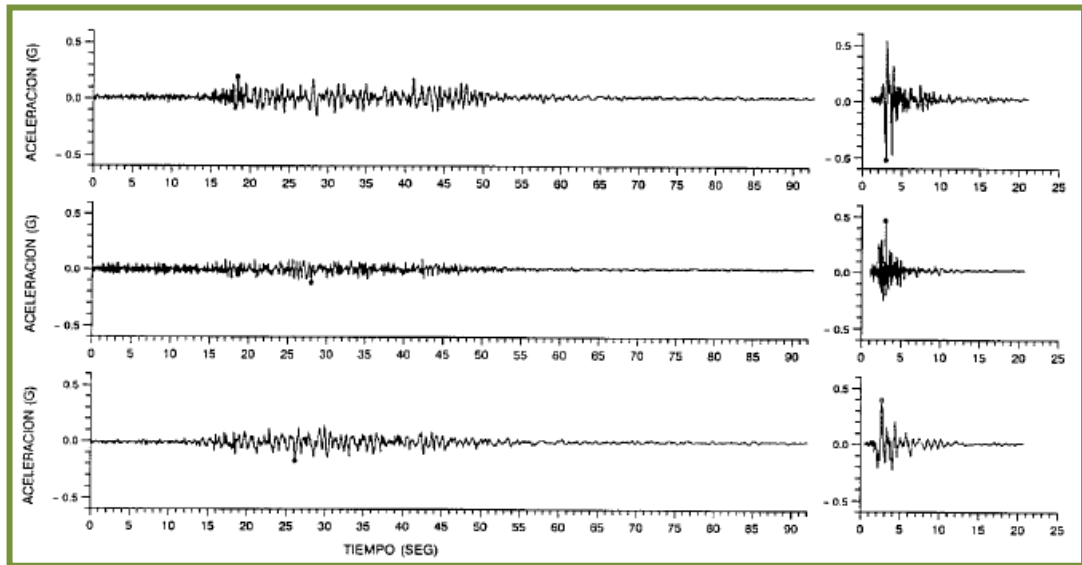


Figura 2. 17. Registros de movimiento fuerte obtenido en San Salvador para el terremoto de la subducción del 19 de junio de 1982 (izquierda) en el Observatorio Sismológico y el terremoto del 10 de octubre de 1986 (derecha) en el Instituto Geográfico Nacional. Componente longitudinal (arriba), vertical (al medio), transversal (abajo). Fuente: Bommer y otros (1997).

2.2.3. SISMOS MÁS DESTRUCTORES DE EL SALVADOR.

Según López (2004), la república de El Salvador sufre un terremoto destructivo una vez por década en promedio y la ciudad de San Salvador es probablemente la ciudad en América más frecuentemente dañada por los sismos; fue gravemente afectada el 3 de mayo de 1965 (Ms 6.0), el 10 de octubre de 1986 (Mw 5.7) y el 13 de enero de 2001 (Mw 7.6). El terremoto de 1965 dejó unos 120 muertos, mientras que el de 1986, a pesar de ser menor magnitud, se tradujo en 1,500 muertos y más de 100,000 personas afectadas (Bommer et al, 1998) y el de 2001, dejó 315 muertos.

Estos eventos y los más recientes de 13 de Enero de 2001 (Mw 7.6, frente a las Costas de El Salvador) y 13 de Febrero de 2001 (Mw 6.6, San Vicente), han puesto

en evidencia la alta vulnerabilidad sísmica de las edificaciones existentes en la ciudad. El acelerado y desordenado proceso de urbanización que se ha dado en el Área Metropolitana de San Salvador ha tenido consecuencias devastadoras en el pasado y de continuar, el nivel de riesgo seguirá aumentando y eventos futuros podrán provocar elevadas pérdidas humanas y económicas.

La Tabla 2.2 se presenta un resumen de los sismos más destructores que han afectado al país en el último siglo. La Figura 2.18 muestra los sismos destructores del siglo XX y XXI en términos del número de muertes. La Figura 2.19 muestra las máximas intensidades sísmicas observadas en el territorio y las curvas de isosistas mayor o igual a VII MM para sismos superficiales.

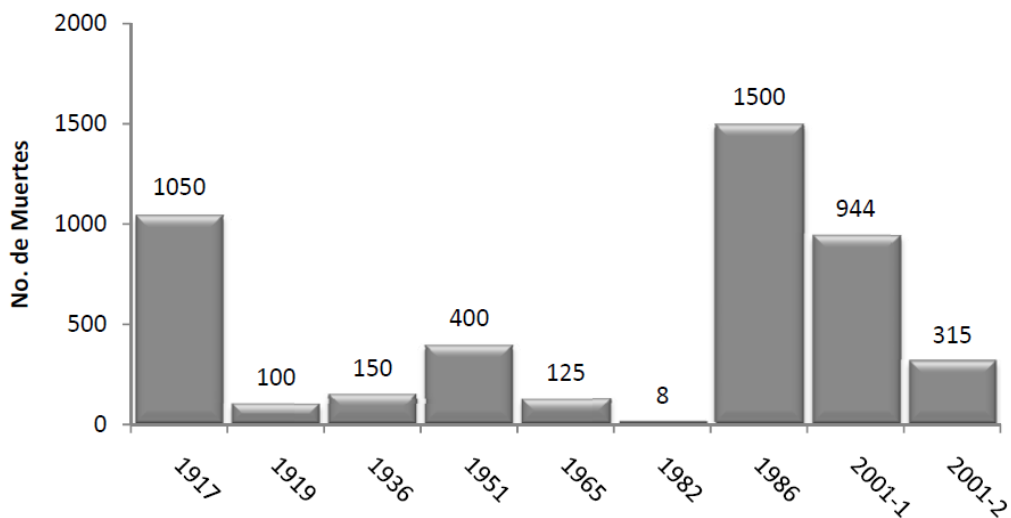


Figura 2. 18. Sismos destructivos de los Siglos XX y XXI en El Salvador. Fuente: SNET, 2004.

Tabla 2. 2. Sismos destructores en El Salvador en el último Siglo. Fuente: SNET, 2012.

Fecha	Ubicación	Magnitud	MMI máx.	Epicentro	Comentarios
19/07/1912	13.87° N 89.57° O	Ms=5.9	---	---	Violento temblor causa daños en Armenia, Izalco y Santa Ana.
07/06/1917	13.70° N 89.50° O	Ms=6.5	---	---	Erupción del Boquerón. Sismo causa destrucción en Armenia y graves daños en Ateos, Sacacoyo y San Julián. Un segundo sismo causa daños en San Salvador, Apopa, Nejapa, Quezaltepeque, Opico y Santa Tecla.
07/06/1917	13.75° N 89.27° O	Ms=6.4	---	---	
20/12/1936	13.72° N 88.93° O	Ms=6.1	---	San Vicente	Destrucción de San Vicente. Entre 100 a 200 muertos.
06/05/1951	13.52° N 88.40° O	Ms=6.2	---	Jucuapa y Chinameca	Murieron más de 400 personas
07/05/1951	13.48° N 88.45° O	5.8	---	Jucuapa y Chinameca	---
12/04/1961	13.20° N 88.90° O	5.95	VI en San Salvador	Océano Pacífico	Daños menores en San Salvador y el sur de El Salvador
03/05/1965	13.70° N 89.17° O	Ms=6.0	VII en San Salvador	San Salvador	125 muertos, 400 heridos y 4000 casas destruidas
19/06/1982	13.30° N 89.30° O	7.0 6.0	VII en San Salvador	Océano Pacífico	8 personas murieron, 96 resultaron heridas y un promedio de 5000 damnificadas
10/10/1986	13.67° N 89.19° O	mb=5.4	VIII-IX en San Salvador	San Salvador	1,500 muertos, 10,000 heridos, unas 60,000 viviendas destruidas o dañadas.
13/01/2001	12.83° N 88.79° O	Mw=7.6	VII en San Salvador	Zona de Subducción	Se reportan 944 fallecidos, 1155 edificios públicos dañados, 108,261 viviendas destruidas, 19 hospitales dañados, 405 iglesias dañadas, 445 derrumbes
13/02/2001	13.64° N 88.94° O	Mw=6.6	VI en San Salvador	Zona de San Vicente	Se reportan 315 fallecidos, 82 edificios públicos dañados, 41302 viviendas destruidas, 5 hospitales dañados, 73 iglesias dañadas, 71 derrumbes

A continuación se explican los eventos sísmicos que más han afectado al Campus Central de la Universitaria de El Salvador en los últimos 50 años.

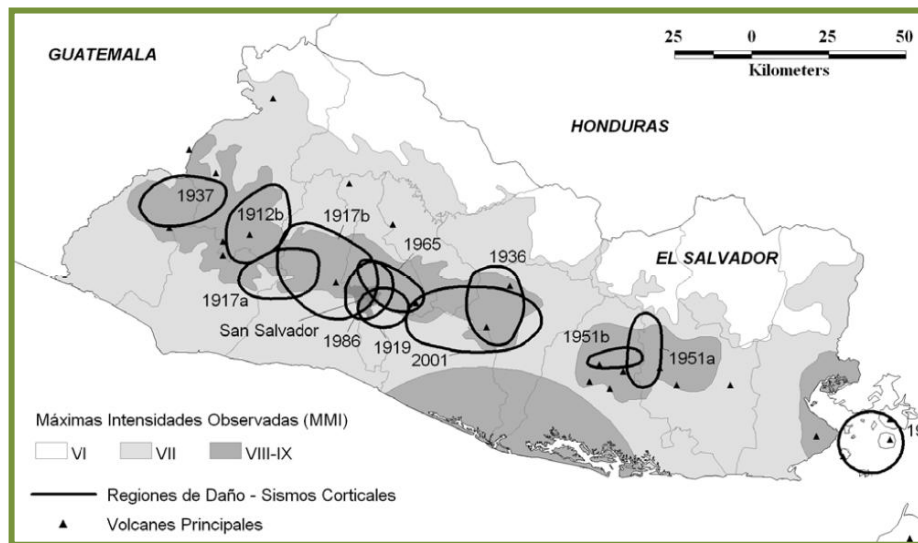


Figura 2. 19. Máximas intensidades sísmicas observadas y curvas de Isosistas.

2.2.3.1. Terremoto del 3 de mayo de 1965.

A las 4 horas con 1 minuto (hora local), San Salvador fue gravemente dañada por un sismo, afectando principalmente las zonas de Soyapango, Ciudad Delgado e Ilopango, causando la muerte de 110 personas, 400 heridos y dejando 30,000 personas sin vivienda (Lomnitz y Schulz, 1966). El epicentro del sismo fue ubicado a unos pocos kilómetros al S-E de la ciudad, con una latitud de 13.70°N una longitud de 89.17° O, una profundidad de 15 Kms y una magnitud 6.0 (White & Harlow, 1993). La extensión de los daños fue ubicada en un radio aproximadamente de 15 Kms en una región densamente poblada que incluyó la ciudad de San Salvador y sus alrededores. Este terremoto fue precedido por una alta actividad sísmica de tres meses de duración, registrándose más de 600 terremotos por día en Febrero y Mayo en la estación Sismográfica de San Salvador (SSS) (Lomnitz y Schulz, 1966). Los efectos del sismo fueron investigados por una misión de reconocimiento de la UNESCO, debido a la petición del Gobierno de El Salvador.

La Figura 2.20 muestra el área afectada por este sismo. El área sombreada indica las regiones de Intensidad máxima (VI-VII) en la escala donde se encuentran puntos específicos en donde se alcanzó o se excedió la Intensidad de VIII. Es importante mencionar que un valor de Intensidad en la escala Modificada de Mercalli puede ser obtenido a partir de la escala Mercalli-Sieberg entre el rango IV y VIII restando una unidad (Murphy y O'Brien, 1977). Se observó que las zonas de mayor intensidad se encontraron alejadas de la zona epicentral, la cual se ubicó en una región de rocas volcánicas, mientras la zona de máximas intensidades se encontró localizada en los depósitos de tierra blanca. Esta característica destaca la incidencia de la geología en el movimiento del terreno durante la acción de un sismo.

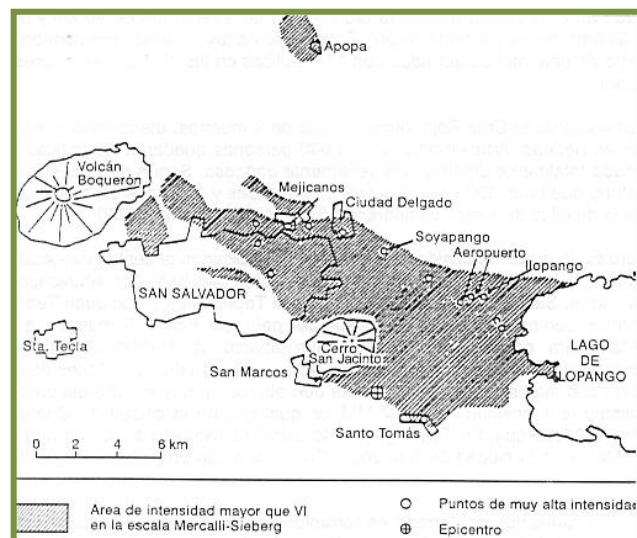


Figura 2. 20. Área afectada por el sismo del 3 de mayo de 1965. Fuente: Lomnitz y Schulz, 1966.

El colapso de las casas tradicionales de adobe y bahareque fue la causa de la mayoría de muertes en el sismo, ya que el adobe es un material pobre para la resistencia sísmica, debido al hecho que es muy pesado y ofrece poca resistencia. Aunque el bahareque en sí tiene un buen comportamiento sísmico, el uso de techos pesados

aumenta su vulnerabilidad y debido a la deforestación se utilizan hoy en día maderas con calidad inferior. Ambos sistemas constructivos se deterioran rápidamente debido a la pérdida del repello y a la consiguiente erosión del adobe por falta de mantenimiento, y también el daño del refuerzo debido a la acción de la interperie, insectos y roedores (Bommer, 1996).

En edificaciones de concreto reforzado, algunas estructuras fueron dañadas y pocas colapsaron.

La causa de los daños se atribuyó principalmente a la utilización de coeficientes sísmicos demasiado pequeños para estructuras rígidas ignoradas en el análisis, exceso de resistencia en ciertos niveles, escasez de refuerzo transversal en columnas, anclajes insuficientes, empleo de materiales defectuosos, y detalles defectuosos de dobleces del refuerzo. Las secciones de elementos estructurales de marcos paralelos entre sí diseñaron ignorando la diferencia en sollicitaciones, a que se despreciaron en el análisis muros de mampostería ligados a los marcos y a que no se dejaron holguras amplias en juntas de construcción. Ambos factores causaron torsiones imprevistas, y el segundo originó choques (Rosenblueth y Prince, 1966).

2.2.3.2. Terremoto del 10 de octubre de 1986.

El terremoto del 10 de octubre de 1986 ocurrió a las 11 horas, 49 minutos (hora local), con una magnitud de 5.4, con una profundidad de 10 Kms y el epicentro ubicado en las coordenadas 13.67°N y 89.18°O a pocos kilómetros de la ciudad de San Salvador (White & Harlow, 1993). La máxima intensidad en San Salvador fue de VIII-IX MM. Este sismo dejó un total de 1,500 muertos, 10,000 heridos y 100,000 damnificados (Bommer & Ledbetter, 1987; Harlow y otros, 1993). A las 5:25 p.m.

del 13 de octubre una fuerte réplica produjo pánico en toda la ciudad pero causando pocos daños.

El total de los daños, incluyendo la pérdida en la producción, fue estimado entre \$1.5 y 2.0 billones de dólares. Una indicación del gran daño ocasionado por este terremoto puede ser medido examinando la razón de las pérdidas económicas directas y el PNB correspondiente al año en que ocurrió el sismo.

El Ministerio de Planificación reportó que aproximadamente 23,000 casas de bahareque fueron destruidas en el terremoto y 30,000 fueron fuertemente dañadas, resultando 10,000 personas heridas y 300,000 damnificadas, regresando a otras partes del país de donde habían migrado durante los años de la guerra (Bommer y Ledbetter, 1987).

El impacto en el sistema de salud debido al desastre fue muy grande, obligando a las autoridades de salud a promover la descentralización y reestructuración de los servicios hospitalarios.

Se estimó el costo de estos proyectos en \$121 millones, los costos de reposición de los hospitales se estimaron en \$70,000 por cama, y para la reparación el costo fue del 30% de valor de reposición (\$21,000) (Vargas, 1996).

Tres días después del terremoto la Cámara Salvadoreña de la Construcción (CASALCO) reportó daños en 75 edificios de 3 o más pisos. Claramente muchos de los edificios dañados por los sismos del 3 de mayo 1965 y el de junio de 1982 no fueron reparados ni reforzados adecuadamente y por ende no ofrecieron resistencia a la intensa sacudida de este evento (Bommer y Ledbetter, 1987). Es de destacar el caso del edificio Rubén Darío en donde murieron unas 300 personas, y el Gran Hotel San Salvador donde murieron 12 personas.

En la Figura 2.21 se muestran las aceleraciones máximas registradas en las diferentes estaciones acelerográficas en San Salvador. Todos los acelerógrafos estaban instalados en edificios de 1 a 10 niveles, excepto el instrumento del Observatorio Nacional, el más cercano al epicentro. Desgraciadamente, una sección del registro en esta estación no es legible ya que la película se trabó y salió negra la parte que pudo contener la sacudida más fuerte (Shakal y otros, 1987). Por ende, la aceleración máxima en esta estación probablemente fue más alta que los valores reportados. Reproducciones de los nueve acelerogramas son presentadas por Shakal, Moh-Jiann Huang y Linares (1986).

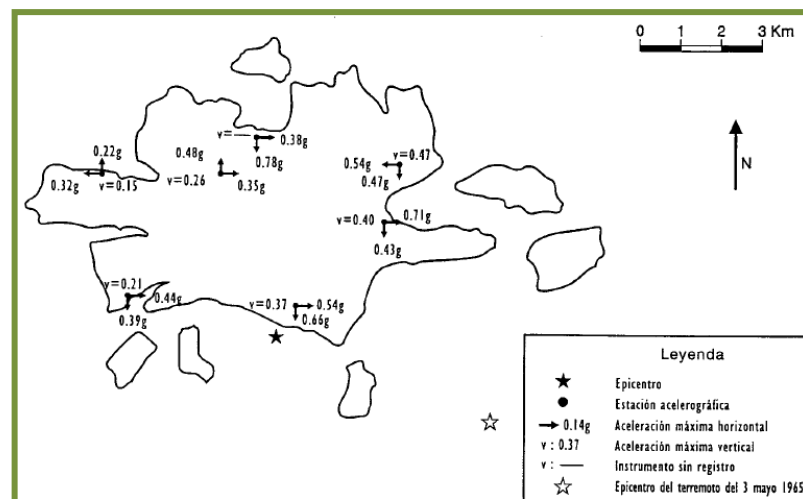


Figura 2. 21. Aceleraciones del terreno registradas durante el sismo de 1986.

Fuente: Bommer y Ledbetter (1987).

2.2.3.3. Terremoto del 13 de enero de 2001.

A las 11:35 del sábado 13 de enero de 2001, un terremoto de 7,6 grados Richter y 45 segundos de duración provoca destrucción generalizada en 172 de los 262 municipios del país, entre ellos Santa Ana, Jayaque, Comasagua, Nueva San Salvador, Santa Elena, San Vicente, San Agustín y muchos más. El epicentro es

localizado en el Océano Pacífico, a 100 kilómetros al suroeste de la ciudad de San Miguel y a una profundidad focal estimada de 39 kilómetros. Se considera que el evento es de carácter tectónico, originado por el acoplamiento de las placas del Caribe y Cocos, con fractura interna de esta última.

Aunque la destrucción es más evidente en casas y edificios públicos construidos de adobe o bajareque, la mayor mortandad se centra en la zona residencial La Colina, construida al sur de la ciudad de Nueva San Salvador o Santa Tecla, donde un alud cae sobre cientos de casas y soterró a casi medio millar de personas. Con un aporte de 2,6 millones de dólares, proporcionado por el gobierno de la República de China (Taiwán), en el futuro en dicho lugar será construido un parque memorial en homenaje a las víctimas.

Los desprendimientos de millones de metros cúbicos de tierra y piedra sepultan los tramos de la Carretera Panamericana que conducen al occidente y oriente del país, a la altura de Los Chorros y de la curva de La Leona, respectivamente, donde también quedan soterradas varias personas. En total, el país sufre 445 derrumbes, los que causan diversos grados de destrucción.

Con titubeos y contradicciones, las cifras oficiales actualizadas hasta el último día de febrero cuantifican la tragedia humana en 944 fallecidos, 193 soterrados, 125 desaparecidos, 5565 heridos, 1364160 damnificados, 68777 evacuaciones, 39000 personas desempleadas y 24000 pescadores artesanales, afectados por la ausencia de cardúmenes en las costas salvadoreñas.

Por su parte, la destrucción material es estimada en 277953 viviendas (más 688 soterradas), 32000 micro y pequeñas empresas destruidas, 1385 escuelas (109 destruidas por completo), 1155 edificios públicos, 405 templos, 94 hospitales y

centros públicos de salud, 16 penitenciarías, 43 muelles, 41 instalaciones militares, la cuarta parte de los 2000 kilómetros de carreteras pavimentadas y 98 monumentos nacionales.

Una misión de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL) estima los daños materiales directos e indirectos en 1,255.4 millones de dólares, de los cuales 823 millones (66%) corresponden al sector privado. Para este mismo organismo de la ONU, las necesidades económicas para la reconstrucción son calculadas en 1,492.6 millones de dólares, los que deberán ser invertidos en los próximos cinco años.

2.2.4. REGLAMENTOS PARA DISEÑO SISMORRESISTENTES EN EL SALVADOR.

El estudio de Bommer (1996) se describe que **el primer reglamento** para diseño sismorresistentes en El Salvador se introdujo en 1966 como respuesta al sismo de 1965. El código fue básicamente una adaptación del reglamento de Acapulco, recomendado por el ingeniero mejicano Emilio Rosenblueth. La zonificación sísmica del país fue una simple división en dos áreas (Figura 2.22) y las cargas sísmicas fueron prescritas sin referencia al tipo de suelo.

Después del terremoto de 1986, la Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos (ASIA) formó un Comité Técnico que elaboró el código de 1989, conocido como Reglamento de Emergencia del Diseño Sísmico (REDSSES). La zonificación fue ligeramente modificada y las cargas sísmicas aumentaron con base en registros del movimiento fuerte que se habían obtenido, pero la influencia del subsuelo aún no se tenía en cuenta.

En 1994 el Ministerio de Obras Públicas publicó un nuevo reglamento con el título de Norma Técnica para el Diseño Sísmico. Este nuevo reglamento tiene el mérito de

no haber sido elaborado como reacción a un desastre. Además, por primera vez se ha incluido un estudio de la peligrosidad sísmica que fue llevado a cabo por la UNAM (Singh y otros, 1993). Sin embargo, la zonificación es casi igual a la de los previos códigos, pero en este caso la determinación de las cargas sísmicas depende no sólo de la zona y del tipo de estructura y su uso, sino también de las condiciones del subsuelo. El diseño original del nuevo reglamento pretendía una microzonificación de San Salvador, pero este aspecto no fue llevado a cabo.

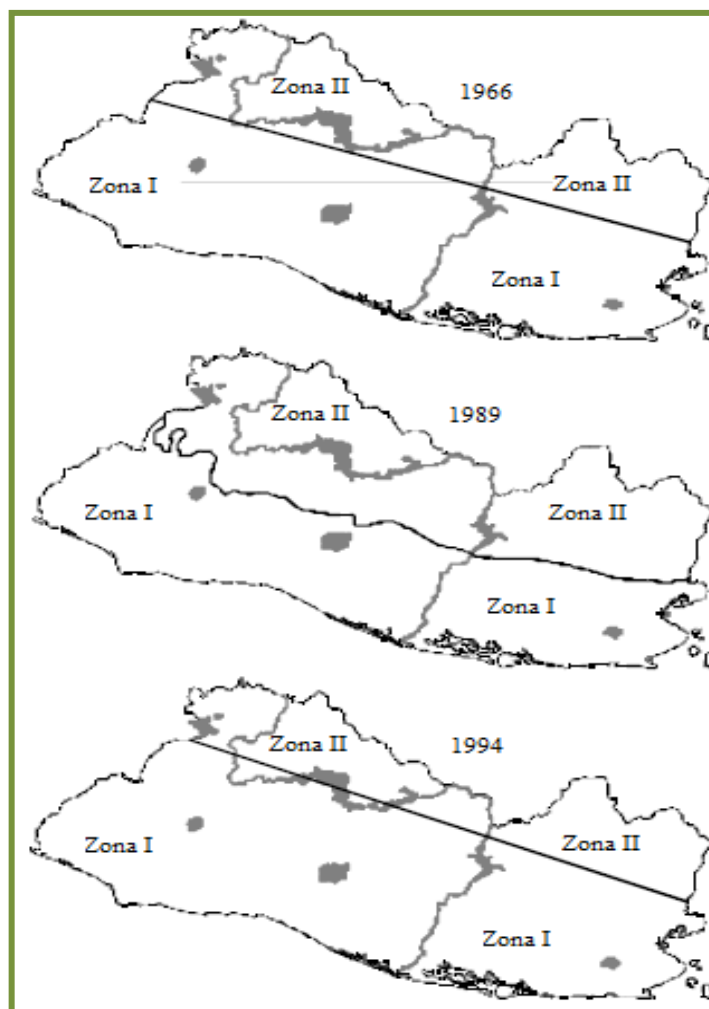


Figura 2. 22. El Salvador: Zonificación sísmica 1966, 1989 y 1994. Fuente:

Bommer y otros, 1996.

En los tres códigos, la Zona I que incluye la costa y la cadena volcánica, es de mayor peligro que la Zona II. En los códigos de 1966 y 1989 las cargas sísmicas aplicables en la Zona II son iguales a las de la Zona I multiplicadas por un factor de 0.5, mientras que en el nuevo reglamento la razón ha sido incrementada al 0.75.

Tomando en cuenta las intensidades sísmicas que se han experimentado en el norte de El Salvador, estas cargas parecen ser innecesariamente elevadas.

La figura 2.23 muestra que las intensidades más elevadas ocurren solamente en las zonas volcánicas mencionadas previamente. Considerando que una intensidad de grado VII en la escala de Mercalli es el umbral para el daño estructural importante, dicho mapa muestra que la zona norteña del país es de peligrosidad relativamente baja. En cambio, el sur es obviamente una zona de alto peligro.

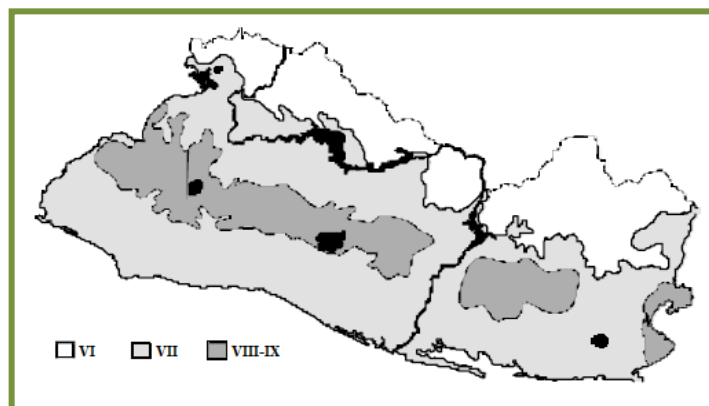


Figura 2. 23. Mapa de máximas intensidades sísmicas observadas. Fuente:

Aguilar, 1986.

Un código de diseño debe ser puesto en práctica para lograr sus objetivos. Sin embargo, se ha identificado una falta de seguimiento adecuado por parte de entidades oficiales de la construcción en El Salvador (Lara, 1987). La eficacia de un código

depende de la capacidad de aplicación, pero también de la comprensión de los ingenieros sobre los conceptos en que se basa el diseño sísmico.

Según Bommer (1996) el nuevo reglamento para el diseño sísmico, a pesar de sus deficiencias, podría contribuir a una reducción importante del riesgo si este se promulga como ley y se hace cumplir. Sin embargo, aún no ha sido aprobado por la Asamblea Legislativa y no existe una entidad oficial encargada de inspeccionar su cumplimiento. Por el propio interés e integridad del gremio de la ingeniería civil, seguramente muchos ingenieros adoptarán y aplicarán el nuevo reglamento, pero una ley sin mecanismos para asegurar su cumplimiento, no será obedecida por todos.

Aun suponiendo que el nuevo reglamento fuese universal y correctamente aplicado a todo diseño estructural y hubiese control adecuado sobre la calidad de la construcción, es debatible cuanto reduciría la vulnerabilidad de la RMSS antes de que vuelva a temblar el Valle de las Hamacas.

Esta hipótesis se basa en el hecho de que hay muchas áreas de importancia que quedan fuera del reglamento:

1. Es importante reconocer que siempre habrá un sector de vivienda informal que no estará cubierto por las normas, en parte porque no hay intervención ingenieril en su construcción.
2. Esto es un punto trascendental, el reglamento sólo se aplica a nuevas construcciones y no incide en el estado de las estructuras existentes.

Según Bommer (1996) al igual que muchos otros reglamentos de diseño sísmico, el que se propone para El Salvador no conlleva ninguna información sobre la reparación y reforzamiento de estructuras dañadas, a pesar de que el diseño sísmico

siempre implica que se acepta cierto nivel de daño en la estructura (por lo cual se permite la reducción de las cargas para el diseño). Seguramente hay varios edificios, incluyendo algunos muy grandes y de alta ocupación, en San Salvador que fueron dañados en el sismo de 1986 haciéndolos muy vulnerables.

Hay otro factor que está fuera del alcance del nuevo reglamento que tiene consecuencias muy importantes para el riesgo sísmico y se refiere al uso del terreno. Mientras siga creciendo la Región Metropolitana se ocuparán cada vez más zonas de relleno, se construirá más al borde de las barrancas y también en los taludes de los cerros y volcanes que son intrínsecamente inestables por sus altas pendientes.

Lo anterior refuerza la idea de que el riesgo sísmico debe ser incorporado en una gestión integral del desarrollo de la RMSS.

2.2.4.1. Los códigos para el diseño sismorresistentes y sus limitaciones.

El estudio de Bommer (1996) afirma que estos códigos proporcionan al ingeniero información sobre las cargas que se deben tomar en cuenta para el diseño, en caso de un sismo, incluyendo un mapa de zonificación. Si bien muchos códigos se basan en modelos como los códigos de los Estados Unidos, la zonificación sísmica y la especificación de las cargas sísmicas no pueden ser importadas. El código también debe orientar al ingeniero en el análisis del comportamiento estructural frente a las acciones sísmicas y definir los criterios que la estructura debe cumplir.

El objetivo de un código es lograr que un edificio pueda resistir un sismo moderado con daños estructurales leves y daños no estructurales moderados, y evitar el colapso por efectos de sismos de gran intensidad, disminuyendo los daños a niveles económicamente admisibles. La inversión necesaria para lograr la resistencia sísmica

en un edificio nuevo no es excesivo: se ha mostrado que la aplicación de las normas más exigentes para diseño sismo-resistente, como las de Nueva Zelanda o California, representan un aumento promedio del 5% (con un valor máximo del 10%) en el costo de un proyecto de ingeniería, (Dowrick, 1987).

Dada la creciente importancia de los costos relacionados con el colapso de edificios durante los sismos, el diseño de edificios sismorresistentes representa un elemento fundamental para la protección contra los efectos de los terremotos. Normalmente, esto se logra a través de códigos o reglamentos que imponen las normas mínimas que han de cumplir las estructuras en una zona sísmica para garantizar un nivel mínimo de seguridad.

2.3. EXPOSICIÓN SÍSMICA.

Según Cardona (1990) este concepto no es muy claro definirlo, por varios elementos expuestos. Entre los principales elementos expuestos se encuentran las edificaciones e infraestructura, que pueden sufrir daños de acuerdo con su capacidad de resistencia, la cual depende de las condiciones de mantenimiento, de la calidad de los materiales y de la configuración o forma de distribución de sus elementos estructurales y arquitectónicos.

La exposición sísmica es el requisito más importante para el riesgo sísmico y depende de la existencia de áreas densamente pobladas ligadas a la proximidad de bordes de placas o zonas de riesgo, en las cuales se pueden tener las mayores pérdidas.

Otras definiciones:

- Según “Natural Disasters and Vulnerability Analysis” (UNDRO 1979) se definió la exposición llamándola también elementos en riesgo. Estos son la población, las edificaciones y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta en un área determinada. Por ello, dentro de este marco conceptual el Dr. Cardona propuso en el Instituto de Ingeniería Sísmica y Sismología (IZIIS) de Skoplie, antigua Yugoslavia, en 1985, eliminar la variable exposición E por considerarla implícita dentro de la vulnerabilidad V, ya que no se es vulnerable sino se está expuesto.
- El Observatorio Sismológico del Suroccidente de la Universidad del Valle de Cali (Colombia) señala que el término exposición se refiere a un área o región, expuesta a un fenómeno amenazante, o a un elemento potencialmente sometido a él (vidas, estructuras).
- Pero cabe otra definición de la exposición que se relaciona más con la amenaza sísmica y se refiere a que tan expuestas están las estructuras para estar en riesgo sísmico debido al sitio donde se ubican, es decir a la respuesta del sitio frente al sismo.

2.3.1. INVENTARIO ESTRUCTURAL.

Según Ventura (2001) un inventario estructural es una enumeración de los edificios y servicios en cada categoría del sistema de clasificación. La preparación del inventario es la principal parte de cualquier estudio de estimación de pérdidas. En este hay que obtener toda la información necesaria para el estudio.

Son varias las características que hay que tener en cuenta: año de construcción, número de pisos, altura, geounidades, defectos estructurales.

De la información estadística se puede obtener el número total de edificaciones de acuerdo a: su sistema estructural, densidad poblacional por facultades del Campus. Pero la parte fuerte del inventario consiste en evaluar mediante un censo a las edificaciones de acuerdo con su estructura y tomando como base el sistema de clasificación correspondiente.

Como afirma Ventura (2001) la relación entre el estado de daños y la intensidad establecida para cada tipo de edificación se realiza con evaluación de la vulnerabilidad del edificio. Esta puede efectuarse:

- 1) A partir de la simulación numérica del daño sísmico en las estructura mediante modelos dinámicos y matemáticos;
- 2) De la inspección post-terremoto de edificios existentes o
- 3) De pruebas dinámicas en el laboratorio.

Ventura (2001) también dice que por ese motivo se hace necesario distinguir entre la vulnerabilidad observada, que significa la vulnerabilidad que ha sido derivada del levantamiento de los daños posteriores a un terremoto y del análisis estadístico de los mismos para algún tipo definido de estructura y la vulnerabilidad calculada, que significa la vulnerabilidad que ha sido expresados en términos probabilistas. Generalmente las pruebas dinámicas en el laboratorio se utilizan para estudiar el comportamiento de elementos estructurales aislados y facilitar la formulación de modelos mecánicos sencillos, que son incorporados posteriormente al modelo global de la estructura.

Los métodos basados en vulnerabilidad calculada utilizan modelos estructurales capaces de reproducir las deformaciones cíclicas inelásticas experimentadas por sus elementos durante la aplicación de cargas dinámicas. Una vez que se haya calculado la respuesta de la estructura, estos métodos la relacionan con el daño ocurrido en los elementos estructurales o en la estructura misma, mediante unos parámetros que se conocen con el nombre de **indicadores de daño**. Estos indicadores reflejan únicamente la degradación de la capacidad de la estructura para resistir fuerzas sísmicas, razón por la cual es difícil relacionarlos con el daño real observado en edificios afectados por sismos, que es un indicativo más fiable de las pérdidas económicas totales.

La implementación de los métodos de vulnerabilidad calculada a gran escala, es decir, en el análisis de toda una zona urbana, puede resultar bastante difícil, por lo que su aplicación se restringe al estudio de estructuras tratadas de manera individual. Por esta razón se siguen buscando métodos alternativos que permitan un análisis rápido de la vulnerabilidad, como por ejemplo los métodos basados en la vulnerabilidad observada.

Según Ventura (2001), los estudios de vulnerabilidad observada no han sido desarrollados para efectuar una evaluación precisa de la vulnerabilidad de edificios, sino más bien para obtener una idea general sobre el comportamiento sísmico que se puede esperar en una zona urbana, como una herramienta más en la prevención de desastres. Una de las características más importantes de estos métodos es la de utilizar la opinión del experto y datos empíricos como fuente de conocimiento para la evaluación de la vulnerabilidad. Se ha llegado a reconocer ampliamente, que la experiencia acumulada durante la observación de daños en estructuras durante

terremotos tiene un valor incalculable en el momento de la evaluación sísmica de edificios existentes.

Según la afirmación de Ventura (2001), los métodos basados en la vulnerabilidad observada recopilan esta información a través de:

- Matrices de Probabilidad de Daño (DPM) o
- Funciones de Vulnerabilidad.

Las Matrices de Probabilidad de Daños, expresan la probabilidad discreta de la distribución del daño para un tipo de estructura y una intensidad sísmica dada, por lo que simplifican enormemente la operación de convolución requerida para el cálculo del riesgo sísmico específico. Las Funciones de Vulnerabilidad constituyen una relación matemática que expresa el daño global que experimenta una estructura específica cuando es sometida a un movimiento de origen sísmico y, al contrario de las anteriores, no tienen una forma estándar reconocida.

Estas últimas relaciones, el daño global de la estructura suele estar representado como un índice o porcentaje, mientras que el movimiento sísmico viene representado por la magnitud, intensidad máxima, aceleración máxima, o cualquier otro parámetro que lo cuantifique.

2.4. VULNERABILIDAD.

Uno de los componentes esenciales en la evaluación del riesgo sísmico es la vulnerabilidad de las edificaciones construidas por el hombre, es por esto que los materiales y el método de construcción son, entre otras, características determinantes de la misma. Una de las enseñanzas que nos han dejado los terremotos pasados ha sido que existen estructuras de una misma tipología que pueden sufrir un mayor

grado de daño debido aún terremoto a pesar de localizarse en el mismo lugar (Hernández, 2002). Esto hace relevancia a lo mencionado anteriormente, es decir, que existen edificios con mejor calidad estructural que otros.

El que una estructura sea más o menos vulnerable ante un terremoto de determinadas características, es una propiedad intrínseca de cada estructura, es decir, es independiente de la amenaza sísmica del sitio de localización, por lo tanto, una estructura puede ser vulnerable pero no estar en riesgo, a menos que se encuentre en un sitio con una cierta amenaza sísmica.

Una de las primeras tareas que hay que plantearse en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras, es el alcance que tendrán los estudios de Riesgo Sísmico. Este paso es importante, ya que la vulnerabilidad sísmica se puede evaluar de una manera muy específica realizando un estudio muy exhaustivo de las estructuras o muy general como puede ser un estudio a nivel urbano.

Otro aspecto muy importante que hay que definir al momento de plantearse la evaluación de la vulnerabilidad sísmica es definir el daño que pueda sufrir una estructura debido a un terremoto. En realidad, el daño va asociado a la vulnerabilidad, ya que una estructura es más o menos vulnerable dependiendo del daño que pueda sufrir ante un terremoto.

Según Barbat (2004) el marco conceptual de la vulnerabilidad surgió de la experiencia humana en situaciones en que la propia vida diaria normal era difícil de distinguir de un desastre. La gran mayoría de las veces existían condiciones extremas que hacían realmente frágil el desempeño de ciertos grupos sociales, las cuales dependían del nivel de desarrollo alcanzado, así como también de la planificación de ese desarrollo. Se empezó a identificar entonces en los grupos sociales la

vulnerabilidad, entendida como la reducción de la capacidad a “acomodarse” a determinadas circunstancias.

Dicha vulnerabilidad ha sido definida de diferentes maneras, entre las que se puede citar las siguientes:

- Grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos en riesgo como resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 (sin daño) a 1 (pérdida total).
- Cuantificación del daño o grado de daño que se espera sufra una determinada estructura o grupo de estructuras, sometida o sometidas a la acción dinámica de un terremoto de determinada intensidad.
- Es la capacidad que tienen los elementos estructurales de una edificación para resistir un terremoto.

No podemos perder de vista que lo que estamos intentando predecir son las pérdidas (riesgo) de toda una ciudad debido a la ocurrencia de un sismo, por lo tanto es necesario emplear modelos simplificados que permitan “predecir” el nivel de daño de las edificaciones al presentarse el sismo. La mayoría de los métodos para predecir pérdidas a nivel de ciudades están basados en una evaluación general de vulnerabilidad y en una globalización de los resultados de pérdidas. En la metodología planteada a continuación se calcula la pérdida probable de cada una de las edificaciones que componen la ciudad y el escenario final de riesgo se determina como la suma de las contribuciones particulares de pérdidas. Este enfoque filosófico presenta la ventaja de que el grado de detalle en la estimación de las pérdidas es muy alto, la desventaja principal del método es que debido a esto su campo de aplicación

puede estar restringido a pequeños o medianos escenarios urbanos (entiéndase ciudades no muy grandes o subsectores de grandes ciudades), debido principalmente a lo dispendioso y costoso que puede resultar la recolección de la información primaria para ciudades de gran tamaño.

El concepto de vulnerabilidad sísmica es indispensable en estudios sobre riesgo sísmico y para la mitigación de desastres por terremotos. La mitigación de desastres, en el ámbito de la ingeniería, corresponde a la totalidad de las acciones que tienen como objetivo la mejora del comportamiento sísmico de los edificios de una zona, a fin de reducir los costos de daños esperados durante el terremoto. Así, es evidente que para mitigar el riesgo sísmico de una zona, es necesario disminuir la amenaza, la vulnerabilidad y el costo de reparación de las estructuras afectadas. El conocimiento adecuado de la amenaza sísmica existente, permite definir tanto la acción que debe considerarse en el diseño de nuevas estructuras como el sitio donde pueden ser construidas, de tal forma que las condiciones de emplazamientos sean óptimas, esto es: alejando las fallas, evitando los rellenos, los lugares con posibles asentamientos o deslizamientos y los de alto potencial de licuefacción. Sin embargo, poco puede hacerse para reducir la amenaza a la que están expuestas las estructuras existentes, por lo tanto, si se desea disminuir el riesgo, se requiere una intervención directa sobre la vulnerabilidad.

El conocimiento del comportamiento sísmico de las estructuras, permite definir los mecanismos y acciones de refuerzo requeridos para la reducción de los efectos provocados por los movimientos del terreno. Para el caso de construcciones nuevas, pueden plantearse nuevos sistemas constructivos y/o nuevas filosofías de diseño que

garanticen el buen desempeño de cada uno de los elementos expuestos. (Bonett, 2003).

En la actualidad, el análisis de vulnerabilidad sísmica de las diferentes estructuras existentes en nuestro medio, esto es: edificios, componentes de líneas vitales, estructuras esenciales, entre otras, se encuentran en un nivel avanzado debido a la gran cantidad de estudios hechos por diferentes investigaciones. De igual forma, se han desarrollado un gran número de propuestas para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica a diferentes niveles de detalle, y se han hecho numerosas aplicaciones en varias regiones del mundo (Bonett, 2003). No obstante, en países en Vías de desarrollo y con bajo control del diseño sismorresistentes, como es el caso de El Salvador, poco se ha hecho para reducir la vulnerabilidad sísmica de las estructuras existentes, con lo cual, ante movimiento de intensidad moderada y alta, el número de pérdidas de vidas humanas y la magnitud de los daños físicos, sociales y económicos, han originado verdaderas catástrofes sísmicas, como las ocurridas en el eje salvadoreño. (Bonett, 2003).

Las aplicaciones de los estudios de vulnerabilidad en entornos urbanos, debe considerar tanto los aspectos estructurales como los funcionales, operativos y urbanos, para que puedan proporcionar información útil para la prevención de desastres, la planificación y la ordenación del territorio. En este sentido, constituyen un importante punto de partida para la toma de decisiones relacionadas con la rehabilitación o demolición de edificios peligrosos, la ubicación de hospitales y puestos de socorro en una determinada zona o por ejemplo, el diseño de las vías alternativas de evaluación y rápido acceso de las ayudas hacia las zonas más vulnerables. El primer paso de un estudio de vulnerabilidad consiste en definir su

naturaleza y alcance, lo cual está condicionado por varios factores, tales como: el tipo de daño que se pretende evaluar, el nivel de amenaza existente en la zona, la información disponible sobre las estructuras, entre otras. (Bonett, 2003). Cuando todos estos factores se tengan, se prosigue a determinar la vulnerabilidad de las estructuras por medio del método escogido.

Para la determinación de la vulnerabilidad estructural, existen métodos de análisis cualitativos y cuantitativos o analíticos de distintos grados de complejidad, en concordancia con el objetivo que se persigue al determinar. (OPS, 2004).

2.4.1. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LA ESTRUCTURA.

El estudio de Jaramillo (2006) afirma que el conocimiento obtenido en los últimos años en la ingeniería ha permitido desarrollar bases que facilitan efectuar un diseño de estructuras con razonable seguridad para la vida. Ha sido posible también aplicar criterios económicos en el diseño sismorresistentes optando por estructuras menos fuertes que lo necesario y, como consecuencia, de menor costo inicial, al ser estas sometidas a un movimiento sísmico severo, deben sufrir daños controlados, sin colapsar. El comportamiento sísmico adecuado de una estructura depende, además de su resistencia, de su habilidad de disipar energía vibratoria a partir del instante en que sus deformaciones exceden el límite elástico. La vibración de la estructura en el rango inelástico durante sismos fuertes significa, por lo tanto, la ocurrencia de daños estructurales y no estructurales. Esto no debe confundirse con el comportamiento deficiente que una estructura puede tener frente a un sismo incluso moderado, debido a un déficit de resistencia o a una ductilidad escasa, es decir, con su vulnerabilidad.

Se acepta, en general, y así se recoge en algunas normativas, que los edificios se diseñen para resistir sismos fuertes sin colapso, aun cuando se produzcan daños estructurales severos; sismos moderados con daños estructurales moderados y no estructurales aceptables y sismos leves sin daño.

Se puede relacionar un índice de daño para cada intensidad del movimiento con una vulnerabilidad cualitativa asociada dependiendo del estado discreto del daño.

Para tal motivo se deben escoger escenarios para un sismo leve, moderado y fuerte con el fin de comparar el índice de daño global con los estados discretos del daño en cada uno de ellos. En el estudio de caso se utilizó el sismo leve como uno lejano con período de retorno de 10 años, el sismo moderado como uno intermedio con período de retorno de 100 años y el sismo fuerte como uno cercano con período de retorno de 475 años, sin embargo de acuerdo a las condiciones específicas de cada ciudad lo anterior puede ser replanteado. En cualquiera de los escenarios planteados la vulnerabilidad debe ser la misma y para tal efecto se debe escoger una matriz de vulnerabilidad adecuada como se verá a más adelante.

Los índices de daño con que se va a entrar a la matriz deben contener tanto el daño estructural como el no estructural (dado que en la mayoría de los casos el valor de las pérdidas no estructurales superaran a las pérdidas estructurales en varios órdenes de magnitud), para tal efecto se calcula cada índice de daño, como se describirá más adelante y se obtiene el índice de daño total. Aunque la relación porcentual de aporte al índice de daños total, puede variar de acuerdo a las condiciones locales de cada ciudad.

Como se había mencionado anteriormente, para poder relacionar el índice de daños con la vulnerabilidad, necesariamente se deben asociar estos con un estado discreto

del daño que especifique de una manera cualitativa el grado de deterioro de la estructura para cada índice.

2.4.1.1. Vulnerabilidad Física.

La vulnerabilidad física se describe en términos de la aceleración basal resistente última, la aceleración basal resistente elástica, la ductilidad disponible y el período fundamental de vibración de la estructura. Cada uno de estos parámetros se calcula en función del tipo de estructura que a su vez está descrito en términos de las variables generales que la caracterizan:

- Estrato socioeconómico.
- Número de pisos.
- Tipo de estructura
- Tipo de cubierta.
- Uso.
- Periodo de construcción.
- Calidad de la construcción.
- Configuración estructural.

2.4.1.2. Funciones De Daños.

Las funciones de daños son aquellas que relacionan las solicitaciones que actúan sobre la estructura, ya sean aceleraciones básicas o derivas de entrepiso, con las pérdidas que estas ocasionan (Jaramillo, 1997).

Las pérdidas estructurales se consideran como las que son ocasionadas por la aceleración basal y las pérdidas no estructurales se calculan proporcionalmente a la

diferencia entre la deriva impuesta por el temblor a la estructura y la deriva elástica permisible (Jaramillo, 1997).

2.4.1.3. Definición de niveles de Daños.

CAPRA (Central American Probabilistic Risk Assessment) afirma que para poder hacer una integración de la metodología es necesario definir una serie de niveles de daño y a lo que normalmente estos niveles corresponderían.

Se propone la siguiente definición:

- Daño leve,
- Daño Moderado,
- Daño Severo,
- Daño Colapso.

Una vez definidos estos niveles de daño, es posible proponer una función de daño unificada para cada sistema, relacionando simultáneamente la curva de capacidad, la función de daño y la función de vulnerabilidad.

En particular la curva de capacidad se puede utilizar para definir una curva de daño del sistema analizado. Por ejemplo el daño leve debe corresponder a un valor de intensidad que mantenga la construcción por dentro del rango elástico, mientras que el Daño Severo debe estar asociado a una situación de comportamiento inelástico considerable, al igual que colapso puede estar asociado a altos niveles de desplazamiento horizontal con efectos considerables.

2.4.1.4. Daños Estructurales.

Se consideran los daños ocasionados por la aceleración basal. Se calcula para cada tipo de combinación de estructura las siguientes variables:

- Periodo. (T).
- Aceleración resistente última. (Aru).
- Aceleración resistente elástica. (Are).
- Solicitación (As) en el espectro de respuesta de aceleraciones en el sitio.

Según Jaramillo (1997) debido a las diferentes formas en que se considera la vulnerabilidad sísmica, es posible identificar que en ocasiones se usa el término de funciones de vulnerabilidad, o curvas de vulnerabilidad, para referirse a relaciones de algún parámetro que represente las características de la acción sísmica (PGA, etc.) con el daño sísmico (Khater et al, 2003; Porter, 2003), mientras que en otros casos las mismas relaciones se identifican como funciones de daño (Grossi y Kunreuther, 2005). Por lo tanto, para evitar errores de interpretación, es necesario identificar claramente el uso que se le esté dando al término de vulnerabilidad sísmica, en cualquier estudio de vulnerabilidad, daño o riesgo sísmicos.

Por otra parte, una importante fuente de conocimiento respecto a la vulnerabilidad sísmica de los edificios es el análisis de los daños que ciertos sismos han ocasionado en edificios. Por ejemplo, de acuerdo con un estudio y evaluación de daños hecho por Dogangün (2004), muchos de los colapsos y daños en edificios de hormigón armado que ocurrieron en el sismo de Bingöl, Turquía, del primero de mayo de 2003, se debieron en gran medida a una alta vulnerabilidad sísmica de los edificios ocasionada por los siguientes factores:

- 1) el uso de detalles no dúctiles;
- 2) la presencia de pisos débiles;
- 3) la pobre calidad del concreto;

- 4) la presencia de columnas cortas;
- 5) la presencia de columnas débiles – vigas fuertes;
- 6) la existencia de voladizos largos y pesados.

En forma más general, en un documento publicado por el EERI (EERI, 2004) se establece que los edificios con baja vulnerabilidad sísmica, suelen ser aquellos que cumplen con lo siguiente:

- Han sido bien diseñados, bien detallados, y bien construidos;
- Han sido detallados para ductilidad y redundancia, lo cual les provee seguridad contra el colapso;
- Tienen adecuados diafragmas horizontales para distribuir las fuerzas sísmicas, los cuales están adecuadamente diseñados, para todas las transferencias de carga requeridas hacia y desde los elementos verticales.

Mientras que de acuerdo con el mismo documento del EERI (EERI, 2004), los edificios con alta vulnerabilidad sísmica suelen ser aquellos que satisfacen lo siguiente:

- Han tenido inadecuados procedimientos de construcción y ausencia de control de calidad;
- Han experimentado sismos sucesivos de importante magnitud;
- Contienen elementos rígidos que no fueron considerados en el diseño;
- Tienen irregularidades en planta y elevación;
- Tienen pisos débiles;
- Tienen distancia inadecuada entre edificios;
- Tienen inadecuadas conexiones entre elementos estructurales;

- Tienen elementos dúctiles con resistencia baja;
- Tienen columnas de esquina que no han sido diseñadas adecuadamente;
- Tienen paneles exteriores y parapetos con anclaje débil.

Por otra parte, en el informe del ATC-13 (ATC-13, 1985) mencionan que en general para fines de estimar posible daño sísmico, las características importantes de las estructuras son las siguientes:

- El material de construcción;
- El suelo sobre el que está la cimentación;
- La cimentación;
- La altura;
- El sistema estructural;
- La configuración;
- La continuidad estructural;
- La calidad del diseño y de la construcción;
- La edad;
- La proximidad a otras estructuras para considerar los efectos de golpeteo.

Por lo tanto, esta última lista contiene algunas de las variables más importantes que de acuerdo con el ATC-13, determinan la vulnerabilidad sísmica de un edificio.

2.4.2. CURVAS DE CAPACIDAD Y CURVAS DE FRAGILIDAD.

El estudio de Arévalo y Bermúdez (2007), la Caracterización del daño, obtenido mediante técnicas analíticas o como resultado de la observación de los efectos de los terremotos sobre las estructuras ha contribuido a la calibración de funciones de

pérdidas o de vulnerabilidad. Sin embargo, en los últimos años se han diferenciado dos tipos de curvas: de Capacidad y Fragilidad.

2.4.2.1. Curvas de Capacidad.

Se usan para estimar la respuesta de un edificio ante un nivel dado de aceleración espectral o demanda sísmica. Las curvas de capacidad son graficas de la resistencia a Carga lateral del edificio vs. Desplazamiento lateral. Mediante este tipo de curvas es posible identificar la capacidad a la fluencia y la capacidad ultima de una estructura. Existen varias formas de hallar las curvas de capacidad. Una de ellas es el análisis “Pushover” o “Paso a Paso”, en el cual se aplica una carga lateral a la estructura mediante incrementos en forma paulatina. Para cada incremento de carga se determina el desplazamiento, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal, obteniéndose así la curva de Capacidad o la relación Fuerza-Deformación para una estructura. Es decir, la grafica de la fuerza cortante total y del desplazamiento lateral asociado con cada incremento, hasta que la estructura alcanza el estado límite o condición de colapso. (Figura 2.24).

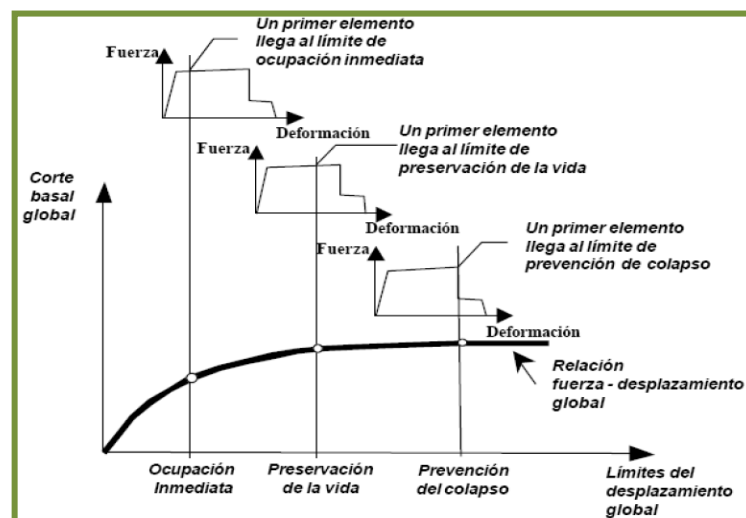


Figura 2. 24. Planteamiento Conceptual del “Pushover”. Fuente: FEMA (1997).

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

2.4.2.2. Curvas de Fragilidad.

Se usan para estimar la probabilidad de alcanzar o exceder estados de daño específicos para un determinado nivel de respuesta sísmica.

La probabilidad de alcanzar un estado de daño, mediante esta técnica, se calcula como la diferencia entre las curvas de fragilidad (Kircher, Nassar, Kustu y Holmes et al., 1997). Para el desarrollo de estas funciones, normalmente, primero se hace una clasificación de los edificios según su sistema estructural, su uso, altura, etc. En algunos casos, estas funciones predicen el daño en forma separada sobre el sistema estructural, los elementos no estructuras sensibles a inclinaciones (como muros divisorios) y sensibles a la aceleración (como techos suspendidos). En general, para estas funciones se definen cuatro niveles de daño, estimados de alguna manera en forma subjetiva y que corresponden a daños leves, moderados, severos y colapso.

Por tanto las curvas de fragilidad son, en síntesis, funciones que describen la probabilidad de alcanzar o exceder un nivel de daño estructural o no estructural, dado un valor determinístico de respuesta, como de desplazamiento espectral. Para dicha transformación es necesario definir el porcentaje de daño a que corresponde cada uno

de los niveles de daño que se proponen. Un ejemplo de este tipo de curva se ilustra en la figura 2.25.

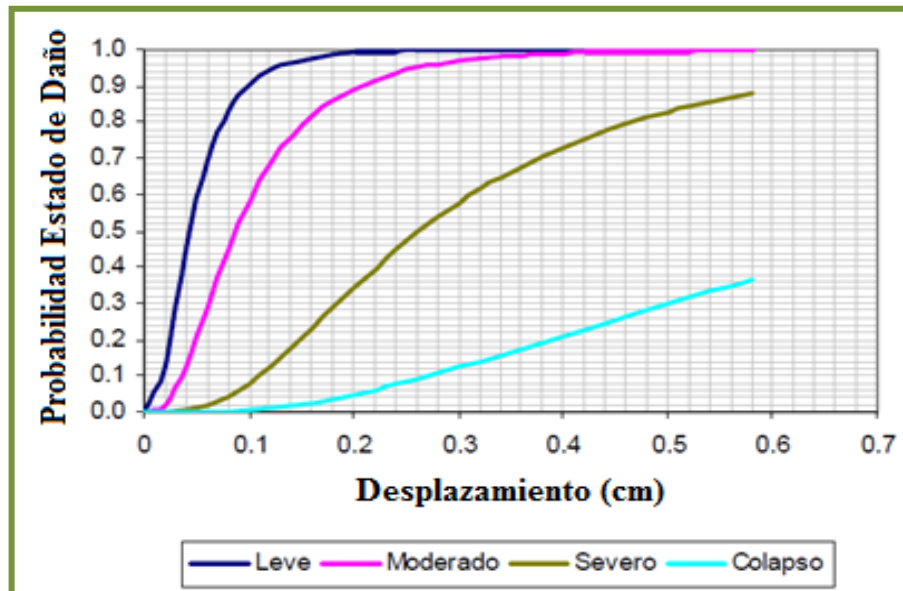


Figura 2. 25. Curvas de Fragilidad. Fuente: HAZUS, Technical Manual.

2.5. ZONA DE ESTUDIO: UES.

La Universidad de El Salvador (UES) es el centro de estudios superiores más grande y antiguo de la República de El Salvador y la única universidad pública del país. Su sede central, la Ciudad Universitaria, está ubicada en San Salvador; contando además con sedes regionales en las ciudades de Santa Ana, San Miguel y San Vicente. Actualmente se construye el nuevo Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología Aplicada de la Universidad de El Salvador, en Nueva Concepción, Chalatenango. Su símbolo es la deidad romana Minerva, equivalente latina de la diosa griega Atenea.

La Universidad de El Salvador, está dividida en doce facultades, dos centros regionales y sus oficinas centrales, la población usuaria del Campus Central en el Ciclo I-2013 es de 39,261. Las ocho facultades del Campus Central de la Universidad

de El Salvador son la de Medicina, Odontología, Química y Farmacia, Ciencias Agronómicas, Ingeniería y Arquitectura, Ciencias Naturales y Matemática, Jurisprudencia y Ciencias Sociales, Ciencias Económicas, Ciencias y Humanidades.

2.5.1. RESEÑA HISTÓRICA. (Fuente: Wikipedia)

SIGLO XIX: LOS PRIMEROS AÑOS.

La Universidad de El Salvador fue fundada el 16 de febrero de 1841, por Decreto Legislativo de la Asamblea Constituyente, emitido a iniciativa del Presidente de la República, Juan Lindo, a quien la comunidad universitaria considera como el fundador de este centro de educación superior, y del presbítero católico Crisanto Salazar, con el objetivo de proporcionar un centro de estudios superiores para la juventud salvadoreña.

La UES nació con una fuerte influencia de la Iglesia católica. Sin embargo, la identidad de la Universidad de El Salvador se formó mientras tomó protagonismo en el desarrollo de los acontecimientos históricos, como es el caso de la Reforma Agraria Liberal ejecutada por el gobierno del Presidente de la República, Dr. Rafael Zaldívar, con las leyes de extinción de las tierras comunales y ejidales de 1881 y 1882, respectivamente, en la que los académicos universitarios realizaron un fuerte cuestionamiento sobre esta reforma agraria inversa, y fue así que con hechos como este se reconoció el inicio de una universidad crítica.

SIGLO XX.

Positivistas como Gerardo Barrios, David J. Guzmán y Santiago I. Barberena, transformaron la Universidad de El Salvador a partir de 1860 y se dio más énfasis en la profesión y la experimentación. El pensamiento positivista fue dominante hasta el

principio el siglo XX y es hasta 1910 que se regresó al humanismo y vitalismo. En esa época reaccionaron al positivismo personajes como Alberto Masferrer, Francisco Gavidia y Salarrué.

La Universidad de El Salvador comenzó a romper con el énfasis profesionalista en 1944 mediante una revolución educativa que priorizó el desarrollo académico de su planta docente y sus bibliotecas, democratizó el ingreso universitario, invitó a distinguidos profesores visitantes y realizó un amplio programa de investigaciones científicas, que dio mucho prestigio a la Universidad de El Salvador e hizo una época llamada “La época de oro de la UES”.

Desde la década de 1950, la Universidad de El Salvador, se convirtió en el principal referente de pensamiento de la izquierda salvadoreña y fue uno de los núcleos más importantes de oposición a los gobiernos autoritarios y militaristas del país, y fue por esta actitud que muchos de sus estudiantes y catedráticos fueron víctimas de la represión militar. Hasta 1965 la UES fue el único centro de estudios superiores del país y la que concentraba la mayor parte de la comunidad intelectual de El Salvador. En ese año se autorizó la creación de la primera universidad privada del país, la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas". Se considera, que las universidades privadas, surgieron como una respuesta de los sectores conservadores de la sociedad salvadoreña, que buscaban una alternativa, más acorde a su pensamiento, ante la línea progresista que adoptó la Universidad de El Salvador.

La década de 1970 y la Guerra civil.

En la década de los años setenta surgieron dentro de la UES, grupos estudiantiles cercanos a los movimientos armados de izquierda revolucionaria. El gobierno, por su

parte, inició una campaña contra la comunidad universitaria acusándola de ser un centro de adoctrinamiento marxista.

En los años siguientes, centenares de estudiantes, catedráticos, y autoridades universitarias cayeron víctimas de la represión gubernamental, llegando a ser asesinado, el 29 de octubre de 1980, el rector Félix Ulloa. El terremoto del 10 de octubre de 1986, dañó gravemente la infraestructura de la Ciudad Universitaria en la capital salvadoreña.

Fin del conflicto armado.

Hasta el final de la Guerra civil de El Salvador (1980-1992), la UES sufrió un período de decadencia. En 1991 con la elección del rector Dr. Fabio Castillo, comenzó un período de recuperación de la Universidad de El Salvador.

El 12 de noviembre de 1989, dentro del contexto de la ofensiva insurgente lanzada por el FMLN el día anterior, el presidente Alfredo Cristiani ordenó la última intervención militar que sufriría la UES y que la mantendría cerrada hasta el siguiente año.

SIGLO XXI.

En la gestión de la rectora, Dra. María Isabel Rodríguez (período 1999-2007) se superaron la mayoría de prejuicios hacia la UES, las luchas internas de la Universidad de El Salvador, las destrucciones causadas por los terremotos de 2001, se realizaron luchas por un presupuesto adecuado, mayor desarrollo académico y científico, se lograron acuerdos de cooperación con el gobierno y se obtuvo el préstamo de \$25,000,000 a través del BCIE para la reconstrucción de la infraestructura de la UES.

En la gestión de la Dra. María Isabel Rodríguez se construyó el Complejo Deportivo de la Universidad de El Salvador, uno de los escenarios universitarios más modernos y complejos del país y Centroamérica, donde se disputaron los XIX Juegos Centroamericanos y del Caribe. La UES se convirtió en Villa Olímpica Centroamericana, dejando como legado una moderna infraestructura y un complejo deportivo que ninguna otra universidad salvadoreña posee.

2.5.2. UBICACIÓN.

El Campus Central de la Universidad de El Salvador está ubicado al noroeste de la Ciudad de San Salvador. (Figura 2.26).



Figura 2. 26. Limitaciones del Campus de la Universidad de El Salvador.

Fuente: Google Earth, 2013.

Geográficamente está limitada, al sur, por la autopista norte y los terrenos de la escuela unificada España; al norte y al oriente por la calle de Circunvalación y al poniente, por la 29 avenida norte dentro de la zona calificada como institucional según la Dirección General de Urbanismo y Arquitectura para la Ciudad de San Salvador. (D.U.A.) (Figura 2.27).

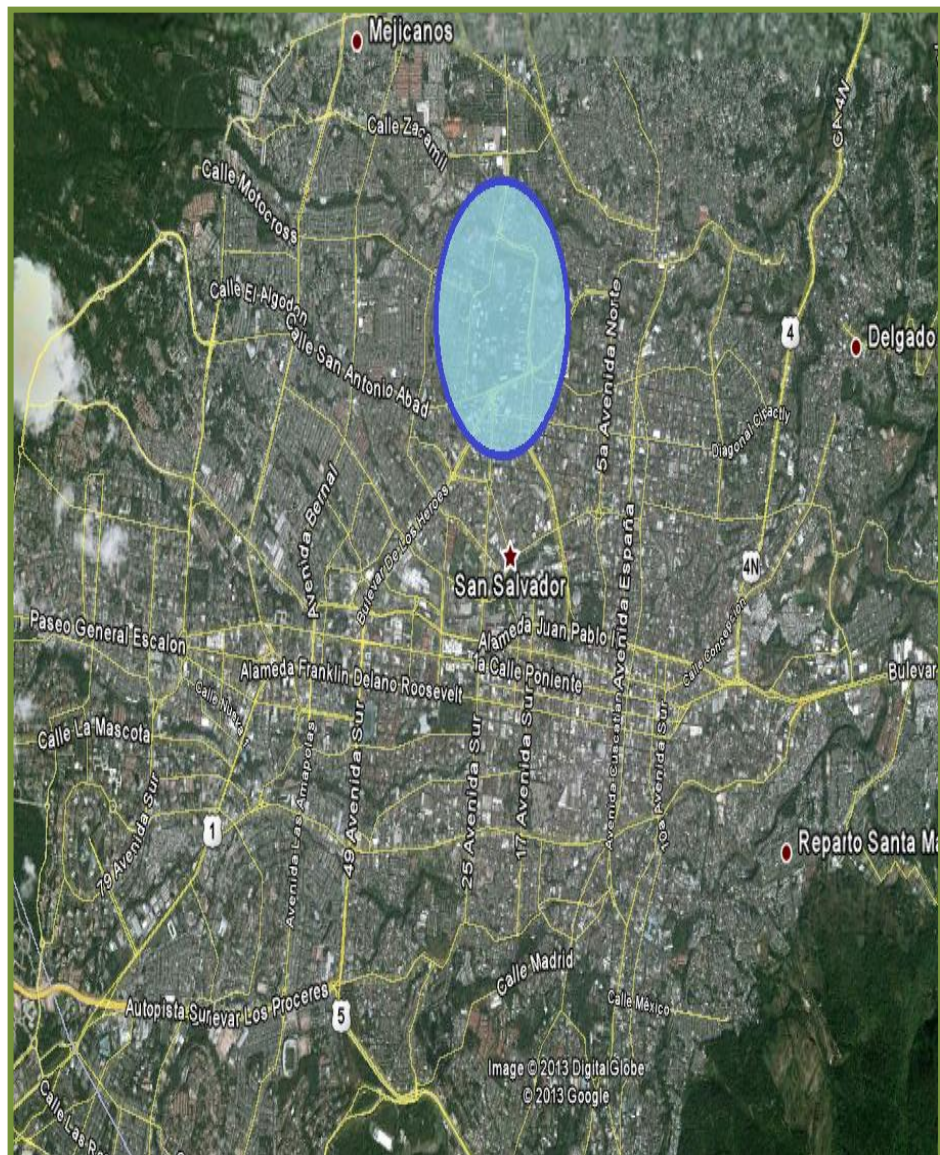


Figura 2. 27. Ubicación del Campus de la Universidad de El Salvador. Fuente:

Google Earth, 2013.

2.5.3. CARACTERISTICA MÁS RELEVANTES DE LOS SISMOS MÁS DESTRUCTORES EN EL CAMPUS.

Del Ejemplar del Convenio de Cooperación Científica, Técnica y Cultural entre la Universidad de Guadalajara y la Universidad de El Salvador (1988), detallan los daños que ha sufrido la Universidad de El Salvador, por 2 de los denominados terremotos mas destructores en El Salvador: Terremoto del 1986 y 2001.

2.5.3.1. Daños del Terremoto del 10 de octubre de 1986.

Debido al terremoto ocurrido el 10 de Octubre de 1986 un gran número de edificios en el Campus, quedaron seriamente dañados o totalmente destruidos, así como el equipo y material educativo. Este hecho natural vino a agudizar mas las condiciones precarias de funcionamiento del Campus, que no se recuperaba aun de la destrucción y saqueo, producto de los cuatro años de intervención militar de 1980 a 1984.

El violento terremoto daño el 70% de los edificios entre estos Oficinas Administrativas y Aulas Universitarias, planteándose a la Universidad nuevos desafíos en el cumplimiento de su papel. Todos estos daños han llevaron a que la Universidad de El Salvador, enfrentara a una multiplicidad de necesidades para su desarrollo entre las más importantes están:

- Materiales y equipo de investigación,
- Material y equipo de Imprenta,
- Material Bibliográfico para la Biblioteca Central,
- Vehículos.

El Convenio de Cooperación Científica, Técnica y Cultural entre la Universidad de Guadalajara y la Universidad de El Salvador, dio un listado de los estados de las edificaciones tomados del convenio, las cuales son Acceso Restringido, Acceso No Restringido, Habitable con Restricciones y Habitable sin Restricciones. En las tablas 2.3 y 2.4.

Tabla 2. 3. Estados de Daños de las Edificaciones.

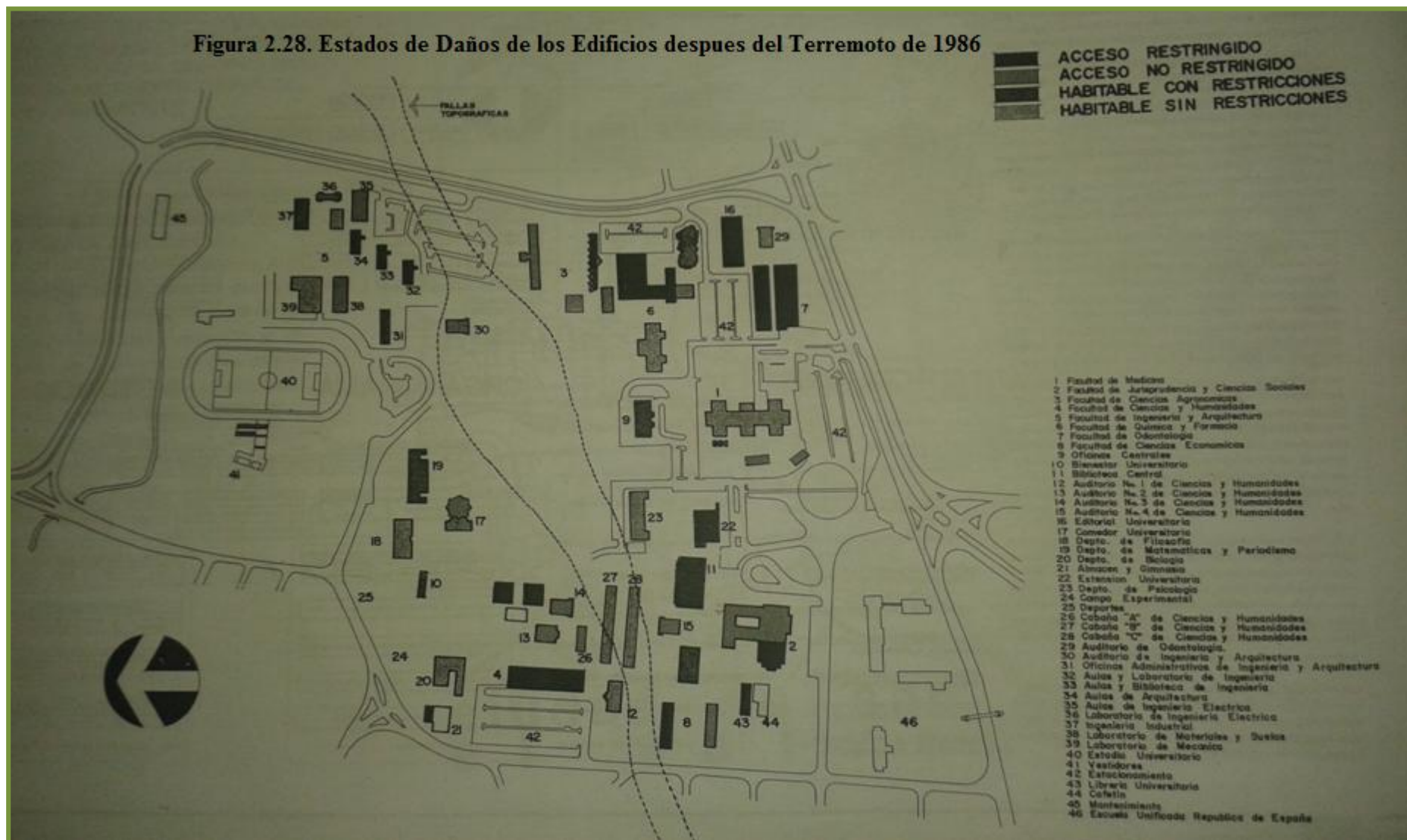
ESTADOS DE DAÑOS	EDIFICACIONES
Acceso Restringido	Edificio Administrativo de Odontología.
	Edificio de Clínicas de Odontología.
	Laboratorios e Impresiones de Química y Farmacia.
	Decanato de Química y Farmacia.
	Edificio de Quincha y Farmacia.
	Edificio Administrativo de Agronomía.
	Edificio B, C y D de Ingeniería y Arquitectura.
	Laboratorios de Biología.
	Costado Este del Edificio Histórico de Jurisprudencia.
	Librería Universitaria (demolido, se construyo el Edificio de Carlos Rodas de Economía).
	Edificio de Administración Académica de Economía.
	Edificio de Física y Matemática.
	Edificio ex-Biblioteca (Hoy Edificio de Arte y Cultura).
	Edificio de Extensión Universitaria (colapsado, se construyo el Edificio de Rectoría y el Edificio de Cine-Teatro).
Imprenta Universitaria.	
Acceso No Restringido	Planta Piloto.
	Edificio de Aulas y Maestrías de Agronomía.
	Edificio de Ingeniería Civil.
	Edificio de Ingeniería Eléctrica.
	Edificio de Potencia.
	Auditórium de Ingeniería y Arquitectura.
	Auditórium de CCNN. Y Matemática.
	Edificio Histórico de Jurisprudencia.

Tabla 2. 4. Estados de Daños de las Edificaciones.

ESTADOS DE DAÑOS	EDIFICACIONES
Acceso No Restringido	Cabaña de Aulas de Ciencias Económicas. (Hoy en día ahí está construido el Edificio Compartido de Economía y Jurisprudencia).
	Comedor Universitario.
	Bienestar Universitario.
	Auditórium 3 y 4 de Ciencias y Humanidades.
Habitable con Restricciones	Laboratorio de Medicina. (Hoy en día no está disponible, esta descuidado).
	Edificio de Administrativo de Ingeniería y Arquitectura.
	Edificio de Ingeniería Industrial e Ingeniería en Sistemas.
	Edificio de Ciencias Económicas (Hoy Edificio de Decanato de Ciencias Economías).
	Edificio de Periodismo y Letras.
	Edificio de Oficinas Centrales.
Habitable sin Restricciones	Edificio de Medicina.
	Auditórium de Odontología.
	Biblioteca de Química y Farmacia.
	Aulas F10, F12 y F13.
	Edificio de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Química.
	Edificio de Biología.
	Edificio de Decanato de Ciencias y Humanidades.
	Cabañas de Ciencias y Humanidades. (Se demolieron y se está construyendo un Edificio de Aulas).
	Edificio de Filosofía e Idiomas.
	Edificio de Psicología y Educación.
CENSALUD	

Los gastos de reconstrucción del Campus causados por el terremotos fue de \$5,179,507. En la Figura 2.28 se muestran los edificios con sus respectivos estados.

Figura 2.28. Estados de Daños de los Edificios despues del Terremoto de 1986



2.5.3.2. Daños del Terremoto del 13 de enero de 2001.

En el escrito, personeros de la Unidad de Desarrollo Físico (UDF) y miembros de la Escuela de Ingeniería Civil de la UES, reconocieron que el movimiento tectónico obligó al cierre temporal de por lo menos cinco edificios, mismos que ya habían sido declarados con daño luego del terremoto del 10 de octubre de 1986.

Los edificios de acceso restringido fueron:

- Periodismo y Letras,
- Filosofía e Idiomas,
- Decanato de Ciencias y Humanidades,
- Administrativo de Ingeniería y Arquitectura,
- Arte y Cultura.

El panorama dentro de estos edificios es similar. Paredes de relleno colapsadas, grietas y fisuras de gran tamaño, cielos falsos dañados, Etc. Sin embargo, de acuerdo a la comisión universitaria no hay daños en la estructura madre.

La diferencia estaría marcada en el edificio de Arte y Cultura, donde el análisis de la comisión de la UES afirma que "los elementos estructurales de todo el edificio necesitan reconstrucción.

La UES sufrió daños importantes en el sismo de 1986. Y su infraestructura estaba dañada casi en un 70 por ciento. Lógicamente las cosas no mejoraron con el terremoto del 13 de enero, cuando se incrementaron los daños que ya existía, reconoció Reyes de Morán, Jefe de la Unidad de Desarrollo Físico.

Sin embargo, según la Unidad de Desarrollo Físico, los problemas causados por el sismo vendrían a elevar en \$10,000,000 los gastos de la UES, tanto en el ámbito de infraestructura como de equipamiento para los Juegos Centroamericanos.

CAPITULO III

ANALISIS DE LA

EXPOSICION

3.1. TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE INFORMACION.

La amenaza se convierte en riesgo cuando existen edificaciones u obras expuestas al movimiento del suelo, y el nivel de riesgo depende no solo del nivel de movimiento sino también de la capacidad de las estructuras expuestas para resistirlo. (Sección 2.1).

Para este estudio las edificaciones de las instalaciones del Campus Central de la Universidad de El Salvador, fueron inspeccionadas tanto para obtener informaciones básicas de exposición, como para examinar las características más influyentes en la capacidad de las estructuras de resistir las cargas sísmicas.

El proceso de la información en el Campus comprendió de dos etapas:

- Proceso de recolección de datos para la Población Usuaría.
- Proceso de recolección de datos para las Estructuras.

3.1.1. POBLACIÓN USUARIA.

Para la recolección de los datos de la Población Usuaría en el Campus Central primero se requirió de un permiso del Decano de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, el cual pidió la colaboración de los Decanos de las diferentes Facultades del campus central para que por medio de ellos se pudiera obtener un permiso para la obtención de datos.

Posteriormente el levantamiento de la población usuaria se realizó por medio de información proporcionada por las diferentes Facultades del Campus, el cual incluían:

- Personal Docente, Administrativo y de Servicio,

- Matriz de Horarios,
- Total de Estudiantes inscritos por Facultad,
- Total de Estudiantes inscritos por grupo de clases (Grupo Teórico, Grupo Laboratorio, Grupo Discusión).

Los datos de la población evaluada en este trabajo fueron tomados por cantidad de estudiantes inscritos en el año 2013, que fue proporcionada por las diferentes Facultades del Campus Central. Aproximadamente el Campus Central alberga a 40,000 usuarios mencionados anteriormente.

Criterios de la Población Usuaría.

Una vez obtenido los datos de la Población Usuaría en las Instalaciones del Campus Central de la Universidad de El Salvador, se procedió a detallar los datos basándose en los siguientes criterios:

- El número total de usuarios se basó en la información que fue proporcionada por las diferentes Facultades del Campus de la Universidad de El Salvador.
- Se consideró calcular y obtener el número de usuarios por hora, debido a que se necesitó la hora de mayor capacidad de usuarios, así como, una hora intermedia de la capacidad de usuarios, y una tercera hora que será donde no haya ningún usuario dentro del Campus.
- Las tres horas mencionadas anteriormente, sirvieron como parámetros para la recopilación de datos de las diferentes edificaciones, estos datos sirvieron para la realización de los archivos Input de RISE.

- El periodo de la recolección de datos fue de 3 de meses, en el cual las visitas a las Facultades fue de 3 a 4 veces a la semana, esto se debió a incertidumbres que surgieron conforme se recolectaba la información, las cuales se mencionan a continuación.

Procesamiento de la recolección de Datos:

1o. Se tuvo que elaborar una Carta con la autorización del Decano de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, y que fuera dirigida a los diferentes Decanos de las Facultades para que los departamentos de Recursos Humanos, Administración Financiera y Administración Académica proporcionaran los datos necesarios para la información, ya que los diferentes departamentos pedían autorización del Decano de la Facultad, ya que son datos personales.

2o. El tiempo de respuesta de la información de los departamentos mencionados anteriormente varió de una a cuatro semanas, debido a que los jefes de departamentos pasaban en reuniones laborales o estaban saturados de carga académica.

3o. Una vez proporcionado los datos, se tuvo que ubicar las aulas en las matrices de horarios, debido a que se necesito la cantidad usuaria por edificio y por las diferentes horas del día (6 am a 8 pm) y para donde no haya ningún usuario se tomo las 2 am.

Una vez depurada la información de la población usuaria, se procedió a evaluar las estructuras del Campus.

3.1.2. ESTRUCTURAS.

Para la evaluación de los edificios se tomaron en consideración estructuras o edificaciones formales, es decir, estructuras diseñadas con un cierto nivel ingenieril que entrar en rango de ser evaluados por sismos. Dentro de la zona evaluada se ubican gran parte de las edificaciones que funcionan como uso educacional y de oficinas. La recopilación de información de cada edificación evaluada, recoge datos vitales que dan muestra de su característica estructural, año de construcción y niveles de ocupación, lo cual ha de permitir en buena medida la estimación de su exposición, vulnerabilidad y riesgo ante un evento sísmico.

Procesamiento de la Información:

Para la realización del procesamiento de las estructuras estudiadas en el presente trabajo, se tomaron en cuenta el siguiente procedimiento para la recolección de datos de las estructuras:

- Para poder definir los sistemas estructurales, se tuvo que contar con la información dada por la **Norma Técnica para Diseño por Sismo en El Salvador** (1994) y por medio del estudio de **Modelación Probabilista de Escenarios de Riesgo para el Área Metropolitana de San Salvador** (CAPRA, 2012), también se conto con el asesoramiento de ingenieros estructurales expertos.

- Estableciendo claramente los diferentes sistemas estructurales, se realizó una visita de Campo por todas las edificaciones del Campus y así poder identificarlas. El periodo de visita a todas las edificaciones fue de una semana.
- Cada levantamiento de recolección de datos contó en su mayoría con una inspección visual detallada de cada estructura, además de entrevistas con algún experto con el propósito de conseguir información, que por la vía visual, no se podía obtener.
- Se tomaron fotos de las edificaciones, para que por medio de reuniones con los ingenieros estructurales expertos se pudieran definir el tipo de sistema estructural de las edificaciones.
- En algunas de las edificaciones, las informaciones puntuales no se lograron obtener, por lo cual se procedió a una revisión por medio de los planos arquitectónicos o estructurales que fueron proporcionados por la **Unidad de Desarrollo Físico** (nominada como UDF de aquí en adelante) de la Universidad de El Salvador.
- Una vez obtenido el levantamiento de datos se determinó los edificios a tomar en cuenta en el Campus. Las estructuras tienen que ser edificaciones diseñadas con un cierto nivel ingenieril, es decir, estructuras que cumplen con los parámetros o lineamientos dados por la Norma Técnica para Diseño por Sismo en El Salvador (MOP, 1994) y por Características Sismorresistentes esenciales del programa SELENA.

- De las edificaciones a evaluar se obtuvo las características más relevantes para poder evaluarlas.
- Las etiquetas mostradas en las tablas del Trabajo de Graduación, se definen como las iniciales de las palabras principales que conforman las descripciones.

A continuación se detalla los criterios para la caracterización de las Estructuras:

3.1.2.1. Año de Construcción.

Criterios para determinar el Año de Construcción:

- La mayoría de datos de años de construcción de las estructuras fueron tomados de los planos proporcionados por la UDF del Campus Central de la Universidad de El Salvador, ya que en los membretes llevaban el año de construcción o reconstrucción.
- En algunos de los planos no llevaban los membretes para identificar los años de construcción o reconstrucción de las estructuras, las estructuras que no se sabía los años de construcción se pidió nuevamente el apoyo a la UDF para proporcionar los datos de las edificaciones faltantes.
- También se contó con entrevistas a ex-Decanos de las diferentes Facultades, así como información del diario “El Universitario” y de las memorias de la Universidad de El Salvador proporcionados por la Biblioteca Central, para poder obtener los años de construcción y reconstrucción de las edificaciones a evaluar.
- La importancia del Año de Construcción para cada una de las 68 estructuras a evaluar fue para definir o asumir el diseño sismorresistentes, de acuerdo a los

periodos de vigencia de los códigos sísmicos de El Salvador, la Tabla 3.1 se presenta la evolución de los códigos con el paso de los años.

Tabla 3. 1. Evolución de Códigos en El Salvador. Fuente: CAPRA, Modelación Probabilista de Escenarios de Riesgo Sísmico, 2012.

Etiqueta	Tipo de Código	Descripción
PC	Pre Código	Construcciones anteriores a 1965: Previo a la adopción del primer reglamento de Diseño Sismorresistentes.
CB	Código Bajo	Construcciones entre 1966 a 1989: Periodo de vigencia del Reglamento de Diseño Sísmico de 1966 (MOP, 1966)
CM	Código Medio	Construcciones de 1990 en adelante: El Actual reglamento para la Seguridad Estructural de las construcciones y su Norma Técnica para Diseño por Sismo fue adoptado en 1994 (MOP, 1994), sin embargo, en 1989 se adoptó un Reglamento de Emergencia, cuyo espectro de diseño fue muy similar.

3.1.2.2. Número de Pisos.

El número de pisos se definió como la cantidad de entrepisos arquitectónicos observados. Los criterios tomados para determinar el número de pisos de las Edificaciones son los siguientes:

- Se visitó todas las edificaciones para determinar los números de pisos.
- Para estructuras con irregularidad en la elevación, el número de pisos corresponde al máximo número de pisos observados.
- Las edificaciones que contenían sótanos se consideraron como pisos adicionales.

- Las azoteas en algunas edificaciones no fueron considerados como un piso adicional.
- Una vez obtenida los números de pisos de las edificaciones se estableció el rango de pisos, ya que se tomo como base la metodología HAZUS, que evalúa por pisos arquitectónicos y no por metros de altura, estos números por pisos arquitectónicos quedo de la siguiente manera: 1 = uno a dos pisos, 2 = tres a cinco pisos y 3 = más de seis pisos.

3.1.2.3. Altura de Entrepisos.

La altura de entrepisos se definió como la altura que hay en cada uno de los niveles de las edificaciones. Los criterios tomados para determinar la altura de entrepisos de las edificaciones son las siguientes:

- Para las edificaciones que tienen techo, se considero la altura de entrepiso como el promedio entre la altura más baja del techo y la altura de la cumbrera, medidas desde el nivel del suelo.
- Para edificaciones que tienen diafragma rígido, la altura característica se considero como una medida desde el nivel del suelo hasta la altura de la edificación.
- Las alturas de entrepisos se calcularon por cada sistema estructural, es decir, se obtuvo una altura de entrepiso promedio por cada sistema estructural.
- Las alturas de las edificaciones fueron obtenidas de los planos de elevaciones proporcionados por la UDF.

3.1.2.4. Sistema Estructural.

Considerando los sistemas estructurales contemplados en la **Norma Técnica de Diseño por Sismo de El Salvador (MOP, 1994)**, así como estudios de **Modelación Probabilista de Escenarios de Riesgo para el Área Metropolitana de San Salvador (CAPRA, 2012)**, y asesoramiento de Ingenieros Estructurales Expertos, se definieron distintos sistemas estructurales que se detallan en la Tabla 3.2.

Tabla 3. 2. Descripción de los sistemas Estructurales.

SISTEMAS ESTRUCTURALES		
Sistemas	Etiqueta	Descripción
Sistemas de Marcos de Concreto	SMC	Sistemas de Columnas y Vigas de C/R conectados por nudos Rígidos formando una retícula tridimensional resistente a Momentos, resisten la totalidad de cargas gravitacionales y laterales. Las paredes actúan como estructuras secundarias ya que están desligadas estructuralmente.
Sistema Dual	SD	Sistemas de Columnas y Vigas de C/R combinados con paredes de corte que están construidas de Mampostería o de C/R, no presentan separación estructural, se dan dos casos: el primero los marcos y paredes resisten las cargas gravitacionales y laterales respectivamente, segundo las paredes estructurales resisten la mayor parte de las cargas gravitacionales y laterales y los marcos resisten un 25 o 30% de las cargas mencionadas.
Paredes de Concreto Reforzado	PCR	Sistema a base de Paredes de Concreto, que resisten las cargas gravitacionales y laterales. Se incluyen sistemas con refuerzo integral de Concreto.
Paredes de Mampostería Reforzada	PMR	Sistema a base de Paredes de Mampostería, que resisten las cargas gravitacionales y laterales. Se incluyen sistemas de mampostería con refuerzo integral, de ladrillos de arcilla o bloques.
Prefabricados de Concreto Reforzado	PreCR	Sistemas de Paredes elaboradas de C/R. Se incluyen el sistema conocido como "bloque panel", el cual consiste en columnas de Concreto Reforzado y placas que sirven como material de relleno entre columnas.
Sistema de Péndulo Invertido	SPI	Sistemas con masa esencialmente concentrada en el extremo superior. Estructuras Isostáticas con escasa capacidad de absorción de energía.

Consideraciones de Estructuras no evaluadas.

Durante el proceso de las visitas a las diferentes edificaciones del Campus, se encontró con edificaciones a base de sistemas metálicas y sistemas precarios, de los cuales no fueron tomados en cuenta. No fueron tomados en cuenta debido a que son estructuras que en ocasiones no alcanzan el nivel de rigurosidad del diseño ingenieril que se requiere para ser incluido en el análisis. En la tabla 3.3 se detalla la descripción de dichas estructuras mencionadas anteriormente.

Tabla 3. 3. Sistemas Estructurales no Evaluadas.

SISTEMAS ESTRUCTURALES		
Sistemas	Etiqueta	Descripción
Paredes de Mampostería Sin Refuerzo	PMSR	Sistema a base de Paredes de Mampostería Simple usualmente ladrillos de Arcilla o Concreto unidas con mortero, carecen de refuerzo integral o confinante.
Sistemas de Estructuras Metálicas	SEM	Sistemas de elementos metálicos a base de polines "C", generalmente dobles, con conexiones soldadas sin garantizar nudos rígidos. Las paredes están hechas de tabla roca. Son bajos a resistir carga gravitacional y carga lateral
Sistemas Precarios	SPr	Sistemas Estructurales incompletos o deficientes, que presentan combinaciones de materiales o configuraciones que denotan falta de planificación o supervisión profesional y que tienen baja resistencias a cargas laterales.

3.2. BASE DE DATOS E INVENTARIO DE EDIFICACIONES.

3.2.1. INTRODUCCIÓN.

Teniendo la información organizada, se mostraran las estadísticas de las principales características halladas mediante los levantamientos e inventario de las edificaciones.

3.2.1.1. Totalización de Datos.

Con la finalidad de mostrar la proporción y distribución, de alguna característica dentro del inventario de las edificaciones, se efectuó una totalización dentro de la base de datos que representan importancia dentro de este estudio. Esto ha permitido crear mediante gráficas una distribución porcentual, cuantitativa y cualitativa.

3.2.1.2. Análisis y Observaciones.

A cada una de las gráficas obtenidas a través de la totalización le corresponde su respectiva discusión y análisis, destacando así la incidencia e importancia, permitiendo de esta manera observar e identificar particularidades dentro de los inventarios de edificios.

3.2.2. INVENTARIO DE LAS EDIFICACIONES.

A continuación se enumeran las edificaciones que se evaluaron de la diferentes Facultades, se logró inspeccionar un total de 68 edificios que serán evaluados. En la Figura 3.1 se muestran las edificaciones evaluadas.

Los números de las geounidades mostradas en la Figura 3.1 corresponden al código por Facultad y su respectiva etiqueta, mostrada en la tabla 3.4.

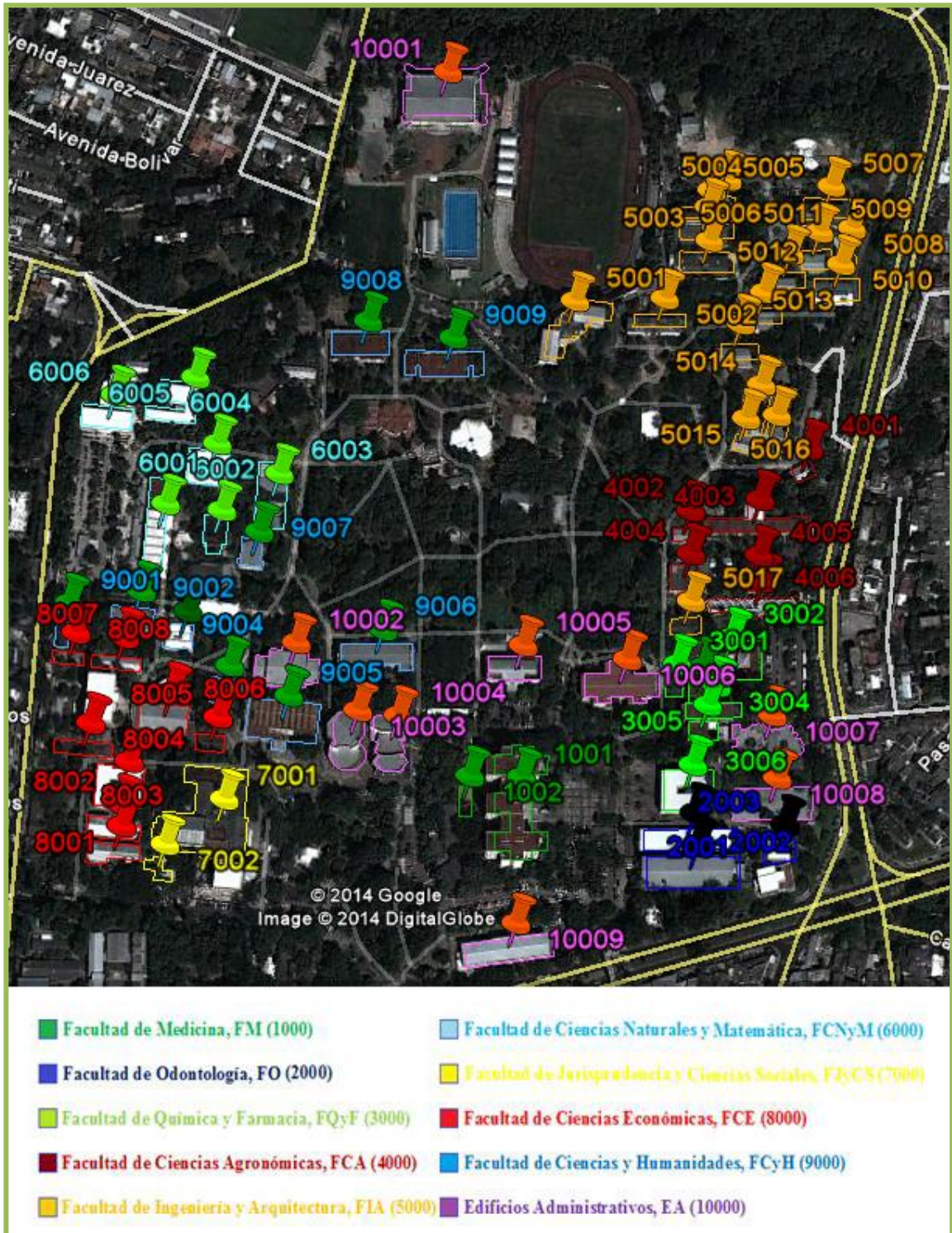


Figura 3. 1. Edificaciones a Evaluar. Fuente: Google Earth, 2014.

Tabla 3. 4. Descripciones de las Etiquetas por Geounidades y Facultad.

ETIQUETA	GEOUNIDADES	DESCRIPCION
FM	1000	Facultad de Medicina
FO	2000	Facultad de Odontología
FQyF	3000	Facultad de Química y Farmacia
FCA	4000	Facultad de Ciencias Agronómicas
FIA	5000	Facultad de Ingeniería y Arquitectura
FCNyM	6000	Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas
FJyCS	7000	Facultad de Jurisprudencia y Ciencias Sociales
FCE	8000	Facultad de Ciencias Económicas
FCyH	9000	Facultad de Ciencias y Humanidades
EA	10000	Edificios Administrativos

Los 68 edificios seleccionados se detallan a continuación por su correspondiente Facultad a la que pertenecen, su respectiva ubicación y su geounidades:

Tabla 3. 5. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Medicina.

FACULTAD DE MEDICINA	
GEOUNIDADES	EDIFICIOS/AULAS
1001	Medicina
1002	Enfermería



Figura 3. 2. Edificaciones de la Facultad de Medicina. Fuente: Google Earth, 2013.

Tabla 3. 6. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Odontología.

FACULTAD DE ODONTOLOGIA	
GEOUNIDADES	EDIFICIOS/AULAS
2001	Clínicas
2002	Auditórium
2003	Administrativo



Figura 3. 3. Edificaciones de la Facultad de Odontología. Fuente: Google Earth, 2013

Tabla 3. 7. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Química y Farmacia.

FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA	
GEOUNIDADES	EDIFICIOS/AULAS
3001	Administración Académica y Recursos Humanos
3002	Laboratorios e Impresiones
3003	Decanato
3004	Edificio de Química y Farmacia
3005	Biblioteca y Administración Financiera
3006	Compartido: Medicina-Química y Farmacia-Odontología



Figura 3. 4. Edificaciones de la Facultad de Química y Farmacia. Fuente: Google

Earth, 2013.

Tabla 3. 8. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Ciencias Agronómicas.

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS	
GEOUNIDADES	EDIFICIOS/AULAS
4001	Lab. De Medicina Veterinaria
4002	Decanato
4003	Edificio de Aulas y Maestrías
4004	Aula 15, Lab. De Zootecnia y Clínica Veterinaria
4005	Lab. De Recursos Naturales y Lab. De Hidráulica
4006	Edificio Administrativo



Figura 3. 5. Edificaciones de la Facultad de Ciencias Agronómicas. Fuente: Google

Earth, 2013.

Tabla 3. 9. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA			
GEOUNIDADES	EDIFICIOS/AULAS	GEOUNIDADES	EDIFICIOS/AULAS
5001	Biblioteca	5010	Ing. Eléctrica
5002	Administrativo	5011	B
5003	Ing. Civil	5012	C
5004	Ing. Mecánica e Ing. Química 1	5013	D y Arquitectura
5005	Ing. Mecánica e Ing. Química 2	5014	F1, UCB
5006	Ing. Mecánica e Ing. Química 3	5015	F2
5007	Ing. Industrial e Ing. Sistemas	5016	UCB
5008	Potencia	5017	Planta Piloto
5009	F10, F12 y F13		

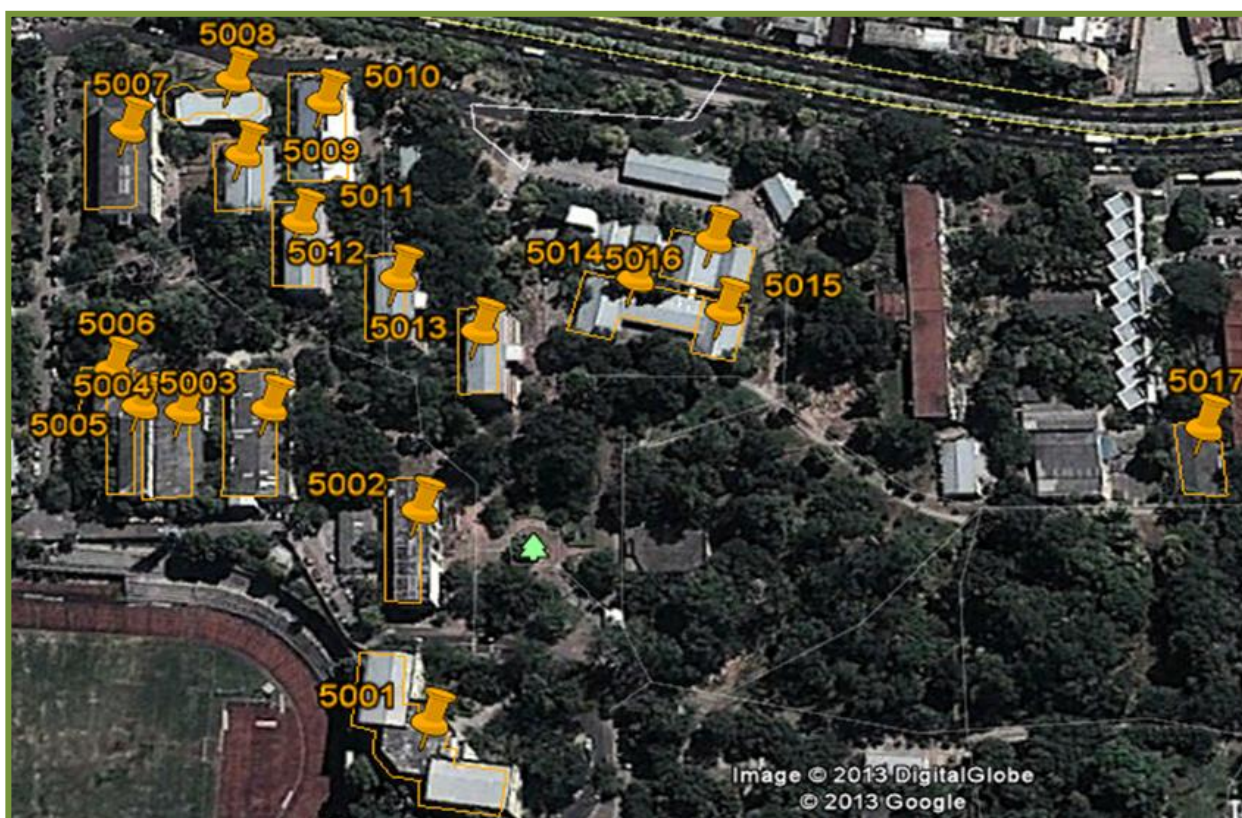


Figura 3. 6. Edificaciones de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Fuente:

Google Earth, 2013.

Tabla 3. 10. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática.

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMATICA	
GEOUNIDADES	EDIFICIOS/AULAS
6001	Escuela de Física
6002	Auditórium y Adm. Académica
6003	Lab. De Biología
6004	Escuela de Química - Decanato
6005	Escuela de Biología
6006	Escuela de Matemática



Figura 3. 7. Edificaciones de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática.

Fuente: Google Earth, 2013.

Tabla 3. 11. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Jurisprudencia y Ciencias Sociales.

FACULTAD DE JURISPRUDENCIA Y CIENCIAS SOCIALES	
GEOUNIDADES	EDIFICIOS/AULAS
7001	Histórico
7002	Socorro Jurídico



Figura 3. 8. Edificaciones de la Facultad de Jurisprudencia y Ciencias Sociales.

Fuente: Google Earth, 2013.

Tabla 3. 12. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Ciencias Económicas.

FACULTAD DE CIENCIAS ECONOMICAS	
GEOUNIDADES	EDIFICIOS/AULAS
8001	Felipe Peña
8002	Carlos Rodas
8003	Compartido
8004	Adm. Académica
8005	Cabaña Adm. Financiera
8006	Administrativo - Decanato
8007	Proyección Social y Lab. De Computo
8008	Cabaña MAF

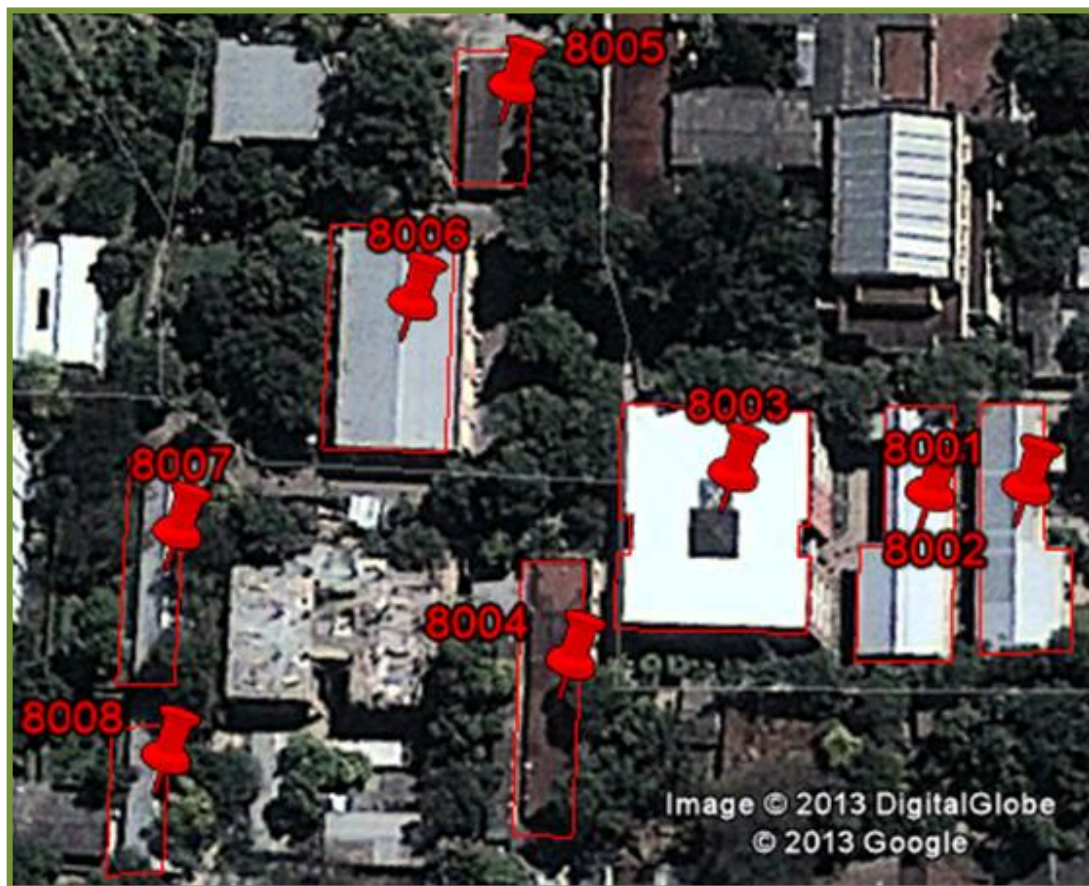


Figura 3. 9. Edificaciones de la Facultad de Ciencias Económicas. Fuente: Google

Earth, 2013.

Tabla 3. 13. Edificaciones a Evaluar de la Facultad de Ciencias y Humanidades.

FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES	
GEOUNIDADES	EDIFICIOS/AULAS
9001	Cabaña CENIUES
9002	Administrativo – Decanato
9003	Anexo a CCSS
9004	Auditorium 4
9005	Arte y Cultura
9006	Psicología y Educación
9007	Auditorium 3
9008	Filosofía e Idiomas
9009	Periodismo y Letras



Figura 3. 10. Edificaciones de la Facultad de Ciencias y Humanidades. Fuente:

Google Earth, 2013.

Tabla 3. 14. Edificaciones Administrativas a Evaluar.

EDIFICIOS ADMINISTRATIVOS	
GEOUNIDADES	EDIFICIOS/AULAS
10001	Polideportivo
10002	Biblioteca Central
10003	Rectoría-Usos Múltiples
10004	Teatro Universitario
10005	Oficinas Centrales
10006	CENSALUD
10007	Bienestar Universitario
10008	Imprenta
10009	Centro Regional de la Salud "Valencia"

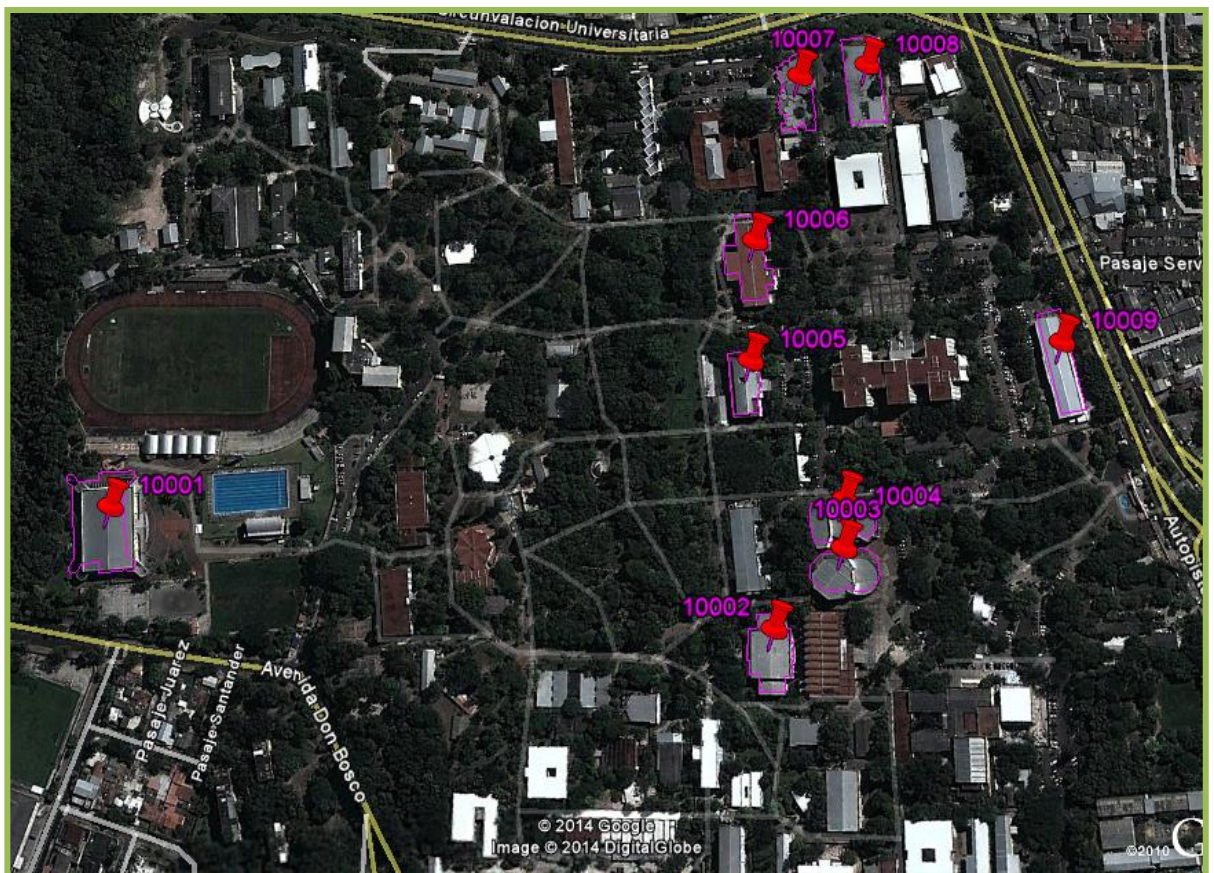


Figura 3. 11. Edificaciones Administrativas. Fuente: Google Earth, 2013.

3.2.3. DISTRIBUCIÓN DE LOS EDIFICIOS POR TIPO DE CÓDIGO SÍSMICO.

De acuerdo a la sección 2.3.1.3 se estableció la evolución de los códigos sísmicos en El Salvador, los cuales son: Pre-Código (PC), Código Bajo (CB), Código Medio (CM), para ello en la tabla 3.15 y figura 3.12 se muestra las edificaciones por códigos sísmicos por facultades.

Tabla 3. 15. Distribución numérica de las edificaciones por tipos de Códigos Sísmicos.

NUMERO DE EDIFICIOS POR TIPO DE CODIGO SISMICOS											
ETIQUETA	FM	FO	FQyF	FA	FIA	FCNyM	FJyCS	FCE	FCyH	EA	TOTAL
PC	0	0	2	0	1	3	0	0	0	0	6
CB	1	2	0	2	9	0	1	3	0	2	20
CM	1	1	4	4	7	3	1	5	9	7	42
TOTAL	2	3	6	6	17	6	2	8	9	9	68

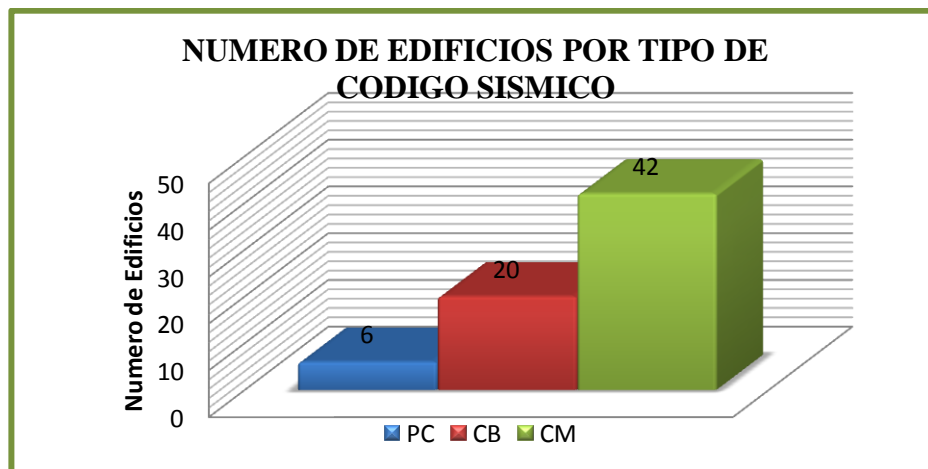


Figura 3. 12. Distribución numérica de las edificaciones por tipos de Códigos Sísmicos.

La figura 3.13 muestra que la mayor parte de los edificios están construidos por el Códigos Medio, (de 1990 en adelante), teniendo aproximadamente 62%, luego le sigue los edificios construidos por el Código Bajo, (entre 1965 a 1989), lo que equivale al 29% aproximadamente y por ultimo edificaciones construidas por el Pre-Código, (antes de 1965), con un 9% aproximadamente.

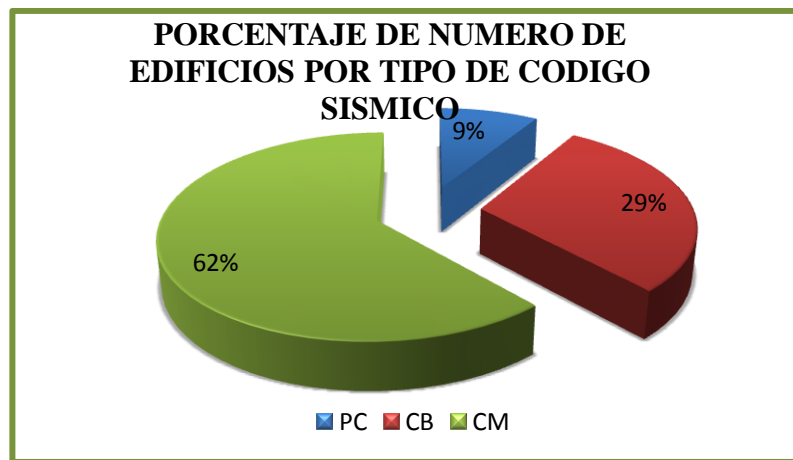


Figura 3. 13. Distribución porcentual de las edificaciones por tipos de Códigos Sísmicos.

3.2.4. DISTRIBUCIÓN DE LOS EDIFICIOS DE ACUERDO AL NÚMERO DE PISOS.

Para la clasificación de los Edificios de acuerdo al Número de Pisos se establecieron rangos, el primero está compuesto por edificios de 0 hasta 2 pisos, el que le sigue son edificios de 3 hasta 5 pisos y por último los edificios compuestos que están arriba de 6 pisos, tal y como se muestra en la tabla 3.16 y figura 3.14. Cabe destacar que se

establecieron estos rangos en función a la información del levantamiento de datos, encontrándose que los números de pisos no eran superiores a 7.

Tabla 3. 16. Distribución numérica de las edificaciones de acuerdo al Número de Pisos.

NUMERO DE PISOS DE LOS EDIFICIOS POR FACULTADES											
ETIQUETA	FM	FO	FQyF	FA	FIA	FCNyM	FJyCS	FCE	FCyH	EA	TOTAL
0 - 2	1	2	4	6	9	5	2	7	5	5	46
3 - 5	0	1	2	0	8	1	0	1	4	4	21
6 +	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
TOTAL	2	3	6	6	17	6	2	8	9	9	68

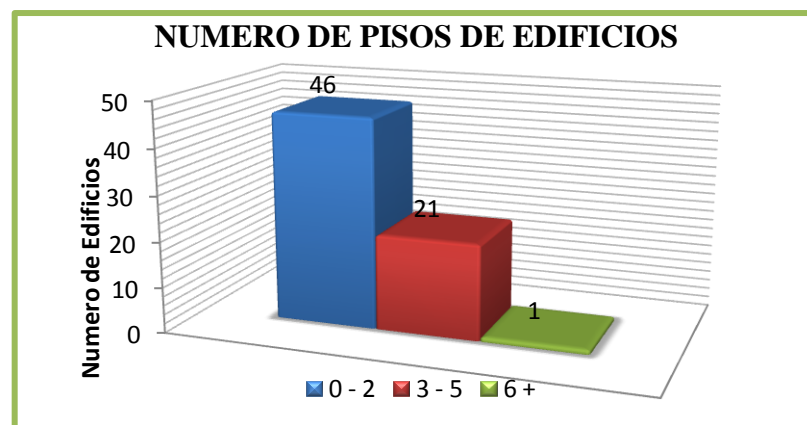


Figura 3. 14. Distribución numérica de las edificaciones de acuerdo al Número de Pisos.

La figura 3.15 revela que la mayor parte de los edificios están construidos con pocos pisos, teniendo aproximadamente el 68% edificaciones de menos de 2 niveles. Esto se puede deber, a que la mayoría son edificaciones de un nivel para Aulas. La otra gran cantidad de edificios se encuentran entre un rango de pisos de 3 a 5 pisos, representando

aproximadamente un 31%, de modo que, las edificaciones mayor de 6 pisos representa el 1%.

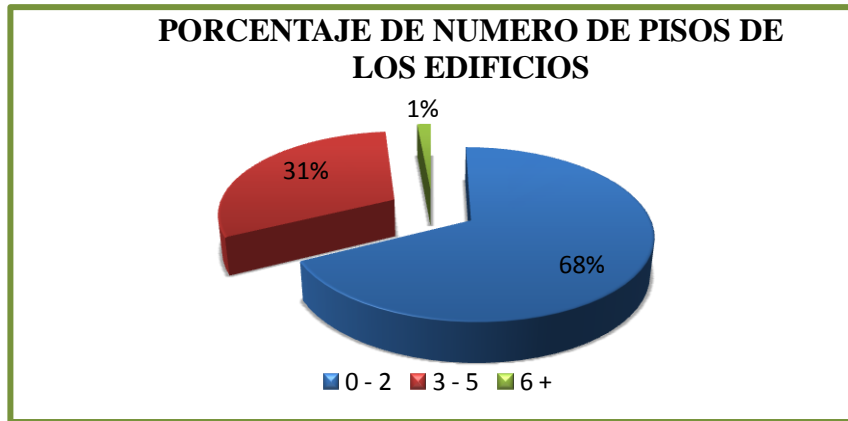


Figura 3. 15. Distribución porcentual de los edificios de acuerdo al Número de Pisos.

3.2.5. ALTURA DE ENTREPISOS.

Para determinar la Altura de Entrepisos, se obtuvo un promedio de alturas de entrepisos por cada uno de las 68 edificaciones evaluadas, una vez obtenida esa información se sacó un promedio de alturas de entrepisos por sistema estructural, en la Tabla 3.17 se presenta la Altura de Entrepisos Promedio por sistema estructural.

Tabla 3. 17. Altura de Entrepisos de los Sistemas Estructurales.

Sistema Estructural	Altura de Entrepiso Promedio (m)
Sistemas de Marcos de Concreto	4
Sistemas Dual	4
Paredes de Concreto Reforzado	4
Paredes de Mampostería Reforzada	3.5
Prefabricado de Concreto Reforzado	3.5
Sistemas de Péndulo Invertido	4

3.2.6. DISTRIBUCIÓN DE LOS EDIFICIOS POR SU SISTEMA ESTRUCTURAL.

Dentro de la zona de estudio se evaluaron diversos Sistemas Estructurales, se observaron 6 tipos, estos fueron los definidos en la sección 3.1.2.4 los cuales estas edificaciones fueron tomadas por criterios de la metodología HAZUS y el Código Sísmico de El Salvador. En la Tabla 3.18 y Figura 3.16 se visualizan las Tipologías Estructurales por las diferentes Facultades.

Tabla 3. 18. Distribución Numérica de las edificaciones por su Sistema Estructural.

NUMERO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES											
ETIQUETA	FM	FO	FQyF	FA	FIA	FCNyM	FJyCS	FCE	FCyH	EA	TOTAL
SMC	1	0	0	0	4	2	0	1	3	3	14
SD	0	3	2	4	10	4	1	3	4	5	36
PCR	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	3
PMR	1	0	1	0	1	0	1	3	1	1	9
PreCR	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	3
SPI	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3
TOTAL	2	3	6	6	17	6	2	8	9	9	68

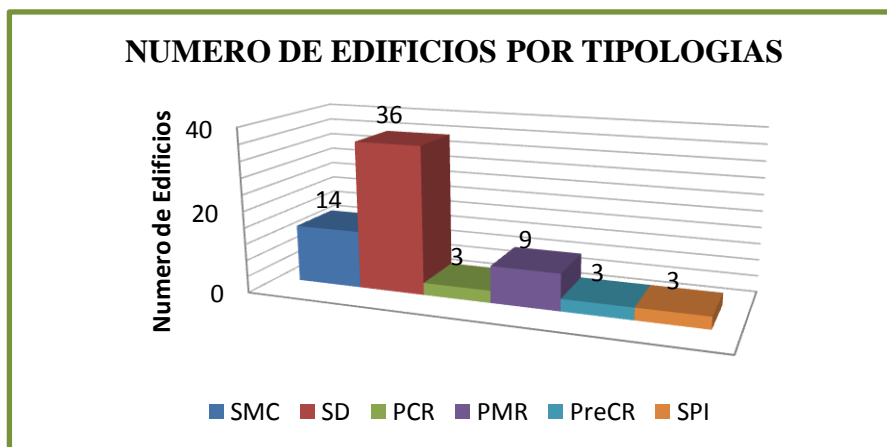


Figura 3. 16. Distribución Numérica de los edificios por su Sistema Estructural.

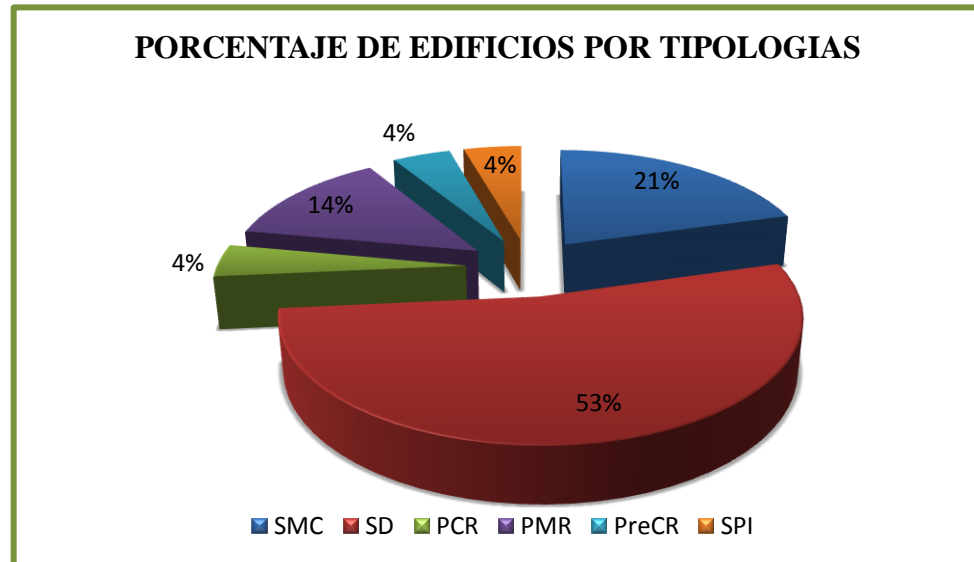


Figura 3. 17. Distribución porcentual de los edificios por su Sistema Estructural.

En la figura 3.17 se puede observar que el de mayor presencia (con un 53%) es el sistema estructural compuesto por Sistema Dual (SD), lo que equivale a 36 edificios dentro de la muestra estudiada, luego le sigue Sistema de Marcos de Concreto (SMC) con un 21%. En menor proporción se encuentran los edificios construidos de Paredes de Mampostería Reforzada (PMR), con un 13%, para las edificaciones Prefabricados de Concreto (PreCR), Paredes de Concreto Reforzado (PCR), y Sistemas de Péndulo Invertido (SPI), se encuentran con un 4%.

3.3. BASE DE DATOS DE POBLACION USUARIA.

La Base de datos de la Población Usuaria se baso en 3 pasos esenciales para determinar las 3 horas a evaluar en el Campus Central de la Universidad de El Salvador, los cuales son los siguientes:

3.3.1. BASE DE DATOS DE LA POBLACIÓN USUARIA DE CADA UNA DE LAS EDIFICACIONES.

Lo primero que se realizó fue ubicar la población usuaria por cada una de las edificaciones a evaluar, estos datos fueron proporcionados por medio de Matrices de Horarios y Totalización de Estudiantes inscritos por grupos de clases (Grupo Teórico, Grupo Laboratorio, Grupo Discusión). En la Tabla 3.19 se presenta la población usuaria de un edificio específico, en este caso el Edificio “B” de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, el cual detalla el nombre del Aula y la cantidad de usuarios por hora clase en cada una de las aulas.

Tabla 3. 19. Población Usuaria del Edificio “B” de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

EDIFICIO B									CAPACIDAD
POBLACION USUARIA									
Aula	Hora								
	6:20-8:00	8:05-9:45	9:50-11:30	11:35-13:15	13:20-15:00	15:05-16:45	16:50-18:30	18:35-20:15	
B-11	87	78	90	96	95	96	56	58	100
B-21	36	92	93	36	39	0	51	94	200
B-22	93	93	48	0	0	61	58	57	
B-31	97	105	93	104	0	103	94	0	200
B-32	57	87	90	0	95	79	44	67	
B-41	32	41	41	40	30	34	32	0	200
B-42	37	38	37	41	31	38	53	0	
B-43	0	40	9	36	41	29	27	0	
B-44	30	38	38	41	0	39	0	34	
TOTAL	469	612	539	394	331	479	415	310	700

3.3.2. BASE DE DATOS DE LA POBLACIÓN USUARIA DE CADA UNA DE LAS FACULTADES.

Una vez obtenida la base de datos de cada una de las edificaciones a evaluar, se determino la base de datos de la población usuaria de cada una de las facultades del Campus Central de la Universidad de El Salvador. En la Tabla 3.20 se presenta la población usuaria de una Facultad específica, en este caso la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, el cual detalla las edificaciones a evaluar en dicha facultad y la cantidad de usuarios por hora por edificaciones.

Tabla 3. 20. Población Usuaria de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA														CAPACIDAD
POBLACION USUARIA														
Edificios / Aulas	Hora													
	7:00-8:00	8:00-9:00	9:00-10:00	10:00-11:00	11:00-12:00	12:00-13:00	13:00-14:00	14:00-15:00	15:00-16:00	16:00-17:00	17:00-18:00	18:00-19:00	19:00-20:00	
Biblioteca	533	533	655	505	505	521	521	584	584	472	458	458	3	782
Administrativo	2	20	63	78	78	33	64	65	65	63	22	0	0	88
Civil	40	59	59	66	66	12	37	37	58	58	58	56	15	94
Mecanica y Quimica 1	3	3	16	3	3	3	3	15	15	3	3	0	0	38
Mecanica y Quimica 2	13	32	32	38	38	32	19	24	35	35	20	13	7	64
Mecanica y Quimica 3	1	9	9	24	24	0	1	1	1	1	1	1	23	35
Industrial y Sistemas	36	102	102	83	83	70	70	58	58	58	37	37	1	208
Potencia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
F10, F12 y F13	36	47	47	32	32	0	0	0	10	10	42	42	0	110
Electrica	10	22	22	22	22	31	31	38	38	14	38	18	0	64
B	469	612	612	539	539	394	394	331	479	479	415	415	310	700
C	396	468	468	509	509	320	320	239	208	208	385	385	44	700
D y Arquitectura	290	234	234	155	155	100	100	156	159	159	176	176	114	357
F1, UCB	40	46	46	41	41	45	45	46	46	45	46	43	16	55
F2	0	41	41	44	44	42	42	42	42	41	40	40	0	50
UCB	17	32	32	32	32	11	32	32	32	32	32	20	5	32
CIAN	0	7	7	7	7	2	7	7	7	7	3	0	0	7
Planta Piloto	0	1	1	26	26	1	1	42	42	42	1	1	0	7
TOTAL	1886	2268	2446	2204	2204	1617	1687	1717	1879	1727	1777	1705	538	3441

3.3.3. BASE DE DATOS DE LA POBLACIÓN USUARIA EN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

Una vez obtenida la base de datos de cada una de las Facultades del Campus Central de la Universidad de El Salvador, se determinó la base de datos de la población usuaria en el Campus Central de la Universidad de El Salvador.

Para la clasificación de la hora de mayor Población Usuaria, se establecieron rangos, los cuales están dados por hora: 7:00 am, 8:00 am, 9:00 am, 10:00 am, 11:00 am, 12:00 md, 1:00 pm, 2:00 pm, 3:00 pm, 4:00 pm, 5:00 pm, 6:00 pm, 7:00 pm., tal y como se muestra en la tabla 3.20 y figura 3.18 que visualizan la Población Usuaria de las diferentes Facultades de la Universidad de El Salvador. Cabe destacar que se establecieron estos rangos en función a los criterios de la población usuaria de la metodología HAZUS mencionados en la sección 3.1.1.

Tabla 3. 21. Población Usuaria de la Universidad de El Salvador.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR														CAPACIDAD
POBLACION USUARIA														
FACULTADES	HORA													
	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	
Medicina	736	1938	2176	2205	2338	1058	1430	1976	1971	1571	1145	295	0	3464
Odontología	216	251	117	256	256	96	251	251	251	0	0	0	0	458
Química y Farmacia	1109	1121	967	1126	1105	252	906	1040	952	743	230	533	620	2371
Ciencias Agronomicas	541	634	594	640	638	208	264	588	645	540	125	0	0	1028
Ingeniería y Arquitectura	1886	2268	2446	2204	2204	1617	1687	1717	1879	1727	1777	1705	538	3441
Ciencias Naturales y Matematica	584	783	743	785	863	774	801	787	752	583	329	260	0	1476
Jurisprudencia y Ciencias Sociales	553	599	612	643	426	244	299	277	443	504	410	384	321	782
Ciencias Economicas	3002	3146	3180	3285	2930	1952	791	1134	1720	1620	2189	2424	2503	3644
Ciencias y Humanidades	2031	2591	2707	2439	2386	920	2055	2285	2511	2504	2135	1818	374	4670
Edificios Administrativos Centrales	36	1074	1074	1074	1074	1052	1074	1074	1045	368	363	0	0	2531
TOTAL	10694	14405	14616	14657	14220	8173	9558	11129	12169	10160	8703	7419	4356	23865

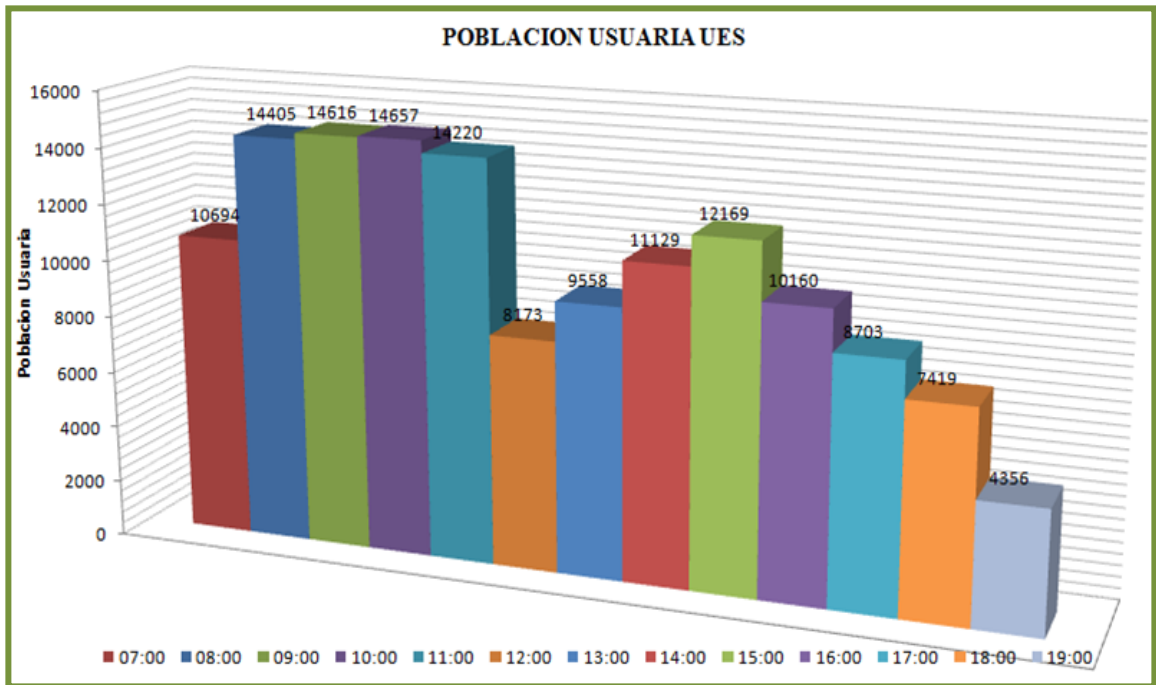


Figura 3. 18. Población Usuaria de la Universidad de El Salvador.

Para una mayor comprensión de esta clasificación es necesario compararla con la correspondiente a la distribución porcentual de la Población Usuaria, justificando que de acuerdo a la figura 3.19 se puede observar que el de mayor presencia (con un 11%) es el de las 10:00 am, lo que equivale a 14,657 usuarios, luego con un 10% se encuentran las horas de las 8:00 am, 9:00 am y 11:00 am, lo que equivale a 14,405, 14,616 y 14,220 respectivamente, luego sigue con un 9% esta las 3:00 pm, con 12,169 usuarios, con 8% se encuentran las horas de 7:00 am y 2:00 pm, con 10,694 y 11,129 usuarios respectivamente, con 7% se encuentran las horas de 1:00 pm y 4:00 pm, con 9,558 y 10,160 y usuarios respectivamente, con un 6% se encuentran las horas de 12:00 md y 5:00 pm, con 8,173 y 8,703 usuarios respectivamente, con un 5% está la hora de las 6:00

pm, con 7,419 usuarios, en menor proporción se encuentra las 7:00 pm, con un 3%, con 4,356 usuarios.

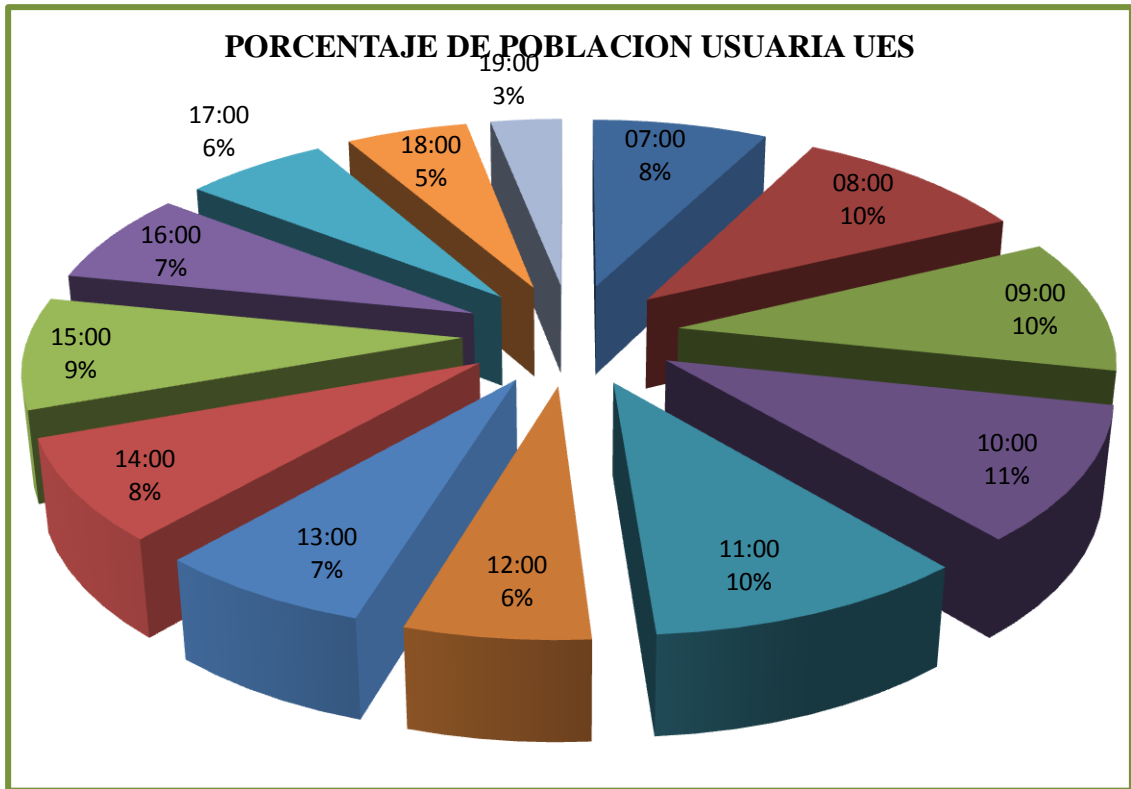


Figura 3. 19. Distribución porcentual de la Población Usuaria en la Universidad de El Salvador.

Una vez determinado el análisis de la población usuaria del Campus Central de la Universidad de El Salvador se tomaron las siguientes horas:

- Hora Menor de la población usuaria: 2:00 am,
- Hora Mayor de la población usuaria: 10:00 am,
- Hora Intermedia de la población usuaria: 2:00 pm.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA

VULNERABILIDAD

4.1. VULNERABILIDAD SISMICA.

Parte fundamental del análisis de riesgos es definir la vulnerabilidad de un activo cualquiera sometido a una amenaza determinada, en este caso la amenaza sísmica. La vulnerabilidad se mide en términos de un porcentaje medio de daño (MDR), definido en general como el costo necesario para llevar la edificación a su estado inicial (costo de reposición), en porcentaje del valor total de la edificación. Se llama función de vulnerabilidad a la relación entre este valor con el parámetro de intensidad seleccionado para el fenómeno amenazante, para este caso la aceleración espectral correspondiente (considerando únicamente vulnerabilidad estructural) (MARN, 2012).

El análisis de la vulnerabilidad sísmica consistió en reconocer y caracterizar las tipologías constructivas de los edificios del campus, a partir de la información de campo, identificar edificaciones típicas, y generar curvas de capacidad y funciones de vulnerabilidad para las tipologías identificadas.

En el presente capítulo se describe la metodología y los parámetros utilizados para generar las curvas de vulnerabilidad, los resultados obtenidos de las mismas y su respectiva asignación a las tipologías constructivas.

La determinación de la vulnerabilidad sísmica en las edificaciones, es un problema de gran complejidad que ha de ser abordado de diferentes formas en función de la escala de trabajo. Son multitud las variables que influyen en la vulnerabilidad de un edificio; cimentación, sistemas estructurales, años de construcción, altura, respuesta del terreno (ubicación geográfica), criterios geométricos que afectan la capacidad estructural, etc., el conocimiento de todos estos factores implica un exigente trabajo de campo.

4.2. CLASIFICACION DE LOS EDIFICIOS POR SU TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL.

Procedimientos para la clasificación de la tipología estructural:

La clasificación de los edificios por su tipología estructural se basó en tres grupos:

1. Sistema Estructural,
2. Número de Pisos y
3. Código Sísmico.

Primero se determino los “Tipos de Modelos de Edificios”, este lo conforman: el Sistema Estructural, el Número de Pisos y la Altura de Entrepiso. A continuación se presentan las tablas de los sistemas estructurales a evaluar y los rangos de los números de pisos.

Tabla 4. 1. Sistemas Estructurales.

Etiqueta	Sistemas
SMC	Sistemas de Marcos de Concreto
SD	Sistema Dual
PCR	Paredes de Concreto Reforzado
PMR	Paredes de Mampostería Reforzada
PreCR	Prefabricados de Concreto Reforzado
SPI	Sistema de Péndulo Invertido

El criterio para establecer este rango se basa en el trabajo de “**Modelación Probabilista de Escenarios de Riesgo Sísmico para el ARMS, MARN**”, en el que se hace una comparación del espectro de diseño del año 1966 con el del año 1994 (para un suelo tipo S3), tal como se muestra en la Figura 4.1.

Tabla 4. 2. Número de Pisos.

Etiqueta	Niveles
1	0 – 2
2	3 – 5
3	6 +

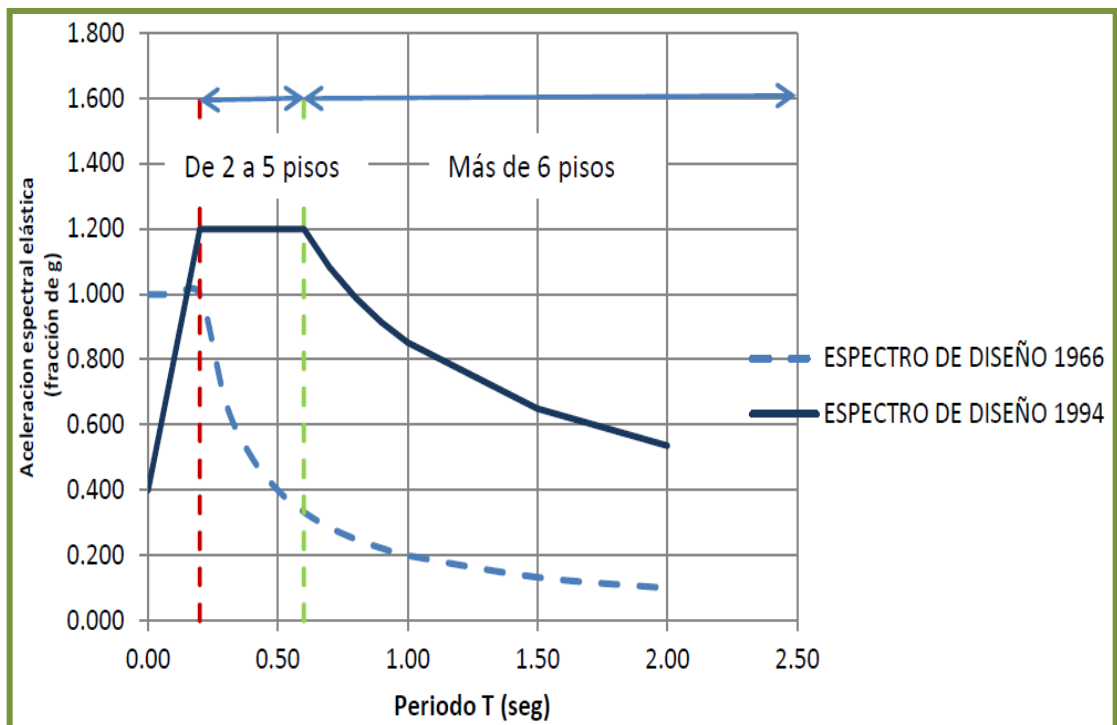


Figura 4. 1. Comparación de espectros de diseño 1966 vs 1994. Fuente: MARN, 2012.

Una vez teniendo estos datos se procedió a como estaría conformado los tipos de modelos de los edificios en el Campus Central de la Universidad de El Salvador, en la tabla 4.3 se presenta la propuesta.

Tabla 4. 3. Tipos de Modelos de Edificios del Campus Central de la Universidad de El Salvador.

TIPOS DE MODELOS DE EDIFICIOS						
No.	Etiqueta	Sistema Estructural	Altura			
			Rango		Típico	
			Nombre	Niveles	Niveles	Metros
1	SMC1	Sistemas de Marcos de Concreto	Baja Altura	1-2	2	8
2	SMC2		Media Altura	3-5	4	16
3	SMC3		Gran Altura	6+	7	28
4	SD1	Sistemas Dual	Baja Altura	1-2	2	8
5	SD2		Media Altura	3-5	4	16
6	PCR1	Paredes de Concreto Reforzado	Baja Altura	1-2	2	8
7	PMR1	Paredes de Mampostería Reforzada	Baja Altura	1-2	2	7
8	PreCR1	Prefabricado de Concreto Reforzado	Baja Altura	1	1	3.5
9	SPI1	Sistemas de Péndulo Invertido	Baja Altura	1	1	4

Ya determinado los tipos de modelos de los edificios en el Campus Central, se procedió a la clasificación de las tipologías estructurales, para ello, fueron necesarios los datos de los años constructivos de las edificaciones (incluyendo las reconstrucciones).

Teniendo la base de datos de los años constructivos se procedió a determinar el tipo de código sísmico para cada una de las edificaciones a evaluar, tomando como referencia la tabla 4.4.

Tabla 4. 4. Códigos Sísmicos.

Etiqueta	Tipo de Código
PC	Pre Código
CB	Código Bajo
CM	Código Medio

La asignación del código de las tipologías estructurales se baso en el Sistema Estructural, el Número de Pisos y el Año de Construcción (Figura 4.2). (MARN, 2012)

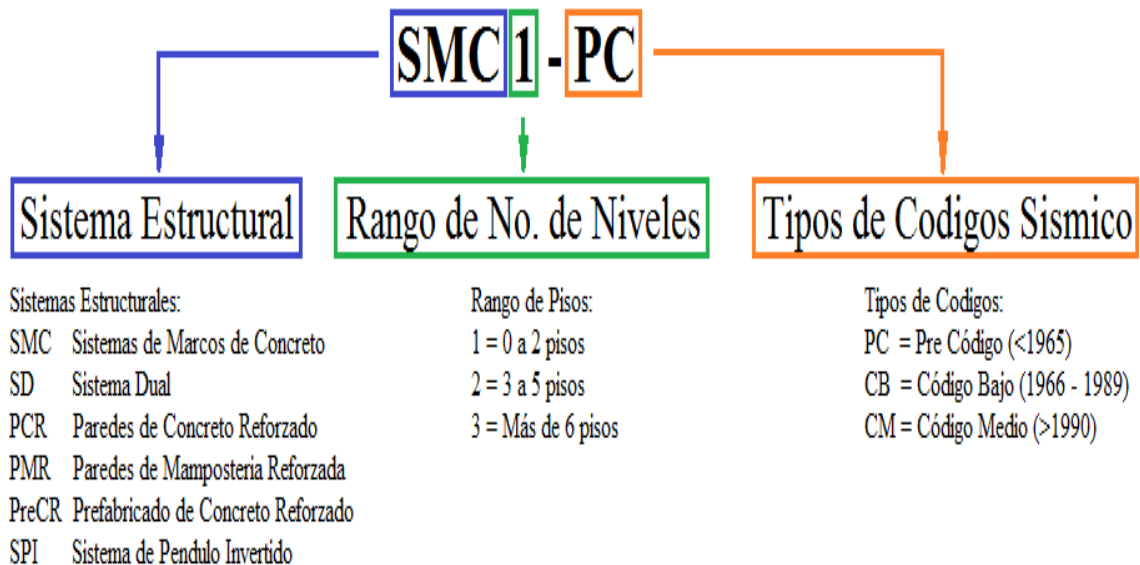


Figura 4. 2. Codificación de las Tipologías Estructurales.

4.2.1. DISTRIBUCIÓN DE LOS EDIFICIOS POR SU TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL.

El análisis anterior sirve para establecer la siguiente distribución de edificios por su Tipología Estructural. Las Tablas 4.5 y 4.6 muestran las 68 edificaciones con su respectiva tipología estructural.

Tabla 4. 5. Tipologías Estructurales por cada Edificación.

GEOUNIDADES	EDIFICIOS/AULAS	TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES
FACULTAD DE MEDICINA		
1001	Medicina	SMC3-CB
1002	Enfermería	PCR1-CM
FACULTAD DE ODONTOLOGIA		
2001	Clínicas	SD2-CM
2002	Auditorium	SD1-CB
2003	Administrativo	SD1-CB
FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA		
3001	Administración Académica y Recursos Humanos	PMR1-CM
3002	Laboratorios e Impresiones	SPI1-PC
3003	Decanato	SPI1-PC
3004	Edificio de Química y Farmacia	SD2-CM
3005	Biblioteca y Administración Financiera	SPI1-CM
3006	Compartido: Medicina-Química y Farmacia-Odontología	SD2-CM
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS		
4001	Lab. De Medicina Veterinaria	SD1-CM
4002	Decanato	SD1-CM
4003	Edificio de Aulas y Maestrías	SD1-CB
4004	Aula 15, Lab. De Zootecnia y Clínica Veterinaria	SD1-CM
4005	Lab. De Recursos Naturales y Lab. De Hidráulica	PCR1-CB
4006	Edificio Administrativo	PCR1-CM
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA		
5001	Biblioteca	SMC2-CM
5002	Administrativo	SD2-CM
5003	Civil	SD1-CB
5004	Mecánica y Química 1	SMC1-CB
5005	Mecánica y Química 2	SMC2-CB
5006	Mecánica y Química 3	SMC2-CB
5007	Industrial y Sistemas	SD2-CM
5008	Potencia	PCR1-CB
5009	F10, F12 y F13	SD1-CB
5010	Eléctrica	SD1-CB
5011	B	SD2-CM
5012	C	SD2-CM
5013	D y Arquitectura	SD2-CM
5014	F1, UCB	PMR1-CB
5015	F2	PreCR1-CB
5016	UCB	SD1-CM
5017	Planta Piloto	SD1-PC

Tabla 4. 6. Tipologías Estructurales por cada Edificación.

GEOUNIDADES	EDIFICIOS/AULAS	TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMATICA		
6001	Escuela de Física	SD2-CM
6002	Auditórium y Adm. Académica	SMC1-PC
6003	Lab. De Biología	SD1-PC
6004	Escuela de Química – Decanato	SD1-CM
6005	Escuela de Biología	SD1-PC
6006	Escuela de Matemática	SMC1-CM
FACULTAD DE JURISPRUDENCIA Y CIENCIAS SOCIALES		
7001	Histórico	SD1-CM
7002	Socorro Jurídico	PMR1-CB
FACULTAD DE CIENCIAS ECONOMICAS		
8001	Felipe Peña	PMR1-CM
8002	Carlos Rodas	PMR1-CM
8003	Compartido	SMC2-CM
8004	Adm. Académica	SD1-CM
8005	Cabaña Adm. Financiera	PreCR1-CB
8006	Administrativo – Decanato	SD1-CM
8007	Proyección Social y Lab. De Computo	SD1-CB
8008	Cabaña MAF	PMR1-CB
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES		
9001	Cabaña CENIUES	PreCR1-CM
9002	Administrativo – Decanato	SMC2-CM
9003	Anexo a CCSS	PMR1-CM
9004	Auditórium 4	SD1-CM
9005	Arte y Cultura	SD2-CM
9006	Psicología y Educación	SMC2-CM
9007	Auditórium 3	SMC1-CM
9008	Filosofía e Idiomas	SD2-CM
9009	Periodismo y Letras	SD1-CM
EDIFICIOS ADMINISTRATIVOS		
10001	Polideportivo	SD1-CM
10002	Biblioteca Central	SMC2-CM
10003	Rectoría-Usos Múltiples	SMC2-CM
10004	Teatro Universitario	SD1-CM
10005	Oficinas Centrales	SD2-CM
10006	CENSALUD	SD2-CM
10007	Bienestar Universitario	PMR1-CB
10008	Imprenta	SD1-CB
10009	Centro Regional de la Salud "Valencia"	SMC1-CM

La tabla 4.7 muestra las 27 tipologías estructurales por las diferentes Facultades del Campus Central de la Universidad de El Salvador. Las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 muestran cuantas edificaciones hay por cada tipología estructural.

Tabla 4. 7. Distribución de Edificios por su Tipología Estructural.

NUMERO DE EDIFICIOS POR TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES											
ETIQUETA	FM	FO	FQyF	FA	FIA	FCNyM	FJyCS	FCE	FCyH	EA	TOTAL
SMC1-PC	---	---	---	---	---	1	---	---	---	---	1
SMC1-CB	---	---	---	---	1	---	---	---	---	---	1
SMC1-CM	---	---	---	---	---	1	---	---	1	1	3
SMC2-PC	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0
SMC2-CB	---	---	---	---	2	---	---	---	---	---	2
SMC2-CM	---	---	---	---	1	---	---	1	2	2	6
SMC3-PC	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0
SMC3-CB	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	1
SMC3-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0
SD1-PC	---	---	---	---	1	2	---	---	---	---	3
SD1-CB	---	2	---	1	3	---	---	1	---	1	8
SD1-CM	---	---	---	3	1	1	1	2	2	2	12
SD2-PC	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0
SD2-CB	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0
SD2-CM	---	1	2	---	5	1	---	---	2	2	13
PCR1-PC	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0
PCR1-CB	---	---	---	1	1	---	---	---	---	---	2
PCR1-CM	1	---	---	1	---	---	---	---	---	---	2
PMR1-PC	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0
PMR1-CB	---	---	---	---	1	---	1	1	---	1	4
PMR1-CM	---	---	1	---	---	---	---	2	1	---	4
PreCR1-PC	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0
PreCR1-CB	---	---	---	---	1	---	---	1	---	---	2
PreCR1-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	1	---	1
SPI1-PC	---	---	2	---	---	---	---	---	---	---	2
SPI1-CB	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0
SPI1-CM	---	---	1	---	---	---	---	---	---	---	1
TOTAL	2	3	6	6	17	6	2	8	9	9	68

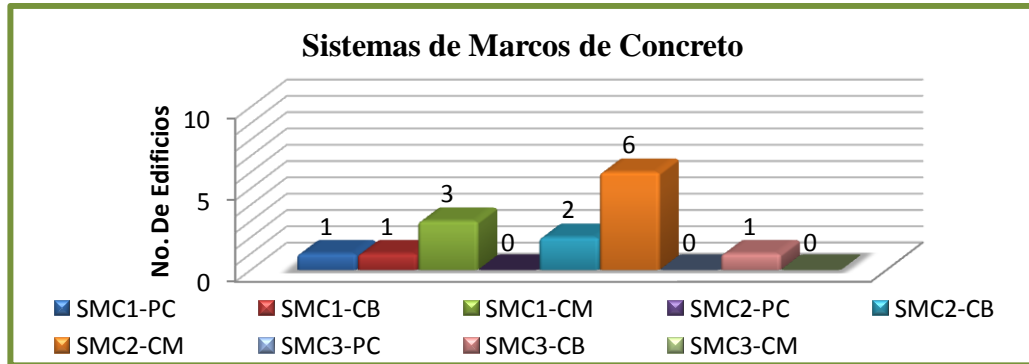


Figura 4. 3. Distribución Numérica de los edificios por Sistemas de Marcos de Concreto.

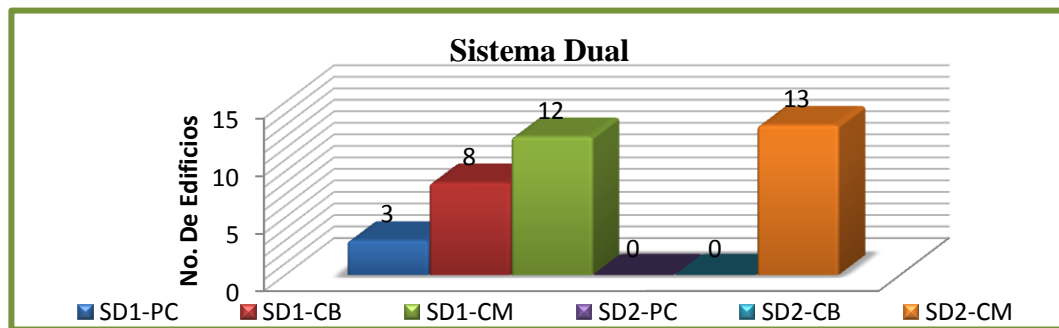


Figura 4. 4. Distribución Numérica de los edificios por Sistema Dual.

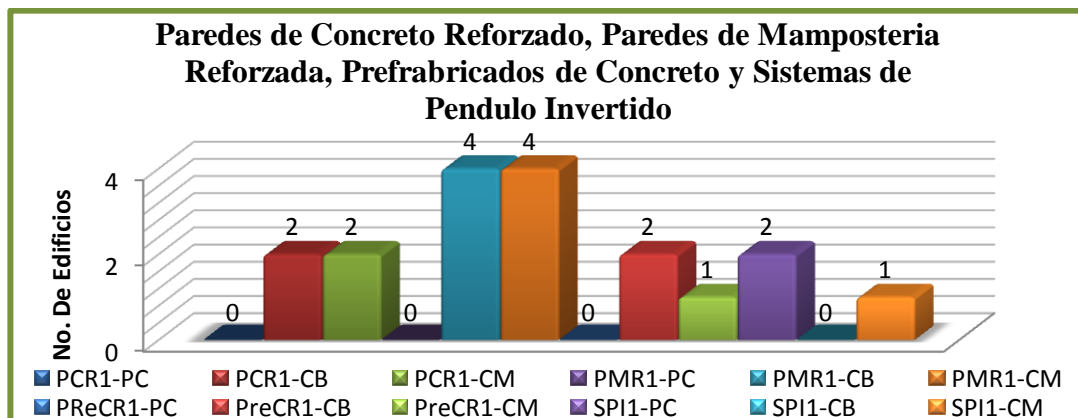


Figura 4. 5. Distribución Numérica de los edificios de Tipologías restantes.

4.3. DEFECTOS ESTRUCTURALES.

Según Astorga y Rivero (2009) la vulnerabilidad de las estructuras suele reflejarse a través de defectos que aparecen en las edificaciones, ocasionando múltiples efectos, desde pequeños daños y molestias para sus ocupantes, hasta grandes fallas que pueden causar el colapso de la edificación o parte de ella.

Los Defectos, son aquellas patologías relacionadas con las características intrínsecas de la estructura, son los efectos que surgen en la edificación producto de un mal diseño, una errada configuración estructural, una construcción mal elaborada, o un empleo de materiales deficientes o inapropiados para la obra. Un defecto en la edificación, puede traducirse en altas vulnerabilidades, dejando la estructura expuesta a sufrir daños y deterioros de magnitudes incalculables.

Considerando los defectos estructurales contemplados en el **Levantamiento de Información sobre Edificaciones Expuestas a Riesgo Sísmico** (MARN, 2011), y asesoramiento de Ingenieros Estructurales Expertos, se definieron los diferentes defectos estructurales que se detallan en la Tabla 4.8.

Tabla 4. 8. Defectos Estructurales.

DEFECTOS ESTRUCTURALES		
Defectos	Etiqueta	Descripción
Columna Corta	CC	Aquella que por su tamaño relativo a las demás del sistema al que pertenece, tendrá mayor rigidez relativa y podrá demandar mayores fuerzas, pero sin poder responder satisfactoriamente, por no haber sido diseñada para esas demandas.
Irregularidad en Planta	IP	Disposición asimétrica de los elementos estructurales en el plano horizontal, en relación con la forma y distribución del espacio arquitectónico; siempre y cuando la planta estructural de entrepisos o techos sea continua.
Irregularidad Torsional	IT	La torsión se produce por la excentricidad existente entre el centro de masa y el centro de rigidez.
Piso Débil	PD	Pisos vulnerables al daño sísmico debido a que tienen menor rigidez, menor resistencia o ambas cosas.
Entrepiso sin Vigas	ESV	Corresponde al caso de losas planas que transmiten las cargas directamente a las columnas, sin la ayuda de vigas.
Irregularidad en Elevación	IE	Disposición asimétrica de los elementos estructurales en el plano vertical.
Sobrepeso en el Edificio	SE	Concentración de cargas en algún nivel determinado del edificio que se puede deber a la disposición de elementos pesados, tales como equipos, tanques, bodegas, o archivos.
Golpeteo con otros Edificios	GCE	Se produce por el impacto de dos edificaciones construidas sin una adecuada separación entre ellas. Estos impactos provocan daño debido a la gran masa en movimiento que representa un edificio.
Columna Débil, Viga Fuerte	CD/VF	Se identifica cuando las dimensiones de las vigas son notablemente superiores a las de las columnas, faltando al requisito fundamental para el buen comportamiento de la estructura, que la disipación de energía se inicie en los elementos horizontales, por lo que se debe considerar en los diseños que las columnas sean más fuertes que las vigas.

4.3.1. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN:

Para la realización del procesamiento de los defectos estructurales, en el presente trabajo, se tomaron en cuenta el siguiente procedimiento para la recolección de datos de los defectos estructurales:

- Para poder definir los defectos estructurales, se tuvo que contar con la información dada por el trabajo de **Levantamiento de Información sobre Edificaciones Expuestas a Riesgo Sísmico (MARN, 2011)**, y por medio de estudios de ingenieros sísmicos, también se contó con el asesoramiento de ingenieros estructurales expertos.
- Estableciendo claramente los diferentes defectos estructurales, se realizó una visita de campo por las 68 edificaciones a evaluar en el Campus Central, y así poder identificar los posibles defectos que cada edificación pudiera tener. El periodo de visita a todas las edificaciones fue de una semana.
- Cada levantamiento de recolección de datos contó en su mayoría con una inspección visual detallada de cada estructura, además de entrevistas con algún experto con el propósito de conseguir información, que por la vía visual, no se podía obtener.

A continuación se detalla los criterios tomados en cada Defecto Estructural:

4.3.1.1. Columnas Cortas.

- Solamente fueron consideradas columnas cortas en aquellas edificaciones de más de un nivel o edificaciones de una planta con sistema de techo rígido.

- Se consideró columna corta en todas aquellas edificaciones en la que su entrepiso estaba conectado a 2 o más columnas de igual sección pero diferentes longitudes.
- Se tomó como columna corta todos aquellos casos en los cuales la columna estaba arriostrada más de un tercio de su altura en al menos una dirección.

4.3.1.2. Irregularidad en Planta.

- Se consideró irregularidad en planta cuando la distribución geométrica en planta de la edificación puede provocar concentraciones de esfuerzos en esquinas de unión.

4.3.1.3. Irregularidad Torsional.

- Aquellas estructuras donde la distribución de rigideces de los elementos portantes fue evidente (inspección visual) y sugería efectos torsionales durante un sismo, fue catalogada como una estructura con irregularidad torsional.
- Se tomo en cuenta aquellas edificaciones que tenían irregularidad en planta, ya que se vio la distribución de los elementos rígidos (por medio de planos) y eso hace que existan grandes excentricidades, lo cual las edificaciones están propensas a efectos torsionales.
- Se considero también aquellas edificaciones con diferentes sistemas estructurales en un mismo edificio, causando el efecto de “latigazo” que hace el la edificación vibre y tenga mayor deformaciones en el lado del sistema estructural “más débil”.

- La irregularidad torsional fue considerada solamente para estructuras de dos o más niveles o para estructuras de un nivel con techo rígido.

4.3.1.4. Piso Débil.

- Se considero aquellas estructuras donde fue evidente que la rigidez de uno de los pisos es menor que la de los pisos consecutivos superiores.

4.3.1.5. Entrepiso sin Vigas.

- Se clasificó como estructura con entrepiso sin viga a aquellos edificios donde no existe un elemento de concreto reforzado que transmita las cargas de la losa a las columnas.

4.3.1.6. Irregularidad en Elevación.

- Se considero aquellas edificaciones cuando la distribución geométrica en elevación puede provocar concentración de esfuerzos en las esquinas de unión de entrepisos o paredes.
- De manera visual se tomo la irregularidad a aquellas edificaciones que no mostraban de manera visual una forma simétrica.
- En aquellas edificaciones en los que a pesar de que la geometría es regular, existe una marcada diferencia de rigideces entre pisos sucesivos, lo cual puede generar fallas en los pisos de menor rigidez.

4.3.1.7. Sobrepeso en el Edificio.

- Aquella edificación que contenían grandes voladizos, ya que estos producen fuerzas de inercia verticales que sumadas a las fuerzas de gravedad podrían generar problemas.
- Se consideró este defecto ante cualquiera de los siguientes casos: bibliotecas u otros en segundos pisos o superiores en edificios que no fueron diseñados para tal uso.

4.3.1.8. Golpeteo con otros Edificios.

- Se consideró golpeteo en aquellos casos donde la junta mínima entre edificios es menor del 1% de la altura total del edificio más alto.
- En casos donde la junta entre edificios han sido rellenada con mortero, concreto o cualquier otro material rígido.

4.3.1.9. Columna Débil, Viga Fuerte.

- Se consideró para los casos donde se observó que la sección transversal de la viga de entrepiso es mayor que la sección transversal de la columna que la soporta.

4.3.2. DETALLES DE LOS POSIBLES DEFECTOS ESTRUCTURALES.

En la tabla 4.9 y 4.10 se detallan los posibles defectos estructurales de las 68 edificaciones por su respectiva Facultad.

Tabla 4. 9. Defectos Estructurales de las edificaciones del Campus.

DEFECTOS ESTRUCTURALES										
GEOUNDADES	TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES	COLUMNA CORTA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	IRREGULARIDAD TORSIONAL	PISO DEBIL	ENTREPISO SIN VIGAS	IRREGULARIDAD EN ELEVACION	SOBREPESO EN EL EDIFICIO	GOLPETEO CON OTROS EDIFICIOS	COLUMNA DEBIL, VIGA FUERTE
FACULTAD DE MEDICINA										
1001	SMC3-CB	---	SI	SI	---	---	---	---	---	---
1002	PCR1-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
FACULTAD DE ODONTOLOGIA										
2001	SD2-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
2002	SD1-CB	SI	---	SI	---	---	SI	---	---	---
2003	SD1-CB	---	---	---	---	---	---	---	---	---
FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA										
3001	PMR1-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
3002	SPI1-PC	---	---	---	---	---	---	---	---	---
3003	SPI1-PC	---	---	---	---	---	---	---	---	---
3004	SD2-CM	SI	---	SI	---	---	SI	---	---	---
3005	SPI1-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
3006	SD2-CM	SI	SI	---	---	---	---	---	---	---
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS										
4001	SD1-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
4002	SD1-CM	SI	---	---	---	---	---	---	---	---
4003	SD1-CB	SI	---	---	---	---	---	---	---	---
4004	SD1-CM	---	---	SI	---	---	SI	---	---	---
4005	PCR1-CB	---	---	---	---	---	---	---	---	---
4006	PCR1-CM	---	SI	SI	---	---	---	---	---	---
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA										
5001	SMC2-CM	---	SI	SI	---	---	---	---	---	---
5002	SD2-CM	---	---	SI	---	---	SI	---	---	---
5003	SD1-CB	SI	---	SI	---	---	SI	---	SI	---
5004	SMC1-CB	---	---	SI	---	---	---	---	SI	---
5005	SMC2-CB	---	---	SI	---	---	SI	---	SI	---
5006	SMC2-CB	---	---	SI	---	---	SI	---	SI	---
5007	SD2-CM	SI	---	---	---	---	---	---	---	---
5008	PCR1-CB	---	SI	SI	---	---	SI	---	---	---
5009	SD1-CB	SI	---	---	---	---	---	---	---	---
5010	SD1-CB	SI	---	---	---	---	---	---	---	---
5011	SD2-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5012	SD2-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5013	SD2-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5014	PMR1-CB	---	SI	SI	---	---	---	---	---	---
5015	PreCR1-CB	SI	---	---	---	---	---	---	---	---
5016	SD1-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5017	SD1-PC	SI	---	---	---	---	---	---	---	---

4.3.3. POSIBLES DEFECTOS ESTRUCTURALES POR TIPOLOGÍAS.

En esta sección se muestran los posibles defectos estructurales por las diferentes tipologías estructurales que se encontraron en el Campus, en total se definieron 27

tipologías que se muestran en la tabla 4.11. El color amarillo indica que no se encontraron edificaciones con esa tipología, lo cual hacen un total de 18 tipologías las que se evaluarán, cada tipología lleva la cantidad de edificios con dicha tipología y en la parte de los posibles defectos estructurales se ubican la cantidad de edificaciones que tienen esos defectos.

Tabla 4. 10. Defectos Estructurales de las edificaciones del Campus.

DEFECTOS ESTRUCTURALES										
GEOUNIDADES	TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES	COLUMNA CORTA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	IRREGULARIDAD TORSIONAL	PISO DEBIL	ENTREPISO SIN VIGAS	IRREGULARIDAD EN ELEVACION	SOBREPESO EN EL EDIFICIO	GOLPETEO CON OTROS EDIFICIOS	COLUMNA DEBIL, VIGA FUERTE
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMATICA										
6001	SD2-CM	SI	---	SI	---	---	SI	---	---	---
6002	SMC1-PC	SI	SI	SI	---	---	SI	---	---	SI
6003	SD1-PC	---	---	---	---	---	---	---	---	---
6004	SD1-CM	SI	SI	SI	---	---	---	---	---	---
6005	SD1-PC	SI	SI	SI	---	---	---	---	---	SI
6006	SMC1-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
FACULTAD DE JURISPRUDENCIA Y CIENCIAS SOCIALES										
7001	SD1-CM	---	SI	SI	---	---	SI	---	---	---
7002	PMR1-CB	---	SI	---	---	---	---	---	---	---
FACULTAD DE CIENCIAS ECONOMICAS										
8001	PMR1-CM	---	SI	SI	---	---	---	---	---	---
8002	PMR1-CM	---	SI	SI	---	---	---	---	---	---
8003	SMC2-CM	---	SI	---	---	---	---	---	---	---
8004	SD1-CM	SI	---	SI	---	---	---	---	---	---
8005	PreCR1-CB	SI	---	---	---	---	---	---	---	---
8006	SD1-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
8007	SD1-CB	SI	---	SI	---	---	---	---	---	---
8008	PMR1-CB	---	---	---	---	---	---	---	---	---
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES										
9001	PreCR1-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
9002	SMC2-CM	SI	---	SI	---	---	---	---	---	---
9003	PMR1-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
9004	SD1-CM	---	SI	SI	---	---	SI	---	---	---
9005	SD2-CM	SI	---	---	---	---	---	---	---	---
9006	SMC2-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
9007	SMC1-CM	---	SI	SI	---	---	SI	---	---	---
9008	SD2-CM	---	SI	SI	---	---	SI	---	---	---
9009	SD1-CM	---	SI	SI	---	---	---	---	---	---
EDIFICIOS ADMINISTRATIVOS										
10001	SD1-CM	---	SI	---	---	---	SI	---	---	---
10002	SMC2-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---
10003	SMC2-CM	---	SI	SI	---	---	SI	---	---	---
10004	SD1-CM	---	SI	SI	---	---	SI	---	---	---
10005	SD2-CM	---	SI	SI	---	---	---	---	---	---
10006	SD2-CM	---	SI	SI	---	---	---	---	---	---
10007	PMR1-CB	---	SI	SI	---	---	---	---	---	---
10008	SD1-CB	---	SI	SI	---	---	---	---	---	---
10009	SMC1-CM	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Tabla 4. 11. Posibles Defectos Estructurales por Tipologías.

DEFECTOS ESTRUCTURALES										
TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES	No. DE EDIFICACIONES	COLUMNA CORTA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	IRREGULARIDAD TORSIONAL	PISO DEBIL	ENTREPISO SIN VIGAS	IRREGULARIDAD EN ELEVACION	SOBREPESO EN EL EDIFICIO	GOLPETEO CON OTROS EDIFICIOS	COLUMNA DEBIL, VIGA FUERTE
SMC1-PC	1	1	1	1	---	---	1	---	---	1
SMC1-CB	1	---	---	1	---	---	---	---	1	---
SMC1-CM	3	---	1	1	---	---	1	---	---	---
SMC2-PC	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---
SMC2-CB	2	---	---	2	---	---	2	---	2	---
SMC2-CM	6	1	3	3	---	---	1	---	---	---
SMC3-PC	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---
SMC3-CB	1	---	1	1	---	---	---	---	---	---
SMC3-CM	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---
SD1-PC	3	2	1	1	---	---	---	---	---	1
SD1-CB	8	6	1	4	---	---	2	---	1	---
SD1-CM	12	3	6	7	---	---	5	---	---	---
SD2-PC	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---
SD2-CB	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---
SD2-CM	13	5	4	6	---	---	4	---	---	---
PCR1-PC	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---
PCR1-CB	2	---	1	1	---	---	1	---	---	---
PCR1-CM	2	---	1	1	---	---	---	---	---	---
PMR1-PC	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---
PMR1-CB	4	---	3	2	---	---	---	---	---	---
PMR1-CM	4	---	2	2	---	---	---	---	---	---
PreCR1-PC	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---
PreCR1-CB	2	2	---	---	---	---	---	---	---	---
PreCR1-CM	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---
SPI1-PC	2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
SPI1-CB	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---
SPI1-CM	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---

4.4. CURVAS DE CAPACIDAD Y CURVAS DE FRAGILIDAD.

Para calcular las estimaciones de daños para los diferentes tipos de modelos de edificios, se recopiló un conjunto de funciones que describen daños del edificio (DF), para así obtener un análisis de las curvas de capacidad y funciones de fragilidad.

El propósito del Trabajo de Graduación no fue desarrollar un análisis de las curvas de capacidad y de las curvas de fragilidad para cada uno de los tipos de modelos de edificios, sino más bien fue recopilar y seleccionar una función de daño (DF) que para el presente caso se utilizara la metodología HAZUS. El motivo por el cual se tomaron las curvas de capacidad y de fragilidad de HAZUS, fue porque el presente trabajo es de carácter preliminar, pero que se recomienda, para futuros estudios, el implementar la información de vulnerabilidad considerando las características propias de las estructuras del Campus Central. La tabla 4.12 muestra el emparejamiento de las tipologías estructurales en el Campus con las tipologías estructurales de HAZUS.

Las edificaciones en el Campus Central de la Universidad de El Salvador, en general, alcanzan hasta siete pisos. Los términos utilizados para los rangos de altura se definen en la sección 3.1.2.2 y son de baja altura (de 1 a 2 niveles), de media altura (de 3 a 5 niveles), y de gran altura (más de 6 niveles). Además de esto, otra sub-clasificación de edificios se realiza con respecto al tipo de código sísmico que se definen en la sección 3.1.2.1 que refleja directamente el nivel de diseño de edificios.

Tabla 4. 12. Emparejamiento de tipologías estructurales en el Campus Central con las tipologías estructurales definidas por HAZUS (FEMA 2003).

TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES DEL CAMPUS CENTRAL		TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES DE HAZUS	
Etiqueta	Descripción	Etiqueta	Descripción
SPI1	Sistemas de Péndulo Invertido	C1L	Estructuras de Marcos de Concreto resistente a Momentos
SMC1	Sistemas de Marcos de Concreto		
SMC2			
SMC3			
SD1	Sistemas Dual	PC2L	Estructuras de Marcos de Concreto Prefabricado con Paredes de Concreto Reforzado
SD2		PC2M	
PCR1	Paredes de Concreto Reforzado	C2L	Paredes de Concreto Reforzado
PMR1	Paredes de Mampostería Reforzada	RM2L	Estructuras de Paredes de Carga de Mampostería Reforzada con Diafragmas Prefabricados de Concreto
PreCR1	Prefabricado de Concreto Reforzado	PC1	Paredes de Concreto Prefabricado Precoladas

Por lo tanto, las nueve tipologías estructurales definidas inicialmente se subdividen en 16 tipos de modelos de edificios según rango de altura, código sísmico. La tabla 4.13 muestra los sistemas de clasificación de edificios emparejados y las funciones de daños (DF) proporcionada por HAZUS (FEMA 2003).

Esto proporciona una base para ejecutar los cálculos de riesgos y pérdidas utilizando el conjunto de DF: Una selección de curvas de capacidad y curvas de fragilidad que figuran en HAZUS para códigos sísmicos de diseño que se espera que represente las condiciones locales de construcción en el Campus Central de la Universidad de El Salvador.

Tabla 4. 13. Sub-clasificación de las 16 principales tipologías estructurales predominantes en el Campus Central de la Universidad de El Salvador y la asignación de los conjunto de DF por HAZUS (FEMA, 2003).

Sistemas Estructurales UES	Niveles	Código Sísmicos			Tipologías Estructurales	Asignando Curvas de Capacidad y Funciones de Fragilidad de HAZUS	
						Sistema Estructural	Códigos de USA
SMC	1-2	PC	CB	CM	SMC1-PC	C1L	PC
					SMC1-CB	C1L	LC
					SMC1-CM	C1L	MC
	3-5				SMC2-CB	C1M	LC
					SMC2-CM	C1M	MC
					>6	SMC3-CB	C1H
SD	1-2	PC	CB	CM	SD1-PC	PC2L	PC
					SD1-CB	PC2L	LC
					SD1-CM	PC2L	MC
	3-5				SD2-CM	PC2M	MC
PCR	1-2	---	CB	CM	PCR1-CB	C2L	LC
					PCR1-CM	C2L	MC
PMR	1-2	---	CB	CM	PMR1-CB	RM2L	LC
					PMR1-CM	RM2L	MC
PreCR	1-2	---	CB	CM	PreCR1-CB	PC1	LC
					PreCR1-CM	PC1	MC

Códigos sísmicos de USA: pre-código, PC; código bajo, LC, código moderado, MC.

4.4.1. OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD.

La obtención de los datos de las Curvas de Capacidad para las edificaciones del Campus Central de la Universidad de El Salvador, fueron tomadas de HAZUS-MR.

Según Lang, Molina, Lindholm y Balan (2011) las curvas de capacidad de HAZUS-MR se construyeron de acuerdo con las disposiciones que figuran en HAZUS en los Módulos

de Edificios de Ingeniería Avanzada (FEMA 2003) con una forma elástica lineal hasta el punto de fluencia (D_y, A_y), luego del punto de fluencia hasta el punto de capacidad última (D_u, A_u) la curva toma una pendiente logarítmica. Más allá del punto final de la curva de capacidad, la curva de capacidad se asume que se mantiene totalmente plástico. En la figura 4.6, se muestran los dos puntos: capacidad de fluencia (D_y, A_y) y capacidad última (D_u, A_u), que definen la curva de capacidad. El punto de fluencia representa el desplazamiento en el que la respuesta del edificio empieza a ser fundamentalmente no lineal. El punto de capacidad última representa el desplazamiento en el que el sistema estructural global ha alcanzado el mecanismo de colapso.

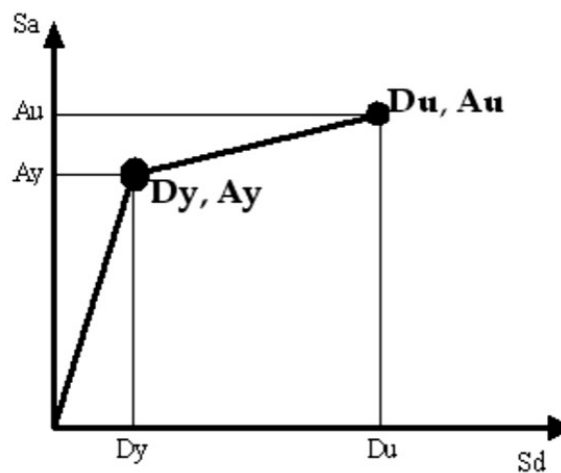


Figura 4. 6. Definición de la curva de capacidad. Fuente: Moreno y Bairán, 2010.

Dicho lo anterior, las curvas de capacidad pueden construirse de forma rápida a partir de los puntos de fluencia (D_y, A_y) y de los puntos de capacidad última (D_u, A_u), a continuación se da el procedimiento para obtener las curvas de capacidad:

1. La curva es lineal desde el origen $(0, 0)$ hasta el punto de fluencia (D_y, A_y).
2. La curva pasa por el punto de fluencia (D_y, A_y).

3. La curva toma una pendiente logarítmica que va desde el punto de fluencia (D_y , A_y) hasta el punto de capacidad última (D_u , A_u).
4. La curva pasa por el punto de capacidad última (D_u , A_u).

La Tabla 4.14 muestra los puntos de fluencia y capacidad última de las curvas de capacidad de las edificaciones del Campus Central. Los datos de puntos de fluencia y capacidad última fueron tomados de la Tabla 22 del Manual de SELENA.

Tabla 4. 14. Características de las curvas de capacidad para las tipologías en el Campus Central de la Universidad de El Salvador.

TIPOLOGIA UES	TIPOLOGIA USA	PUNTO DE FLUENCIA		CAPACIDAD ULTIMA	
		D_y (m)	A_y (m/s ²)	D_u (m)	A_u (m/s ²)
SMC1-PC	C1L-PC	0.0025	0.6082	0.0447	1.8345
SMC1-CB	C1L-LC	0.0025	0.5886	0.0373	1.8639
SMC1-CM	C1L-MC	0.0051	1.1772	0.0894	3.7278
SMC2-CB	C1M-LC	0.0074	0.4905	0.0732	1.5696
SMC2-CM	C1M-MC	0.0147	0.9810	0.1755	3.0411
SMC3-CB	C1H-LC	0.0127	0.1962	0.0958	0.6867
SD1-PC	PC2L-PC	0.0030	0.9810	0.0366	1.9620
SD1-CB	PC2L-LC	0.0030	0.9810	0.0305	1.9620
SD1-CM	PC2L-MC	0.0061	1.9620	0.0732	3.9240
SD2-CM	PC2M-MC	0.0132	1.6677	0.1054	3.2373
PCR1-CB	C2L-LC	0.0030	0.9810	0.0381	2.4525
PCR1-CM	C2L-MC	0.0061	1.9620	0.0914	4.9050
PMR1-CB	RM2L-LC	0.0041	1.2753	0.0406	2.6487
PMR1-CM	RM2L-MC	0.0081	2.6487	0.0975	5.1993
PreCR1-CB	PC1-LC	0.0046	1.4715	0.0457	2.9430
PreCR1-CM	PC1-MC	0.0091	2.9430	0.1097	5.8860

A continuación en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 muestran los espectros de capacidad para las 16 tipologías analizadas en el Campus Central. Las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 evidencian claramente que dependiendo del tipo de código la estructura presenta mayor resistencia.

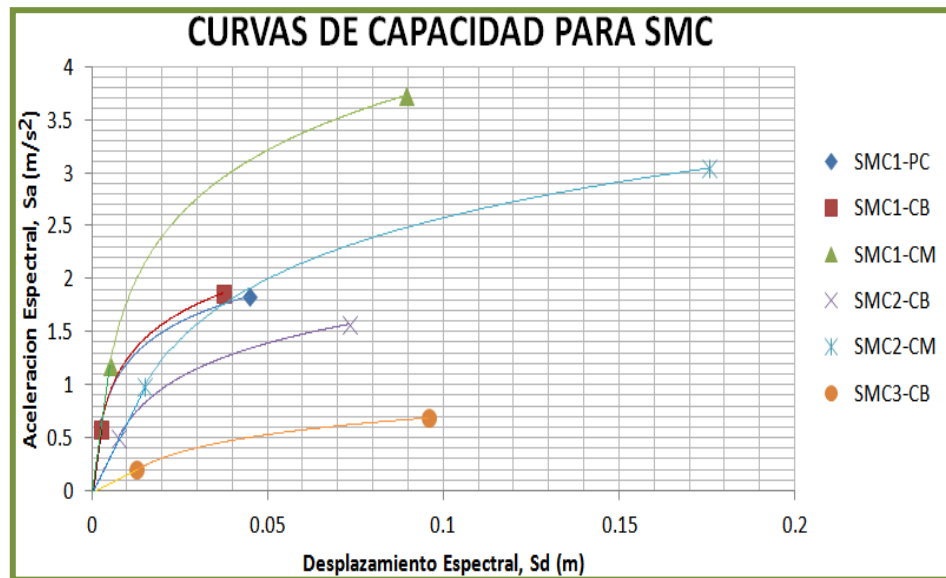


Figura 4. 7. Curvas de Capacidad para SMC en formato Sd-Sa.

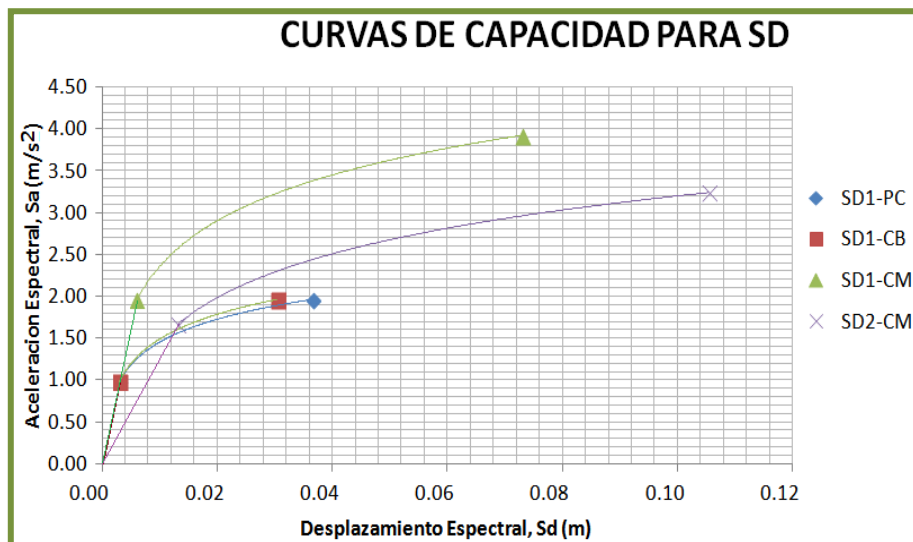


Figura 4. 8. Curvas de Capacidad para SD en formato Sd-Sa.

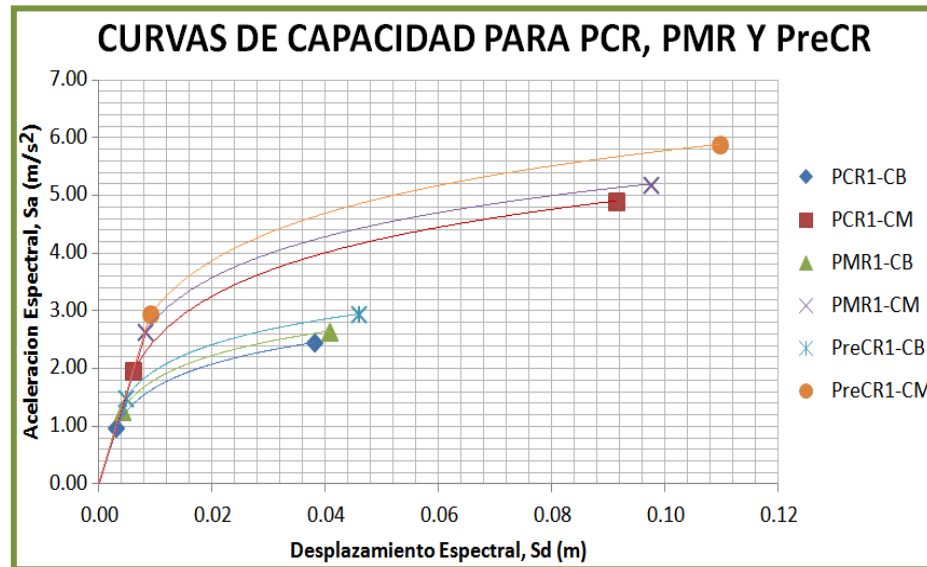


Figura 4. 9. Curvas de Capacidad para PCR, PMR y PreCR formato Sd-Sa.

4.4.2. OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD.

Según Bonett (2003) las curvas de fragilidad representan la probabilidad de que una estructura exceda un determinado estado de daño en función de un parámetro que define la intensidad sísmica. Estas curvas sirven para estimar el riesgo sísmico de grupos de edificios con características estructurales similares o de una estructura esencial (puente, planta nuclear, aeropuerto, líneas vitales). Las curvas de fragilidad se pueden generar mediante observaciones de campo, basándose en la opinión de expertos y utilizando métodos analíticos.

En este trabajo de graduación se ha adoptado la metodología HAZUS-MR que define estas curvas suponiendo que siguen una distribución de probabilidad tipo lognormal, pero estas curvas podrían no corresponder a las edificaciones del Campus Central, lo que requerirá hacer estudios a futuros para desarrollar las curvas correspondientes a las

edificaciones del Campus Central. La distribución de probabilidad lognormal, permite definir cada curva de fragilidad mediante dos parámetros: el valor medio y la desviación estándar. Los datos se proporcionan de la Tabla 5.9 en HAZUS-MR para los 5 estados de daño: Sin daño (*None*), Leve (*Slight*), Moderado (*Moderate*), Severo (*Extensive*), y Completo (*Complete*).

Para cada estado de daño dado, la curva de fragilidad proporciona la probabilidad de alcanzar o superar ese estado de daño como función de un parámetro que representa la acción sísmica sufrida por el edificio. En este caso dicho parámetro es el desplazamiento espectral S_d .

La figura 4.10 muestra este procedimiento y la cuantificación de los valores concretos de los umbrales de daño que se han fijado en base a la experiencia y a la opinión experta.

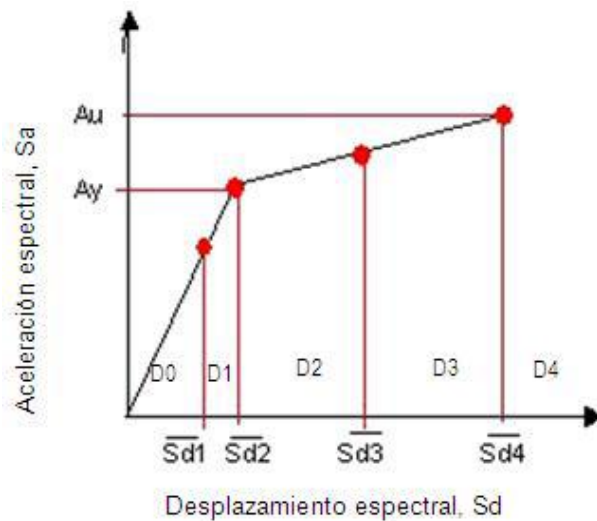


Figura 4. 10. Definición de los umbrales de los estados de daño a partir del espectro de capacidad. Fuente: Lagomarsino et al. (2002).

El daño leve es definido antes de alcanzar el punto de desplazamiento de fluencia. El daño moderado se define justo en el desplazamiento de fluencia. El daño severo es definido antes del punto de capacidad ultima. Finalmente, el daño completo es definido en el punto de la capacidad última.

La tabla 4.15 muestra los parámetros obtenidos para las 16 tipologías estructurales analizadas. En ella, se dan los valores medios y la desviación típica de la función lognormal.

Tabla 4. 15. Parámetros característicos (desviaciones típicas β i y valores medios Sdi) de las curvas de fragilidad para los tipologías estructurales analizadas para los 4 estados de daño.

TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES		LEVE		MODERADO		EXTENSO		COLAPSO	
		Valor Medio, Sd (m)	Desviación Estándar, β *	Valor Medio, Sd (m)	Desviación Estándar, β *	Valor Medio, Sd (m)	Desviación Estándar, β *	Valor Medio, Sd (m)	Desviación Estándar, β *
UES	USA								
SMC1-PC	C1L-PC	0.0183	0.98	0.0292	0.94	0.0732	0.90	0.1829	0.97
SMC1-CB	C1L-LC	0.0229	0.95	0.0366	0.91	0.0914	0.85	0.2286	0.97
SMC1-CM	C1L-MC	0.0229	0.89	0.0396	0.90	0.1067	0.90	0.2743	0.89
SMC2-CB	C1M-LC	0.0381	0.70	0.0610	0.74	0.1524	0.86	0.3810	0.98
SMC2-CM	C1M-MC	0.0381	0.70	0.0660	0.70	0.1778	0.70	0.4572	0.89
SMC3-CB	C1H-LC	0.0549	0.70	0.0879	0.81	0.2195	0.89	0.5486	0.98
SD1-PC	PC2L-PC	0.0183	1.04	0.0348	1.02	0.0902	0.99	0.2286	0.95
SD1-CB	PC2L-LC	0.0183	0.91	0.0386	0.97	0.1059	1.03	0.2743	0.87
SD1-CM	PC2L-MC	0.0137	1.00	0.0221	1.05	0.0551	1.12	0.1501	0.89
SD2-CM	PC2M-MC	0.0137	0.89	0.0239	0.92	0.0640	0.97	0.1801	1.04
PCRI-CB	C2L-LC	0.0147	1.14	0.0234	1.10	0.0587	1.10	0.1600	0.93
PCRI-CM	C2L-MC	0.0183	1.08	0.0292	1.03	0.0734	0.98	0.2002	0.96
PMRI-CB	RM2L-LC	0.0183	0.96	0.0318	1.00	0.0856	1.03	0.2400	0.88
PMRI-CM	RM2L-MC	0.0305	0.82	0.0528	0.79	0.1425	0.75	0.4001	0.93
PreCRI-CB	PC1-LC	0.0183	1.05	0.0292	1.07	0.0734	1.09	0.2002	0.91
PreCRI-CM	PC1-MC	0.0183	0.91	0.0318	0.96	0.0856	1.02	0.2400	0.93

*La desviación estándar no tiene unidades.

4.5. OBTENCION DE DATOS DE DAÑOS Y PÉRDIDAS.

Para la obtención de daños y pérdidas son necesarios dos modelos:

1. Modelo de Víctimas, y
2. Modelo de Pérdidas Económicas.

A continuación se detallan los parámetros necesarios en cada Modelo de daños y pérdidas.

4.5.1. MODELO DE PÉRDIDAS HUMANAS.

La base de datos para un modelo de pérdidas humanas incluyó el número de usuarios que reside en cada geounidad a analizar, así como, el porcentaje de población en los tres momentos del día y el porcentaje de niveles de severidad (gravedad) de población usuaria.

Una distribución de los números de la población en las 68 geounidades del Campus Central de la Universidad de El Salvador se da en la Tabla 4.16. En consecuencia, el cálculo del riesgo sísmico, sólo se llevó a cabo para los edificios de ocupación educativa, junto con la estimación de víctimas relacionadas.

Basándose en esta información, los criterios se establecieron para estimar las tasas de ocupación de las horas del día y de la noche, es decir, el porcentaje de personas que están en el interior (dentro del edificio) o el exterior (fuera del edificio) en función de las horas del día. En general, las estimaciones de pérdidas humanas se derivan para los tres momentos del día en que se espera que el terremoto ocurra, es decir, un tiempo de noche (2:00 am), un tiempo de día (10:00 am), y un escenario de tiempo promedio (2:00 pm).

Tabla 4. 16. Distribución de la población para las 68 geounidades del Campus.

GEOUNIDAD	POBLACION	GEOUNIDAD	POBLACION
1001	3314	6001	533
1002	150	6002	255
2001	80	6003	192
2002	275	6004	107
2003	103	6005	311
3001	7	6006	210
3002	279	7001	748
3003	6	7002	34
3004	417	8001	581
3005	129	8002	601
3006	1503	8003	1988
4001	40	8004	107
4002	19	8005	19
4003	522	8006	130
4004	204	8007	59
4005	105	8008	38
4006	86	9001	75
5001	782	9002	96
5002	88	9003	128
5003	94	9004	325
5004	35	9005	562
5005	68	9006	1045
5006	35	9007	325
5007	208	9008	1112
5008	0	9009	276
5009	110	10001	1047
5010	64	10002	563
5011	700	10003	214
5012	700	10004	364
5013	357	10005	219
5014	55	10006	34
5015	50	10007	39
5016	33	10008	23
5017	50	10009	30

Estos escenarios son considerados para producir el mayor número de pérdidas humanas en el Campus Central (la ocupación educacional). La tabla 4.17 da los porcentajes de personas en los tres momentos del día en el Campus Central.

Tabla 4. 17. Porcentajes de la población en los tres momentos del día del Campus Central.

Hora	Interior (%)	Exterior (%)
02:00 a.m.	0.00	100
10:00 a.m.	71	29
02:00 p.m.	49	51

Como el inventario de la base de datos disponible sólo incluye las edificaciones tipo educacional, los escenarios del tiempo del día y los escenarios de tiempo promedio se despreciaron y sólo el escenario de las 10:00 a.m. fue considerada para obtener las estimaciones de víctimas, esto se debe a que el 71% de la población educacional (Tabla 4.17) se mantiene en el interior de las edificaciones y se pueden generar mayores pérdidas humanas.

Las cifras de población del interior sirvieron como base para estimar el número de heridos en función de los cuatro niveles de severidad o gravedad que van desde leve (nivel de severidad 1), moderada (nivel de severidad 2), fuerte (nivel de severidad 3) para las lesiones mortales (nivel de severidad 4). La información detallada sobre la descripción de cada nivel de severidad se detalla a continuación en la tabla 4.18.

Tabla 4. 18. Descripción de de los Niveles de Severidad con sus respectivos ejemplos. Fuente: HAZUS-MR.

NIVELES	DESCRIPCION	EJEMPLOS
Severidad 1	Lesiones que requieren asistencia médica básica que podría ser administrado por para-profesionales. Estos tipos de lesiones requerirán vendajes u observación.	<ul style="list-style-type: none"> > Esguinces. > Cortes severos que requieren puntos de sutura. > Quemaduras Menores (primero o segundo grado en una pequeña parte del cuerpo). > Golpes en la cabeza sin pérdida de la conciencia.
Severidad 2	Lesiones que requieren un mayor grado de atención médica y el uso de la tecnología médica, como los rayos X o la cirugía, pero no se espera que progresar a una condición de amenaza para la vida.	<ul style="list-style-type: none"> > Golpe en la cabeza que causa la pérdida de la conciencia. > Huesos Fracturados. > Deshidratación o Exposición.
Severidad 3	Lesiones que presentan una condición de amenaza para la vida inmediata si no se trata adecuadamente y con prontitud.	<ul style="list-style-type: none"> > Órganos Perforados. > Otras Lesiones Internas. > Lesiones de la columna vertebral. > Síndrome de Aplastamiento.
Severidad 4	Instantáneamente muertos o mortalmente lesionado.	

4.5.1. MODELO DE PÉRDIDAS ECONÓMICAS.

En la actualidad, no hay un modelo económico detallado disponible para el Campus Central de la Universidad de El Salvador para que se pueda utilizar para determinar con precisión los costos de reparación y reemplazo para diferentes tipologías estructurales.

De acuerdo con la explicación de costos en las edificaciones del evaluador certificado con muchos años de experiencia, el costo promedio de las edificaciones educacionales en el Campus Central varía entre \$350 a \$600 por metro cuadrado. Este precio varía en

función de la tipología estructural del edificio y el tipo de detalles no estructurales del edificio. La tabla 4.19 muestra los valores de construcción dependiendo de la Tipología Estructural.

Tabla 4. 19. Los costos de construcción (dólares por metro cuadrado) dependiendo de la Tipología Estructural.

Tipologías Estructurales UES	\$ / m²	Tipologías Estructurales UES	\$ / m²
SMC1-PC	500	SD1-CM	500
SMC1-CB	500	SD2-CM	475
SMC1-CM	500	PCR1-CB	500
SMC2-CB	450	PCR1-CM	500
SMC2-CM	450	PMR1-CB	400
SMC3-CB	450	PMR1-CM	400
SD1-PC	500	PreCR1-CB	350
SD1-CB	500	PreCR1-CM	350

Estos valores se basan en los números promedios proporcionados por el profesional experto en avalúos, que se calibra de la siguiente forma tratando de abordar las condiciones específicas del Campus Central:

1. Como puede esperarse de que el precio de la construcción es mayor dependiendo del tipo de detalle no estructural, ya sea detalles de calidad normal a detalles de excelente calidad que le dan una mejor estética a la edificación, este precio puede llegar a aumentar hasta en un 50% del costo de construcción.
2. El costo relativo para la reparación de un cierto daño o la reconstrucción disminuye con la altura. Para considerar este efecto, los valores de reconstrucción a partir de 2 niveles se reducen en un 10%. Estas tasas de

aumento son casi similares a las aplicadas para el estudio de la pérdida sísmico para la ciudad de Bucarest (Lang et al. 2011).

Los costos de reparación o reconstrucción dependen naturalmente del estado de daño de la estructura. La Tabla 4.20 enumera los gastos relativos para la reparación y reconstrucción de los diferentes tipos de modelos de edificios. Dependiendo de la ocupación, estos coeficientes de costos se han tomado de la tabla 15.5 en HAZUS-MR.

Tabla 4. 20. Relaciones de costos para los diferentes tipos de modelos de edificios y los estados de daños según lo definido por HAZUS-MH.

Tipologías Estructurales UES	Relaciones de Costos			
	Leve	Moderado	Extenso	Completo
SMC1-PC	0.02	0.10	0.50	1.00
SMC1-CB	0.02	0.10	0.50	1.00
SMC1-CM	0.02	0.10	0.50	1.00
SMC2-CB	0.02	0.10	0.50	1.00
SMC2-CM	0.02	0.10	0.50	1.00
SMC3-CB	0.02	0.10	0.50	1.00
SD1-PC	0.02	0.10	0.50	1.00
SD1-CB	0.02	0.10	0.50	1.00
SD1-CM	0.02	0.10	0.50	1.00
SD2-CM	0.02	0.10	0.50	1.00
PCR1-CB	0.02	0.10	0.50	1.00
PCR1-CM	0.02	0.10	0.50	1.00
PMR1-CB	0.02	0.10	0.50	1.00
PMR1-CM	0.02	0.10	0.50	1.00
PreCR1-CB	0.02	0.10	0.50	1.00
PreCR1-CM	0.02	0.10	0.50	1.00

La tabla 4.21 muestra los costos de cada geounidad (edificación) que fue calculada del área constructiva de cada geounidad por el costo de cada tipología estructural.

Tabla 4. 21. Costo total de cada Geounidad del Campus Central.

GEOUNIDAD	COSTO TOTAL	GEOUNIDAD	COSTO TOTAL
1001	32,505,825.55	6001	8,798,748.69
1002	345,060.00	6002	1,293,873.57
2001	6,448,616.76	6003	2,006,245.91
2002	1,390,857.50	6004	2,846,001.26
2003	5,851,166.61	6005	3,233,339.44
3001	126,415.90	6006	1,693,952.24
3002	3,914,932.83	7001	16,966,634.24
3003	638,131.51	7002	331,760.38
3004	1,877,163.66	8001	963,360.82
3005	923,085.84	8002	963,360.82
3006	6,265,618.97	8003	5,599,688.00
4001	287,120.00	8004	1,405,068.40
4002	388,748.76	8005	264,920.46
4003	4,350,410.51	8006	2,345,842.60
4004	870,872.84	8007	638,655.60
4005	322,504.48	8008	330,345.96
4006	3,172,606.82	9001	364,578.87
5001	5,089,422.88	9002	3,389,541.61
5002	2,708,025.07	9003	766,375.00
5003	2,348,603.66	9004	1,422,301.66
5004	2,125,575.00	9005	9,619,111.25
5005	1,725,894.84	9006	4,825,273.50
5006	658,978.03	9007	1,356,032.65
5007	3,284,884.87	9008	3,188,700.69
5008	564,903.00	9009	3,872,427.20
5009	579,955.00	10001	22,319,109.93
5010	2,508,817.47	10002	5,630,807.16
5011	2,410,433.26	10003	5,564,080.67
5012	2,409,544.81	10004	4,885,327.45
5013	2,409,544.81	10005	5,475,999.39
5014	654,394.88	10006	5,848,680.56
5015	186,600.65	10007	1,629,596.22
5016	413,451.59	10008	4,024,897.52
5017	936,122.26	10009	4,173,190.35

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE

RIESGO SÍSMICO

5.1. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL RIESGO SISMICO.

La aplicación de la metodología utiliza dos enfoques para la estimación de los daños de un terremoto sufrido para un determinado número de tipos de modelos de edificios.

Según Crowley son dos enfoques:

1. El enfoque tradicional que está basado en parámetros empíricos tales como la intensidad macrosísmica para representar el movimiento sísmico del suelo,
2. El enfoque analítico el cual utiliza preferiblemente el espectro de respuesta en el dominio de la aceleración espectral-desplazamiento espectral. El método del espectro de capacidad se aplica para calcular el desplazamiento de demanda inelástica lateral de un edificios S_d , que es una medida de la extensión de los daños.

Con el fin de calcular el daño estimado para las edificaciones del Campus Central, el análisis de evaluación de riesgo sísmico se aplica a SELENA. En SELENA, se detallan tres métodos que pueden ser seleccionados por el usuario y que son incorporados para calcular las estimaciones de daños:

1. Método Tradicional del espectro de capacidad.
2. Método Modificado del Espectro de Respuesta de Desplazamiento-Aceleración (MADRS) y
3. Método del Coeficiente del Desplazamiento I-DCM.

Para el Trabajo de Graduación, se aplica el procedimiento de I-DCM ya que está diseñado para que pueda ser utilizado en el programa SELENA. El método de

coeficiente del desplazamiento se utilizará con el fin de calcular el punto de desempeño y determinar si el daño resultante es dependiente en el número de edificios dañados o área del edificio dañado. El resultado de los daños se medirá en metros cuadrados. Para la evaluación de las pérdidas humanas en el programa SELINA se usó el método básico.

5.2. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS DE DAÑOS Y PÉRDIDAS SÍSMICAS.

Según Lang, Molina, Lindholm y Balan (2011) el riesgo se define como el daño físico esperado y las pérdidas vinculadas que se calculan a partir de la convolución de la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a un cierto peligro (Organización de Ayuda para Desastres de las Naciones Unidas).

Para un análisis determinístico, el primer componente, el riesgo sísmico se refiere a los efectos movimiento en un sitio causado por un escenario de terremoto. Mientras que la exposición a largo plazo representa la disponibilidad y el inventario de las edificaciones, instalaciones de infraestructura, y la gente en el área de estudio sometido a un determinado evento sísmico (es decir, físico), la vulnerabilidad estructural representa la susceptibilidad de cada elemento individual (construcción, infraestructuras, etc.) a sufrir daños debido a los niveles de los terremotos. Esto da lugar a daños estructurales (y no estructurales), que implicaba directamente a las pérdidas económicas, así como las víctimas (personas). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los números reales de pérdidas financieras a menudo son mayores que los costos por reparación o

reconstrucción del edificio, como, por ejemplo, totalmente los edificios dañados tienen que ser demolidos y removidos antes de la nueva construcción que se lleve a cabo. Las relaciones de costos que tienen en cuenta estos costos adicionales se resumen en la Tabla 4.18 para las diferentes tipos de modelos de edificios, dicha tabla se muestra en la sección 4.4.2.

5.3. CALCULOS DE LOS ESCENARIOS DE RIESGO SISMICO.

A continuación se presentan los criterios que se utilizaron para definir y estimar los parámetros y modelos de entrada para el cálculo de riesgo sísmico.

El cálculo del riesgo sísmico se ha realizado mediante un análisis determinista zonificado. Ello ha requerido, definir las entradas de cálculo al riesgo, que esencialmente, son:

- Definición de un modelo de zonas sismogénicas para la región.
- Elaboración de parámetros como localización donde pueden ocurrir terremotos que afecten al Campus Central y diferentes magnitudes de momentos, Mw.
- Condiciones Locales para el Campus Central de la Universidad de El Salvador.

5.3.1. ESCENARIOS DE UN TERREMOTO DETERMINISTA PARA EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

En el siglo XX, tres grandes terremotos han sido provocados en San Salvador por la cadena volcánica de que los acontecimientos de 1965 y 1986 produjeron efectos desastrosos en El Salvador (sección 2.2.3). Para el presente trabajo de graduación se

utilizaron los eventos de 1965 y 1986 como escenarios deterministas para la calibración del modelo de pérdidas en el Campus Central. En el presente caso, sin embargo, los resultados de un estudio así determinado no serán del todo precisos, especialmente por la inadecuada información sobre la fuente sísmica disponible: los parámetros focales (coordenadas del epicentro, profundidad focal y magnitud) de los eventos de 1965 y 1986 tomados de diferentes estudios y organismos mostrando variaciones significativas. Además, cualquier comparación entre el daño producido y el daño previsto, no se puede hacer ya que el inventario de las edificaciones ha cambiado considerablemente después de los terremotos sufridos en 1965 y 1986. Debido a estas razones y para reducir la incerteza, una serie de escenarios de terremotos deterministas se definen que son capaces de producir un daño estructural significativo en el inventario de edificaciones del Campus Central.

Se supone que estos eventos de escenarios se limitan a la zona del Campus Central de la Universidad de El Salvador, para obtener los eventos de escenarios de terremotos se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

- Tres lugares donde se puede dar el hipocentro de un terremoto (Planes de Renderos, Ciudad Delgado y Mariona).
- Tres magnitudes diferentes, terremotos destructivos de magnitud baja (5.4), de magnitud media (6.0) y de magnitud alta (6.6).

En consecuencia, se realizaron 12 escenarios de terremotos que representan todas las posibles combinaciones de estos dos parámetros. Se tomaron escenarios de terremotos de fuente cercana ya que son más destructivos que terremotos de fuentes lejanas. La

tabla 5.1 muestra los detalles de los 12 escenarios de terremotos que se usaron para calcular los daños y pérdidas por medio del programa SELENA.

Tabla 5. 1. Detalles de las 12 combinaciones de escenarios de terremotos usados para calcular los daños y perdidas en el Campus Central.

COMBINACION	UBICACIÓN	MAGNITUD
1	Planes de Renderos	5.4
2		6.0
3		6.6
4	Ciudad Delgado	5.4
5		6.0
6		6.6
7	Mariona	5.4
8		6.0
9		6.6
10	Planes de Renderos	5.4
	Ciudad Delgado	
	Mariona	
11	Planes de Renderos	6.0
	Ciudad Delgado	
	Mariona	
12	Planes de Renderos	6.6
	Ciudad Delgado	
	Mariona	

5.3.2. CONDICIONES LOCALES PARA EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

Según Lang et al. (2011) en muchas partes del mundo se ha observado que los depósitos de suelos blandos y los puntos de relieve topográfico pueden amplificar y prolongar el movimiento sísmico, haciendo así mucho más dañina la sacudida. Dicho lo anterior, los

suelos en el Campus Central están representados por dos depósitos en los que se ha observado el efecto amplificador de la capa de ceniza volcánica y que esta cubre casi todo San Salvador, estos depósitos son:

- El primer depósito es una ceniza conocida como "tobas color café" originado por erupciones del volcán de San Salvador y alcanza espesores de 25 metros.
- El segundo depósito, según Schmidt-Thomé (1975) es un depósito más joven y menos consolidado, es la "tierra blanca", que proviene del centro volcánico que ahora está sumergido en el lago de Ilopango. Debido a su falta de compactación, la tierra blanca es la causa de mucha amplificación. El espesor de este depósito varía desde casi 50 metros en la orilla del lago hasta 2 ó 3 metros en las faldas del volcán de San Salvador.

El modelo de velocidad de ondas de corte revela que en suelos blandos las velocidades de onda de corte según la Norma Técnica de Diseño por Sismo de El Salvador varía entre $300 \text{ m/s} < V_s < 550 \text{ m/s}$. Debido a lo anterior se decidió representar la demanda sísmica en el Campus Central por el espectro de acuerdo con las disposiciones NEHRP utilizado por el Código Internacional de la Construcción IBC-2006 (Tabla 2 y 4 del Manual SELINA), el tipo de suelo C se puede asignar para el Campus Central, que se caracteriza por "Depósitos Profundos de Arena densa o de mediana Densidad" con espesores de varios decenas metros, así como las velocidades de onda corte promedios de V_{S30} que van desde 360 hasta 760 m/s.

El espectro de cada geounidad está anclado a los valores pronosticados de la PGA que se derivan del sistema de cómputo de árbol lógico y representan la media estadística de la

PGA predicho para cada ecuación de predicción del movimiento del terreno (GMPE) de acuerdo a su peso respectivo. Se supone que las condiciones del suelo son las mismas en todos las geounidades (tipo de suelo C). Por lo tanto, las variaciones previstas en los valores del movimiento del suelo y, las probabilidades de daño se presentan sólo en pequeñas variaciones.

5.4. RESULTADOS DE DAÑOS Y PÉRDIDAS PARA LOS DIFERENTES ESCENARIOS DETERMINISTAS.

5.4.1. FUNCIONES QUE DESCRIBEN LOS DAÑOS DE EDIFICIOS.

Para tener una idea acerca de la magnitud de estas variaciones individuales y de ser capaz de construir el árbol lógico de una manera más fiable, los cálculos de daños se realizan con SELENA para tomar el conjunto de las funciones de daños de HAZUS-MR. Esto se hace para las 12 combinaciones de escenario de terremotos con 3 diferentes magnitudes y con parámetros focales del evento de 1965, 1986 y un nuevo parámetro teniendo como foco en Mariona, San Salvador. La figura 5.1 muestra las pérdidas económicas medias para un escenario de evento de magnitud de momento (Mw) 6.6 con una combinación de ubicaciones simultanea en Mariona, Ciudad Delgado y Planes de Renderos (combinación 12), y la figura 5.2 muestra las pérdidas económicas medias para un escenario de evento de magnitud de momento (Mw) 6.6 con una ubicación en Ciudad Delgado (Combinación 6), ya que estos eventos de esa magnitud es la mayor que puede ocurrir en la zona de cadena volcánica y así mostrar las pérdidas del Campus Central.

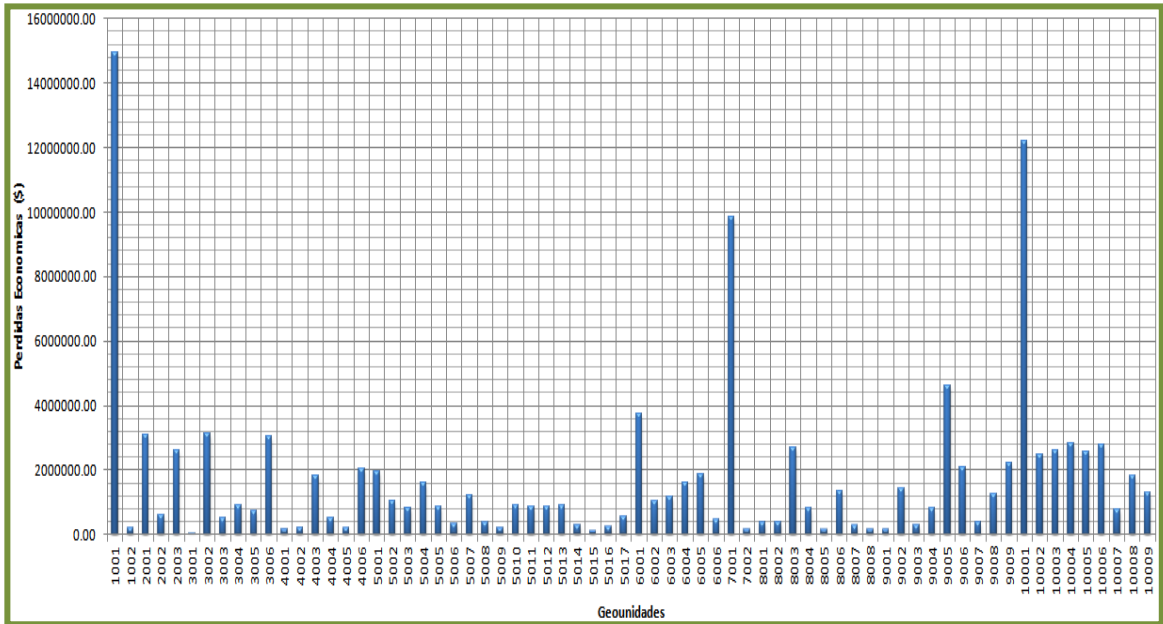


Figura 5. 1. Pérdidas Económicas Medias Total para una magnitud de momento (Mw) 6.6, tomando una Combinación 12.

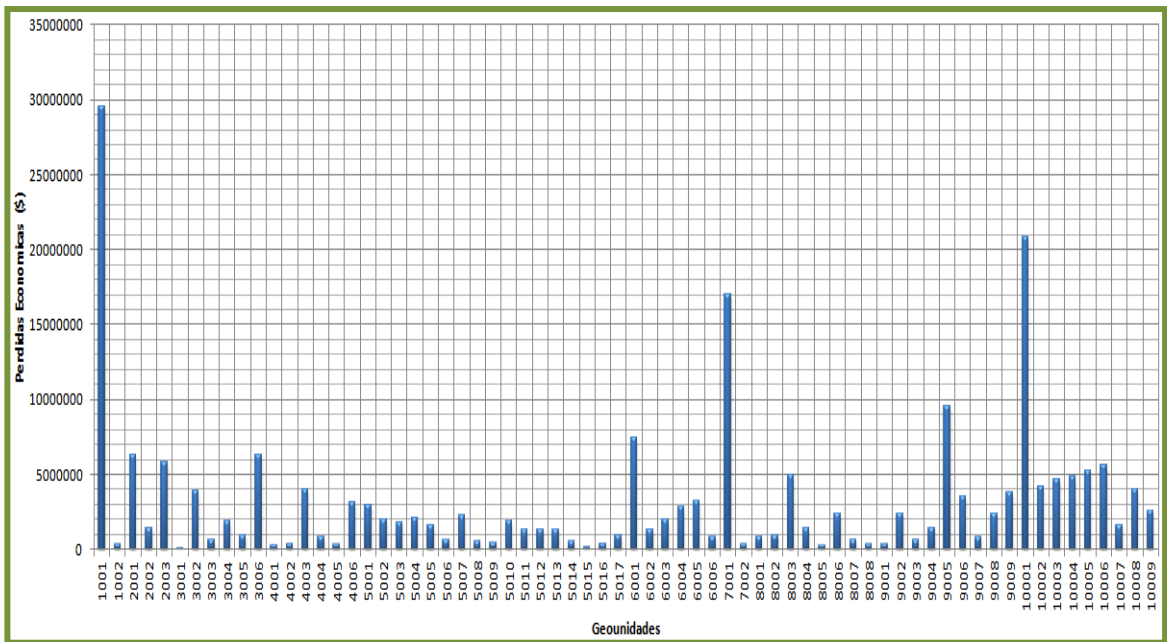


Figura 5. 2. Pérdidas Económicas Medias Total para una magnitud de momento (Mw) 6.6, tomando una Combinación 6.

Debido a esta razón, las estimaciones de daños y pérdidas están representadas por la pérdida económica total. La MDR se obtiene de la relación de la pérdida económica total con el costo total de cada edificación. MDR se puede calcular para una cierta área de estudio o una cierta tipología de edificios. Según Lang et al. (2011) una ventaja al calcular MDR consiste en el hecho de que no se requieren valores absolutos para los gastos de reparación o de reconstrucción estructural, por lo que es un parámetro establecido sin la influencia de los cambios en los costos de reconstrucción o de los precios de bienes raíces.

La figura 5.3 muestra la MDR para un escenario de evento de magnitud de momento (Mw) 6.6 con una combinación de ubicaciones simultanea en Mariona, Ciudad Delgado y Planes de Renderos (combinación 12).

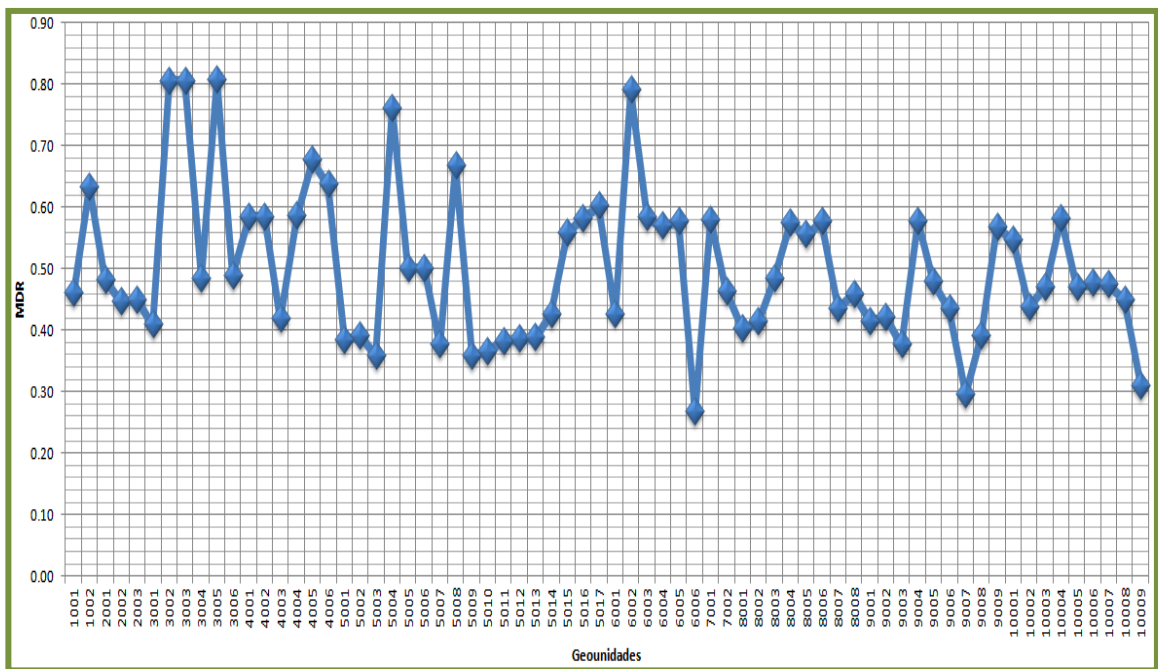


Figura 5. 3. MDR para una magnitud de momento (Mw) 6.6, tomando una Combinación 12.

La figura 5.4 muestra la MDR para un escenario de evento de magnitud de momento (Mw) 6.6 con una ubicación en Ciudad Delgado (Combinación 6).

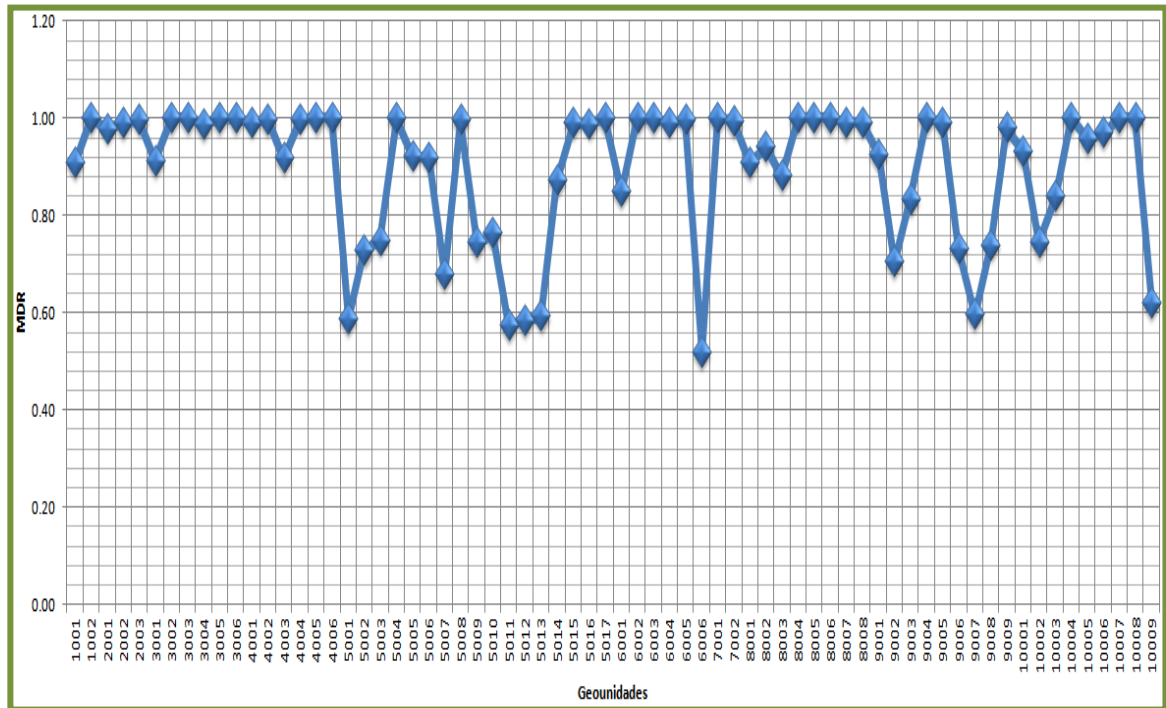


Figura 5. 4. Relación Media de Daños (MDR) para las edificaciones del Campus Central para un Mw 6.6, ubicado en Ciudad Delgado (Combinación 6).

La figura 5.4 muestra que la mayoría de edificaciones del Campus Central se encuentran en estado de colapso a lo hora de un evento sísmico de Mw 6.6 en Ciudad Delgado, lo cual ocasionaría grandes daños y pérdidas. Se decidió tomar la combinación 6 debido a que un evento de Ciudad Delgado ocasiona mayores pérdidas que en los Planes de Renderos y Mariona.

5.4.2. DAÑO GENERAL Y ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS EN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

Aun cuando el MDR es un parámetro claro para comprender los daños, es mejor presentar las pérdidas en valores totales de pérdidas económicas y víctimas para el Campus Central. La tabla 5.2 ofrece una visión general de las estimaciones previstas para las 12 combinaciones de escenarios de terremotos considerados. Además de las cifras absolutas de la pérdida económica totales y las personas afectadas en el Campus Central, se proporcionan los números relacionados, por ejemplo, el porcentaje de personas afectadas. Las pérdidas económicas y el MDR se sacan de la media de los escenarios del terremoto de las 12 Combinaciones de Escenarios de terremotos.

La tabla 5.2 muestra que aun cuando las funciones de daños de las tipologías estructurales fueran tomadas de HAZUS-MR, en manera general se observa que el terremoto que más daño y pérdidas causaría (independientemente de la magnitud) en el Campus Central es el que se ubica en Ciudad Delgado, el menos daños y pérdidas causaría es el que se ubica en los Planes de Renderos. Los elevados daños y pérdidas que se presentan en la tabla 5.2 para Ciudad Delgado se debe a que es el evento de escenario de terremotos que está más cerca del Campus Central y que estos daños y pérdidas se elevan dependiendo de la magnitud de momento.

Tabla 5. 2. Información general de predicciones de pérdidas económicas y humanas para las 12 combinaciones de escenarios de terremotos del Campus Central de la Universidad de El Salvador.

COMBINACION	MAGNITUD	PERDIDAS ECONOMICAS* (\$)	PERSONAS AFECTADAS**	
			% DE POBLACION	ABSOLUTAS
1	5.4	31,930,808.20	0.09	22
2	6.0	64403,116.70	0.36	86
3	6.6	88,985,724.70	0.61	147
4	5.4	191,556,766.20	2.73	651
5	6.0	204,925,488.00	3.03	724
6	6.6	213,549,688.60	3.20	764
7	5.4	66,770,687.00	0.40	96
8	6.0	147,269,926.70	1.79	427
9	6.6	47,832,129.70	0.19	45
10	5.4	96,687,931.86	1.08	257
11	6.0	138,791,714.10	1.72	411
12	6.6	116,761,377.50	1.33	318

*El valor de las pérdidas económicas fue el total de pérdidas en los edificios del campus Central.

**En las Personas Afectadas se incluyeron a las personas que sufren lesiones de cualquier tipo de severidad o gravedad, es decir, desde heridas leves a muertes instantáneas. Se asume un escenario diurno, es decir, hora local del terremoto a las 10:00 am.

*Población en el Campus Central de la Universidad de El Salvador de 23,865 usuarios.

5.4.3. DISTRIBUCIÓN DE DAÑOS Y PÉRDIDAS EN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

La base de datos reside en su resolución espacial en el que el Campus Central se subdivide en 68 geounidades, que sirven como la entidad geográfica más pequeña

(Geounidades), lo cual es una gran ventaja debido a que los daños y pérdidas están bien detallados, ya que cada uno de estas 68 geounidades cubre un edificio por geounidad. La figura 5.5 muestra la resolución grafica de las pérdidas económicas medias para un escenario de terremoto, tomando la combinación 12.

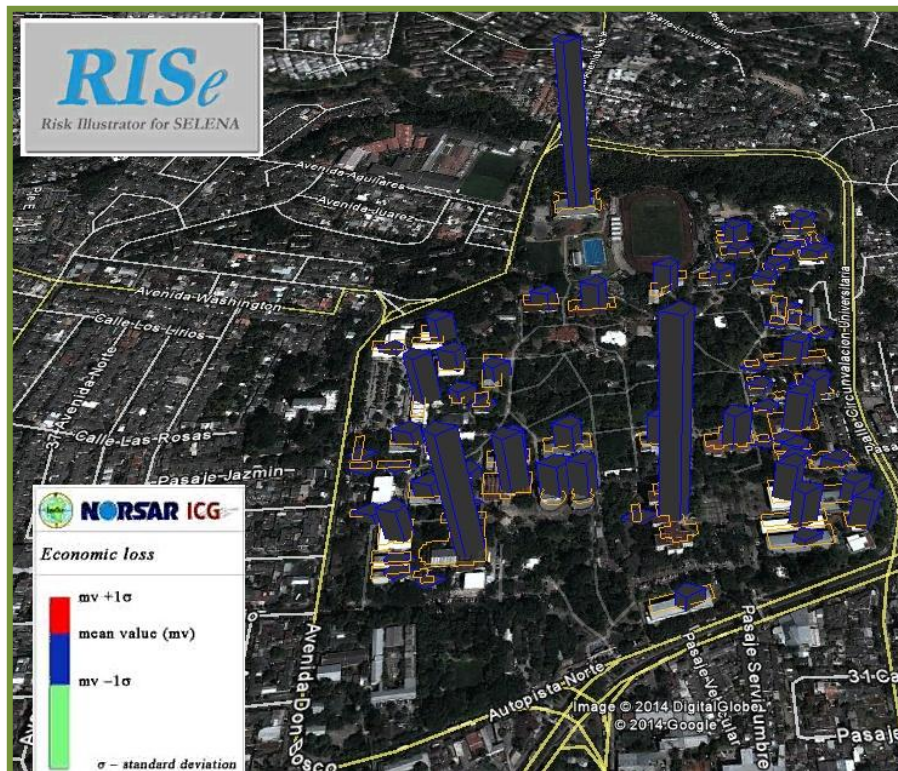


Figura 5. 5. Distribución Grafica de las pérdidas económicas medias para un escenario de terremoto, tomando la combinación 12. Fuente: Google Earth (2014), RISE.

Las edificaciones con geounidades 1001, 7001 y 10001 tienen mayores pérdidas que a los demás debido a que son edificaciones con un mayor área constructiva lo cual hace que su valor monetario se eleve. Como la extensión del área de estudio es pequeña con respecto a las distancias del epicentro observadas, las variaciones en las estimaciones del

movimiento sísmico son insignificantes y provocan menores variaciones en las estimaciones de daños.

Según Lang y Gutiérrez (2010) la resolución espacial de la base de datos se muestra con una ilustración geográfica de los resultados, por ejemplo, por medio de las herramientas basadas en Google Earth. Por lo tanto, se elige una manera convencional para comparar las estimaciones de daños (MDR) en las 68 geounidades. La figura 5.6 muestra la resolución grafica de las pérdidas humanas para un escenario de terremoto, tomando la combinación 12.

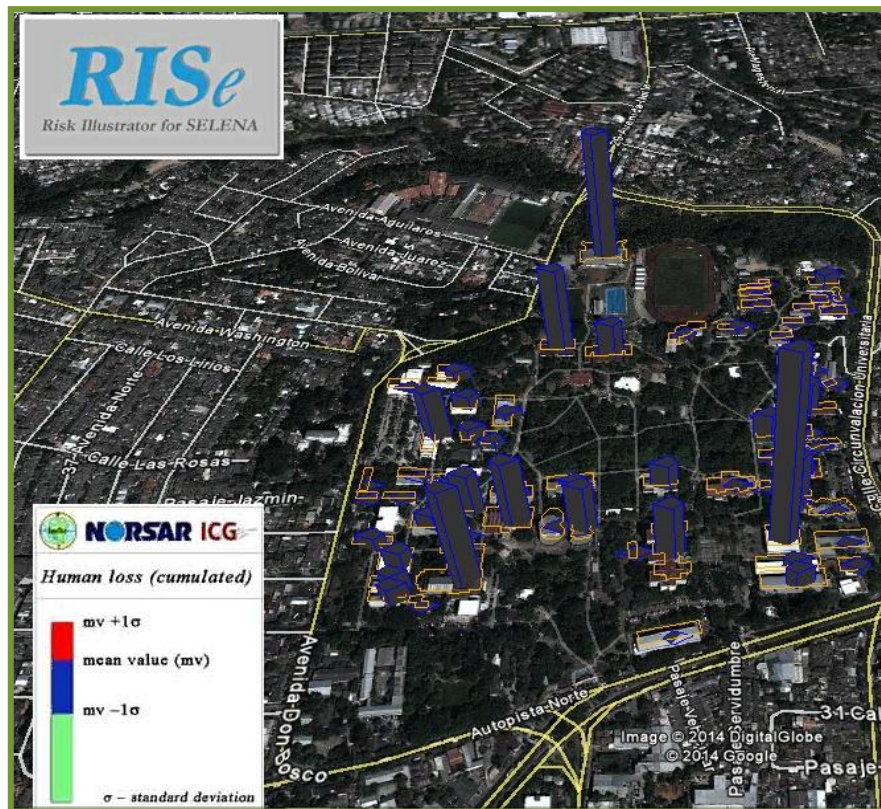


Figura 5. 6. Distribución Grafica de las pérdidas humanas acumuladas para un escenario de terremoto, tomando la combinación 12. Fuente: Google Earth (2014),

RISE.

La figura 5.6 muestra las edificaciones con geounidades 1001, 3006, 7001, 9008 y 10001 tienen mayores pérdidas humanas con respecto a las demás geounidades ya que son edificaciones con un mayor número de usuarios, lo que hace que las pérdidas humanas se eleven.

Para la mayoría de las 16 tipologías estructurales, sólo se exhiben pequeñas variaciones en MDR entre las geounidades. Básicamente, esto ilustra una distribución homogénea de la respectiva tipología de edificio en toda el área de estudio, mientras que las pequeñas desviaciones son relacionadas principalmente con los diferentes niveles de las estimaciones de movimientos sísmicos.

La tabla 5.3 muestra en detalle las pérdidas económicas y humanas de las 68 geounidades del Campus Central de la Universidad de El Salvador para una magnitud de momento (M_w) 6.6, tomando una combinación de ubicaciones simultáneas en Mariona, Ciudad Delgado y Planes de Renderos (Combinación 12).

La tabla 5.3 muestra que las edificaciones con geounidades 3001, 7001, 9005 y 10001 tienen pérdidas económicas altas, ya que estas edificaciones tienen un área constructiva muy alta, también se debe al tipo de código y al tipo de sistema estructural que influye en la resistencia de cada una de las 68 edificaciones; también se muestra que hay edificaciones que no tienen pérdidas humanas y en las edificaciones en las hay se debe a que tiene mucha concentración población usuaria, ya que entre más población usuaria tenga una edificación, mayor pérdidas humanas habrán.

En Anexos A se muestran las tablas de porcentaje de pérdidas económicas con respecto al costo total (MDR) de cada geounidad del Campus Central para las Combinación 12.

Tabla 5. 3. Pérdidas Económicas y Humanas del Campus Central de la Universidad de El Salvador, tomando la Combinación 12.

GEOUNIDAD	DOLARES	PERSONAS AFECTADAS	GEOUNIDAD	DOLARES	PERSONAS AFECTADAS
1001	14,957,492.86	136	6001	3,751,049.24	20
1002	218,380.67	0	6002	1,021,859.37	2
2001	3,105,990.20	1	6003	1,169,612.76	1
2002	620,203.05	4	6004	1,618,014.21	1
2003	2,625,652.36	1	6005	1,865,055.38	2
3001	51,640.37	0	6006	451,443.87	0
3002	3,151,047.96	3	7001	9,825,511.01	55
3003	513,814.18	0	7002	153,505.13	0
3004	907,197.71	15	8001	386,953.42	8
3005	744,510.12	1	8002	397,351.00	8
3006	3,057,673.87	207	8003	2,700,728.10	26
4001	167,580.82	0	8004	807,069.86	1
4002	226,957.83	0	8005	147,046.07	0
4003	1,817,657.60	13	8006	1,350,695.35	2
4004	509,627.02	4	8007	277,467.88	0
4005	217,830.89	0	8008	151,346.79	0
4006	2,019,396.12	0	9001	151,063.35	0
5001	1952,346.13	2	9002	1,428,393.98	0
5002	1058,656.49	0	9003	287,668.89	0
5003	840,916.39	0	9004	820,132.50	10
5004	1,616,688.40	0	9005	4,601,927.91	28
5005	864,196.75	0	9006	2,093,810.62	5
5006	329,307.90	0	9007	400,037.70	2
5007	1,233,190.21	2	9008	1,245,880.25	70
5008	376,795.20	0	9009	2,198,518.81	7
5009	207,493.43	0	10001	12,186,201.22	96
5010	915,494.33	0	10002	2,463,335.92	2
5011	871,338.69	2	10003	2,613,706.09	0
5012	878,748.34	2	10004	2,842,242.97	13
5013	885,396.95	0	10005	2,574,019.34	4
5014	278,449.87	0	10006	2,780,159.15	0
5015	104,238.75	0	10007	771,550.74	0
5016	240,224.87	0	10008	1,808,750.42	0
5017	562,616.26	0	10009	1,290,515.65	0

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES.

- Durante la recopilación de la base de datos se seleccionaron parámetros considerados como más influyentes en el comportamiento sísmico de las edificaciones, prestando atención a los principales defectos estructurales que generarían daños estructurales durante eventos sísmicos.
- Los defectos estructurales influye en el comportamiento sísmico de las edificaciones y es un factor muy importante a considerar, especialmente en tipologías que suponen una considerable cantidad de defectos y que tienen un bajo comportamiento durante un evento sísmico.
- Aun con las limitaciones sobre funciones de daños tomados de HAZUS-MR, los resultados obtenidos son ya valiosos para efectos de toma de decisiones para mitigación y prevención de riesgo sísmico.
- Posiblemente la gran diferencia de los conjuntos de funciones de daños de Estados Unidos con las construcciones del país revela una incertidumbre fundamental. Esto representa un fuerte estímulo para las mejoras a través del modelo, la correlación de los resultados del modelo con la prueba experimental, así como la experiencia de los daños del terremoto real.
- En el trabajo de graduación, se usa la herramienta de fuente abierta SELINA. SELINA está abierto a cualquier entrada definida por el usuario y por lo tanto puede ser personalizado para el banco de pruebas del Campus Central.
- En total, 12 combinaciones de escenarios de terremotos se han investigado con variaciones en la magnitud de momento (5.4, 6.0 y 6.6) y de ubicación, siendo

estas Planes de Renderos, Ciudad Delgado y Mariona, y se escogieron porque en estos lugares ya se ha producido un evento sísmico y es probable de que ocurra uno en esos 3 lugares.

- Los terremotos generados por el evento de escenario en Ciudad Delgado tiene un mayor potencial de generar daños y pérdidas en el Campus Central.
- Los resultados de daños y pérdidas son mayores en edificaciones de mayor área constructiva y en edificaciones de mayores usuarios.

6.2. RECOMENDACIONES.

- El presente estudio de riesgo sísmico, debe de considerarse como lo dice el titulo un estudio preliminar, y debe de ser complementada con estudios de amenaza sísmica, funciones de daños propios del Campus Central de la Universidad de El Salvador.
- Los resultados del análisis de riesgo sísmico, muestran las infraestructuras que están más propensas a las condiciones de riesgo, permitiendo priorizar aquellas edificaciones que deben de ser estudiadas en detalle para evitar un desastre a la hora de un evento sísmico.
- Los eventos de escenarios de los 3 lugares epicentrales pueden ser utilizados para la definición de planes de respuesta ante emergencias y pueden ser incorporados para la generación de medidas de mitigación y reducción del riesgo al momento de un sismo.

- El presente estudio da los lineamientos necesarios para darle continuidad al estudio de riesgo, lo cual es necesario poder obtener las curvas de capacidad y curvas de fragilidad para las tipologías estructurales del Campus Central de la Universidad de El Salvador
- Será importante realizar estudios de evaluaciones futuras de daños y de pérdidas para desarrollar funciones de daños que se adaptan a las condiciones locales de los edificios del Campus Central.
- El darle seguimiento y mejorar cada cierto tiempo el presente trabajo de graduación, permitirá obtener una mejor planificación de prevención y mitigación ante un evento sísmico.
- Con respecto al presente trabajo, se deben de tener futuras investigaciones tales como:
 1. Definiciones de escenarios de Amenaza,
 2. Mejor detalle de la base de datos de inventario de las edificaciones en términos de unidades geográficas,
 3. Generación de Modelos de funciones de daños para las tipologías estructurales del Campus Central;
 4. Generación de espectros de capacidad para determinar la amplificación del suelo ante un evento sísmico.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- Aguilar, A., 2011, Evaluación Probabilista de Riesgo Sísmico de edificios de zonas urbanas, Barcelona.
- Aki, K., Lee, W. H. K., 2003, Glossary of interest to earthquake and engineering seismologists. En Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P.C., Kisslinger, C. (Eds), International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, (pp. 1793-1856).
- Alfaro, C.S., A.S. Kiremidjian y R.A. White, 1990, Seismic zoning and ground motion parameters for El Salvador. Report No. 93, The John A. Blume Center for Earthquake Engineering Research, Stanford University.
- Álvarez G., J., 1982, Informe técnico sobre aspectos sismológicos del terremoto en El Salvador, del 19 de junio de 1982. Centro de Investigaciones Geotécnicas, Ministerio de Obras Públicas, San Salvador.
- Arévalo P., J. C. y Bermúdez F., W. F, 2007, Niveles de Daño a partir de un Análisis Pushover para una Estructura Aperticados de Concreto Reforzada, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Arteta, C. y Vásquez, J., 2003, Monografías: Manual de evaluación y diagnóstico de vulnerabilidad sísmica de estructuras existentes de pórticos de concreto, Universidad del Norte.
- Astorga, A., Rivero, P., 2009, Patologías en las Edificaciones, Centro de Investigación en Gestión Integral de Riesgos, CIGIR, Venezuela.

- ATC-13 (1985). Earthquake Damage Evaluation. Data for California; Applied Technology Council; Redwood City, California, 492 pp.
- Barbat, A. H., Pujades, L., 2004, Evaluación de la Vulnerabilidad y del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas, Barcelona, España.
- Bertero, V.V., 1994, Major issues and future directions in earthquake-resistant design. Proceedings, Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, vol.11, 6407-6444.
- Bilham, R., 1988, Earthquakes and urban growth. Nature 336, 15 December, 625-626.
- Bommer, J.J. y N.N. Ambraseys, 1989, The Spitak (Armenia, USSR) earthquake of 7 December 1988: a summary engineering seismology report. Earthquake Engineering and Structural Dynamics.
- Bommer, J.J., 1996, Programa Salvadoreño de investigación sobre desarrollo y medio ambiente. PRISMA, 18.
- Bommer, J. J., Salazar, W., Samayoa, R., 1998, Riesgo Sísmico en la Región Metropolitana de San Salvador. PRISMA.
- Bonett, R. L., 2003, Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. 474 pp.
- Bray, J., Frost, D., 2010, Geo-engineering Reconnaissance of the 2010 Maule, Chile Earthquake. GEER Association Report No. GEER-022, Versión 1, 272 pp.

http://www.geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/Maule_Chile_2010/GEER_Report_Chile_2010_final.pdf (Consultado el 15 de septiembre de 2010).

- Caballero, A. R., 2007, Determinación de la Vulnerabilidad Sísmica por medio del Método del Índice de Vulnerabilidad en las estructuras ubicadas en el Centro Histórico de la Ciudad de Sincelejo, utilizando la tecnología del Sistema de Información Geográfica, Colombia.
- Cardona, O. y Hurtado, J., 1990, Propuesta metodológica para los análisis de vulnerabilidad. Informe de consultoría del proyecto UNDRO/ ACDI/ONAD para la Mitigación de Riesgos en Colombia. Santiago de Cali.
- Coburn, A., Spence, R., 2002, Earthquake protection. John Wiley.
http://books.google.es/books?id=MjUdkHJ_wHcC&printsec=frontcover&hl=en&source=gbp_navlinks_s#v=onepage&q=&f=false (Consultado el 20 de enero de 2008).
- Crowley, H., Pinho, R., Bommer, J.J., 2004, A Probabilistic Displacement-Based Vulnerability Assessment Procedure for Earthquake Loss Estimation. Bull Earthq Eng 2:173-219.
- Dewey, J.W. & Suárez, 1991, Seismotectonics of the Middle America. In: Slemmons et al. eds. Neotectonics of North America, Geol. Soc. Am. Decade Map, vol. 1, 323-338.
- Dowrick, D.J., 1987, Earthquake resistant design for engineers and architects. Second edition, Wiley.

- EERI, 2004, Learning from earthquakes. The EERI Learning from Earthquakes Program: A Brief Synopsis of Major Contributions, Oakland, California: Earthquake Engineering Research Institute, 29 pp.
- Eguchi, R. T., Goltz, J. D., Taylor, C. E., Chang, S. E., Flores, P. J., Johnson, L. A., y otros, 1998, Direct economic Losses in the Northridge Earthquake: A Three-Year Post-Event Perspective. Earthquake Spectra. Volume 14, No.2. Earthquake Engineering Research Institute (EERI).
- Elnashai, A.S., J.J. Bommer y A.Y. Elghazouli, 1989, The Loma Prieta (Santa Cruz, California). Earthquake of 17 October 1989. ESEE Research Report No. 89-11, Imperial College, Londres.
- Erdey, C. K., 2007, Earthquake Engineering: application to design, John Wiley & Sons; Hoboken, New Jersey, 428 pp.
- Faccioli, E., C. Battistella, P. Alemani y A. Tibaldi, 1988, Seismic microzoning investigations in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador, following the destructive earthquake of October 10, 1986. Proceedings, International Seminar on Earthquake Engineering, Universität Innsbruck, Austria.
- FEMA 366, 2000, Hazus® 99 Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC. 40 pp.
- FEMA, 2003, HAZUS-MR: Multi-Hazard Loss Estimation Methodology. Federal Emergency Management Agency, Washington.

- FEMA, 2009, Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model, Advance Engineering Building Module, Technical and Usre's. Federal Emergency Magnagement Agency and National Institute of Building Sciences. Whashington D.C.
- Fournier d'Albe, E., 1988, An approach to earthquake risk management. Engineering Strcutures.
- Giovinazzi, S., 2005, The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis. Doctoral Thesis, Technical University of Braunschweig, and University of Florence, 222 pp.
- Grases, J., 1994, Terremotos destructores del Caribe, 1502-1990. UNESCO-RELACIS. Montevideo, Uruguay.
- Grossi, P., Kunreuther, H., 2005, Catastrophe modeling: a new approach to managing risk. Huebner International Series on Risk, Insurance, and Economic Security. New York, Springer, 245 pp.
- Grünthal, G., Thieken, A.H., Schwarz, J., Radtke, K.S., Smolka, A., Merz, B., 2006, Comparative Risk Assessment for the City of Cologne – Storms, Floods, Earthquakes. Natural Hazards, 38: 21-44.
- Guimet, J., 2002, Valoración catastral de inmuebles urbanos. Descripción práctica. Barcelona. Ediciones UPC. 232 pp.
- Hernández, U. M., 2002, Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas. Barcelona, España.

- Jaramillo, J.D., 1997, “Programa para el Cálculo de Perdidas por Sismo (PERCAL ver.6)”. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad EAFIT. Medellín.
- Jaramillo, A., 2006, Memorias de clase de Maestría en Ingeniería Civil. Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.
- Kattan, C., Menijvar, L., Castellanos, R., Ramos, J., Ayala, N., Méndez, P., 2012, Modelación Probabilistas de Escenarios de Riesgo Sísmico para el Área Metropolitana de San Salvador, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, MARN.
- Khater, M., Scawthorn, C., Johnson, J.J., 2003, Loss estimation. En Chen W. y Scawthorn, Ch. (Eds.), Earthquake Engineering Handbook, (pp. 31-1,31-23) USA: CRC Press.
- Kleindorfer, P., Grossi, P., Kunreuther, H., 2005, The impact of mitigation on homeowners and insurers: an analysis of model cities. En Grossi, P y Kunreuther, H. (Eds.), Catastrophe modeling: a new approach to managing risk, (pp. 167-188), USA: Springer.
- Kunreuther, H., Pauly, M., 2006, Rules rather than discretion: Lessons from Hurricane Katrina. Journal of Risk and Uncertainty; 33:101-116.
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., Podestà, S. y Resemini, S., 2002, WP4-Vulnerability Assesment of Current Buildings: I Level Methodology for the Vulnerability Assessment of Current Buildings and Guidelines for the Implementation. RISK-UE project: an Advanced Approach to Earthquake Risk

Escenarios with Application to Different European towns. Contract No. EVK4-CT-2000-0014. 28 pp.

- Lang, D., Molina, S., Lindholm, C., 2008, Towards near realtime Damage Estimation using a CSM-based tool for Seismic Risk Assessment. *J Earthq Eng* 12:199–210.
- Lang, D., Gutiérrez, F., 2010, RISE, A Google Earth-based tool to Illustrate Seismic Risk and Loss Results. Technical note. *Earthquake Spectra* 26(1):295–307.
- Lang, D., Molina, S., Lindholm, C., Balan, S., 2011, Deterministic Earthquake Damage and Loss Assessment for the City of Bucharest, Romania.
- Lara, M.A., 1987, History of construction practices in El Salvador. *Earthquake Spectra*.
- Lomnitz, C. & R. Schulz, 1966, The San Salvador earthquake of May 3, 1965. *Bull. Seism. Soc. America*, 56, 561-575.
- Lopez, M., Bommer, J.J. y Pinho, R., 2004, Seismic Hazard Assessments, Seismic Design Codes and Earthquake Engineering in El Salvador, in Rose, W.I., et al., eds., *Natural Hazards in El Salvador*, Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 375, p.p 301.
- Lungo, M., F. Oporto y R. Chinchilla, 1996, Proceso de urbanización y sostenibilidad en El Salvador. *PRISMA*, 17.
- MARN, 2011, Levantamiento de Información sobre Edificaciones Expuestas a Riesgo Sísmico, San Salvador.

- Marroquín, G. y Benito, M. B., 2009, Evaluación de la Amenaza Sísmica en El Salvador.
- McGuire, R. K., 2004, Seismic Hazard and Risk Analysis, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- Mena, U., 2002, Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 234 pp.
- Meyer-Abich, H., 1952, Terremotos de Jucuapa en El Salvador (América Central), 6-7 de mayo de 1951. Comunicaciones del Instituto Tropical de Investigaciones Científicas, Universidad de El Salvador.
- Miranda, E., 1999. “Approximate Seismic Lateral Deformation Demands in Multistory Buildings”, Journal of Structural Engineering.
- Molina, S., NORSAR y Universidad de Alicante, SELENA, 2012, User Manual for the Earthquake Loss Estimation Tool: SELENA v6.0.
- Murphy, J.R. y L.J. O’Brien, 1977, The correlation of peak ground acceleration amplitude with Seismic intensity and other physical parameters. Bull. Seism. Soc. America, 67, 877-915. Nakamura, Y. (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. QR of RTRI, 30 (1), 25-33.
- National Research Council (1989). Estimating Losses from Future Earthquakes: Panel Report, Washington, D.C., The National Academies Press, 82 pp. http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=1734&page=R1 (Consultado el 26 de marzo de 2009).

- Quintero C., N. C. y Rojas S., J. A., 2011, “Niveles de vulnerabilidad y Riesgo sísmico en edificaciones de la Parroquia Catedral del municipio Libertador de Caracas, Venezuela.
- Rosenblueth, E. y J. Prince, 1966, EL temblor de San Salvador, 3 de mayo de 1965: ingeniería sísmica. Ingeniería, UNAM, vol. 36, 1, 31-58.
- Rosa, H. y D. Barry, 1995, Población, territorio y medio ambiente en El Salvador. PRISMA 11, mayo-junio.
- Rowshandel, B., Reichle, M., Wills, C., Cao, T., Petersen, M., Branum, D., y otros, 2007, Estimation of Future Earthquake Losses in California. California Geological Survey. 52 pp. Department of Conservation. State of California. <http://www.conservation.ca.gov/CGS/rghm/loss/Pages/Index.aspx> (Consultado el 6 de marzo de 2008).
- Rymer, M.J., 1987, The San Salvador earthquake of October 10, 1986 - geologic aspects. Earthquake Spectra.
- Salazar, W.M., N.N. Ambraseys, J.J. Bommer, 1998, Compilación de un catálogo sísmico para El Salvador y zonas aledañas, 1898-1993. Seminario sobre Evaluación y Mitigación del Riesgo Sísmico en el Area Centroamericana, 22-27 de septiembre. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, San Salvador, El Salvador.
- Schmidt-Thomé, M., 1975, The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America): a basis for city development and planning. Geologisches Jahrbuch. Hannover, Alemania.

- Shakal, A.F., M. Moh-Jiann Huang y R. Linares, 1987, The San Salvador earthquake of October 10, 1986 - processed strong motion data. *Earthquake Spectra*, 3, 465-481.
- Singh, S.K., C. Gutiérrez, J. Arboleda y M. Ordaz, 1993, Peligro sísmico en El Salvador. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Stoiber, R.F. y M.J. Carr, 1977, Geological setting destructive earthquakes in Cenral America. *Geological Society of American Bulletin*. Vol. 88, 9. 151-156.
- Sutch Osiecki, P., 1981, Estimated intensities and probable tectonic sources of historic (pre-1898) Honduran earthquakes. *Bull. Seism. Soc. America*, 71, 865-881.
- Todd, D., Carino, N., Chung, R. M., Lew., H. S., Taylor, A. W., Walton, W. D., Cooper, J.D., Nimis, R., 1994, 1994 Northridge Earthquake. Performance of Structures, Lifelines, and Fire Protection Systems. NIST (National Institute of Standards and Technology) Special Publication 862. Gaithersburf, MD, 180 pp.
- Vallecilla. R., 2003, Fuerzas Sísmicas. Principios y aplicaciones, Bogotá, D.C.
- Viscusi, W. K., 2006, Natural disaster risks: An introduction. *Journal of Risk and Uncertainty*; 33:5-11.
- White, R.A. & D.H. Harlow, 1993, Destructive upper-crustal earthquakes of Central America since 1900. *Bull. Seism. Soc. America*, **83**, 1115-1142.
- Yepez, F., Barbat, A. H. y Cañas, J. A., 1995, 1) Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería. Monografías de Ingeniería Sísmica CIMNE IS-12 España.

- Yépez, F., Barbat, A. H. y Canas, J. A., 1996, Evaluación Probabilista de la Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Estructuras de Concreto Armado por medio de Simulación, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE, Barcelona, monografía **IS-20**.

ANEXOS

ANEXO A

**MDR PARA LAS 12 COMBINACIONES DE
EVENTOS SÍSMICOS**

Tabla A-1. MDR del Campus Central, tomando la combinación 1.

GEOUNIDADES	MDR	GEOUNIDADES	MDR
1001	0.09	6001	0.12
1002	0.20	6002	0.27
2001	0.13	6003	0.15
2002	0.08	6004	0.18
2003	0.08	6005	0.15
3001	0.05	6006	0.05
3002	0.28	7001	0.20
3003	0.29	7002	0.10
3004	0.12	8001	0.05
3005	0.29	8002	0.05
3006	0.13	8003	0.14
4001	0.19	8004	0.19
4002	0.19	8005	0.16
4003	0.07	8006	0.19
4004	0.19	8007	0.07
4005	0.25	8008	0.09
4006	0.19	9001	0.08
5001	0.13	9002	0.14
5002	0.11	9003	0.05
5003	0.07	9004	0.19
5004	0.19	9005	0.12
5005	0.08	9006	0.14
5006	0.08	9007	0.05
5007	0.11	9008	0.11
5008	0.23	9009	0.18
5009	0.07	10001	0.17
5010	0.07	10002	0.14
5011	0.13	10003	0.14
5012	0.13	10004	0.20
5013	0.13	10005	0.12
5014	0.09	10006	0.12
5015	0.15	10007	0.10
5016	0.19	10008	0.08
5017	0.16	10009	0.05

Tabla A-2. MDR del Campus Central, tomando la combinación 2.

GEOUNIDADES	MDR	GEOUNIDADES	MDR
1001	0.19	6001	0.22
1002	0.47	6002	0.63
2001	0.24	6003	0.37
2002	0.18	6004	0.36
2003	0.18	6005	0.36
3001	0.12	6006	0.11
3002	0.67	7001	0.38
3003	0.67	7002	0.20
3004	0.23	8001	0.11
3005	0.68	8002	0.11
3006	0.24	8003	0.24
4001	0.37	8004	0.37
4002	0.37	8005	0.34
4003	0.16	8006	0.37
4004	0.38	8007	0.16
4005	0.52	8008	0.19
4006	0.46	9001	0.16
5001	0.24	9002	0.24
5002	0.22	9003	0.11
5003	0.15	9004	0.37
5004	0.56	9005	0.23
5005	0.21	9006	0.24
5006	0.21	9007	0.11
5007	0.22	9008	0.21
5008	0.49	9009	0.36
5009	0.15	10001	0.34
5010	0.16	10002	0.24
5011	0.24	10003	0.25
5012	0.24	10004	0.38
5013	0.24	10005	0.23
5014	0.20	10006	0.23
5015	0.34	10007	0.21
5016	0.37	10008	0.17
5017	0.40	10009	0.12

Tabla A-3. MDR del Campus Central, tomando la combinación 3.

GEOUNIDADES	MDR	GEOUNIDADES	MDR
1001	0.30	6001	0.28
1002	0.61	6002	0.85
2001	0.31	6003	0.52
2002	0.24	6004	0.46
2003	0.25	6005	0.51
3001	0.22	6006	0.19
3002	0.89	7001	0.48
3003	0.89	7002	0.26
3004	0.31	8001	0.20
3005	0.89	8002	0.20
3006	0.31	8003	0.34
4001	0.51	8004	0.46
4002	0.50	8005	0.44
4003	0.24	8006	0.47
4004	0.50	8007	0.21
4005	0.69	8008	0.25
4006	0.63	9001	0.21
5001	0.35	9002	0.34
5002	0.29	9003	0.20
5003	0.23	9004	0.47
5004	0.84	9005	0.29
5005	0.42	9006	0.35
5006	0.42	9007	0.19
5007	0.30	9008	0.28
5008	0.69	9009	0.48
5009	0.23	10001	0.47
5010	0.24	10002	0.34
5011	0.35	10003	0.35
5012	0.35	10004	0.49
5013	0.35	10005	0.30
5014	0.28	10006	0.30
5015	0.47	10007	0.29
5016	0.51	10008	0.24
5017	0.57	10009	0.21

Tabla A-4. MDR del Campus Central, tomando la combinación 4.

GEOUNIDADES	MDR	GEOUNIDADES	MDR
1001	0.79	6001	0.70
1002	1.00	6002	1.00
2001	0.92	6003	0.98
2002	0.93	6004	0.94
2003	0.95	6005	0.96
3001	0.71	6006	0.34
3002	1.00	7001	1.00
3003	1.00	7002	0.95
3004	0.94	8001	0.70
3005	1.00	8002	0.76
3006	0.99	8003	0.80
4001	0.94	8004	1.00
4002	0.96	8005	1.00
4003	0.73	8006	1.00
4004	0.98	8007	0.93
4005	1.00	8008	0.94
4006	1.00	9001	0.78
5001	0.45	9002	0.58
5002	0.57	9003	0.59
5003	0.52	9004	1.00
5004	0.97	9005	0.96
5005	0.64	9006	0.61
5006	0.64	9007	0.42
5007	0.52	9008	0.58
5008	0.96	9009	0.89
5009	0.51	10001	0.78
5010	0.53	10002	0.63
5011	0.44	10003	0.74
5012	0.45	10004	1.00
5013	0.46	10005	0.87
5014	0.67	10006	0.90
5015	0.92	10007	1.00
5016	0.92	10008	1.00
5017	1.00	10009	0.44

Tabla A-5. MDR del Campus Central, tomando la combinación 5.

GEOUNIDADES	MDR	GEOUNIDADES	MDR
1001	0.85	6001	0.81
1002	1.00	6002	1.00
2001	0.96	6003	1.00
2002	0.98	6004	0.98
2003	0.99	6005	0.99
3001	0.81	6006	0.42
3002	1.00	7001	1.00
3003	1.00	7002	0.99
3004	0.98	8001	0.80
3005	1.00	8002	0.85
3006	1.00	8003	0.84
4001	0.98	8004	1.00
4002	0.99	8005	1.00
4003	0.86	8006	1.00
4004	1.00	8007	0.98
4005	1.00	8008	0.98
4006	1.00	9001	0.89
5001	0.51	9002	0.64
5002	0.68	9003	0.70
5003	0.67	9004	1.00
5004	0.99	9005	0.98
5005	0.79	9006	0.67
5006	0.78	9007	0.50
5007	0.63	9008	0.69
5008	0.99	9009	0.96
5009	0.66	10001	0.89
5010	0.68	10002	0.68
5011	0.50	10003	0.79
5012	0.51	10004	1.00
5013	0.52	10005	0.94
5014	0.81	10006	0.95
5015	0.97	10007	1.00
5016	0.98	10008	1.00
5017	1.00	10009	0.52

Tabla A-6. MDR del Campus Central, tomando la combinación 6.

GEOUNIDADES	MDR	GEOUNIDADES	MDR
1001	0.91	6001	0.85
1002	1.00	6002	1.00
2001	0.98	6003	1.00
2002	0.99	6004	0.99
2003	1.00	6005	1.00
3001	0.91	6006	0.52
3002	1.00	7001	1.00
3003	1.00	7002	0.99
3004	0.99	8001	0.91
3005	1.00	8002	0.94
3006	1.00	8003	0.88
4001	0.99	8004	1.00
4002	1.00	8005	1.00
4003	0.92	8006	1.00
4004	1.00	8007	0.99
4005	1.00	8008	0.99
4006	1.00	9001	0.92
5001	0.59	9002	0.70
5002	0.73	9003	0.83
5003	0.75	9004	1.00
5004	1.00	9005	0.99
5005	0.92	9006	0.73
5006	0.92	9007	0.60
5007	0.68	9008	0.74
5008	1.00	9009	0.98
5009	0.74	10001	0.93
5010	0.76	10002	0.75
5011	0.57	10003	0.84
5012	0.58	10004	1.00
5013	0.59	10005	0.96
5014	0.87	10006	0.97
5015	0.99	10007	1.00
5016	0.99	10008	1.00
5017	1.00	10009	0.62

Tabla A-7. MDR del Campus Central, tomando la combinación 7.

GEOUNIDADES	MDR	GEOUNIDADES	MDR
1001	0.17	6001	0.24
1002	0.45	6002	0.65
2001	0.22	6003	0.43
2002	0.15	6004	0.40
2003	0.16	6005	0.45
3001	0.11	6006	0.12
3002	0.63	7001	0.36
3003	0.63	7002	0.19
3004	0.23	8001	0.10
3005	0.62	8002	0.10
3006	0.23	8003	0.23
4001	0.40	8004	0.37
4002	0.39	8005	0.33
4003	0.17	8006	0.37
4004	0.39	8007	0.16
4005	0.54	8008	0.20
4006	0.48	9001	0.17
5001	0.25	9002	0.24
5002	0.25	9003	0.11
5003	0.19	9004	0.37
5004	0.63	9005	0.23
5005	0.25	9006	0.24
5006	0.25	9007	0.11
5007	0.26	9008	0.25
5008	0.59	9009	0.41
5009	0.19	10001	0.44
5010	0.18	10002	0.24
5011	0.25	10003	0.23
5012	0.25	10004	0.37
5013	0.25	10005	0.23
5014	0.22	10006	0.23
5015	0.36	10007	0.20
5016	0.40	10008	0.16
5017	0.42	10009	0.10

Tabla A-8. MDR del Campus Central, tomando la combinación 8.

GEOUNIDADES	MDR	GEOUNIDADES	MDR
1001	0.38	6001	0.57
1002	0.92	6002	0.99
2001	0.50	6003	0.95
2002	0.45	6004	0.89
2003	0.45	6005	0.96
3001	0.31	6006	0.33
3002	0.98	7001	0.80
3003	0.98	7002	0.51
3004	0.52	8001	0.28
3005	0.98	8002	0.28
3006	0.51	8003	0.42
4001	0.89	8004	0.82
4002	0.87	8005	0.80
4003	0.56	8006	0.82
4004	0.86	8007	0.51
4005	0.97	8008	0.57
4006	0.95	9001	0.47
5001	0.49	9002	0.44
5002	0.64	9003	0.32
5003	0.69	9004	0.83
5004	1.00	9005	0.52
5005	0.86	9006	0.43
5006	0.86	9007	0.30
5007	0.70	9008	0.63
5008	0.99	9009	0.92
5009	0.70	10001	0.98
5010	0.68	10002	0.43
5011	0.50	10003	0.42
5012	0.49	10004	0.82
5013	0.49	10005	0.53
5014	0.66	10006	0.53
5015	0.89	10007	0.54
5016	0.90	10008	0.46
5017	0.93	10009	0.25

Tabla A-9. MDR del Campus Central, tomando la combinación 9.

GEOUNIDADES	MDR	GEOUNIDADES	MDR
1001	0.17	6001	0.15
1002	0.29	6002	0.52
2001	0.16	6003	0.23
2002	0.11	6004	0.25
2003	0.11	6005	0.22
3001	0.10	6006	0.10
3002	0.53	7001	0.26
3003	0.53	7002	0.13
3004	0.16	8001	0.10
3005	0.53	8002	0.10
3006	0.16	8003	0.23
4001	0.25	8004	0.26
4002	0.25	8005	0.22
4003	0.10	8006	0.26
4004	0.25	8007	0.10
4005	0.34	8008	0.13
4006	0.28	9001	0.11
5001	0.22	9002	0.22
5002	0.15	9003	0.10
5003	0.10	9004	0.26
5004	0.44	9005	0.16
5005	0.16	9006	0.22
5006	0.16	9007	0.10
5007	0.15	9008	0.15
5008	0.32	9009	0.25
5009	0.10	10001	0.24
5010	0.10	10002	0.22
5011	0.22	10003	0.22
5012	0.22	10004	0.26
5013	0.22	10005	0.16
5014	0.13	10006	0.16
5015	0.21	10007	0.13
5016	0.25	10008	0.11
5017	0.23	10009	0.10

Tabla A-10. MDR del Campus Central, tomando la combinación 10.

GEOUNIDADES	MDR	GEOUNIDADES	MDR
1001	0.35	6001	0.35
1002	0.55	6002	0.64
2001	0.42	6003	0.52
2002	0.39	6004	0.51
2003	0.40	6005	0.52
3001	0.29	6006	0.17
3002	0.64	7001	0.52
3003	0.64	7002	0.41
3004	0.43	8001	0.28
3005	0.64	8002	0.30
3006	0.45	8003	0.39
4001	0.51	8004	0.52
4002	0.51	8005	0.49
4003	0.33	8006	0.52
4004	0.52	8007	0.39
4005	0.60	8008	0.41
4006	0.56	9001	0.35
5001	0.28	9002	0.32
5002	0.31	9003	0.25
5003	0.26	9004	0.52
5004	0.60	9005	0.44
5005	0.32	9006	0.33
5006	0.32	9007	0.19
5007	0.30	9008	0.31
5008	0.59	9009	0.49
5009	0.25	10001	0.46
5010	0.26	10002	0.33
5011	0.27	10003	0.37
5012	0.28	10004	0.52
5013	0.28	10005	0.41
5014	0.33	10006	0.42
5015	0.47	10007	0.43
5016	0.50	10008	0.41
5017	0.52	10009	0.20

Tabla A-11. MDR del Campus Central, tomando la combinación 11.

GEOUNIDADES	MDR	GEOUNIDADES	MDR
1001	0.47	6001	0.53
1002	0.79	6002	0.87
2001	0.57	6003	0.77
2002	0.53	6004	0.74
2003	0.54	6005	0.77
3001	0.41	6006	0.28
3002	0.88	7001	0.72
3003	0.88	7002	0.56
3004	0.58	8001	0.40
3005	0.88	8002	0.42
3006	0.58	8003	0.50
4001	0.75	8004	0.73
4002	0.75	8005	0.71
4003	0.53	8006	0.73
4004	0.74	8007	0.55
4005	0.83	8008	0.58
4006	0.80	9001	0.51
5001	0.41	9002	0.44
5002	0.51	9003	0.38
5003	0.50	9004	0.73
5004	0.85	9005	0.58
5005	0.62	9006	0.45
5006	0.62	9007	0.30
5007	0.51	9008	0.51
5008	0.83	9009	0.74
5009	0.50	10001	0.74
5010	0.50	10002	0.45
5011	0.41	10003	0.48
5012	0.41	10004	0.73
5013	0.41	10005	0.57
5014	0.56	10006	0.57
5015	0.73	10007	0.58
5016	0.75	10008	0.55
5017	0.78	10009	0.30

Tabla A-12. MDR del Campus Central, tomando la combinación 12.

GEOUNIDADES	MDR	GEOUNIDADES	MDR
1001	0.46	6001	0.43
1002	0.63	6002	0.79
2001	0.48	6003	0.58
2002	0.45	6004	0.57
2003	0.45	6005	0.58
3001	0.41	6006	0.27
3002	0.80	7001	0.58
3003	0.81	7002	0.46
3004	0.48	8001	0.40
3005	0.81	8002	0.41
3006	0.49	8003	0.48
4001	0.58	8004	0.57
4002	0.58	8005	0.55
4003	0.42	8006	0.58
4004	0.59	8007	0.43
4005	0.68	8008	0.46
4006	0.64	9001	0.41
5001	0.38	9002	0.42
5002	0.39	9003	0.38
5003	0.36	9004	0.58
5004	0.76	9005	0.48
5005	0.50	9006	0.43
5006	0.50	9007	0.30
5007	0.38	9008	0.39
5008	0.67	9009	0.57
5009	0.36	10001	0.55
5010	0.36	10002	0.44
5011	0.38	10003	0.47
5012	0.38	10004	0.58
5013	0.39	10005	0.47
5014	0.43	10006	0.48
5015	0.56	10007	0.47
5016	0.58	10008	0.45
5017	0.60	10009	0.31

