



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Estimación de las pérdidas económicas
en las estructuras asociadas a peligro sísmico
en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Dr. Raúl González Herrera



Dr. Juan Carlos Mora Chaparro
Asesor

ÍNDICE

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	xi
DEDICATORIA	xv
AGRADECIMIENTOS	xvi
RESUMEN	xviii
ABSTRACT.....	xix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo general.....	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
1.2. Justificación	4
1.2.1. Importancia económica de los estudios de riesgo en el mundo	4
1.2.2. Importancia económica de los estudios de riesgo en México.....	8
1.2.3. Importancia económica de los estudios de riesgo en Chiapas	11
1.3. Alcances y logros de la investigación.....	14
1.4. Descripción del capitulado de la tesis.....	15
2. MARCO CONCEPTUAL DEL RIESGO	16
2.1. Desastres por fenómenos naturales.....	16
2.1.1. Clasificación de los desastres en las zonas urbanas.....	16
2.1.2. Efectos de los desastres en las zonas urbanas.....	18
2.2. Marco conceptual.....	18
2.3. Gestión del riesgo	22
3. PROCESOS HISTÓRICOS, SOCIALES Y FÍSICOS QUE CONDICIONAN LOS NIVELES DE VULNERABILIDAD EXISTENTES ACTUALMENTE EN LA CIUDAD DE TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS	26
3.1. Historia de la conformación de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez	26
3.1.1. Fundación de Tuxtla Gutiérrez	26
3.1.2. Tuxtla Gutiérrez durante la colonia y la independencia	27
3.1.3. Tuxtla Gutiérrez capital del estado de Chiapas.....	29
3.2. Aspectos socioeconómicos de Tuxtla Gutiérrez.....	31
3.2.1. Vivienda.....	31
3.2.2. Salud	32
3.2.3. Educación.....	32
3.3. Elementos económicos.....	33
3.3.1. Población económicamente activa (PEA).....	33
3.3.2. Actividades económicas del municipio	33
3.3.3. Infraestructura urbana, equipamiento y servicios	33
3.4. Elementos demográficos.....	34
3.4.1. Crecimiento y densidad de la población	34
3.4.2. Características y dinámica de la población en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.....	37
3.5. Aspectos físicos de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	40
3.5.1. Fisiografía de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	40
3.5.2. Geomorfología de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	41

4.	PELIGRO SÍSMICO EN TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS	57
4.1.	Estudios de peligro sísmico; generalidades, retos y perspectivas	57
4.1.1.	Estudios de peligro sísmico en el mundo.....	57
4.1.2.	Estudios de peligro sísmico en México	63
4.1.3.	Estudios de peligro sísmico en Chiapas.....	65
4.1.4.	Características geotectónicas del estado de Chiapas	67
4.1.4.1.	Fuentes sismogénicas del estado de Chiapas	71
4.1.4.2.	Instrumentación sísmica en el estado de Chiapas	77
4.1.5.	Análisis estadísticos en los sismos en Chiapas	79
4.2.	Estudio de peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.....	86
4.2.1.	Análisis de la fuente sísmica.....	86
4.2.2.	Funciones de Green Empírica.....	90
4.2.2.1.	Peligro sísmico empleando funciones de Green empíricas.....	97
4.2.3.	Análisis del peligro sísmico considerando la metodología del MOC-CFE (1993; 2008) contemplando PRODISIS (2008).....	98
4.2.4.	Análisis de los daños e intensidades por sismo en Tuxtla Gutiérrez	101
4.2.4.1.	Efecto de los embovedados en los daños en Tuxtla Gutiérrez.....	109
4.2.5.	Análisis del efecto de sitio en Tuxtla Gutiérrez.....	111
4.2.5.1.	Estudios de microzonificación sísmica en Tuxtla Gutiérrez.....	112
4.2.5.2.	Actualización de la Microzonificación Sísmica de Tuxtla Gutiérrez	114
4.2.5.3.	Determinación de la estructura de velocidades mediante el método de Autocorrelación Espacial (SPAC)	117
4.2.5.4.	Efecto de sitio empleando sismos reales en Tuxtla Gutiérrez	129
4.2.6.	Análisis del peligro sísmico considerando la metodología de Crisis (2007)	132
4.2.7.	Análisis del peligro sísmico considerando la metodología de SGM	133
4.2.8.	Espectros de diseño propuestos para Tuxtla Gutiérrez	134
4.2.9.	Discusión.....	136
5.	VULNERABILIDAD SÍSMICA EN TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS	139
5.1.	Estudios de vulnerabilidad sísmica.....	139
5.1.1.	Metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica en el mundo	141
5.1.1.1.	Metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica	142
5.1.2.	Metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica en México	145
5.1.3.	Metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica en Tuxtla Gutiérrez... ..	149
5.1.4.	Parámetros para evaluar la vulnerabilidad de Tuxtla Gutiérrez.....	152
5.1.5.	Caracterización de los sistemas constructivos en Tuxtla Gutiérrez.....	152
5.1.5.1.	Antecedentes históricos de la vivienda en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.....	152
5.1.5.2.	Antecedentes de la normativa de construcción en Chiapas	153
5.1.5.3.	Características mecánicas de los materiales constructivos empleados en Tuxtla Gutiérrez	155
5.1.5.4.	Identificación de los sistemas constructivos empleados en Tuxtla Gutiérrez	157
5.1.6.	Evaluación de la vulnerabilidad mediante SORIS en Tuxtla Gutiérrez	162
5.1.6.1.	Fundamentos del software SORIS para determinar la vulnerabilidad.....	162
5.1.6.2.	Ejemplo de la obtención de la vulnerabilidad con SORIS.....	171
5.1.6.3.	Comparación de los resultados con las tres metodologías empleadas.....	174
5.1.7.	Discusión.....	177

6. ESCENARIO DE RIESGO SÍSMICO Y SU IMPACTO ECONÓMICO EN LAS ESTRUCTURAS EN TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS	179
6.1. Estudios de riesgo sísmico	179
6.1.1. Metodologías para los estudios de riesgo sísmico en el mundo	181
6.1.2. Metodologías para los estudios de riesgo sísmico en México	184
6.1.3. Sistemas de información geográfica para el estudio del riesgo sísmico	187
6.1.4. Información satelital para el estudio del riesgo sísmico	188
6.2. Estudios de costos del riesgo sísmico	189
6.2.1. Evaluación de costos de contenidos y elementos no estructurales	195
6.3. Aplicación de SORIS para estimar los costos en distintos escenarios.....	196
6.3.1. Escenarios contruidos con SORIS para determinación de pérdidas económicas en las estructuras en Tuxtla Gutiérrez.....	200
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	205
7.1. Conclusiones	205
7.2. Recomendaciones	207
7.2.1. Propuestas para mitigar riesgo sísmico.....	207
7.2.2. Recomendaciones generales	214
REFERENCIAS.....	216
Referencias documentales.....	216
Referencias digitales	231
ANEXOS	232
Anexo A.1. Sismos ocurridos en el estado de Chiapas con magnitud superior a 6.5 .	232
Anexo A.2. Sismos históricos ocurridos en el estado de Chiapas, reportados por distintas fuentes con intensidad igual o mayor que VI	234
Anexo A.3. Encuesta aplicada para obtener datos de campo de vulnerabilidad.....	238
Anexo A.4. Algoritmo de software SORIS	240
Anexo A.5. Porcentaje de daños para distintos escenarios.....	246

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Número de importantes catástrofes mundiales anuales para el periodo 1950-2011. Tomado de NatCatSERVICE, MunichRE http://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/georisks/natcatservice/great_natural_catastrophes.aspx	5
Figura 2. Costo de las importantes catástrofes mundiales anuales para el periodo 1950-2011. Tomado de NatCatSERVICE, MunichRE http://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/georisks/natcatservice/great_natural_catastrophes.aspx	5
Figura 3. Pérdida por desastres en América Latina y el Caribe. Fuente EM DAT 2003 (Zapata, 2008).	7
Figura 4. Clasificación de los 101 principales desastres naturales ocurridos en México durante el siglo XX (Bitrán, 2001).	9
Figura 5. (a) Afectaciones a sectores Transporte, Industria, Agropecuario y Educativo y su infraestructura. (b) Afectaciones a servicios Alcantarillado, Energía y Adecuado y su infraestructura (Velázquez y Rosales, 1999).	10
Figura 6. Curva de excedencia de pérdida para infraestructura en México por sismo y huracanes (Reinoso <i>et al.</i> , 2010).	11
Figura 7. Distribución espacial de las pérdidas totales 1980-2006 (miles de dólares) (GAR, 2009).	13
Figura 8. Ciclo de la gestión de riesgos modificado de Alarcón (2005).	22
Figura 9. Entramado que conforma la seguridad territorial (Wilches-Chaux, 2006).	24
Figura 10. Mapa facsímil editado por el Gobierno del Estado, con motivo del centenario de Tuxtla Gutiérrez de manera definitiva como capital del Estado de Chiapas en 1992 (Paz, 2012a).	29
Figura 11. Plano de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, donde se observa el crecimiento de 1892 a 2009 (amarillo mostaza 1892, amarillo 2000 y gris 2009), (Paz, 2012b).	34
Figura 12. Crecimiento poblacional de ciudad de Tuxtla Gutiérrez desde 1611-2010 construcción basada en datos del INEGI y de referencias históricas (Paz, 2012a; Castro, 2012; ACECH, 2010; Pavía, 2006; Tovar, 2003).	35
Figura 13. Tasa de crecimiento municipal en el municipio de Tuxtla Gutiérrez (SEDESOL, 2011). Se muestran en colores rojos las colonias con mayor crecimiento, mientras que en grises las colonias sin crecimiento poblacional.	35
Figura 14. Densidad de población en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez por AGEB (SEDESOL, 2011).	36
Figura 15. Densidad de población en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez por manzana (SEDESOL, 2011).	36
Figura 16. Pirámide poblacional por grupos quinquenales de edad en Tuxtla Gutiérrez (SEDESOL, 2011).	37
Figura 17. Grado de marginación en el municipio de Tuxtla Gutiérrez (SEDESOL, 2011).	39
Figura 18. Altimetría de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (González <i>et al.</i> , 2013).	41
Figura 19. Geoformas en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Paz, 2012b).	42

Figura 20. Mapa de identificación de laderas en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Paz <i>et al.</i> , 2011).	43
Figura 21. Mapa geológico del estado de Chiapas (Modificado de Castro-Mora <i>et al.</i> , 1999).	45
Figura 22. Columna litoestratigráfica del estado de Chiapas (Castro-Mora <i>et al.</i> , 1999).	46
Figura 23. (a) Disposición de bloques de roca caliza. Tramo Tuxtla – San Fernando; (b) Bloques de caliza asociados a fracturamiento debido a fallamiento.....	48
Figura 24. (a) Disposición estratificada del afloramiento; (b) Conformación de los estratos y ubicación de la falla.	48
Figura 25. (a) Tamaño del grano del afloramiento; (b) Estratos inclinados pertenecientes a la Fm Soyaló.	49
Figura 26. (a) Disposición estratificada del afloramiento en zona de falla con forma angulosa de los bloques expuestos; (b) Disposición estratificada del afloramiento con presencia de fósiles, calizas de la Fm Sierra Madre, estratificada y con fracturamiento intraformacional.	49
Figura 27. (a) Disposición estratificada del afloramiento de calizas de la Fm Angostura; (b) Calizas con presencia de fósiles de la Fm Angostura.	50
Figura 28. (a) Disposición estratificada de calizas de la Fm Ocozocoautla; (b) Disposición estratificada semivertical de calizas de la Fm Ocozocoautla.....	50
Figura 29. (a) Carta geológico-Minera de Tuxtla Gutiérrez E15-11 (INEGI y SGM, 2005); (b) Acercamiento a Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.....	51
Figura 30. Mapa con la cartografía geológica de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (González <i>et al.</i> , 2012).	52
Figura 31. Mapa zonificación geotécnica de Tuxtla Gutiérrez, (Díaz <i>et al.</i> , 2006).....	52
Figura 32. Zonificación geotécnica propuesta para Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (modificado de Ordoñez, 2008).....	53
Figura 33. Perfiles de los suelos en el valle de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (González <i>et al.</i> , 2013).	54
Figura 34. Cuenca y subcuencas del río Sabinal (SEDESOL, 2011).	55
Figura 35. Hidrografía del municipio (SEDESOL, 2011).	56
Figura 36. Caracterización de la fuente sísmica de manera esquemática.	60
Figura 37. Pasos para la determinación determinista del riesgo sísmico (Kramer, 1996). ..	61
Figura 38. Pasos para la determinación probabilista del riesgo sísmico (Kramer, 1996). ..	62
Figura 39. Mapa de regionalización sísmica de México (CFE, 1993).....	64
Figura 40. Mapa de regionalización sísmica de México, considerando un periodo de retorno de 50 años (CFE, 2008).	65
Figura 41. Mapa de efecto sísmico y regiones del estado de Chiapas, considerando la variable IMM (SGM, 2005a).	66
Figura 42. Mapa de intensidades de terremotos en escala de Mercalli Modificada (MMI) procesado por la Universidad de Columbia (2009).	67
Figura 43. Elementos y provincias tectónicas del sureste de México (Guzmán y Meneses, 2000).	68
Figura 44. Modelo de la discontinuidad entre la corteza y el manto superior (Narcía, 2002).	69
Figura 45. Modelos de velocidades promedio de ondas P de la corteza (1D) para Chiapas, Guatemala y Oaxaca (Rodríguez, 2007).	69

Figura 46. Estructura tridimensional de velocidades de ondas P para cada bloque de Chiapas en km/s (Rodríguez, 2007).....	70
Figura 47. Mapa de las placas tectónicas que se presentan en el estado de Chiapas (SGM, 2005a).	70
Figura 48. Distribución de placas tectónicas en México. Puntos rojos representan sismos superficiales (menores a 40 Km) y azules sismos intermedios y profundos (Kostoglodov y Pacheco, 1999).....	71
Figura 49. Estructura de la zona de subducción y localización de Sismos profundos en México (Kostoglodov y Pacheco, 1999).....	72
Figura 50. (a) Enjambre sísmico presentado en Chiapas durante la construcción de la presa Chicoasén (Figuroa <i>et al.</i> , 1975); (b) Daño en el centro histórico de Chiapa de Corzo (Alegría, 2011).	73
Figura 51. (a) Erupción del volcán Chichonal en Chiapas en marzo de 1982; (b) Consecuencias de la erupción del volcán (PCECH, 2003). Fotografías de Dr. Servando de la Cruz.	73
Figura 52. Marco tectónico de la República Mexicana (CENAPRED, 2001).....	74
Figura 53. Principales sismos en el siglo XX en la República Mexicana (Kostoglodov y Pacheco, 1999).....	75
Figura 54. Mapa de tensor de momento sísmico y fallas geológicas del estado de Chiapas (SGM, 2005a).	75
Figura 55. Estación acelerográfica de la facultad de Ingeniería de la UNACH, la cual data de 1986 y que captó el sismo del 20 de octubre de 1995.....	78
Figura 56. Red acelerográfica del Dr. Cecilio Rebollar en el estado de Chiapas durante la década de los noventa (Narcía, 2009).	78
Figura 57. Epicentros sísmicos en Chiapas considerando su magnitud datos del SSN de 2006 a 2012.....	79
Figura 58. Epicentros sísmicos en Chiapas considerando la profundidad de los mismos a partir de datos del SSN de 2006 a 2012.....	80
Figura 59. Sección sismotectónica con los focos ocurridos en Chiapas de oeste a este, vista hacía el norte. La línea negra es una línea de correlación que marca la tendencia de la subducción entre la placa de Norteamérica y la de Cocos (SGM, 2005a).....	80
Figura 60. Puntos de agrupaciones sísmicas en el estado de Chiapas empleando la magnitud y la profundidad a partir de la ecuación 4 y con los datos del SSN de 1974 a 2010 (González <i>et al.</i> , 2011a).....	81
Figura 61. Epicentros de sismos localizados en el municipio de Tuxtla Gutiérrez (datos del SSN de 1974 a 2010).	82
Figura 62. (a) Tiempo de retorno de sismos fuertes en el estado de Chiapas; (b) Curva Kaplan-Meier para los periodos de retorno en Chiapas.....	82
Figura 63. Histogramas conteniendo la frecuencia e intensidad de sismos moderados e intensos en el estado de Chiapas.....	83
Figura 64. Frecuencia de los sismos en la región considerando datos del SSN 1974 a 2009 (González, 2010).....	83
Figura 65. Energía liberada de los sismos en la región considerando datos del SSN 1974 a 2009 (González, 2010).....	84
Figura 66. Profundidad media de los sismos en la región de estudio (datos del SSN 1974 a 2009; González, 2010).	84

Figura 67. Análisis mensual de los sismos que se presentan en el área de influencia del estado de Chiapas considerando los datos del SSN desde 1974 hasta 2010.....	85
Figura 68. Histograma contemplando el número de evento de acuerdo con su magnitud, los datos corresponden al SSN y contemplan un rango desde 1974 y hasta 2009 (González, 2010).....	86
Figura 69. Elementos esenciales del análisis del peligro sísmico.....	86
Figura 70. Zonas sismo-génicas relacionadas con la profundidad para el estado de Chiapas.....	87
Figura 71. Regiones tectónicas del República Mexicana (Zúñiga y Tapia, 1991).	87
Figura 72. Sismos con magnitud mayor a 7 ocurridos en el siglo XX en la República Mexicana y su frontera con Guatemala (CENAPRED, 2006a).....	88
Figura 73. Comparación de escalas de magnitud sísmica (McGuire, 2004).	89
Figura 74. Fuentes sísmicas que generan peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas y ubicación de las asperezas para las funciones de Green empíricas. Las características de estas fuentes se describen en la Tabla 15.....	91
Figura 75. Esquema del modelo de falla finita con las variables empleadas en el método de funciones de Green empíricas (modificado de Gama <i>et al.</i> , 2010).....	94
Figura 76. a), b, c) y d). Acelerogramas sintéticos desarrollados para cada una de las cuatro regiones A, B, C y D, respectivamente (Figura 74). En el eje x se ubica el periodo en segundos y en el eje y se gráfica la pseudoaceleración en cm/seg^2	95
Figura 77. a), b, c) y d). Espectros sintéticos de respuesta desarrollados de pseudoaceleración con el 5% de amortiguamiento crítico para suelo sedimentario en el valle de Tuxtla Gutiérrez, para cada una de las cuatro regiones A, B, C y D, respectivamente (Figura 74). En el eje x se ubica el periodo en segundos y en el eje y se gráfica la pseudoaceleración en cm/seg^2	96
Figura 78. Ley de atenuación propuesta por Rebollar <i>et al.</i> (1999), con información del sismo del 21 de octubre de 1995.....	97
Figura 79. Curva de peligro para suelo sedimentario en el valle de Tuxtla Gutiérrez en cm/seg^2 , a partir de sismos simulados con la fuente Ocozacoautla.	98
Figura 80. Regionalización sísmica de Chiapas y del municipio de Tuxtla Gutiérrez (CFE, 1993).....	98
Figura 81. Mapa de periodos de retorno para aceleraciones de 0.15% de gravedad o mayores (CFE, 2008).	100
Figura 82. Mapa de periodos de repetición para aceleraciones de 0.15% de gravedad o mayores en Chiapas.	100
Figura 83. Mapa de intensidades sísmicas máximas (Figueroa, 1986).....	102
Figura 84. Mapa de intensidades sísmicas máximas basadas en la Escala Modificada de Mercalli para temblores de gran magnitud ocurridos entre 1845 y 1999.	103
Figura 85. Fotografías de los daños debidos al sismo de Villaflores de octubre de 1995 en edificios públicos de Tuxtla Gutiérrez (González <i>et al.</i> , 2011b). (a, b) Edificio público del centro de la ciudad con sistema a base de muros de cortante sin refuerzo adecuado; (c) Daño estructura de adobe; (d) Daños en la rectoría de la UNACH; (e) Daños en la catedral de San Marcos; (f) Daños en construcciones de adobe.	104
Figura 86. Fotografías de los daños causados por el sismo de Las Choapas de 2011 en edificios públicos de Tuxtla Gutiérrez (González <i>et al.</i> , 2012). (a) Daños edificio Corzo; (b) Hundimiento en rectoría de la UNICACH; (c) Fracturas y asentamientos en	

instalaciones de COCYTECH; (d, e) Daños en hospital de especialidades “ <i>Vida mejor</i> ”; (f) Daño a vivienda en el centro de la ciudad.	104
Figura 87. Daños históricos por sismo en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (González <i>et al.</i> , 2012). (a) Mancha urbana; (b) Acercamiento del centro de la ciudad. El polígono verde representa la mancha urbana de 1892, daños del sismo de 1902; los puntos naranja, daños del sismo de 1995 y los puntos morados, daños del sismo del 7 de abril de 2011.	105
Figura 88. Localización de daños de los sismos del 21 de octubre de 1995 y del 7 de abril de 2011, considerando el uso de las construcciones.	106
Figura 90. Localización de daños de los sismos del 21 de octubre de 1995 y 7 de abril de 2011, considerando el periodo natural de vibración de las construcciones.	107
Figura 91. Localización de daños de los sismos del 21 de octubre de 1995 y 7 de abril de 2011, considerando los sistemas constructivos empleados.	107
Figura 92. Localización de daños de los sismos del 21 de octubre de 1995 y 7 de abril de 2011, considerando la posibilidad de resonancia de los sistemas suelo construcción.	108
Figura 93. Muertes debidas a sismos con diferentes magnitudes, se colocan círculos en verde para sismos entre 2000 y 2009 (modificado de Bilham, 2009).	109
Figura 94. (a) Mapa de toda la ciudad; (b) Acercamiento del centro de Tuxtla Gutiérrez. Se muestra la ubicación de los embovedados siguiendo la trayectoria de las líneas color verde.	110
Figura 95. (a) Deterioro en estructura del embovedado de 4 ^a Norte y 4 ^a Oriente; (b) Corrosión en estructura del embovedado del barrio San Roque; (c) Deterioro y corrosión de la estructura del embovedado de 5 ^a Poniente en el Barrio Guadalupe. Las fotografías corresponden al recorrido realizado por personal de Protección Civil Estatal y Protección Civil Municipal durante el mes de marzo de 2008.	111
Figura 96. Mapa de isoperiodos de Tuxtla Gutiérrez (modificado de Alonso <i>et al.</i> , 1995).	112
Figura 97. Período natural de vibración del suelo de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (modificado de Narcía <i>et al.</i> , 2006).	113
Figura 98. Espesores de los sedimentos para Tuxtla Gutiérrez (Narcía <i>et al.</i> , 2006).	114
Figura 99. Mapa de isoperiodos de Tuxtla Gutiérrez (González <i>et al.</i> , 2012).	115
Figura 100. Mapa con la distribución espacial de los puntos de medición en Tuxtla Gutiérrez.	115
Figura 101. Zonificación de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez considerando el periodo fundamental.	116
Figura 102. Mapa de amplificaciones relativas asociadas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.	117
Figura 103. Ubicación de los sitios donde se desarrollaron estudios SPAC.	120
Figura 104. (a) Arreglo de Calicatas-SPAC en la avenida 1 ^a Norte entre 12 y 13 Poniente; (b) Arreglo SPAC en el campo de futbol de la facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas.	122
Figura 105. Coeficiente de autocorrelación para un arreglo de 5 m.	122
Figura 106. Curva de dispersión para el modelo obtenido de la inversión.	123
Figura 107. Perfil de velocidades para los arreglos de las Calicatas-SPAC en la avenida 1 ^a Norte entre 12 y 13 Poniente, V_p (izquierda) y V_s (derecha).	123
Figura 108. Tomografía para el perfil de velocidades para los arreglos de las Calicatas-SPAC en la avenida 1 ^a Norte entre 12 y 13 Poniente, (a) V_p ; (b) V_s	124

Figura 109. Perfiles de velocidad V_s y V_p , obtenidos en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.....	125
Figura 110. (a) Perfiles de velocidades V_p ; (b) Perfiles de velocidades V_s , obtenidos en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.....	126
Figura 111. (a) Espectros de diseño en roca; (b) Espectros de diseño de peligro uniforme, respectivamente, obtenidos con datos del programa PRODISIS 2.0 (CFE, 2008).....	126
Figura 112. Espectros de diseño en roca considerando el efecto de sitio y la importancia estructural: B, A y A+, respectivamente, con el programa PRODISIS 2.0 (CFE, 2008).	127
Figura 113. Relación normalizada de la velocidad de corte hasta (720 m/s) respecto a la profundidad donde esta es alcanzada, considerando el punto más rígido (UNICACH).	128
Figura 114. Ubicación de los acelerógrafos fijos de la escuela de Ingeniería ambiental de la UNICACH y la facultad de Ingeniería de la UNACH.....	129
Figura 115. Acelerogramas del sismo del 7 de abril de 2011 se encuentran en la misma escala, los tres primeros registros corresponden a la UNICACH y las tres siguientes a la UNACH (Piña, 2012).....	130
Figura 116. Gráfica de cocientes espectrales H/V en dos sitios de la ciudad para el sismo del 7 de abril de 2011. La línea azul corresponde a la UNICACH, la línea roja a la UNACH (Piña, 2012).....	131
Figura 117. Gráficas de H/V de microtemores (línea continua) y sismo (línea discontinua) (Piña, 2012).	131
Figura 118. Mapa de aceleración sísmica asociados a un periodo de retorno de (a) 10, (b) 100, (c) 475 y (d) 2,500 años para Tuxtla Gutiérrez (Crisis, 2007).....	133
Figura 119. Efecto sísmico en la región central (Altos de Chiapas) con intensidades de VI a VIII de la escala IMM (Modificado de SGM, 2005a).	134
Figura 120. Espectros de diseño en el rango del periodo para el municipio de Tuxtla Gutiérrez (CFE, 1993).	135
Figura 121. Zonificación de suelos propuesta para Tuxtla Gutiérrez.	135
Figura 122. Espectros de diseño propuestos en estudios para Tuxtla Gutiérrez (González <i>et al.</i> , 2011b).	135
Figura 123. Espectros de respuesta propuestos en este estudio.	136
Figura 124. Ley de atenuación para el sismo de Villaflores del 21 de octubre de 1995 (Ordaz, 2011).	138
Figura 125. Comparativo de la distribución porcentual de viviendas consideradas vulnerables (Sánchez, 2005).	148
Figura 126. Clases de vulnerabilidad para el primer cuadro de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Guillén, 2005). Las gráficas de pastel representan el porcentaje de las clases de vulnerabilidad por manzana.	150
Figura 127. Clases de vulnerabilidad de Tuxtla Gutiérrez, elaborado mediante la EME-98 (González <i>et al.</i> , 2010; González, 2010).....	151
Figura 128. Comparación de las resistencias de mampostería de piezas de tabique y bloques de concreto de acuerdo con RCDF-2004 y RCTGZ-2004.	156
Figura 129. Puntos de construcciones encuestadas por inferencia estadística.....	157
Figura 130. Clasificación de construcciones de Tuxtla Gutiérrez, según sistemas constructivos para cubiertas y para muros (González <i>et al.</i> , 2010a).	158

Figura 131. Clasificación de construcciones de Tuxtla Gutiérrez, según la edad en que se desarrollaron (González <i>et al.</i> , 2010a).....	160
Figura 132. Mapa de daños observados en los recorridos de las encuestas en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas y considerando los datos del IPCMIRDECH. Se empleó la metodología de CENAPRED (2006b).....	161
Figura 133. Daño estructural en mampostería en función de la demanda de deformación lateral (Terán y Zúñiga, 2007).	162
Figura 134. (a) Correlación entre el desplazamiento elástico de azotea de un SMGD vs S1GL (modificado de Proaño y Zavala, 2003); (b) Análisis de β_1 en estructuras tipo 1, donde se normaliza a 1.5 a partir de 5 niveles y es 1.0 para estructuras de un nivel.....	163
Figura 135. (a) Correlación entre la distorsión máxima elástica de un SMGD vs S1GL (modificado de Proaño y Zavala, 2003); (b) Análisis de β_2 en estructuras tipo 1, donde se normaliza a 1.25 a partir de 5 niveles y es 1.0 para estructuras de un nivel.	164
Figura 136. (a) Correlación entre el máximo desplazamiento lateral del modelo de comportamiento inelástico versus el del modelo elástico lineal (modificado de Proaño y Zavala, 2003); (b) Análisis de β_3 en estructuras tipo 1, donde se normaliza a 1.00 a partir de 1 nivel.....	164
Figura 137. (a) Correlación entre el número de pisos y la demanda de ductilidad (modificado de Proaño y Zavala, 2003); (b) Análisis de β_4 en estructuras tipo 1, donde se tiene un comportamiento lineal con pendiente asociada a la demanda de ductilidad de 1.10 hasta 1.15.	165
Figura 138. Frecuencia de daños durante eventos sísmicos asociados con distintas patologías de diseño, geométricas, constructivas, o geotécnicos con los datos de la Tabla 35.....	166
Figura 139. Alternativas de modelado de muros: Columna ancha, MEF con elementos tipo Shell y MEF con elementos tipo Membrane, respectivamente (modificado de Pérez-Gavilán, 2007).....	168
Figura 140. Comparación de los distintos modelos CA (Columna ancha), ESCV MEF con Membrane y EFSV MEF con Shells.....	169
Figura 141. Pasos de SORIS para determinar la vulnerabilidad y pérdida económica de la estructura estudiada en el ejemplo.	173
Figura 142. (a) Vulnerabilidad física de acuerdo con el método de CENAPRED (2006b), incluyendo gráfica de pastel con índices de vulnerabilidad; (b) Vulnerabilidad física de acuerdo con el método de UAM (González <i>et al.</i> , 2010), incluyendo gráfica de pastel con índices de vulnerabilidad; (c) Vulnerabilidad física de acuerdo con el método SORIS, incluyendo gráfica de pastel con índices de vulnerabilidad.....	174
Figura 143. Comparación entre tres metodologías empleadas para evaluar la vulnerabilidad de las construcciones: SORIS, UAM, CENAPRED.	176
Figura 144. Mapa de vulnerabilidad social del estado de Chiapas, elaborado por el IMTA y SEMARNAT (2011).	177
Figura 145. Esquemas para determinación de daño sísmico (Miranda, 2007).	181
Figuras 146. (a) S1GL empleado por la metodología HAZUS; (b) SMGL empleado en la metodología PEER que puede ser no lineal (Miranda, 2007).....	182
Figura 147. Esquema de flujo de la metodología europea (SERGISAI, 1998).	183
Figura 148. Índice de Susceptibilidad de Daño por sismo en vivienda con el método del CENAPRED (Sánchez, 2005).	185

Figura 149. Índices de desempeño para sismo y viento propuestos por el CENAPRED para las cinco tipologías de viviendas rurales más empleadas en México (CENAPRED, 2006b).	185
Figura 150. Modelo de operación de sistemas de información geográfica (Sánchez, 2005).	188
Figura 151. Comportamiento típico de las estructuras de concreto y mampostería con sus niveles de daño, comportamiento y filosofía Visión 2000, (traducido de Ghoborah, 2004).	193
Figura 152. El dilema del costo en el diseño sísmico Ordaz (2011).	194
Figura 153. Pasos del software SORIS para determinar las pérdidas económicas.	199
Figura 154. Comparación entre los daños del sismo del 21 de octubre de 1995 con respecto al escenario de SORIS para ese sismo. Los colores indican el índice de daño que va desde 0 (color verde), donde no hay daño, hasta 1 o pérdida total (color rojo).	200
Figura 155. Comparación entre los daños del sismo del 7 de abril de 2011 con respecto al escenario de SORIS para ese sismo. Los colores indican el índice de daño que va desde 0 (color verde), donde no hay daño, hasta 0.5 o seguridad de vida (color rojo).	201
Figura 156. Escenarios de daño a) $T_R=50$ años, b) $T_R=100$ años, c) $T_R=150$ años y $T_R=475$ años.	202
Figura 157. (a) Estaciones de la red del IIUNAM; (b) Estaciones de la red del SSN; (c) Estación del SSN en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas en la UNICACH; (d) Propuesta de red acelerográfica permanente para Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (González <i>et al.</i> , 2012).	208
Figura 158. Propuesta de Sistema de Alerta Sísmica para Chiapas de 18 estaciones (CIRES, 2012).	210
Figura 159. Propuesta del desarrollo de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas para el periodo 2012-2015 donde se retoman los aspectos del Atlas de Riesgos (basado en Hernández <i>et al.</i> , 2011).	211
Figura 160. Portada del software SORIS, contemplando los créditos.	240

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de importantes catástrofes mundiales ocurridas durante el periodo 1950-2011. Construido con datos de NatCatSERVICE, MunichRE http://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/georisks/natcatservice/great_natural_catastrophes.aspx .	6
Tabla 2. Efecto de los sismos en la economía de distintos países desarrollados respecto a los efectos en países centroamericanos (Miranda, 2008).	7
Tabla 3. Índices normalizados de heridos y muertos, así como viviendas afectadas, por desastres en México desde 1980 a 2006 (Construida a partir del formato propuesto por Velázquez y Rosales, 1999) y con la base de datos de GAR (2009).	9
Tabla 4. Distribución de recursos del FONDEN en Chiapas desde 1996 hasta 2010 y comparación con los gastos nacionales. Construido con datos tomados de Bitrán (2001); Bitrán <i>et al.</i> (2001); Bitrán <i>et al.</i> (2002); Bitrán <i>et al.</i> (2003); Bitrán <i>et al.</i> (2004); Bitrán <i>et al.</i> (2005); Bitrán <i>et al.</i> (2006); García <i>et al.</i> (2007); García <i>et al.</i> (2009a y 2009b); García <i>et al.</i> (2010); García <i>et al.</i> (2012).	12
Tabla 5. Impacto de los desastres en Chiapas en el periodo 1980-2006 (GAR, 2009).	12

Tabla 6. Distribución de viviendas destruidas en Chiapas en el periodo 1980-2006 (GAR, 2009).	12
Tabla 7. Pérdidas económicas globales en Chiapas 1980-2006 (miles de dólares) (GAR, 2009).	13
Tabla 8. Características de la población de 60 años y mayor (INEGI, 2005).	37
Tabla 9. Porcentaje de población urbana y rural en el municipio de Tuxtla Gutiérrez (INEGI, 2010).	38
Tabla 10. Principales características de los hogares de Tuxtla Gutiérrez (INEGI, 2005).	39
Tabla 11. Estructuras geológicas que se encuentran en la Subcuenca del río Sabinal (De la Rosa, 1989).	47
Tabla 12. Propiedades índice y de resistencia de los suelos en Tuxtla Gutiérrez (Ordoñez, 2008).	53
Tabla 13. Temblores de magnitud superior a 7.0 cercanos al estado de Chiapas en el siglo XX. Adaptado de CENAPRED (2006a).	89
Tabla 14. Fuentes sísmicas que generan peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. .	90
Tabla 15. Características de los sismos empleados como semillas en las funciones de Green empíricas (Datos CMT: Harvard).	91
Tabla 16. Características de los sismos simulados y aceleración máxima alcanzada para las regiones de la Figura 74.	95
Tabla 17. Aceleraciones esperadas en Tuxtla Gutiérrez considerando MOC-CFE-2008. ..	99
Tabla 18. Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores, modificado de CENAPRED, 2006.	101
Tabla 19. Relación entre la IMM y la PGA para distintos autores modificado de Gama (2010).	101
Tabla 20. Características de los estudios SPAC realizados en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.	120
Tabla 21. Especificaciones técnicas de la registradora y sensores empleados.	121
Tabla 22. Estudios SPAC y su relación con las propiedades dinámicas del suelo en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.	128
Tabla 23. Datos de los acelerogramas del sismo registrado el 7 de abril de 2011 en dos estaciones.	130
Tabla 24. Coeficientes sísmicos propuestos por diversos estudios con un amortiguamiento crítico del 5% (González <i>et al.</i> , 2011b).	136
Tabla 25. Clasificación de los tipos de construcción en las clases de vulnerabilidad en escala EME-92, modificada por González (2010).	146
Tabla 26. Clasificación del daño observado en estructuras de mampostería (Arellano <i>et al.</i> , 2003).	147
Tabla 27. Clasificación del daño observado en estructuras de concreto armado (Arellano <i>et al.</i> , 2003).	147
Tabla 28. Clasificación de la vivienda (CENAPRED, 2006b).	148
Tabla 29. Nivel de peligro por sismo (CENAPRED, 2006b).	149
Tabla 30. Daños medios esperados en la vivienda tradicional de Chiapa de Corzo, Chiapas (Salgado, 2005).	151
Tabla 31. Parámetros propuestos para el estudio de la vulnerabilidad de estructuras típicas de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.	152

Tabla 32. Comparativa de resistencias de piezas, morteros y mampostería para el Distrito Federal y la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.	156
Tabla 33. Sistemas constructivos encontrados en Tuxtla Gutiérrez (González <i>et al.</i> , 2010a).	157
Tabla 34. Descripción de los sistemas constructivos en Tuxtla Gutiérrez (González <i>et al.</i> , 2012)	158
Tabla 35. Resumen del efecto de sismos recientes en construcciones de concreto y mampostería, modificada de Solomon y Murat (2008), tomada de González y Gómez (2008).	167
Tabla 36. Modelado en SAP de los sistemas constructivos locales.	170
Tabla 37. Valores del grado de vulnerabilidad social ante desastres.	186
Tabla 38. Niveles de riesgo por sismo.	186
Tabla 39. Estudios de discretización de costos en: estructura, elementos no estructurales y contenidos, de acuerdo con diversos usos de la construcción (González y Gómez, 2007).	195
Tabla 40. Estudios de discretización de costos en: estructura, elementos no estructurales y contenidos para vivienda.	196
Tabla 41. Determinación de la pérdida esperada de los sistemas constructivos de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas en función de desplazamiento máximo de entrepiso.	197
Tabla 42. Discretización de daños y su equivalencia en costos en: estructura, elementos no estructurales y contenidos, de acuerdo con diversos usos de la construcción.	199
Tabla 43. Porcentajes de daños en cuatro escenarios para los niveles de desempeño de las construcciones.	203
Tabla 44. Porcentajes de daños para escenario más crítico ($T_R=475$ años).	203
Tabla 45. Porcentajes de daños para los cuatro escenario ($T_R=50$ años, $T_R=100$ años, $T_R=150$ años y $T_R=475$ años).	204
Tabla 46. Sismos ocurridos en el estado de Chiapas con magnitud superior a 6.5 (Figueroa, 1973 ^(a) ; García y Suarez, 1996 ^(b) ; Alegría, 2011 ^(c) ; González <i>et al.</i> , 2011b ^(d) ; SSN ^(e)).	232
Tabla 47. Sismos históricos ocurridos en el estado de Chiapas, intensidad igual o mayor que VI (Figueroa, 1973 ^(a) ; García y Suarez, 1996 ^(b) ; Alegría, 2011 ^(c) ; González <i>et al.</i> , 2011b ^(d) ; SSN ^(e)).	234
Tabla 48. Encuesta aplicada en Tuxtla Gutiérrez Chiapas.	238
Tabla 49. Elementos complementarios de la encuesta aplicada en Tuxtla Gutiérrez Chiapas.	239
Tabla 50. Porcentajes de daños para escenario $T_R=50$ años.	246
Tabla 51. Porcentajes de daños para escenario $T_R=100$ años.	246
Tabla 52. Porcentajes de daños para escenario $T_R=150$ años.	247

“Estaremos expuestos a los desastres por fenómenos naturales en el momento en que nos hayamos olvidado de ellos”

Dr. Torahiko Terada (1878-1935)

“Los sismos que son un fenómeno recurrente en la corteza de la Tierra, en el pasado han causado considerables pérdidas de vidas y propiedades, gran parte de esa destrucción ha sido debido a la carencia de conocimiento de los sismos y la forma en que podemos tomar acciones frente a ellos”

Sociedad Sismológica de los Estados Unidos (1910)

Tras el sismo de Lisboa de 1755... *“La gran mayoría de nuestros males físicos son obra nuestra. Teniendo el caso de Lisboa hay que considerar que si no hubiera habido 20 mil casas de 6 o 7 pisos, y que si los habitantes de esta gran ciudad hubieran estado mejor y más ligeramente distribuidos, el daño hubiera sido mucho menor y quizás incluso nulo, como si nada hubiera ocurrido”*

Jean-Jacques Rousseau (1712-1778)

“Los principales retos actuales de la ingeniería sísmica yacen en la implantación: la aplicación de los resultados de la investigación, el cumplimiento de los reglamentos y el uso, en construcción económica, de soluciones conocidas”

Emilio Rosenblueth, (1926-1994)

DEDICATORIA

A Dios por haberme dado la vida en este hermoso país y poder permitirme aprender, por tener la salud para lograr llegar a este momento y todas las gracias que me regala.

A mi amada esposa María Alejandra Borraz Santiago, por su apoyo, amor, compañía, compromiso, detalles y por todos los momentos hermosos que me regala cada día.

A mi mamá, María de Jesús Gloria Herrera Martín y mi papá, Carlos Raúl González Vargas, mis hermanos(as), sobrinos(as), son ante todo mis amigos(as) y seres queridos, comparten su tiempo, amistad y amor. Siempre que los necesito han estado conmigo, no importando el tiempo, la distancia, el ritmo de la vida y sus dificultades. Padres, han sido mi luz y guía, son ejemplo y apoyo, les reitero mi admiración, respeto, agradecimiento y cariño. El compartir este tiempo con Ustedes ha hecho de mí, el hombre, profesionalista, investigador y ser humano, que soy.

A mis profesores y compañeros escolares y laborales a lo largo de toda mi formación les reitero mi respeto y agradecimiento por compartir sus experiencias, tiempo y enseñanzas, llevo muchos momentos de Ustedes en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme las puertas, por ofrecerme la mejor formación que se puede obtener en México y en lo particular a todos los participantes en el posgrado de Ciencias de la Tierra y el Instituto de Geofísica.

El trabajo de campo de la tesis fue financiado con proyectos de investigación dirigidos técnicamente por el Dr. Juan Carlos Mora Chaparro: CONACYT 48506-F, PAPIIT IN 103909-3, Proyecto externo Instituto de Geofísica I845, Sistema Integral de Protección Civil I y II para la Reducción de Riesgos de Desastres (FOPREDEN).

Agradezco la beca del Programa del Mejoramiento del Profesorado PROMEP 103.5/06/2007 por gestiones de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas a través de su Representante Interinstitucional Mtra. Magnolia Solís López. Adicionalmente el apoyo de las autoridades de mi Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, de mis compañeros y autoridades de la facultad de Ingeniería, quienes me apoyaron para que accediera a esta formación, en especial las facilidades otorgadas por Dr. Hugo Alejandro Nájera Aguilar y Dr. José Armando Velasco Herrera.

De manera especial agradezco a mi comité tutelar quienes en todo momento estuvieron junto a mí durante estos tres años y medio aportando sus conocimientos, experiencia y recomendaciones para elaborar este trabajo:

Dr. Juan Carlos Mora Chaparro (IG, UNAM) (Tutor)
Dr. David Alberto Novelo Casanova (IG, UNAM)
Dr. Carlos Miguel Valdés González (IG, UNAM)

Agradezco al comité de evaluación del examen de candidatura quienes presentaron recomendaciones trascendentales que enriquecieron este trabajo:

Dr. David Alberto Novelo Casanova (IG, UNAM)
Dr. Gerardo Suárez Reynoso (IG, UNAM)
Dr. Jorge Aguirre González (II, UNAM)
Dr. Servando De la Cruz Reyna (IG, UNAM)
Dra. Virginia García Acosta (CIESAS)

No menos importante el comité de evaluación de grado quienes presentaron recomendaciones que enriquecieron este trabajo:

Dr. David Alberto Novelo Casanova (IG, UNAM) (Presidente)
Dr. Juan Carlos Mora Chaparro (IG, UNAM) (Secretario)
Dr. Jorge Aguirre González (II, UNAM) (Vocal)
Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy (UMICH) (Vocal)
Dr. Manuel Jara Díaz (UMICH) (Vocal)

Mi director el Dr. Juan Carlos Mora Chaparro es el artífice de este proyecto al apoyarlo con recursos económicos, humanos, conocimientos y su optimismo, así como su inagotable energía, la cual siempre lograba motivarme para dar mi máximo esfuerzo en cada actividad desarrollada en el doctorado.

Debido a que el comité académico del posgrado no aprobó implementar una codirección, formalmente, solo aparece como director el Dr. Juan Carlos Mora Chaparro, sin embargo, merece todo mi agradecimiento, respeto y admiración, el trabajo, conocimiento y aportaciones realizadas por el Dr. Jorge Aguirre González.

Durante el trabajo de campo y de gabinete desarrollado en esta investigación, intervinieron diversas personas, principalmente estudiantes de tesis, quienes con su trabajo permitieron alcanzar los resultados que se presentan en el documento:

En la adquisición de datos en campo:

Ing. José Piña Flores, Ing. Eduardo Vázquez Náfate, Ing. Isaac Jordanli Balbuena de la Cruz, Ing. José Edgar Castellanos Roque, Ing. Margarita Vidal Amaro, M.C. Abigail Jiménez Franco, Norma Valdés Reséndiz, Erbin Porfirio Santis López, Ing. Horacio Mijares Arellano e Ing. César Gutiérrez Rodríguez.

En el empleo de Sistemas de Información Geográfica:

Ing. Alondra Gil Ríos, Lic. Silvia Berenice Lovera Salazar, Ing. Itzel de los Santos Reyes, Ing. Rodrigo Manuel Balcázar Cundapí, M.C. Jorge Antonio Paz Tenorio, Biol. José Rodolfo Palacios Silva e Ing. Leonardo Daniel Ruíz Varela.

Aplicación y captura de encuestas:

Ing. Yoana de la Cruz de la Cruz, Ing. Pedro Alberto Sánchez Hernández, Ing. Fabián Alberto Ruiz Torres, Ing. Lucía Guadalupe Vázquez Chávez, Ing. Claudia Crystel Guirao Prado, José Juan Espinosa Hernández, Jorge Luis Pérez García, Ing. Marcos Abel López Cabrera e Ing. Adela Limones Durán.

Programación:

Ing. Eneas Espinosa Cerdio, Dr. Carlos Manuel García Lara, M.I. Ricardo Gabriel Suárez Gómez y Lic. Adrián Torrijos Mora.

Debo agradecer adicionalmente a las siguientes instituciones y personas que me facilitaron información que fortaleció el documento:

Instituto de Protección para el Manejo Integral de Riesgo de Desastres del estado de Chiapas en especial a su director Lic. Luis Manuel García Moreno.

A la empresa Sísmica de suelos en especial al Dr. Raúl Aguilar Becerril.

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco en especial a la Dra. María de la Consolación Gómez Soberón y Dr. Arturo Tena Colunga,

Universidad Autónoma de Chiapas en especial a M.C. Jorge Alfredo Aguilar Carboney,

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas en especial al Ca Dr. Carlos Narcía López.

RESUMEN

Esta investigación se realizó en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, considerando sus características geotécnicas, geológicas, morfológicas, hidrológicas, sociales y económicas así como estudios de microzonificación sísmica. Se analizó en detalle el peligro sísmico al que se encuentra expuesto el centro histórico de la ciudad. Con este propósito, se recurrió a planos, cartas de ordenamiento territorial y litografías que datan de principios del siglo XIX hasta la fecha para ubicar los efectos locales de sismos históricos. Adicionalmente, se observó la evolución histórica del tipo de vivienda y la tendencia de crecimiento de la ciudad. Se localizaron antiguos cauces de ríos y caudales, espejos de agua así como zonas de relleno de la mancha urbana dentro de las cuales el suelo presentó características dinámicas especiales. Se emplearon diversas técnicas geofísicas (Nakamura, SPAC, Calicatas-SPAC) para determinar, mediante el análisis de microtemores (vibración ambiental), los periodos dominantes, las amplificaciones relativas y los perfiles de velocidad. Los resultados permitieron delimitar dos zonas: 1) Zona de laderas con un máximo de frecuencia hasta los 15 Hz, para referirnos a suelos originales sin modificación; y 2) Zona centro (valle) la cual presenta un máximo espectral desde los 2 y hasta valores cercanos a 1 Hz, para referirnos a suelos blandos. Con base en lo anterior se encontró que los valores de la amplificación relativa varían desde 2 hasta 25 veces dependiendo de las características físicas de los suelos, lo cual evidencia un efecto de sitio que se ubica en el centro y en la parte más baja de la ciudad, cercanas al río Sabinal. Se desarrolló un catálogo sísmico para la zona de estudio empleando las bases de datos del Servicio Sismológico Nacional 1974-2012 y de la Red Inter Universitaria de Ingeniería Sísmica 1995-2012. El peligro sísmico se evaluó de manera probabilista considerando las metodologías establecidas por CRISIS (2007), PRODISIS (2008) y mediante funciones de Green empíricas. Como resultado de lo anterior se estimó una aceleración máxima esperada de 589 gales para un periodo de retorno de 475 años. Se identificaron trece sistemas constructivos locales distribuidos en la ciudad, mismos que se modelaron con SAP2000 y NONLIN para evaluar parámetros dinámicos tales como sus distorsiones laterales y rotaciones máximas. Como parte de esta investigación, se desarrolló un software en Matlab denominado SORIS que permite evaluar la vulnerabilidad de cada sistema integrando explícitamente los efectos de las irregularidades estructurales y obteniéndose así la curva de fragilidad para cada uno de los sistemas constructivos. Paralelamente, se construyó una base de datos que incluye las características específicas de alrededor de 6,000 construcciones distribuidas en la mancha urbana en la ciudad. Cada una de estas construcciones fue seleccionada mediante inferencia estadística. La base de datos construida es una muestra estadísticamente representativa de la población de estudio. Con el programa SORIS se determinaron los siguientes escenarios y consecuencias en los sistemas constructivos:

Escenario 1 (Período de retorno de 50 años; 0.15g): 106,140 construcciones (73.21%) sin daño; 30,595 (21.10%) ocupación inmediata; 7,081 (4.88%) seguridad de vida; 1,039 (0.72%) prevención de colapso y 121 (0.08%) colapso.

Escenario 2 (Período de retorno de 100 años; 0.27g): 85,792 construcciones (59.18%) sin daño; 45,095 (31.10%) ocupación inmediata; 11,890 (8.20%) seguridad de vida; 1,740 (1.20%) prevención de colapso y 459 (0.32%) colapso.

Escenario 3 (Período de retorno de 150 años; 0.43g): 51,934 construcciones (35.82%) sin daño; 66,966 (46.19%) ocupación inmediata; 20,083 (13.85%) seguridad de vida; 4,495 (3.10%) prevención de colapso y 1,498 (1.03%) colapso.

Escenario 4 (Período de retorno de 475 años; 0.60g): 10,754 construcciones (7.42%) sin daño; 89,194 (61.52%) ocupación inmediata; 21,605 (14.90%) seguridad de vida; 14,089 (9.72%) prevención de colapso y 9,329 (6.43%) colapso.

Los resultados de este estudio se calibraron considerando los sismos del 20 de octubre de 1995 y del 7 de abril de 2011, los cuales corroboraron los escenarios estimados. Finalmente los resultados se expresaron en diversos mapas que muestran la distribución espacial de los daños para los diferentes escenarios los cuales pueden ser utilizados como una herramienta en la gestión del riesgo por un evento sísmico en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

ABSTRACT

This research was realized in the city of Tuxtla Gutierrez, Chiapas considering the geotechnical, geological, morphological, hydrological, social and economic characteristics of the city, as well as a study of seismic microzonation. We developed a detailed earthquake hazard analysis of the downtown of the city. With this purpose we considerate urban planning projects and lithographs dating from the early 19th century up to present to understand site effects from historical sources. Additionally, we observed the evolution of housing type as well as the city's growth trends. We documented the river paths and flows, bodies of water, sprawl areas. In these zones the ground presented special dynamic features. We used various geophysical techniques like Nakamura, SPAC, Calicatas-SPAC, to determine from microtremors (environmental vibration), the dominant periods, the relative amplifications, and velocity profiles. We delimited two zones: 1) Slope areas that have a maximum frequency of 15 Hz, this region corresponds to the original soil without modification; 2) Downtown area (Valley), which presents maximum spectral values of 2 at 1 Hz, which corresponds to soft soils. The relative amplification values ranges from 2 up to 25 times depending on the local soil characteristics identifying a site effect located in downtown area close to the Sabinal River. We elaborated an earthquake catalog using the database from the National Seismologic Service 1974-2012 and the Inter University Earthquake Engineering Network 1995-2012. The earthquake hazard was estimated with different PHSA techniques such as CRISIS (2007), PRODISIS (2008), and empirical Green's functions. As a result of our analysis, we estimated an expected maximum PGA of 589 for a 475-year return period. We identified thirteen local building systems as a result of the fieldwork and we established their distribution in the city. That building systems were modeled with SAP2000 and NONLIN to assess dynamic parameters such as lateral distortion and maximum rotations. As an outcome of this research we developed an algorithm in Matlab named SORIS that evaluates the vulnerability of each system integrating the effects of structural irregularities to obtain the fragility curve of each construction systems. In addition, we built a database that includes the specifics of about 6,000 buildings distributed in the urban area. Each building was selected according to statistical inference. The database is a statistically representative sample of the households in the city. SORIS provides the following scenarios for the different construction systems:

Scenario 1 (50-year return period; 0.15g): 106,140 buildings (73.21%) without damage; 30,595 (21.10%) immediately occupancy with minor damage; 7,081 (4.88%) living conditions with moderate damage; 1,039 (0.72%) partial collapse prevention; and 121 (0.08%) total collapse.

Scenario 2 (100-year return period; 0.27g): 85,792 buildings (59.18%) without damage; 45,095 (31.10%) immediately occupancy with minor damage; 11,890 (8.20%) living conditions with moderate damage; 1,740 (1.20%) partial collapse prevention; and 459 (0.32%) total collapse.

Scenario 3 (150-year return period; 0.43g): 51,934 buildings (35.82%) without damage; 66,966 (46.19%) immediately occupancy with minor damage; 20,083 (13.85%) living conditions with moderate damage; 4,495 (3.10%) partial collapse prevention; and 1,498 (1.03%) total collapse.

Scenario 4 (475-year return period; 0.60g): 10,754 buildings (7.42%) without damage; 89,194 (61.52%) immediately occupancy with minor damage; 21,605 (14.90%) living conditions with moderate damage; 14,089 (9.72%) partial collapse prevention; and 9,329 (6.43%) total collapse.

The results of this study were calibrated considering the local impact from the earthquakes of October 20, 1995, and April 7, 2011 confirming the estimated scenarios. Finally, our results are presented in maps that display the spataila distribution of damage for the different scenarios which can be used for earthquake risk management in Tuxtla Gutierrez City.

CAPÍTULO

1

1. INTRODUCCIÓN

Diversas entrevistas con especialistas en riesgo sísmico y evaluaciones después de la ocurrencia de sismos importantes hacen énfasis en la importancia del cumplimiento de los Reglamentos de Construcción también llamados Códigos para enfrentar de mejor manera los sismos intensos. Tradicionalmente, los reglamentos de construcción y sus normas técnicas de diseño enfatizan la seguridad de vida como la meta de comportamiento para el diseño de las estructuras, pero este criterio de seguridad de vida no es suficiente para garantizar que las construcciones se mantengan funcionales después de un sismo o que la reparación sea económicamente conveniente. La argumentación para permitir ese estado de comportamiento en la estructura son los costos iniciales de la construcción, los cuales deben restringirse a valores razonables (Riesgo aceptable).

Sabemos que cuando ocurre un sismo, además de los daños en las construcciones de las ciudades, se producen grandes pérdidas económicas e impacto social incalculable. Por lo cual, entendemos que se trabaja para mejorar los códigos o reglamentos a través del conocimiento preciso del peligro sísmico de una región, pero paralelamente se busca mejorar la calidad de la construcción, los materiales y la supervisión. Es decir, trabajar en lo referente a reducir el daño posible en la construcción, lo cual permite influir en la reducción de la vulnerabilidad de las ciudades y por lo tanto en mitigar su riesgo.

Los estudios de impacto económico del riesgo sísmico son relativamente recientes y su actual importancia se debe a que los fenómenos naturales son cada vez más peligrosos por los elementos expuestos. Esto es debido a que la infraestructura, equipamiento urbano y edificaciones presentes en las ciudades hacen que cada vez que ocurre un evento sean más los costos directos y aún mayores los indirectos.

La dificultad de evaluar los costos directos e indirectos asociados al riesgo sísmico parte de la interpretación unidisciplinaria del fenómeno, lo que dificulta asociar a las metodologías el carácter de integralidad que demanda el estudio. No se debe considerar únicamente el aspecto ingenieril, sino también la condición social de la región.

Los estudios y metodologías para la estimación del riesgo han sido desarrollados mayormente para ciudades con diferentes tipologías de construcciones, condiciones sociales y peligro asociado. Por estos motivos, es necesario desarrollar una metodología aplicable a las ciudades pequeñas y medianas de la República Mexicana.

En este estudio se determina el peligro, la vulnerabilidad estructural y el riesgo por sismo de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Esta ciudad se encuentra localizada en una zona que no ha sido estudiada en detalle y que presenta particularidades que propician que la vulnerabilidad sea importante. Además, es una de las diez ciudades de nuestro país con mayor crecimiento de la mancha urbana según los censos de población y vivienda del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2005; 2010). Para el análisis del riesgo sísmico se desarrolló un software denominado SORIS.

Los principales elementos técnicos y sociales que intensifican el riesgo sísmico y potenciales costos asociados para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, son los siguientes:

- Alta vulnerabilidad estructural de las construcciones e infraestructura,
- Alta densidad de población y marginación de la misma,
- Falta de normas técnicas de diseño y capacitación del medio de la construcción,
- Tiempo transcurrido sin la presencia de fenómenos sísmicos importantes,
- Número y cercanía de las fuentes sismogénicas,
- Inversión económica creciente en la ciudad, sin desarrollo técnico y normativo del medio en la misma proporción.
- Migración creciente de las zonas rurales a la ciudad, e incluso absorción de zonas rurales dentro de la mancha urbana, lo cual ha producido una conurbación.
- Población y autoridades con poca preparación para enfrentar una emergencia.

Por todo lo anterior se estima importante la presente investigación en la que se identifican las zonas de la ciudad que se encuentran en mayor riesgo, los sistemas estructurales más vulnerables, las construcciones que requieren mayor atención proporcionándose las medidas para repararlas o mitigar su vulnerabilidad. La prevención es siempre más barata que actuar posterior a los desastres como se observó en el sismo de Haití de 2010 (Suárez *et al.*, 2010).

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Estimar las pérdidas económicas por daños estructurales en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, considerando posibles escenarios por sismo. Se desarrollará una metodología para evaluar el riesgo sísmico de los diferentes tipos de estructuras existentes, contemplando los efectos de sitio y obteniendo funciones de daño que incluyan los efectos de irregularidad.

1.1.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo son los siguientes:

- Recabar y analizar la información existente del peligro sísmico y vulnerabilidad para Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Evaluar el efecto de sitio en la ciudad para determinar el peligro sísmico para distintos periodos de retorno.
- Crear una base de datos que incluya una muestra estadísticamente representativa obtenida a través de encuestas para analizar la vulnerabilidad de las construcciones de la ciudad.
- Desarrollar un algoritmo y un programa de cálculo para estimar la vulnerabilidad estructural, riesgo y costos de las estructuras de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Determinar los posibles escenarios de riesgo sísmico para Tuxtla Gutiérrez, Chiapas y evaluar los más críticos en el programa desarrollado.
- Calibrar los resultados de la metodología desarrollada contra los daños presentados durante la ocurrencia de sismos representativos que han afectado la ciudad: 21 de octubre de 1995 y 7 de abril de 2011.
- Elaborar mapas de vulnerabilidad estructural y riesgo para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, los cuales puedan ser incorporados al Atlas de riesgo municipal.
- Elaborar propuestas para reducir la vulnerabilidad estructural en construcciones presentes y futuras, así como precisar el peligro, con el propósito de disminuir el riesgo sísmico en la ciudad.

1.2. Justificación

1.2.1. Importancia económica de los estudios de riesgo en el mundo

Con el establecimiento de las primeras ciudades, comenzó el reto para sus habitantes de estudiar las condiciones de la región donde establecían su urbe y las técnicas de construcción adecuadas para éstas. Pronto descubrirían que el sitio elegido debía ser estratégico no solo para satisfacer sus necesidades de alimento, agua, defensa, clima, estéticas, etc., sino que relacionados a las ciudades, existían diversos peligros asociados a la manifestación de fenómenos naturales y que estos debían de considerarse.

Los sismos han sido uno de los retos más importantes para las ciudades desde sus comienzos. Son varios los relatos de ciudades de la antigüedad que desaparecieron o se refundaron en otro sitio tras la ocurrencia de un sismo de magnitud importante:

- Pompeya y Herculano, por un sismo generado por la erupción del Vesubio (Romero, 2010).
- Troya, Micenas, Cnossos y Megido ciudades de la edad de Bronce terminaron con sismos intensos (Nur y Burgess, 2008).

Otras ciudades perdieron su estatus de capital o simplemente la gente emigraba a otra, para sentirse a salvo.

- La ciudad de Antigua en Guatemala (Feilden, 1987).

Otro elemento a considerar es que, desde hace casi mil años, ya eran alarmantes las pérdidas de vidas humanas en ciudades ubicadas en países densamente poblados, como China e India. Cabe mencionar el sismo de Shaanxi, donde en la mañana del día 23 de enero de 1556 murieron más de 800,000 personas cerca de Huaxian, en la región china de Shaanxi (Bai, 2008).

Si bien a lo largo de los años las geociencias e ingeniería sísmica han evolucionado permitiendo hacer más precisa la evaluación del peligro, se han establecido metodologías para evaluar la vulnerabilidad, mejoraron los sistemas constructivos y se cuenta con reglamentos más específicos, no obstante esto, se ha potenciado que cada vez más los habitantes se establezcan en zonas de mayor peligro por distintos fenómenos (Figura 1).

Lo anterior debido, entre otras variables, a las dimensiones que han alcanzado algunas de las ciudades, los costos de los terrenos más seguros, la migración del campo a la ciudad, así como la falta de planeación urbana. Debido a ello el riesgo crece exponencialmente, siendo ahora casi imposible trasladar las ciudades hacia otro sitio como en el pasado (Figura 2; Tabla 1), lo cual fue analizado por Bilham (2009) en un documento denominado el futuro sísmico de las ciudades.

La Figura 1 muestra una gráfica donde se indica de manera general el número de fenómenos naturales que han generado grandes desastres en el mundo. La Figura 2

presenta el impacto económico de los desastres a valores de 2011 para un periodo de 60 años, con sus respectivas consecuencias sociales y económicas.

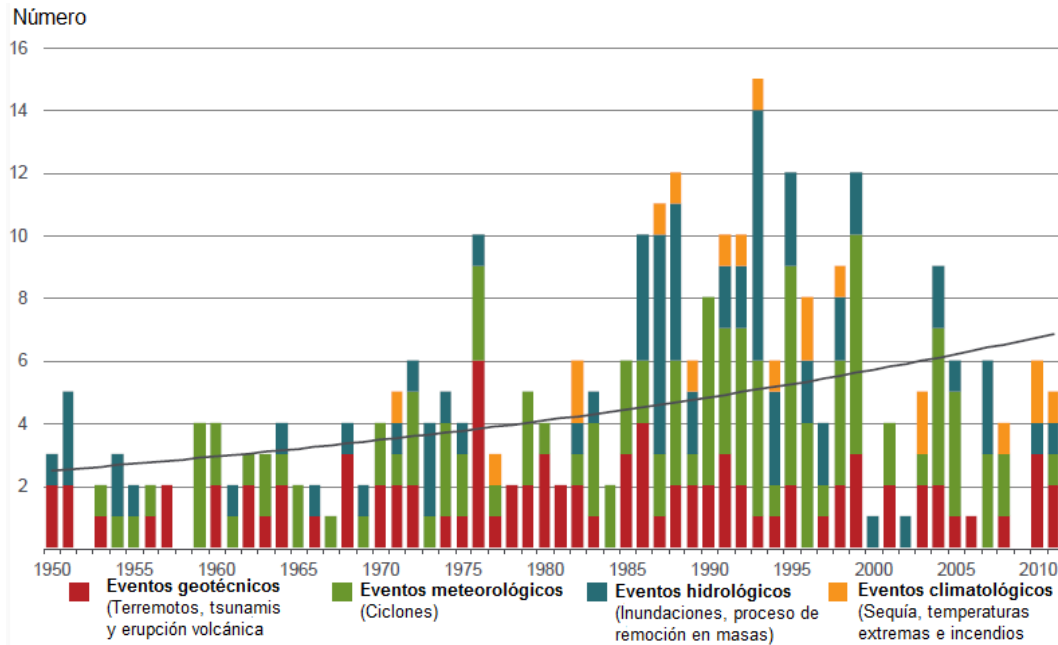


Figura 1. Número de importantes catástrofes mundiales anuales para el periodo 1950-2011. Tomado de NatCatSERVICE, MunichRE http://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/georisks/natcatservice/great_natural_catastrophes.aspx.

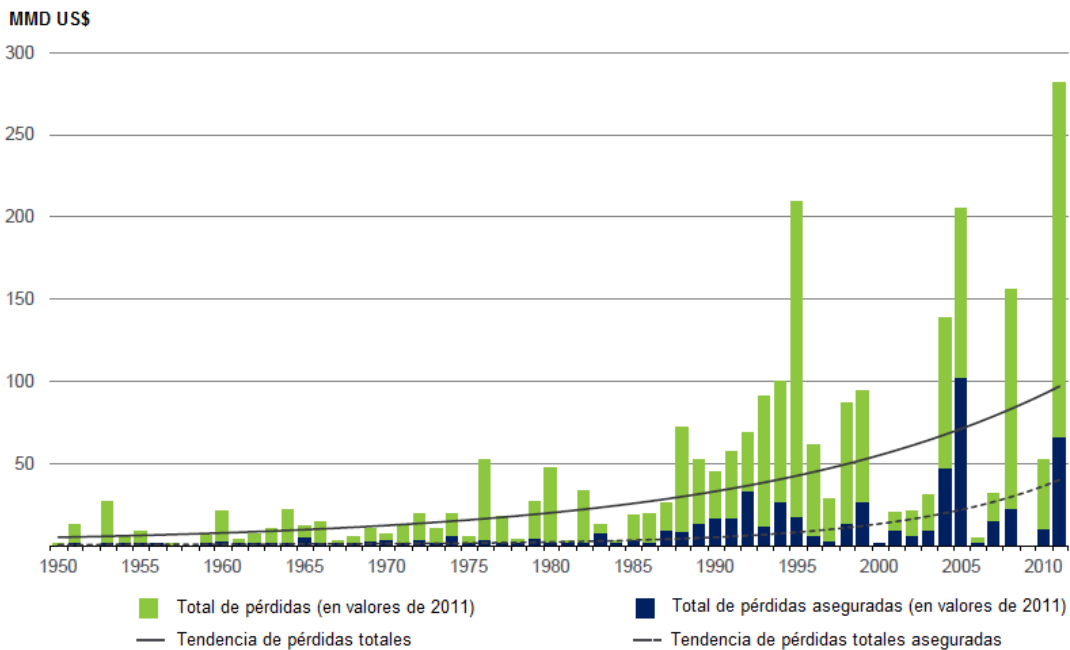


Figura 2. Costo de las importantes catástrofes mundiales anuales para el periodo 1950-2011. Tomado de NatCatSERVICE, MunichRE http://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/georisks/natcatservice/great_natural_catastrophes.aspx.

Tabla 1. Porcentaje de importantes catástrofes mundiales ocurridas durante el periodo 1950-2011. Construido con datos de NatCatSERVICE, MunichRE http://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/georisks/natcatservice/great_natural_catastrophes.aspx.

Tipo de evento	Eventos (%)	Muertos (%)	Daños económicos (%)	Daños asegurados (%)
Temblores, Tsunami y erupción volcánica	29	57	39	19
Ciclones	39	33	35	70
Inundaciones, procesos de remoción en masa	25	5	20	7
Onda de calor, frío, sequía e incendios forestales	7	5	6	4
Totales	300	2.4	2,400	500
Indicadores	Eventos	Millones de muertos	MMD US\$ (valor 2011)	MMD US\$ (valor 2011)

La tendencia ascendente de los daños causados por los desastres y considerando lo limitado de los recursos disponibles para resarcirlos (al menos en lo que respecta a la parte económica), pone de manifiesto que una de las mejores alternativas para disminuir el riesgo y atenuar su impacto económico, es reducir la vulnerabilidad de nuestras ciudades. Esto es una tarea que obliga realizar una mejoría técnica y cultural en la sociedad, así como mejorar y aplicar el marco de legalidad en las decisiones de las autoridades y en su postura frente a las invasiones de terrenos no apropiados para el desarrollo urbano.

En la Figura 3 se muestran las pérdidas ocasionadas por la manifestación de distintos fenómenos naturales en zonas vulnerables de América Latina. De acuerdo con la información presentada, México ocupa el tercer lugar en la región en pérdidas económicas tras los desastres clasificados de acuerdo con el fenómeno natural que los generó.

Debido a la recurrencia de diferentes desastres en varios de los países del continente americano, se han tenido pérdidas muy importantes con respecto a su Producto Interno Bruto (PIB), situación que se traduce en empobrecimiento de la población y estancamiento de su desarrollo, puesto que como consecuencia implica llevar a cabo gastos no previstos en la planeación anual que afectan la balanza de pagos y el desarrollo económico. Es por ello que es urgente la inversión en el desarrollo de estudios aplicados que ayuden a mitigar los desastres en los centros urbanos.

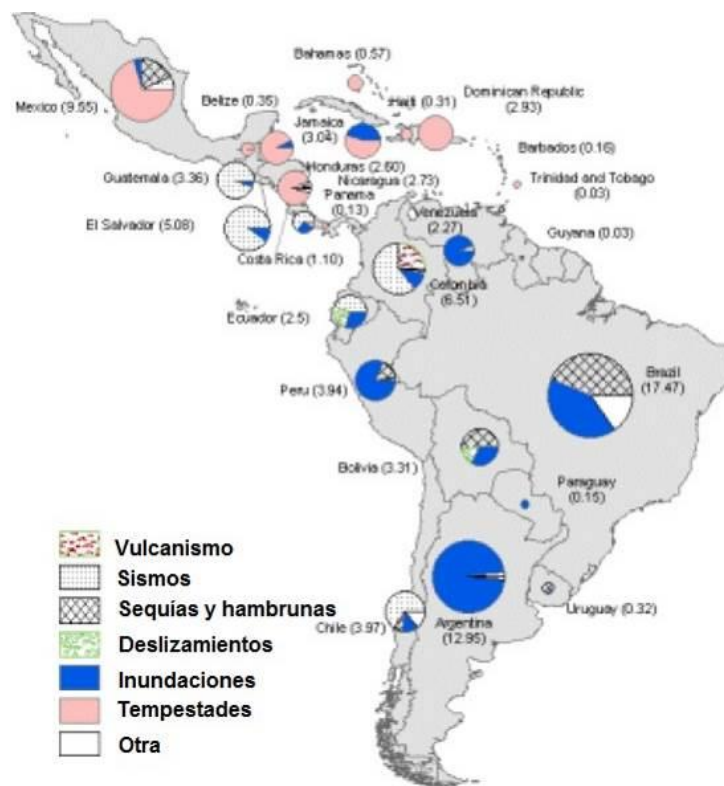


Figura 3. Pérdida por desastres en América Latina y el Caribe. Fuente EM DAT 2003 (Zapata, 2008).

No obstante el costo de algunos sismos ha sido mucho mayor en países desarrollados como Estados Unidos y Japón (desde 8 y hasta 130 MMD), el costo de los daños ocasionados por éstos no ha superado el 2.5% de su PIB, pudiendo recuperarse de éstos en el corto plazo (Tabla 2). En cambio, en países en vías de desarrollo, si bien las pérdidas económicas no son tan grandes, éstas representan un porcentaje muy alto de su PIB, como es el caso de Nicaragua con el sismo de 1972 en Managua, donde se presentaron pérdidas de 5 MMD, estas correspondieron al 40% del PIB, lo cual representa uno de los factores que aún no permiten que el país se recupere económicamente.

Tabla 2. Efecto de los sismos en la economía de distintos países desarrollados respecto a los efectos en países centroamericanos (Miranda, 2008).

Año	Sismo	Magnitud	Costo en MMD	% del PIB
1972	Managua, Nicaragua	6.2	5.0	40
1976	Guatemala, Guatemala	7.5	1.1	18
1980	Irpina, Italia	6.8	10.0	7
1985	Michoacán, México	8.0	5.0	2.7
1986	El Salvador, El Salvador	7.2	1.5	31
1989	Loma Prieta, California, EUA	6.9	8.0	0.2
1994	Northridge, California, EUA	6.7	30	1.0
1995	Kobe, Japón	6.8	180	2.5

1.2.2. Importancia económica de los estudios de riesgo en México

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) es la instancia que en nuestro país más ha estudiado el fenómeno de riesgo con todas sus componentes, así como los costos asociados a los desastres. Ha documentado su investigación en una serie de reportes denominados “*Impacto Socioeconómico de los Desastres en México*”, los cuales fueron coordinados por Bitrán (2001), y aún siguen desarrollándose anualmente. En síntesis, de estas investigaciones se desprenden las siguientes cifras para los sismos más importantes en el país durante el siglo XX:

- Durante el siglo XX, en nuestro país ocurrieron 71 sismos con magnitud $M > 6.0$
- El 33% de la población (hasta el censo del INEGI, 2000) vivía en zonas de alto y muy alto peligro sísmico.
- En 1985 se registraron pérdidas por 4,500 millones de dólares, más de 10,000 víctimas fatales y 90,000 viviendas dañadas.
- En 1999 con dos sismos (Colima y Puebla) de $M < 7.5$, hubo daños en 51,000 viviendas, 3,600 escuelas y 221 hospitales.

Revisando las cifras, podemos entender que los desastres son cada vez más frecuentes y representan un costo que el país no puede superar fácilmente. Tras un desastre, las regiones afectadas retroceden algunos años en su desarrollo social y económico. Tal es el caso de la ciudad de Tapachula en la costa de Chiapas, que después ocho años del impacto del huracán Stan, siguen siendo infructuosos los esfuerzos de las autoridades y la sociedad civil para alcanzar las mismas condiciones existentes previas al desastre.

En nuestro país los riesgos presentes en cada región se han catalogado y descrito en documentos denominados “*Atlas de Riesgo*”, como los desarrollados en el estado de Chiapas (PCECH, 2003; SGM, 2005a) y más recientemente los Atlas de Riesgos Municipales promovidos por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) tal es el caso del Atlas de Riesgo del Municipio de Tuxtla Gutiérrez (SEDESOL, 2011). En estos documentos los riesgos se determinan con la siguiente clasificación:

- Riesgos geológicos.
- Riesgos hidrometeorológicos.
- Riesgos químico-tecnológicos.
- Riesgos biológicos-sanitarios.
- Riesgos socioeconómicos.

Hasta el año 2000 y durante todo el siglo pasado, el CENAPRED tiene registrados y estudiados en el territorio nacional 101 “*grandes desastres*”. Dentro de esta selección, se consideran sólo aquellos que fueron provocados por causas naturales y fueron agrupados de acuerdo con las categorías presentes en los Atlas de riesgo. El porcentaje representativo de cada una de estas categorías se pueden observar en la Figura 4. En ella se muestra que los riesgos geológicos e hidrometeorológicos han aportado el 80% de los desastres y sus costos asociados.

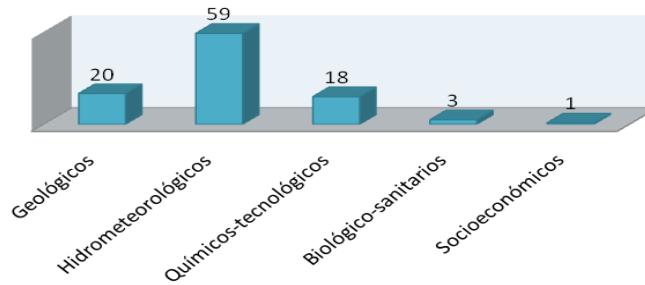


Figura 4. Clasificación de los 101 principales desastres naturales ocurridos en México durante el siglo XX (Bitrán, 2001).

No obstante que los fenómenos hidrometeorológicos son los que más daños ocasionaron y los que más frecuentemente presentaron los desastres del siglo pasado, los sismos son los que más viviendas dañan por evento (Tabla 3), donde se analizan 2,674 eventos que se presentaron desde enero 1988 a diciembre de 1997. La base de datos Desinventar México cuenta con 17,173 registros entre 1980 y 2006, de los cuáles 13,346 (78%) corresponden a desastres asociados a fenómenos naturales, los 3,827 (22%) registros restantes están asociados principalmente a eventos antrópicos como accidentes, pánico, contaminación, intoxicación, y otros como epidemias y plagas (GAR, 2009).

En la Tabla 3 se presentan índices normalizados por tipo de evento que produjo el desastre, se observa que en promedio los sismos dejan más heridos y muertos por evento (37.50). Es necesario señalar que el sesgo de la muestra es debido a que las muertes se deben principalmente a los sismos de septiembre de 1985. En relación a daños en viviendas, los sismos también generan un mayor número de viviendas dañadas (799.53) comparadas respecto a las 199.26 que se pierden durante una inundación extrema.

Tabla 3. Índices normalizados de heridos y muertos, así como viviendas afectadas, por desastres en México desde 1980 a 2006 (Construida a partir del formato propuesto por Velázquez y Rosales, 1999) y con la base de datos de GAR (2009).

Concepto	Inundación	Deslizamiento	Incendio	Sismo
Relación de heridos y muertos por evento	3.04	1.66	0.18	37.5
Viviendas afectadas y destruidas por evento	199.26	8.37	1.48	799.53

En México tras analizar los datos económicos del sismo de septiembre de 1985, la pérdida de 4,100 millones de dólares (3,588.50 gastos directos y 515.50 gastos indirectos), significó el 2.70% del producto interno bruto de ese año; el 13.50% de la formación bruta de capital o el 11.00% del gasto total del Gobierno Federal (Bitrán, 2001). Tuvo, además un efecto perceptible sobre las finanzas públicas y el sistema de intermediación financiera. Debido a que unas 150,000 personas quedaron temporalmente desempleadas, se estima que hubo una reducción de unos 84 millones de dólares de ingreso personal. El producto interno bruto que había crecido en 3.60% en 1984, redujo su ritmo a 2.70% en 1985 y presentó una contracción del 4.0% para 1986.

En la Figura 5, se muestran las afectaciones que se han presentado en distintos sectores básicos de la economía de los estados y el país (Velázquez y Rosales, 1999). En la Figura

5a se observa que el estado de Chiapas es el quinto estado con mayor daño en su infraestructura (tan solo por debajo del Distrito Federal, Estado de México, Veracruz y Oaxaca). Debido a que Chiapas se encuentra rezagado en el desarrollo de infraestructura, el daño tiene un mayor impacto en los distintos sectores.

El estudio de Velázquez y Rosales (1999) no contempla los años 1998, 2005 y 2007, durante los cuales el estado de Chiapas ha sido afectado por distintos eventos hidrometeorológicos muy importantes en cuanto al daño que produjeron. Considerando lo anterior las cifras se harían más críticas de lo reportado anteriormente para los sectores agropecuario, educación, industria y de transporte, los cuales son los considerados en el estudio. En la Figura 5b se observa que Chiapas es el catorceavo estado con mayor daño en su infraestructura de servicios (considerando alcantarillado, energía y acueducto).

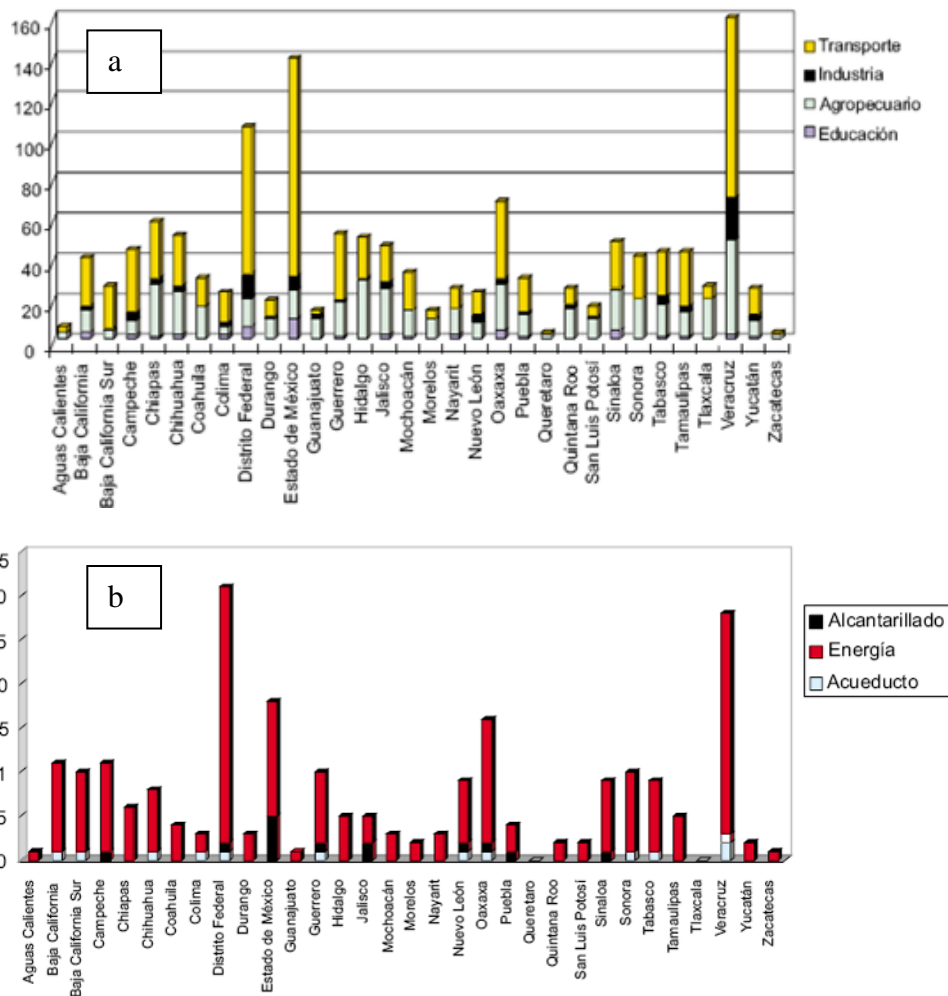


Figura 5. (a) Afectaciones a sectores Transporte, Industria, Agropecuario y Educativo y su infraestructura. (b) Afectaciones a servicios Alcantarillado, Energía y Adecuado y su infraestructura (Velázquez y Rosales, 1999).

En la Figura 6 se muestra el nivel de pérdida esperada por sismo en la infraestructura en México. Se consideran dos peligros muy recurrentes: sismo y huracanes, en todos los

casos un sismo puede impactar con pérdidas mayores, aunque este comportamiento es más importante para los periodos de retorno superiores a 200 años.

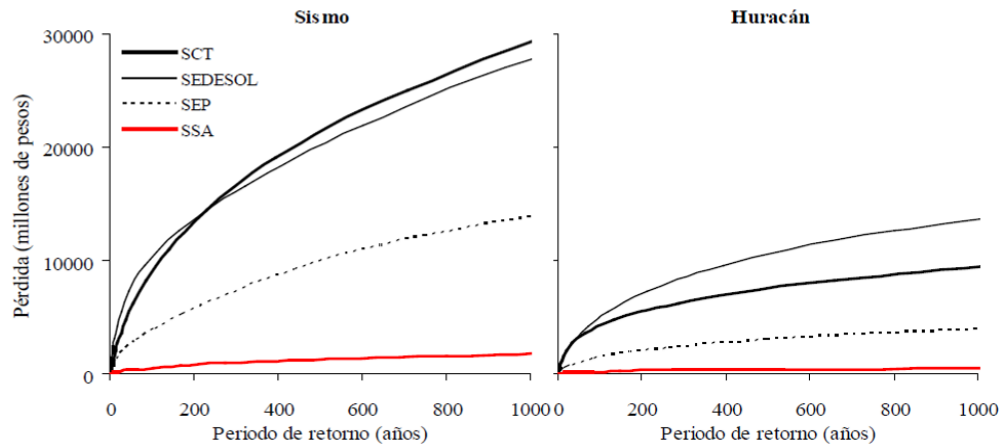


Figura 6. Curva de excedencia de pérdida para infraestructura en México por sismo y huracanes (Reinoso *et al.*, 2010).

En México los elevados niveles de riesgo parecen estar asociados directamente al acelerado crecimiento de los asentamientos humanos y a las formas de urbanización, tendiendo a concentrarse en ciudades donde prevalecen altos y muy altos niveles de marginación urbana (Flores *et al.*, 2006).

1.2.3. Importancia económica de los estudios de riesgo en Chiapas

Los diversos fenómenos naturales, tras su paso por el estado de Chiapas, se han convertido en desastres por las condiciones de vulnerabilidad en las que se encuentra la población. Desde 1996, fecha en que empezó a funcionar el Fondo Nacional para Desastres Naturales (FONDEN), y hasta el 2010 se han entregado a las autoridades del estado de Chiapas, en números cerrados el 10% de este fondo, lo que corresponde a un monto de 8,920.90 millones de pesos (Tabla 4). Lo anterior indica la urgencia de estudios de riesgo por diversos fenómenos naturales para el estado y su capital Tuxtla Gutiérrez.

Los datos procesados en la Tabla 4 corresponden a los años 1996 a 2010, período durante el cual no se presentó ningún sismo importante en el estado de Chiapas, por lo cual corresponden básicamente a desastres generados por inundaciones y procesos de remoción de masas. Es decir, el estado de Chiapas es muy vulnerable a casi cualquier fenómeno natural debido al proceso de construcción social del riesgo que históricamente se ha gestado. Considerando los grandes desastres catalogados por el Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de Desastres (IPCMIRD, 2012), desde 1982 el estado de Chiapas ha sufrido 10 grandes desastres: Erupción volcánica (Chichón, 1982), Sismo (Villaflora, 1995), Proceso de remoción de masas (Pantepec, 2003; Juan de Grijalva, 2007), Incendio forestal (Reserva El Triunfo y Parque Nacional Lagunas de Montebello, 1998), Inundaciones (Costa, 1998; Huracán Isidore, 2002; Tormenta tropical Larry, 2003; Huracán Stan, 2005; Depresión tropical Mathew, 2010).

Tabla 4. Distribución de recursos del FONDEN en Chiapas desde 1996 hasta 2010 y comparación con los gastos nacionales. Construido con datos tomados de Bitrán (2001); Bitrán *et al.* (2001); Bitrán *et al.* (2002); Bitrán *et al.* (2003); Bitrán *et al.* (2004); Bitrán *et al.* (2005); Bitrán *et al.* (2006); García *et al.* (2007); García *et al.* (2009a y 2009b); García *et al.* (2010); García *et al.* (2012).

Concepto	1996	1997	1998	1999	2000					
Nacional	861	2,520	3,267	6,969	4,841					
Chiapas	0	52	1,923	353	40					
Concepto	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Nacional	825	4,045	1,765	1,863	8,530	3,940	14,424	15,474	5,531	14,838
Chiapas	41	128	45	187	2,507	0	2,545	278	0	822
Concepto	1996-2000	%	2001-2010	%	1996-2010	%				
Nacional	18,457	100.00	71,235	100.00	89,692	100.00				
Chiapas	2,368	12.83	6,553	9.20	8,921	9.95				

Debido a que en la presente investigación se analizan los daños en las construcciones ante diferentes escenarios sísmicos, es conveniente revisar la base de datos que se empleó para el desarrollo del GAR (2009), en su capítulo México, la cual cuenta con 17,173 registros entre 1980 y 2006, para las variables muertos, viviendas afectadas y destruidas (Tabla 5).

Tabla 5. Impacto de los desastres en Chiapas en el periodo 1980-2006 (GAR, 2009).

Estado	Registros	%	Muertos	%	Viviendas afectadas	%	Viviendas destruidas	%
Chiapas	12	15.2	2,708	16.1	119,430	22.0	53,659	17.1

Chiapas y Veracruz que registran la mayor cantidad de viviendas destruidas y afectadas ante la ocurrencia de fenómenos naturales, se caracterizan por una amplia dispersión de la población en miles de localidades pequeñas. En Chiapas, el 79.8% de su población continúa siendo rural: 52.3% de la población total viviendo en localidades de menos de 2,500 habitantes y un 15.7% adicional habitando en localidades de entre 2,500 y 15,000 habitantes. Chiapas presenta un muy alto grado de marginación y ocupa el segundo lugar en este rubro a nivel nacional (GAR, 2009). En la Tabla 6 se presenta una distribución de las viviendas destruidas en distintos municipios de Chiapas para el periodo del estudio.

Tabla 6. Distribución de viviendas destruidas en Chiapas en el periodo 1980-2006 (GAR, 2009).

Estado	Municipio	Viviendas destruidas
Chiapas	Amatán	495
	Motozintla	1,780
	Pichucalco	1,060
	San Cristóbal de las Casas	352
	Tapachula	4,230
	Tuxtla Gutiérrez	1,180

La Tabla 7 y la Figura 7 muestran la gran concentración de pérdidas en pocos estados, existe una menor concentración de pérdidas como manifestación de riesgo extensivo (debido a daños a partir de fenómenos naturales de alta frecuencia y poca intensidad) a

diferencia de lo que sucede con el riesgo intensivo (debido a daños a partir fenómenos naturales de baja frecuencia y muy intensos).

Tabla 7. Pérdidas económicas globales en Chiapas 1980-2006 (miles de dólares) (GAR, 2009).

Estado	Pérdidas intensivas	%	Pérdidas extensivas	%	Pérdidas totales	%
Chiapas	1,274,685.74	4.9	188,122.65	1.2	1,462,808.39	3.6

Los procedimientos para el cálculo de pérdidas esperadas en construcciones ante sismo, cobran cada vez más importancia. Como lo señala Ordaz (2011) *“se trata de un interesantísimo problema clásico de ingeniería al que deberá dedicarse más investigación en el futuro”*.

Sin embargo, no podemos dejar de señalar que Chiapas tiene un ingreso mensual promedio per cápita por hogar estimado de \$1,215.00, lo cual es reflejo de los niveles de pobreza que alcanza el 75.7% de la población (Pobreza de capacidades: insuficiencia del ingreso disponible para adquirir el valor de la canasta alimentaria y efectuar los gastos necesarios en salud y educación, aun dedicando el ingreso total de los hogares nada más que para estos fines). Esta pobreza está asociada a las capacidades de enfrentar los riesgos y reduce las posibilidades de intervención en pro de reducir la vulnerabilidad, lo cual obliga a las autoridades, universidades, investigadores, etc., a proponer soluciones más adecuadas a las condiciones y realidad social del estado.

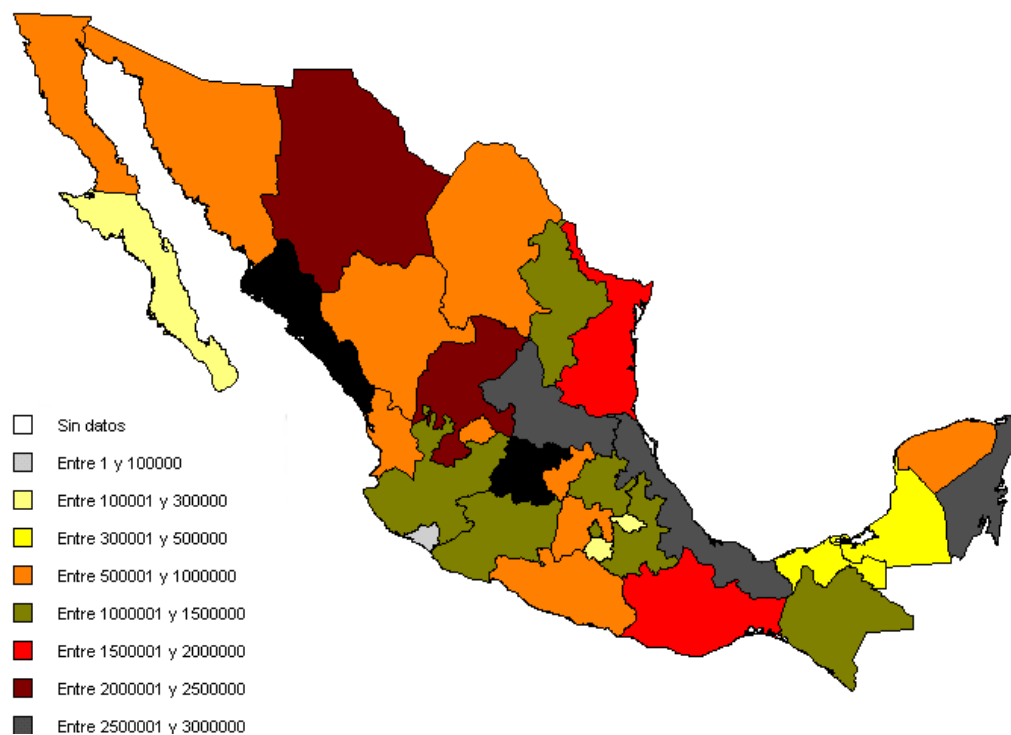


Figura 7. Distribución espacial de las pérdidas totales 1980-2006 (miles de dólares) (GAR, 2009).

1.3. Alcances y logros de la investigación

La metodología desarrollada en la investigación permitirá evaluar el riesgo sísmico de Tuxtla Gutiérrez prácticamente en tiempo real. Tan solo unos minutos después de capturar estas aceleraciones en el software se obtendrán mapas y bases de datos que permitirán identificar las zonas con mayor número de daños y donde se prioriza la atención. Adicionalmente permite construir los escenarios que agilicen la gestión del riesgo sísmico antes de la ocurrencia de un sismo intenso.

En este trabajo de investigación se realiza un análisis de los posibles daños por sismo en las estructuras de las edificaciones de Tuxtla Gutiérrez. Con la metodología desarrollada será posible en un futuro determinar el posible impacto sísmico a otros sistemas constructivos fundamentales para la operación de la ciudad como son las líneas vitales (carreteras, puentes, presas, servicios de comunicación, hidráulico-sanitarios, energéticos, etc.). Otra de los elementos que se integraran en futuro al SORIS es la evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica de los habitantes de las estructuras incluidas en las bases de datos. No obstante los retos por delante se puede afirmar que con este trabajo se generan las bases sólidas para que en futuras investigaciones puedan ser evaluadas estas variables.

Respecto al peligro sísmico, se presenta un trabajo acucioso de análisis histórico llevado a SIG para identificar y evaluar los daños históricos por sismo. Adicionalmente, se evalúa el efecto de sitio de una manera detallada que implicó numerosas mediciones y aplicación de las técnicas de Nakamura y arreglos SPAC, incluso una innovación de la técnica SPAC empleando arreglos denominados Calicatas-SPAC. Adicionalmente se emplearon distintos programas para evaluar el peligro: CRISIS (2007) y PRODISIS (2008).

Para la determinación de la vulnerabilidad se identifican los diferentes sistemas constructivos y se ubicaron espacialmente. Se desarrolló un software basado en una metodología denominada SORIS que evalúa el efecto de las irregularidades constructivas en las funciones del daño de cada uno de los sistemas constructivos mediante la introducción del parámetro β_5 . Las irregularidades que contempla el β_5 son piso blando, columna corta, en planta, en elevación y golpeteo. La principal aportación de esta investigación representa la metodología desarrollada y plasmada en el software. Sin embargo, existen innovaciones parciales en cada una de las áreas en que fue dividida la evaluación del riesgo:

- a) Aportación para el peligro sísmico: información generada para Tuxtla Gutiérrez, aplicación de diversas técnicas nunca aplicadas en esta zona para evaluar el efecto de sitio (SPAC y calicatas-SPAC).
- b) Aportaciones para evaluar la vulnerabilidad: información generada para la capital del estado con la identificación de los diferentes sistemas constructivos locales y su caracterización así como el desarrollo de una metodología que integra diversas variables: distorsión, desplazamiento, ductilidad, no-linealidad e irregularidades.
- c) Aportaciones para evaluar impacto económico: Desarrollo del Software SORIS que integra, peligro y vulnerabilidad y define el estado de daño de los sistemas

constructivos a partir de distintos niveles de comportamiento ubicándolos espacialmente.

1.4. Descripción del capitulado de la tesis

La tesis está dividida en los capítulos siguientes:

Capítulo 1. *Introducción*, incluye la justificación de la investigación dividida desde lo mundial hasta lo estatal, así como los objetivos: general y particulares, alcances y logros de la investigación y descripción del contenido capitular.

Capítulo 2. *Marco conceptual del riesgo*, describe los principales conceptos alrededor de la teoría del análisis y gestión de riesgos, enfocada básicamente al riesgo sísmico.

Capítulo 3. *Procesos históricos, sociales y físicos que condicionan los niveles de vulnerabilidad existentes actualmente en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*, en este capítulo se hace un breve recuento histórico de la conformación de la ciudad capital, Tuxtla Gutiérrez, para posteriormente mostrar un análisis de variables sociales, así como físicas, tales como: Geología, Geomorfología, Geotecnia, Hidrología, etc.

Capítulo 4. *Peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*, se muestran distintos enfoques del análisis del peligro por sismo, se presenta un análisis del peligro sísmico utilizando las metodologías PRODISIS, CRISIS y funciones de Green empíricas. Se describen las fuentes sismogénicas de la región, sus tasas de generación, leyes de atenuación, análisis del efecto de sitio y estructura de velocidad. Se realiza un análisis de los daños históricos y se determina la aceleración máxima esperada para distintos periodos de retorno para el sismo máximo probable.

Capítulo 5. *Vulnerabilidad sísmica en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*, se describen diversas técnicas utilizadas. Se presenta la metodología desarrollada y usada en esta investigación que dio como resultado el software SORIS. Además, se emplea el método de la UAM y del CENAPRED. Se describen los sistemas constructivos empleados en la ciudad y su distribución espacial, así como el análisis de sus propiedades dinámicas y las variables que influyen en el comportamiento de los diversos sistemas constructivos frente a sismos.

Capítulo 6. *Escenario de riesgo sísmico y su impacto económico en las estructuras*, construcción de los escenarios probables para la ciudad, evaluación del efecto de los escenarios mediante el programa SORIS. Comparación de los escenarios considerando sismos significativos en la ciudad (21 de octubre de 1995 y 7 de abril de 2011) y sus consecuencias en las construcciones de la ciudad, así como su distribución espacial.

Capítulo 7. *Conclusiones y Recomendaciones*. Se presentan las conclusiones fundamentales de la investigación, las recomendaciones resultantes del proceso que corresponden a un conjunto de propuestas para reducir la vulnerabilidad en construcciones presentes y futuras. Se precisa el peligro, en busca de disminuir el riesgo sísmico en la ciudad.

CAPÍTULO

2

2. MARCO CONCEPTUAL DEL RIESGO

2.1. Desastres por fenómenos naturales

2.1.1. Clasificación de los desastres en las zonas urbanas

Un desastre puede definirse de acuerdo con Cardona (1993) como: *“un evento o suceso que ocurre, en la mayoría de los casos, de forma repentina e inesperada, causando sobre los elementos sometidos alteraciones intensas, representadas en la pérdida de vida y salud de la población, la destrucción o pérdida de los bienes de una colectividad y daños severos sobre el medio ambiente”*. Esta situación significa la desorganización de los patrones normales de vida, generando desconcierto en las personas, efectos sobre la estructura socioeconómica de una región o un país y la modificación del medio ambiente, lo cual determina la necesidad de asistencia y de intervención inmediata, que puede durar varios años. No obstante, es necesario señalar que considerando los recursos de las investigaciones y el estado del arte de la tecnología, se puede considerar que la connotación de inesperado para el riesgo sísmico ya no es necesariamente precisa.

Los desastres pueden ser originados por la manifestación de un fenómeno natural, provocados por el hombre o como consecuencia de una falla de carácter técnico en sistemas industriales o bélicos. Las ciudades y sus construcciones deben ser capaces de comportarse de manera correcta ante éstos, tras cumplir las recomendaciones de los estudios de riesgo (Bruneau *et al.*, 2002).

Algunos desastres originados por fenómenos naturales corresponden a amenazas que no pueden ser neutralizadas. Lo anterior se debe a que difícilmente su mecanismo de origen puede ser intervenido, aunque en algunos casos puede controlarse parcialmente (esto se refiere al desastre más nunca el fenómeno). Las manifestaciones del fenómeno natural pueden ser paulatinas en el tiempo e identificadas mediante monitoreo constante, planificación de las ciudades, capacitación, sistemas de protección civil preparados,

respeto de los derechos de vía y áreas protegidas, construcción sismoresistente, verificando reglamentos para actualizarlos y cumplirlos mediante supervisión estricta.

Los desastres, cualesquiera sean sus génesis, causas y procesos desencadenantes, ocurren en todas las escalas, desde lo individual – familiar y puntual, hasta lo nacional e internacional, los cuales sólo son diferenciados según las capacidades y conocimientos para la mitigación que cada comunidad o individuo haya logrado desarrollar.

Una lista de los fenómenos naturales que al manifestarse en una región y al conjuntarse con las vulnerabilidades existentes pueden detonar desastres es la siguiente:

- Terremotos, Tsunamis (maremotos).
- Erupciones volcánicas.
- Huracanes (tormentas y vendavales) e Inundaciones.
- Procesos de remoción en masa (deslizamientos, derrumbes, flujos).
- Sequías (desertificación), Epidemias y plagas.

Entendiendo estos fenómenos naturales como complejos (riesgo complejo), tienen a su vez fenómenos secundarios derivados de los primeros, como es el caso de procesos de remoción en masa, incendios, inundaciones por la ruptura de presas, tuberías, etc., epidemias por las muertes, falta de condiciones de salubridad, etc., todos estos fenómenos pueden también ser desencadenados por sismos intensos. Los sismos ocurren de forma cataclísmica, es decir, súbitamente. Sin embargo, existen casos como la desertificación y las sequías, las cuales ocurren durante un largo periodo sobre áreas extensas de manera casi irreversible. No obstante si la región es muy vulnerable la oportunidad de recuperación del desastre por sismo es casi nula, como el caso de Haití.

Los desastres de tipo antrópico pueden ser originados intencionalmente por el hombre o por una falla de carácter técnico, la cual puede desencadenar fallas en serie, causando un desastre de gran magnitud. Como ejemplo podemos citar el terrorismo ocurrido el 11 de septiembre de 2001, el cual culminó en una guerra de consecuencias impactantes para el mundo y produjo una crisis social y un estancamiento económico de orden mundial. Entre otros desastres de origen antrópico pueden mencionarse los siguientes:

- Guerras (terrorismo).
- Explosiones e incendios.
- Accidentes.
- Deforestación y Contaminación.
- Colapsos (impactos).

En la actualidad los centros urbanos ofrecen una alta susceptibilidad a que se presenten este tipo de eventos debido a la concentración de la industria y su vinculación con zonas urbanas de alta densidad de población, de la edificación masiva y de los medios e infraestructura de transporte, comunicación y energía en pequeñas áreas.

2.1.2. Efectos de los desastres en las zonas urbanas

Los efectos que puede causar un desastre varían dependiendo de las características propias de los elementos expuestos y de la naturaleza del evento mismo. En general, pueden considerarse como elementos bajo riesgo a la población, el medio ambiente, y la estructura física representada por la vivienda, la industria y los servicios públicos (Cardona, 1993).

Los efectos pueden clasificarse en pérdidas directas e indirectas. Las pérdidas directas están relacionadas con el daño físico, expresado en víctimas, en daños en la infraestructura de servicios públicos, daños en edificaciones, el espacio urbano, la industria, el comercio y el deterioro del medio ambiente, es decir, la alteración física del hábitat. Las pérdidas indirectas generalmente pueden subdividirse en efectos sociales tales como la interrupción del transporte, de los servicios públicos, de los medios de información y la desfavorable imagen que pueda tomar una región respecto a otras; y en efectos económicos que representan la alteración del comercio y la industria como consecuencia de la baja en la producción, la desmotivación de la inversión y la generación de gastos de rehabilitación y reconstrucción.

La determinación de las pérdidas es un proceso complejo que en ocasiones no se pueden estimar, si no se tienen antecedentes del comportamiento anterior de la ciudad al evento, como serían las pérdidas indirectas que se producen por la falla de un puente. Por ejemplo, los costos del retraso en la entrega de las mercancías, de que no puedan trasladarse a los enfermos rumbo al hospital o de los trabajadores a su empleo (Kiremidjian *et al.*, 2001).

Evaluar el riesgo es complejo por lo que se ha diseccionado el concepto en sus partes para posibilitar su análisis. En estos esfuerzos se ha reconocido a la vulnerabilidad como una de las variables que demanda mayor esfuerzo para ser evaluada de manera razonable. Esta dificultad se debe a que la vulnerabilidad de una región está inseparablemente ligada a los procesos sociales, culturales y económicos en el lugar, así como a la transformación agrícola y ecológica de la región, por ello el tipo de construcción y sus características es una consecuencia de esos procesos (Mansilla, 2000). Según Alarcón (2005), las vulnerabilidades se construyen como el producto de la evolución, tanto positiva como negativa, de la sociedad en una región, puesto que reflejan la debilidad, las falencias o los éxitos de la evolución de una determinada sociedad.

2.2. Marco conceptual

Ante la diversidad de conceptos acerca de los desastres por fenómenos naturales que eran propuestos por algunos autores y con el fin de unificar sus acepciones, la Oficina de las Naciones Unidas para Desastres (UNDRO) que forma parte de la Oficina para Asuntos Humanitarios (DAH) en conjunto con el Programa para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) promovió una reunión de expertos para obtener conceptos homogéneos para la disciplina (Carmona, 1993). A partir de esta reunión, las acepciones que se utilizan en esta disciplina son:

- **Amenaza o peligro (*Hazard* – H)**, definida como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto periodo de tiempo en un sitio dado.
- **Vulnerabilidad (*V*) (*Vulnerability* – V)**, conocida como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, expresada en una escala desde cero “0”, o sin daño, hasta uno “1”, o pérdida total.
- **Riesgo Sísmico (*Earthquake Risk* – R_s)**, como el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.
- **Elementos bajo Riesgo, Exposición (E)**, como la población, las edificaciones y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuestos en un área determinada.
- **Riesgo Total (*Total Risk* – R_t)**, como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica, debido a la ocurrencia de un evento desastroso, es decir, el producto del riesgo específico R_s y los elementos bajo riesgo E .

En otras palabras, la evaluación del riesgo puede llevarse a cabo mediante la siguiente formulación general (ecuación 1):

$$R_t = E * R = E * (HV) \quad (1)$$

Considerando la exposición E , implícita en la vulnerabilidad V , sin que esto modifique la concepción original, podría plantearse que:

Una vez conocida la amenaza o peligro H_i , entendida como la posibilidad de que se presente un evento con una intensidad mayor o igual a i durante un periodo de exposición t , y conocida la vulnerabilidad V_e , entendida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto e a ser afectado o de ser susceptible a sufrir una pérdida ante la ocurrencia de un evento con una intensidad i , el riesgo R_{ie} puede entenderse como la posibilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento e , como consecuencia de la ocurrencia de un evento con una intensidad mayor o igual a i (ecuación 2),

$$R_{ie} = (H_i, V_e) \quad (2)$$

Es decir, la posibilidad de exceder unas consecuencias sociales y económicas durante un periodo de tiempo t dado.

Las principales economías del mundo organizaron conjuntamente en mayo de 1994 en Yokohama, Japón, la primera Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres, que tuvo como elemento de coincidencia el trabajo desarrollado por todos los participantes, el cual fue denominado “Estrategia de Yokohama para un mundo más seguro y su plan de Acción”¹.

Dentro de esta estrategia se manifestó un compromiso generalizado para implementar las siguientes acciones en pro de la reducción de desastres mundiales para distintas áreas:

- Sociológicas: aprender a vivir con el riesgo mediante una cultura de la prevención y difusión de las amenazas por fenómenos naturales y sus consecuencias.
- Técnicas: realizar investigación para reducir la vulnerabilidad, estando conscientes del peligro y divulgarlo a la sociedad de manera clara y concisa.
- Políticas: gestión integral de riesgos, planificación del desarrollo urbano en las ciudades y brindar recursos para la prevención.

Sin embargo, tras haber transcurrido casi veinte años de haberse celebrado la cumbre de Yokohama, los desastres subsecuentes en el mundo han sido cada vez más costosos. Esto ha ocasionado que la manera en que se estudia el fenómeno del riesgo, así como el número de investigadores involucrados y los recursos asignados para esta tarea sean cada vez mayores.

Los investigadores sociales de la RED (1992), establecen que las causas de este incremento del riesgo al menos en América Latina se explica como: *“El crecimiento poblacional y los procesos de urbanización, las tendencias en la ocupación del territorio, el creciente empobrecimiento de importantes segmentos de la población, la utilización de inadecuados sistemas tecnológicos en la construcción de viviendas y en la dotación de la infraestructura básica, e inadecuados sistemas organizacionales, entre otros, han hecho aumentar continuamente la vulnerabilidad de la población frente a una amplia diversidad de eventos fisiconaturales”*.

Para el periodo 2005-2015 se llevó a cabo otra reunión en Kobe, Japón, donde se hicieron los siguientes compromisos:

- Implementar la reducción de riesgos de los desastres a todos los niveles y, en particular, su integración en los procesos de planificación del desarrollo.
- Reducción de los riesgos a través de la reducción de la pobreza, fomentar el desarrollo y el cuidado del medio ambiente.

En esta misma reunión se realizaron las siguientes precisiones en la terminología del riesgo (UNISDR, 2009):

Amenaza geológica se definió como *“un proceso o fenómeno geológico que podría ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales”*.

¹ <http://www.unisdr.org/2005/wcdr/intergover/official-doc/L-docs/Yokohama-Strategy-Spanish.pdf>

Desastre debe entenderse como *“una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos”*.

Evaluación del riesgo como *“una metodología para determinar la naturaleza y el grado de riesgo a través del análisis de posibles amenazas y la evaluación de las condiciones existentes de vulnerabilidad que conjuntamente podrían dañar potencialmente a la población, la propiedad, los servicios y los medios de sustento expuestos, al igual que el entorno del cual dependen”*.

En esta investigación se emplean los siguientes conceptos para el análisis del riesgo:

La amenaza o peligro por sismo, representado como la posibilidad de que un evento exceda cierta magnitud, en cierto periodo de tiempo para Tuxtla Gutiérrez.

La vulnerabilidad, puede entenderse como la predisposición intrínseca de una estructura a sufrir daño debido a la manifestación intensa del sismo, y por lo tanto su evaluación contribuye en forma fundamental al conocimiento del riesgo sísmico.

El riesgo sísmico, se define como la pérdida esperada obtenida de la convolución de la probabilidad de ocurrencia de un evento peligroso y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a tal amenaza, matemáticamente expresado como la posibilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas y sociales en cierto sitio y durante cierto periodo.

La diferencia fundamental entre la amenaza y el riesgo está en que la amenaza está relacionada con la probabilidad de que se manifieste un evento natural o un evento provocado, mientras que el riesgo está relacionado con la posibilidad de que se manifiesten ciertas consecuencias, las cuales están íntimamente relacionadas no solo con el grado de exposición de los elementos sometidos, sino con la vulnerabilidad que tienen dichos elementos a ser afectados por el evento.

Debemos considerar que durante un sismo los elementos expuestos al peligro son: las construcciones, la infraestructura empleada para actividades económicas, culturales y sociales, así como los servicios públicos y líneas de comunicación (líneas vitales), y sobre todos las vidas humanas, que es lo que debemos conservar a través de construcciones e infraestructura segura.

Para Cardona (2001), el riesgo equivale a una situación de crisis potencial que depende no solamente de la acción de un agente perturbador, que podría ser un suceso o un proceso acumulativo de deterioro, sino también de las condiciones de inestabilidad, o de fragilidad del medio físico y humano. Considera que es fundamental caminar hacia *“una concepción holística del riesgo consistente y coherente, fundamentada en los planteamientos teóricos de la complejidad, que tenga en cuenta no sólo variables geológicas y estructurales, sino también variables económicas, sociales, políticas, culturales o de otro tipo, podría facilitar y orientar la toma de decisiones en un área geográfica”*.

Para lograr lo anterior debemos evaluar el riesgo de manera precisa, lo cual no es tarea sencilla, uno de los conceptos generados para enfatizar esta complejidad es el denominado grado de aceptabilidad que la sociedad le ha conferido al riesgo tal como lo señala Briones (2005), *“para entender el grado de aceptabilidad del riesgo se deben estudiar todas las instituciones sociales, principalmente el Estado y su papel frente a los riesgos, pero, igualmente, a los actores sociales que intervienen directa e indirectamente en la construcción de la cultura: la iglesia, la escuela, los medios de comunicación, la sociedad civil”*. En el riesgo sísmico esto se manifiesta oficialmente mediante el nivel de confiabilidad del diseño de las construcciones, que se establece con el espectro de diseño colocado en los reglamentos.

Un evento natural intenso no es un desastre como solía catalogarse por la visión naturalista del riesgo. Esta inadecuada interpretación ha sido empleada por autoridades que consideran en el imaginario que los desastres son productos de lo extremo de los fenómenos y que a partir de ello es prácticamente imposible evitarlos, lo cual permite justificar errores intencionales o no, los cuales ayudaron a pre configurar el desastre.

2.3. Gestión del riesgo

La gestión del riesgo es el proceso multidisciplinario mediante el cual los organismos públicos o privados pueden trabajar organizadamente para reducir el riesgo en una región. En la Figura 8 se muestra el ciclo en que se puede esquematizar la gestión del riesgo. A través de la gestión de riesgo son posibles las siguientes acciones:

- Disminuir los efectos de las amenazas por fenómenos naturales.
- Intervención de la vulnerabilidad de las ciudades y los elementos expuestos.
- Reducir al mínimo las amenazas socio-naturales y tecnológicas.
- Prevenir el deterioro del medio ambiente.



Figura 8. Ciclo de la gestión de riesgos modificado de Alarcón (2005).

Puente (2009) establece que la gestión de riesgos de desastres se puede atender en tres etapas:

- **Gestión prospectiva:** Interviene sobre el riesgo aún no existente: políticas de ordenamiento territorial, normas y regulaciones en proyectos de inversión.
- **Gestión correctiva:** Interviene sobre el riesgo existente: cambio de localización o protección, incremento de resistencia, incremento de resiliencia (seguros, organización), disminución de amenazas (recuperación del ambiente).
- **Gestión reactiva:** Interviene sobre el riesgo no reducido o no mitigable: sistemas de alerta temprana. Preparación para la respuesta (planes de emergencia, de contingencia, simulacros, organización).

No obstante la gestión de riesgos no es sencilla, ya que depende de la percepción del riesgo que la sociedad ha construido, más allá de los esfuerzos institucionales por dotar de científicidad a la noción de riesgo. Esta construcción tiene consecuencias en el comportamiento y la gestión de los desastres en todas las escalas de la sociedad, tal como lo señala Briones (2005). Las personas toman decisiones que no necesariamente coinciden con lo que las autoridades esperan, como por ejemplo el de no participar en una evacuación, es ya una decisión. Por lo cual la gestión del riesgo conlleva un problema de decisión, por ejemplo la miseria no impide la percepción de los riesgos, pero sí limita las posibilidades de la toma de decisiones por sus capacidades materiales de mitigación y formas culturales de actuar.

Giddens (1993) plantea y Audefroy (2007) refuerza la existencia de cuatro formas de respuestas o de actitud frente a un contexto de riesgo de una población:

- Aceptación pragmática del riesgo. Se reconoce el riesgo y se acepta convivir con él, tomando las medidas necesarias para mitigarlo.
- Optimismo sostenido. Es una fe en la razón providencial sin tener los elementos para medir el riesgo. Es la expresión de: "aquí nunca ha pasado nada".
- Pesimismo cínico. Es una forma de autodefensa en contra de riesgos reales o imaginarios. En general, la causa del riesgo no está identificada claramente y se elaboran causas potenciales. Por ejemplo, las múltiples causas del fenómeno del Niño y de la Niña que han sido propuestas por varios autores científicos y no científicos.
- Compromiso radical: se refiere a las actitudes de respuesta radical contra lo que es percibido como un peligro o riesgo. Las movilizaciones de los movimientos ecologistas son una manifestación de esta actitud.

Lo anterior se detona cuando hablamos de riesgo sísmico, ya que una de las primeras necesidades tras un sismo es la de atender la vivienda, reparación, sustitución e incluso reforzamiento de las existentes tras el reconocimiento de que son vulnerables. Después de diversas investigaciones (Valverde y Levi de López, 1990; Villavicencio *et al.*, 2006; Ramírez de Alba *et al.*, 2011) se reconoce que la vivienda que se desarrolla oficialmente no es suficiente, ni cuenta con la calidad necesaria. Además, después de un sismo se

agravan las capacidades económicas de la población, por lo cual es imperante desarrollar las capacidades técnicas, en la sociedad en general, para la autoconstrucción guiada por diversos mecanismos: colegios, sociedades técnicas, universidades, etc.

Gustavo Wilches-Chaux (2006) articula las relaciones entre territorio y seguridad, a partir del concepto de “*seguridad territorial*”, que podría describirse, como la capacidad de un territorio para ofrecerles a sus habitantes determinadas condiciones de “*estabilidad*”, que impiden que amenazas de distinto origen (naturales, socio-naturales, antrópicas) procedentes del propio territorio o del exterior, puedan convertirse en desastres. La seguridad territorial es la telaraña que forman esas hamacas al trenzarse. Esos son la seguridad y la soberanía alimentaria, la seguridad ecológica, la seguridad social, la seguridad económica y la seguridad jurídica institucional (Figura 9).



Figura 9. Entramado que conforma la seguridad territorial (Wilches-Chaux, 2006).

Conjuntamente con la seguridad Wilches-Chaux (2005), propone una serie de derechos vinculados a la gestión del riesgo que deben estar satisfechos como un proceso de reducción de vulnerabilidad. En la siguiente lista se mencionan estos derechos:

1. Derecho a la protección del estado.
2. Derecho a la información frente a los medios de comunicación.
3. Derecho a la participación y autogestión.
4. Derecho a la integralidad de los procesos.
5. Derecho a la diversidad cultural y social, así como a la perspectiva de género.
6. Derecho a la prioridad y prevención.

En el GAR (2009) después de un análisis de las condiciones mundiales y del proceso histórico de los desastres que se generaron, un grupo de expertos propuso las siguientes condiciones para trabajar en pro de reducir el riesgo:

- Fortalecimiento de los medios de vida.
 - Gestión de los recursos naturales.
 - Desarrollo de infraestructura y prestación de servicios básicos.

- Asociaciones para la gobernanza urbana y local.
 - Desconcentración, democracia local y sociedad civil.
- Financiamiento para la gestión del riesgo de desastres.
 - Microfinanciación y microseguros.
 - Seguros agrarios indexados y catastróficos mancomunados.
- Gestión de los servicios de ecosistemas.
 - Gobernanza medioambiental y Pago de servicios de ecosistemas.
 - Planificación integrada y zonas protegidas.
 - Tecnologías medioambientales.
- Enfoques comunitarios en la gestión del riesgo.
 - Importancia en la participación comunitaria y local.

De acuerdo con Poland (2012), existen cuatro elementos que permiten la recuperación de una ciudad tras un sismo desastroso: primero un gobierno estable y fuerte, es decir, que no tenga la desaprobación de la sociedad previamente y que no sea acusado de ser culpable del evento desastroso, lo cual permitirá tener el liderazgo en las acciones emprendidas para atender la emergencia. Segundo una sociedad organizada y solidaria que sea conducida por la estructura de gobierno para trabajar en pro de la reconstrucción. Tercero, un conjunto de infraestructura y líneas vitales que puedan sustituir a la infraestructura y líneas vitales que fueron dañadas y que están temporalmente perdidas o con daños importantes y cuarto, finanzas estatales sanas y suficientes que permitan atender el desastre. A este cuarto punto debe agregarse la transferencia del riesgo mediante la contratación de un seguro de riesgo a las líneas vitales. Analizando la propuesta de Poland (2012), falta un eje articulador que es el conocimiento, el cual permite que el liderazgo de las autoridades tenga elementos para organizar a la sociedad, para dotar a las construcciones de mejores capacidades e invertir mejor los recursos en reducir las vulnerabilidades. Es por ello que la gestión de riesgos debe estar sustentada en el conocimiento del riesgo sísmico de manera científica con aplicación práctica.

Sin embargo, en Chiapas no existe comunicación entre las comunidades y los ecosistemas; entre los científicos y quienes toman las decisiones económicas y políticas; entre los investigadores y las comunidades; entre las autoridades estatales y el sector privado; entre los organismos internacionales y los actores nacionales y locales; entre quienes planean y llevan a cabo el desarrollo y quienes acuden a socorrer a las víctimas de los desastres. Para encontrar una solución se debe de mejorar esta comunicación, para construir canales que reduzcan la vulnerabilidad de manera efectiva.

CAPÍTULO

3

3. PROCESOS HISTÓRICOS, SOCIALES Y FÍSICOS QUE CONDICIONAN LOS NIVELES DE VULNERABILIDAD EXISTENTES ACTUALMENTE EN LA CIUDAD DE TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

3.1. Historia de la conformación de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez

3.1.1. Fundación de Tuxtla Gutiérrez

Tuxtla Gutiérrez fue fundada por los indios zoques con el nombre de Coyatoc "*lugar, casa o tierra de conejos*", el nombre actual se deriva del náhuatl. Los habitantes locales en el tiempo de la conquista eran los zoques que tenían sus asentamientos principales en Tapilula, Rayón, Pantepec, Tapalapa, Ocoatepec, Chapultenango, Coapilla, Copainalá y Tecpatán. Sin embargo, el asentamiento más importante fue Chiapa de Corzo de donde la población huyó por las fuertes inundaciones que sufrían hacia el año 700 a de C. No se sabe mucho sobre los zoques, ya que cuando llegaron los indios Chiapa a Chiapa de Corzo, los zoques ya estaban en el territorio chiapaneco en la partes altas de las montañas, alcanzando las fronteras con Tabasco, los territorios Chontal y Ahualulco al norte, al sur con los Mames, al este con los Mayas, Queleles y Chiapanecas y al Oeste con los Zapotecas del Istmo de Tehuantepec en Oaxaca (Rodríguez, 2008).

Cuando llegaron los aztecas, los zoques se encontraban divididos en cuatro tribus: La primera con capital en Quechula, hoy es la zona bajo la presa de Malpaso, la segunda que contenía a la casta guerrera tenía capital en Javepagcuay ubicada en Ocozocuaultra y la Ciénega, otra en Guateway hoy Francisco León y finalmente la cuarta en Zimatán hoy Cunduacán, Tabasco. En 1486 y 1505, los aztecas invadieron la región, destruyeron Coyatoc y le nombraron Tochtlán, que significa lo mismo (Rodríguez, 2008).

Se estima que a mediados del siglo VI a.C., en la depresión central de lo que hoy es el estado de Chiapas, se asentó uno de los señoríos zoques que a la postre daría lugar al nacimiento de Coyatocmó, luego Tuctlán y finalmente San Marcos Evangelista Tuxtla. Se han encontrado vestigios en lo que ahora es Plan de Ayala y en el centro actual de la ciudad denominada Casa Honda. En esta zona confluían más de 21 arroyuelos y se unían a los cauces principales de los ríos Quishimpak o Sabinal, Potinaspak y San Roque, hasta desembocar en la cuenca principal del río Grijalva (Tovar, 2003; Morales, 1980).

El límite natural de la fundación de Tuxtla Gutiérrez se considera entre dos barrancas y sus arroyos actualmente embovedados: calles 5ª y 6ª poniente desde 5ª y 6ª avenida sur hasta la 5ª norte para desembocar en el Sabinal; el segundo hacia el oriente 2ª poniente y 9ª avenida sur hasta encontrar el Sabinal en 3ª oriente y 4ª avenida norte (ACECH, 2010).

Francisco Marín en 1550 conquistó a los zoques, quienes se unieron a los españoles en la lucha contra los indios Chiapa, que se encontraban en el actual Chiapa de Corzo, vecina al asentamiento zoque. Finalmente bajo el mando de Diego de Mazariegos cayó la región de Chiapa de Corzo que se denominó Chiapa de los Indios.

3.1.2. Tuxtla Gutiérrez durante la colonia y la independencia

Los dominicos, encabezados por Antonio de Pamplona, fundaron en 1560 la Villa de San Marcos Evangelista Tuchtla, pretendiendo congregar a los indios y convertirlos al cristianismo, controlar el satanismo y procurar la aniquilación de las "*idolatrías*", además de la recaudación de los tributos (Cruz y Almazán, 2008). Con la conquista Tuxtla sufrió un cambio significativo al transformar la aldea de chozas dispersas a otro tipo de organización espacial más geométrico y ordenado (Mérida, 2000).

La vivienda tradicional zoque era techo de zacate, paredes de bajareque y piso de tierra y con zona para patio muy amplia, con forma rectangular, dividida en dos cuartos principales y uno pequeño para cocina, ese era el aspecto que se mantuvo en Tuxtla por un tiempo (Rodríguez, 2008).

Al fundarse San Marcos Evangelista Tuchtla se fortaleció la estructura colonial y con ella la Iglesia Católica. Su población fue en aumento hasta alcanzar 900 habitantes en 1611, y 3,775 en 1650, la población se dividía en cuatro barrios: En el lado Sur: San Miguel y San Andrés; y en el Norte: San Jacinto y Santo Domingo de Guzmán, teniendo como centro la parroquia de San Marcos Evangelista. El primer edificio formal que tuvo Tuxtla fue la Iglesia Parroquial de Tuxtla, hoy Catedral Metropolitana de San Marcos, de acuerdo con el primer plano oficial de 1835 levantado por Seandino Orantes (Castro, 2012; ACECH, 2010; Tovar, 2003).

La población indígena sufrió una drástica caída a fines del siglo XVII, como resultado de la confluencia de diversos factores, entre ellos los trabajos forzados, las epidemias y los muertos producto de una revuelta indígena en 1692. Por ello, a finales del siglo XVII la población de San Marcos se redujo a 1,500 habitantes (Tovar, 2003).

Durante el siglo XVIII los informes de los curas reportan un crecimiento de la población que alcanzó los 3,000 habitantes entre 1736 y 1750. En 1764 se creó la alcaldía de Tuxtla, oficialmente denominada San Marcos Tuxtla, con jurisdicción sobre los zoques y chiapanecas. Su ubicación, entre los dos principales asentamientos de la época, la convirtieron en ruta de paso para el intercambio mercantil de la época. Con el aumento de asentamientos zoques y de grupos mestizos, para 1775 la población había ascendido a 3,580 pobladores entre los que se contaban indios zoques, negros y mulatos, mestizos y blancos (Tovar, 2003).

En 1768, al crearse la Alcaldía Mayor de Tuxtla, con cabecera en el pueblo de San Marcos Tuxtla, se empieza a construir unos portales conocidos como Casa Real o del Común, para que despachara el alcalde mayor y teniente de gobernador don Juan de Oliver. Edificio que con el tiempo se convirtió en la sede de la Cabecera del Partido de Tuxtla con jurisdicción en 33 pueblos (1786), Prefectura Política del Departamento y Partido de Tuxtla (1826-1857), en Jefatura Política del Departamento de Tuxtla (1858) y Palacio Municipal de Tuxtla (1858-1892), y en Palacio Provisional del gobierno del estado (1892-1894). En 1815 figura un fuente en el centro de la Plaza Pública y en 1825 se inaugura el primer Mesón tuxtleco que dio alojamiento y alimentos a los viajeros que llegaban a la Villa de San Marcos Tuxtla (Castro, 2012).

En 1800, Tuxtla no estaba entre las tres localidades con mayor población en Chiapas. La ciudad más poblada del estado era San Bartolomé de los Llanos (Hoy Venustiano Carranza), con 7,410 habitantes. Le seguían Santo Domingo Comitán (6,815) y San Juan Chamula (6,000). Luego aparecía San Marcos Tuxtla con 4,280 habitantes y San Cristóbal de las Casas que tenía 3,333 siendo la ciudad más importante de estado por la presencia de capitales y españoles (Castro, 2012).

El 29 de octubre de 1813, las Cortes de Cádiz elevan al pueblo de San Marcos de Tuxtla a la categoría de Villa, que conlleva la apertura de instituciones reales, creándose una diputación provincial que atendía los asuntos de Chiapas, ya contaba con cerca de 5,000 habitantes (74.4% zoques y 19.9% mestizos y 5.7% españoles), y en 1822 el ayuntamiento de Villa de Tuxtla juró reconocimiento al imperio de México gobernado por Agustín de Iturbide (Pavía, 2006).

El siglo XIX fue testigo del crecimiento y consolidación de un grupo liberal en la Villa de Tuxtla que desafiaría al poder de San Cristóbal de Las Casas que hasta entonces se mantenía como el centro de poder económico, político y social de Chiapas. Esta rivalidad afloró en 1822 a la que seguirían una serie de enfrentamientos entre los grupos de poder de ambas ciudades cuando en 1833 Tuxtla se convirtió en capital del estado por primera vez y lo perdió en 1837 con una cruenta batalla con San Cristóbal de las Casas. En 1848 la ciudad de Tuxtla fue designada con el nombre de Tuxtla Gutiérrez en honor a Joaquín Miguel Gutiérrez, líder local que combatió la facción san cristobalense, a cuyas manos murió en la batalla de 1837. Posteriormente, Tuxtla Gutiérrez fue sede provisional de los poderes del Estado en 1858-1861, 1864-1867 y en 1892, fecha última en que se convirtió en capital definitiva, no sin antes presentarse las luchas del año 1911 (Tovar, 2003).

3.1.3. Tuxtla Gutiérrez capital del estado de Chiapas

En 1892 se hizo un plano de Tuxtla Gutiérrez (Figura 10), el cuadrante de la ciudad abarcaba el rango de la 9ª Sur (Avenida Caridad) a la 4ª Norte (Avenida Domínguez) y de la 9ª Oriente (Calle La Unión) a la 9ª Poniente (calle Rayón). A la Avenida Central se le conocía con el nombre de Avenida de la República y a la Calle Central, como Calle del Estado, alumbrados con los tradicionales faroles de petróleo. Conservaron estos antiguos nombres hasta 1930 en que fueron sustituidos por la nomenclatura conforme los puntos cardinales: Norte, Sur, Este (Oriente) y Oeste (Poniente).



Figura 10. Mapa facsímil editado por el Gobierno del Estado, con motivo del centenario de Tuxtla Gutiérrez de manera definitiva como capital del Estado de Chiapas en 1992 (Paz, 2012a).

Elemento central era el río Sabinal, el cual era muy importante y durante todo el año tenía corriente y en sus orillas estaban los Sabinos, de donde tomó su nombre. Sólo habían dos puentes para cruzarlo: el Puente Colón (en la 4a. Poniente) y el Puente Madariaga (en la 5a. Oriente). También se podía pasar en otros dos puntos pero sólo cuando no estaba crecido; eran el Paso de Juy Juy y el Paso de Poponás (Castro, 2012).

En 1892, año en que la ciudad se constituye en capital del estado, la ciudad empieza a experimentar algunos cambios de manera que su constitución predominantemente rural pasa a convertirse en una ciudad que se desarrolla como capital comercial y de prestación de servicios públicos, ya tiene 7,000 habitantes distribuidos en 149 manzanas (Paz, 2012a). Algunos estudiosos del desarrollo urbano: Noguez (1997); Malo (1997); Mérida (2000) ubican como el primer momento de su crecimiento demográfico a partir del año en que se establece como capital del estado y hasta 1940.

El Departamento de Tuxtla sumaba, en 1892, veinte mil habitantes distribuidos en seis poblaciones, trescientos ranchos y sesenta haciendas productores de maíz, frijol, café, azúcar, añil, henequén, arroz, algodón y gran variedad de frutos tropicales, la más

importante fuente de riqueza la constituían la crianza de ganado vacuno y caballar, tal como lo atestiguaban sus catorce mil reses y seis mil yeguas (Tovar, 2003).

La ciudad crecía pasando de cuatro barrios a ocho: *Barrio niño de Atocha* (antes *Barrio Colón*) data de 1871, conformado por migrantes oaxaqueños, constituido al lado norte oriente, las casas eran de bajareque con teja. *Barrio Santo Domingo* data del siglo XVII ubicado al lado norte poniente constituido por casas de adobe con tejas y bajareque. *Barrio la Pimienta* data de 1885 ubicado en el lado norte oriente, sus viviendas eran de bajareque y paja, algunas de sus construcciones fueron dañadas por el sismo de 1902. En 1900 se conformó el *Barrio Nuevo* habitado por zoques. *Barrio Pascualito* data de 1835 ubicado al sur poniente conformado por casas de adobe, sufrió daños en el sismo de 1995. *Barrio el Cerrito* surgido en el siglo XVI región sur poniente conformado por casas de paja y bajareque así como adobe. Otros barrios fueron: *San Jacinto* (zona inundable), *Barrio Guadalupe* y *Barrio San Roque* (ACECH, 2010).

La ciudad capital no terminaba de reponerse de los intensos daños del sismo de 1902 que afectaron gradualmente a todos los barrios, cuando se presentaron un conjunto de conflictos militares como la guerra de Pajarito entre 1910 y 1911, una rebelión chamula y un conflicto civil que ocurrieron cuando, alentados por el obispo de San Cristóbal, los chamulas se opusieron al gobierno de la capital del estado (Gossen, 1989).

En 1913 la estatua de Joaquín Miguel Gutiérrez fue trasladada al extremo sur de la remodelada Alameda, casi frente a las esbeltas agujas de la reconstruida iglesia, cuyas torres habían sido derribadas por temblores de 1902 (Pavía, 2006). Para la primera década de éste siglo, Tuxtla Gutiérrez vinculada con los poderes de la Ciudad de México, se vio favorecida con los circuitos económicos más amplios. Sin embargo no tuvo un desarrollo económico, ni crecimiento importante, debido al brote revolucionario de 1910 a 1920 y por la disputa entre Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal por ser sede de los poderes del estado (Tovar, 2003).

El segundo momento del crecimiento urbano se ubica en el periodo que va de los años cuarenta a los setenta. Es en 1940 que el gobernador Rafael Pascasio Gamboa (1940-1944) orienta las acciones para construir la infraestructura y equipamiento urbano para la consolidación de Tuxtla Gutiérrez como la capital del estado de Chiapas. Se derribó la manzana de portales y la Casa del Pueblo para ampliación del Parque Central, con prolongada pérgola de elevado andador. Surgen el Palacio Federal, la Biblioteca y el Palacio Municipal. Entre las obras de este periodo destaca la construcción de la Carretera Panamericana (Noguez, 1997). Con esta obra la ciudad se desarrolla siguiendo el trazo de la carretera, principalmente hacia el lado poniente, la zona de mayor desarrollo económico y de equipamiento urbano.

En este periodo también destaca la construcción del mercado público “*Rafael Pascasio Gamboa*”, que concentró la actividad comercial al lado sur de la Plaza Central, principalmente sobre la actual 1ª calle poniente, como parte de la consolidación de la

“*ciudad interior*”² de Tuxtla Gutiérrez (Escobar, 1997). No obstante esta etapa de 1940 se caracteriza por la destrucción de lo histórico en un afán de modernizar a la ciudad, quedando nulos vestigios de principios del siglo XX, recordando que el sismo de 1902 derribó gran parte de lo construido en el siglo XIX e incluso anteriores. En 1976 Juan Sabinés Gutiérrez continuó con la transformación de Tuxtla, durante su periodo se arrasaron el Palacio de Gobierno; el frontispicio de la Iglesia Mayor recién erigida en Catedral. La transformación se redujo a una macro plaza (Pavía, 2006).

Con el crecimiento de Tuxtla Gutiérrez se hace más notoria la marginalidad de la población en la periferia de la ciudad, la pobreza, la baja escolaridad, la anarquía y la migración predominantemente centroamericana, así como la constante falta de planeación en su desarrollo que ha generado el incremento en el riesgo de inundaciones como las de los años 1952, 1963, 1974, 1996, 2003, 2010.

Las condiciones constructivas conllevaron al incremento de la vulnerabilidad con la progresiva configuración del riesgo (que muchas veces es inadvertido, se trata de minimizar o se menosprecia temerariamente). Así, por ejemplo, una vivienda cuando es nueva puede ser segura y resistente, pero con el tiempo, debido al uso y la falta de mantenimiento, a los fenómenos a los que se expone, podría deteriorarse y debilitarse hasta un límite en que resulta un potencial sepulcro para sus ocupantes (Romero y Maskrey, 1993). La ciudad creció sin planeación, ni normas técnicas de construcción, así con la falta de personal técnico que diseñara, construyera y supervisara las obras que se desarrollaban, además de las constantes inundaciones y sismos que fragilizan la mampostería, se puede visualizar la construcción histórica del riesgo por sismo.

3.2. Aspectos socioeconómicos de Tuxtla Gutiérrez

Los aspectos que se señalan en los apartados 3.2, 3.3 y 3.4 corresponden a las variables que son empleadas por la Metodología CENAPRED (2006b) para evaluar la vulnerabilidad social. Esta vulnerabilidad, si bien no es el objetivo central de esta tesis, es importante considerar estas variables para tener elementos de discusión en los capítulos 5 y 6 correspondientes a la vulnerabilidad de las estructuras de la ciudad, la cual se puede explicar a partir de la construcción social del riesgo. Los datos estadísticos fueron tomados de INEGI (2005; 2010) y del Informe SEDESOL (2011).

3.2.1. Vivienda

Acorde con el ritmo de crecimiento de la población, el número de viviendas ha tenido un comportamiento dinámico con tasas de crecimiento anual superiores al 3%. Las mayores tasas se registraron en la década de 1980 a 1990, con 7.5% y de 1990 al 2000 con 4.9%, llegando al 2010 con 143,855 viviendas, con una tasa media de 3.1% en la última década.

² De acuerdo a Escobar, la ciudad interior está constituida por aquellas partes del área urbana en la que se llevan a cabo las funciones centrales de la ciudad, es decir, aquellas actividades relacionadas con la dominación política e ideológica, la administración pública y privada, la gestión institucional, el comercio especializado, los servicios financieros, las actividades concentradoras de empleo, los servicios a la producción, el consumo especializado, y las representaciones culturales de la vida social (Escobar, 1997).

El número de personas que habitan una vivienda ha tenido un descenso en las últimas tres décadas, pasando de un promedio de habitantes por vivienda en 1990 de 4.73 a 4.25 en el 2000 y de 4.03 en el 2005. Este indicador está determinado por el tamaño de las viviendas que en 2005 fue de tres o más cuartos, registrando 64.9%, mientras que 15.6% de estas tenían un cuarto, y 16.3% dos cuartos.

En el año 2005 se registraron 124,695 viviendas, y de estas 95.8% reportaron tener drenaje, conectados a la red pública 87.4%, conectados a fosa séptica 12.17%. La disposición de energía eléctrica es de 95.6%. En relación a la disposición de agua en el terreno, 80% de las viviendas se encontraban en esta situación, 16.57% obtenían el agua proveniente de pipa, pozo u otros. El material predominante en pisos es cemento que se encuentra en 65.7% y el 7.39% son de piso de tierra.

3.2.2. Salud

En el año 2009, el Sistema Estatal de Salud registró 1,336 médicos al servicio de las instituciones públicas. Por institución pública, la Secretaría de Salud (48.1%) y al IMSS (24.9%). La razón de médicos de estas instituciones es de 2.47 por cada mil habitantes. En el mismo año, la población con derechohabiencia a servicios de salud en el IMSS ascendió a 264,524 personas, mientras que en el ISSSTE fue de 93,035 y de 28,623 en el ISSSTECH. La participación de Sedena, Pemex, Semar es de aproximadamente 17.8% del total de la población derechohabiente. En relación con la infraestructura médica se cuenta con 124 unidades de salud, de las cuales 117 son de consulta externa y 7 de hospitalización, correspondientes 94 unidades al IMSS, 15 unidades médicas a la Secretaría de Salud y el resto privadas.

3.2.3. Educación

A fin de cursos del ciclo escolar 2009-2010, la infraestructura educativa consta de 671 planteles, correspondiendo a preescolar 225, primaria 207, secundaria 71, nivel medio superior y capacitación para el trabajo 168 escuelas. En el nivel superior se cuentan 52 instituciones con 71 escuelas de técnico universitario, licenciatura y postgrado. El personal docente asciende a 6,733 maestros, distribuidos en preescolar 14.1%, primaria 30%, secundaria 21%, bachillerato y capacitación para el trabajo 31.9%, nivel superior asciende a 6,145 maestros.

La matrícula es de 66,582 alumnos en primaria, 30,797 alumnos en secundaria, y 31,079 alumnos en el nivel medio superior, y de 68,355 en técnico universitario, licenciatura y posgrado en las modalidades escolarizada y no escolarizada. La asistencia escolar en el año 2005 fue de 95% de los niños de 6 a 14 años de edad, con un promedio de escolaridad de 9.6 años cursados. Los niveles de instrucción de la población de 15 años y más en el municipio son: el 6.73% no tiene escolaridad, 10.8% primaria incompleta, mientras que 13.8% la concluyó; 21.3% tiene la secundaria terminada y 46.0% educación posbásica. De este mismo grupo de edad la tasa de analfabetismo fue de 6.85%.

Tuxtla Gutiérrez registra una marginación con un grado Muy Bajo. Sus niveles de pobreza también son los más bajos del estado con 9.3% de su población con pobreza alimentaria, 16.0% en pobreza de capacidades y 40.1% en pobreza patrimonial. Su grado de rezago social es muy bajo. Por otra parte, según las últimas referencias, el municipio ocupa el primer lugar estatal en desarrollo humano con un Índice de Desarrollo Humano (IDH) de grado Alto, posición y grado que conserva en relación a los datos publicados en el año 2000.

3.3. Elementos económicos

3.3.1. Población económicamente activa (PEA)

En el municipio al tercer semestre de 2010, había una población económicamente activa de 255,376 habitantes, de los cuales 42.2% son mujeres y 57.8% hombres. La población económicamente activa se conforma por 94.3% de ocupados y 5.7% desocupados. La población ocupada según los ingresos percibidos está distribuida de la siguiente manera: 36.1% percibe hasta dos salarios mínimos, 45.1% gana de tres a cinco salarios, 13.1% de la población recibe más de cinco salarios mínimos y 5.1% no se le remunera.

Por sector de actividad económica la población se emplea preponderantemente en el sector terciario con el 80.8%, donde se distingue el comercio y los servicios sociales y gubernamentales, seguido del 17.9% en el sector secundario, empleados en la rama de la construcción y la industria manufacturera. En el sector primario con actividades en agricultura, ganadería y silvicultura se emplea el 0.9% de la población. Por el tipo de unidad económica donde labora la población se ubica principalmente en empresas privadas en 49%, instituciones públicas 25.2% y en el sector de los hogares 25.4%.

3.3.2. Actividades económicas del municipio

De acuerdo con el Censo Económico de 2009, ascienden a poco más 25,473 las unidades económicas establecidas en Tuxtla Gutiérrez, y se dedican principalmente al comercio (53.37%). Los establecimientos dedicados a los servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas (10.89%), servicios distintos a los gubernamentales (13.28%), industrias manufactureras (8.35%) y servicios de salud y de asistencia social (5.17%). El valor total de la producción bruta del conjunto de establecimientos ascendió a poco más 27,553 millones de pesos. Dentro del sector terciario es de importancia el turismo. Se dispone de cien establecimientos de hospedaje de una a cinco estrellas y 288 establecimientos de preparación y servicio de alimentos con categoría turística.

3.3.3. Infraestructura urbana, equipamiento y servicios

La prestación de los servicios de envío y recepción de correspondencia, paquetes, giros postales, remesas de dinero, telegramas, fax y otros servicios postales y telegráficos se realizan en 96 oficinas postales y tres de telégrafos. Tuxtla Gutiérrez dispone de 60 sucursales de banca comercial y la banca de desarrollo cuenta con cinco sucursales.

El aeropuerto Ángel Albino Corzo, aunque ubicado en el municipio de Chiapa de Corzo, es estratégico para Tuxtla Gutiérrez dada su cercanía y la capacidad de atención. Para el suministro de combustible existen 23 gasolineras y 5 estaciones de carburación de gas. Para auxiliar a la población en casos de contingencias se dispone de 131 albergues en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez, con capacidad de 13,191 personas. Dos estaciones de bomberos con 19 unidades y 12 voluntarios. Aguilar (2006) estudió los albergues, encontrando que la mayoría no cuenta con el diseño estructural, ni las condiciones que garanticen que tendrán el comportamiento esperado frente a sismos intensos.

3.4. Elementos demográficos

3.4.1. Crecimiento y densidad de la población

Tuxtla Gutiérrez como municipio tiene una población al 2010 de 567,724 habitantes, de los cuales 47.7% son hombres y 52.3% mujeres. La capital del estado presenta un crecimiento poblacional importante en los últimos 40 años sin contemplar un desarrollo urbano ordenado (Figuras 11 y 12). Los factores que contribuyeron a dicho crecimiento son: la migración del campo a la ciudad, la construcción del sistema de las presas (fenómeno que produjo la mayor migración a la ciudad en las décadas de 1970 y 1980); el efecto del movimiento del Ejército Zapatista de Liberación Nacional (EZLN) del año 1994; la llegada de empresas con oportunidades laborales; la presencia de las universidades más grandes del estado y los programas sociales que se dan en la capital, fenómenos complejos que en la actualidad tratan de mitigarse mediante el desarrollo e incremento de la inversión en cada una de las regiones del estado.

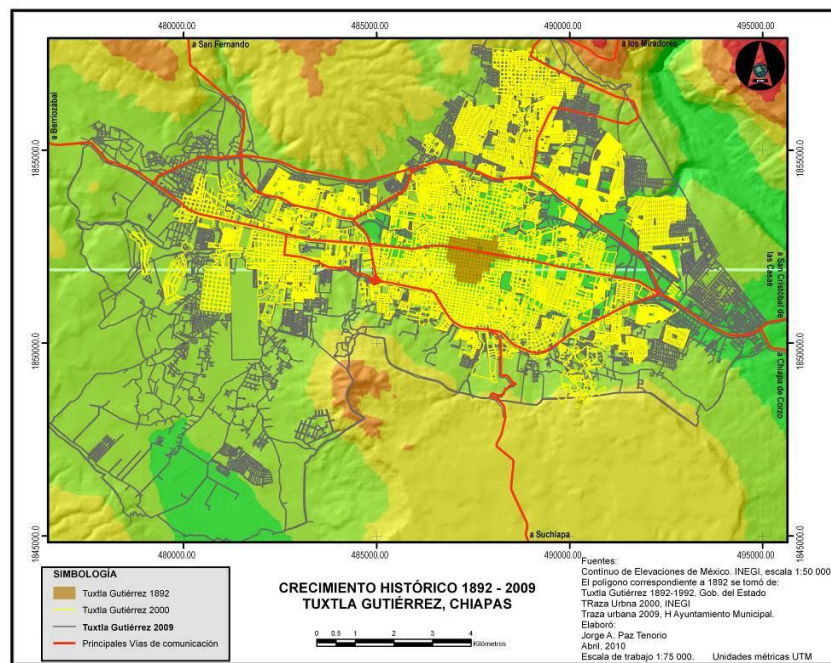


Figura 11. Plano de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, donde se observa el crecimiento de 1892 a 2009 (amarillo mostaza 1892, amarillo 2000 y gris 2009), (Paz, 2012b).

El municipio ha tenido un intenso crecimiento poblacional principalmente entre las décadas de 1970, 1980 y 1990, cuya tasa de crecimiento fue de 8.6% anual en la primera década, ocasionado principalmente por el establecimiento definitivo de trabajadores provenientes de otras partes del país para la construcción de la presa hidroeléctrica Manuel Moreno Torres. A partir de entonces se empieza a observar un descenso en el ritmo de crecimiento de la población de tal forma que de una tasa de crecimiento anual de 3.9% en el año 2000 desciende a 2.4% al año 2010 (SEDESOL, 2011).

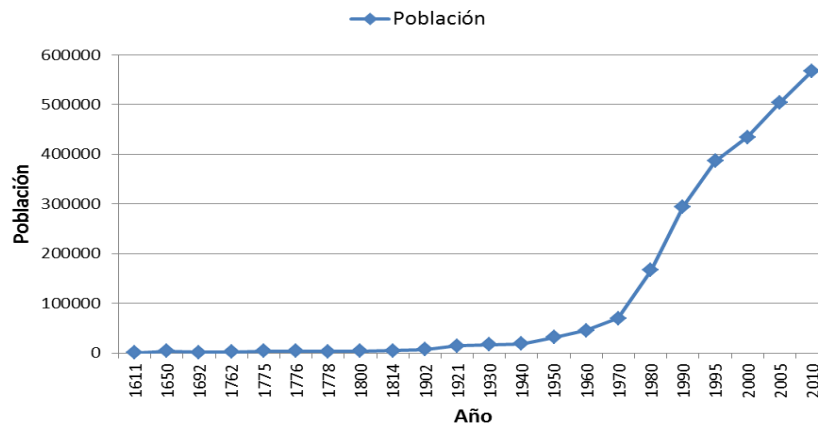


Figura 12. Crecimiento poblacional de ciudad de Tuxtla Gutiérrez desde 1611-2010 construcción basada en datos del INEGI y de referencias históricas (Paz, 2012a; Castro, 2012; ACECH, 2010; Pavía, 2006; Tovar, 2003).

En la zona metropolitana en el periodo 2000 a 2005, el crecimiento más fuerte se refleja del lado norte en su cuadrante poniente con una tasa de crecimiento de 3.1% anual, mientras que el cuadrante oriente creció en 2.9%. Del lado sur, el poniente tuvo un crecimiento de 2.86% y el oriente 1.07% anual (Figura 13; SEDESOL, 2011).

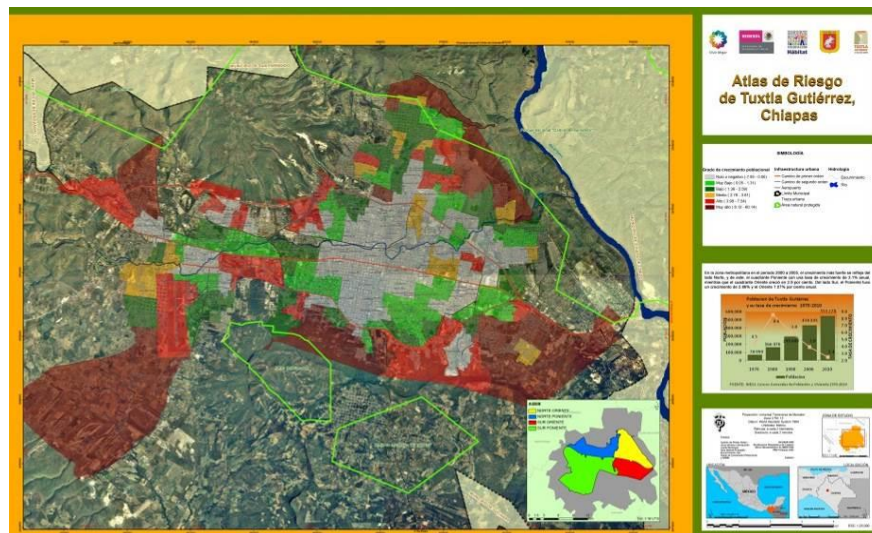


Figura 13. Tasa de crecimiento municipal en el municipio de Tuxtla Gutiérrez (SEDESOL, 2011). Se muestran en colores rojos las colonias con mayor crecimiento, mientras que en grises las colonias sin crecimiento poblacional.

La alta concentración de los habitantes propicia que Tuxtla Gutiérrez registre al año 2010, la mayor densidad de población de los municipios de la entidad, con 1,651.8 hab/km². Considerando las diferentes zonas del área metropolitana, se observa que el lado nororiente de la ciudad registra la mayor concentración de población con una densidad de 6,317 hab/km², tres veces más que la zona sur poniente que es de 1,550 hab/km². Por su parte, las zonas suroriente y norponiente registran 4,901.5 y 4,526 hab/km², respectivamente. Cabe mencionar que la densidad de población estatal es de 65.4 hab/km² según el último Censo de Población y Vivienda (2010).

En la Figura 14 se muestra la densidad de población por Áreas Geostadísticas Básicas (AGEB) desarrolladas por SEDESOL, 2011, según el Censo de Población del INEGI (2010). En la Figura 15 la densidad de población se expresa por manzanas.

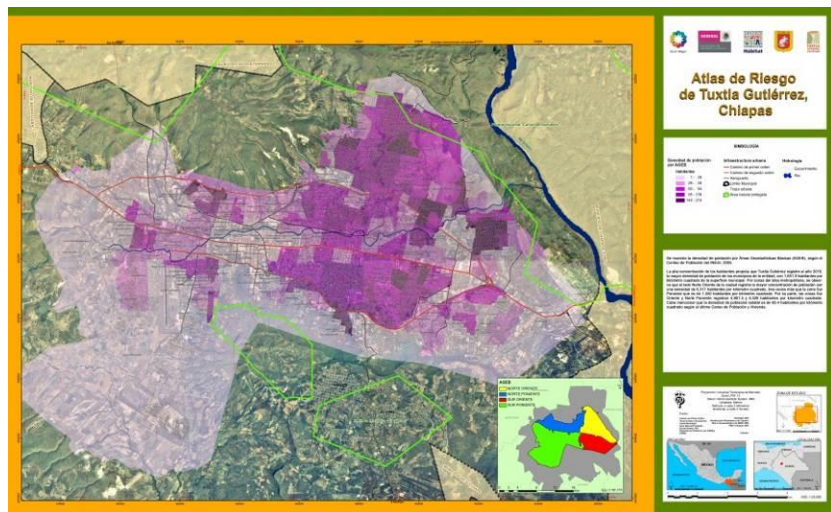


Figura 14. Densidad de población en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez por AGEB (SEDESOL, 2011).

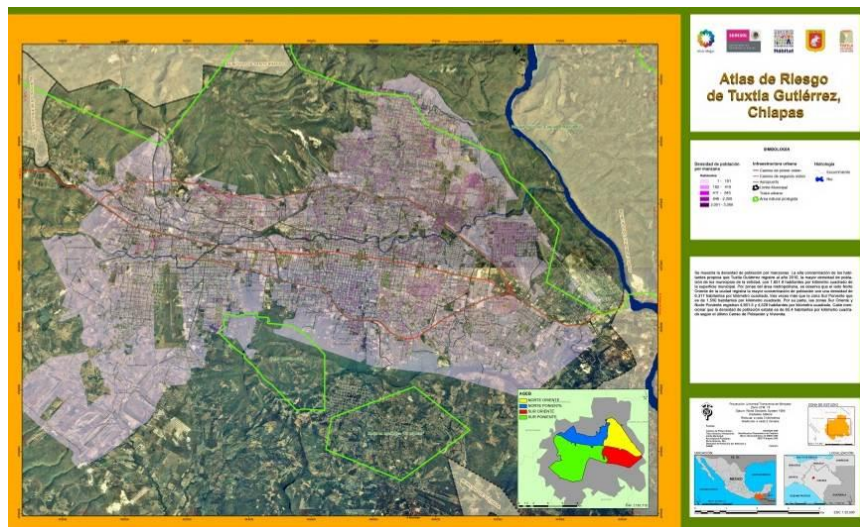


Figura 15. Densidad de población en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez por manzana (SEDESOL, 2011).

3.4.2. Características y dinámica de la población en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

De acuerdo con los datos del Censo de Población y Vivienda 2005, los grupos de edad de la pirámide poblacional muestran dos situaciones particulares en la estructura de la población tuxtleca. En primer término se hace referencia a los resultados de la transición demográfica, que permitió una base menos amplia y más evidente en los tres primeros grupos de edad. El grupo de edad con mayor proporción de población es el de 20 a 24 años con 10.6% del total. En segundo lugar se hace referencia por sexo, en el grupo de población de 0 a 14 años se muestra mayor predominio de la población masculina, pero a partir del grupo de población de 15 a 19 años, la cantidad de mujeres es ligeramente superior a la de los varones en cada uno de los estratos (Figura 16).

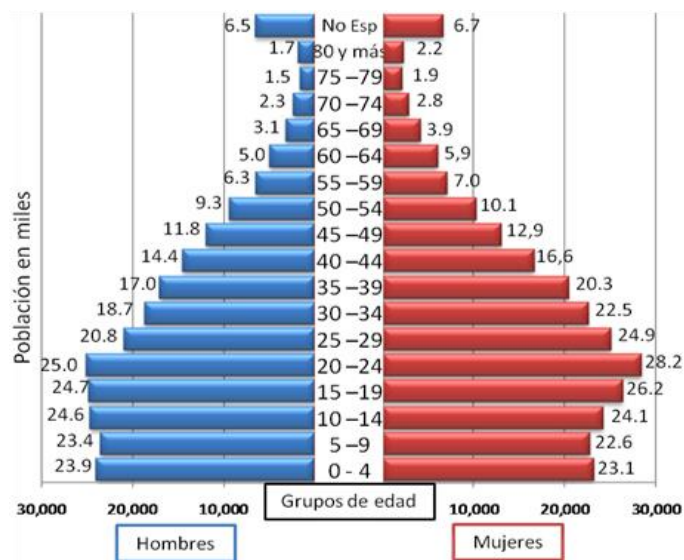


Figura 16. Pirámide poblacional por grupos quinquenales de edad en Tuxtla Gutiérrez (SEDESOL, 2011).

La población municipal se concentra principalmente en el grupo denominado en “*etapa productiva*” que corresponde a la población de 15 a 64 años, donde según estimaciones de la Conapo, es de 388,328 habitantes, correspondiente a cerca del 71% de la población municipal. Por su parte, la población de 0 a 14 años es 134,379 habitantes que representa 24.6%, mientras que el grupo de 65 años y más concentra tan solo el 4%. Esta estructura de población dota al municipio de una tasa de dependencia económica de 40.98%, lo cual provee de ventajas y oportunidades para la obtención de ingresos por persona más altos. No obstante es importante analizar que la dinámica de la población lleva al envejecimiento de la población y con ello incremento de la vulnerabilidad. En la Tabla 8 se señalan las características que hacen vulnerables a las personas mayores.

Tabla 8. Características de la población de 60 años y mayor (INEGI, 2005).

Área Metropolitana	Grupo 60 años y más	No sabe leer ni escribir (%)	No derechohabiente (%)	Adultos mayores viviendo solos (%)
Tuxtla Gutiérrez	36,298	30.5	46.4	8.0

Sánchez (2007) afirma que la vulnerabilidad de este sector de la población se debe a los siguientes factores:

- La educación define el ingreso, en caso de no contar con ella, al jubilarse la pensión no será suficiente, lo cual condiciona el acceso a la salud y el tipo de alimentación.
- Viviendas deficientes y sin créditos o recursos para reducir la vulnerabilidad física.

Sin embargo, no solo el sector de adultos mayores es vulnerable. Después de un desastre, niños, mujeres y adultos mayores, están más expuestos a la desnutrición, las heridas, la mutilación o las enfermedades e incluso a perder la vida durante el evento mismo. También pueden verse forzados a abandonar sus hogares, quedar huérfanos o verse separados de sus familias.

El crecimiento y la estructura de la población municipal, está incidida por la fecundidad. En el año 2005 se registró un promedio de 1.55 hijos por mujer, del grupo de edad de 15 a 49 años. Según las estadísticas del año 2010, ocurrieron 13,392 nacimientos, estimándose una tasa bruta de natalidad de 25.2 nacimientos por cada mil habitantes. Por otra parte, la tasa bruta de mortalidad en ese mismo año fue de 5.5 defunciones por cada mil habitantes.

El municipio está integrado por 158 localidades, de las cuales 98.1% son menores de 2,500 habitantes donde reside 0.5% de la población municipal, mientras que en tres localidades (Tuxtla Gutiérrez, El Jobo y Copoya) se concentra 99.5% del total de la población. Con esa integración territorial, estas tres localidades conforman el estrato urbano del municipio con una población de 550,512 habitantes, mientras que 155 estarían denominadas como rurales con únicamente 2,766 habitantes (Tabla 9).

Tabla 9. Porcentaje de población urbana y rural en el municipio de Tuxtla Gutiérrez (INEGI, 2010).

Tamaño de localidad y ámbito	Población					
	1990	%	2000	%	2010	%
Total municipio	295,608	100.0	434,143	100.0	553,278	100.0
Ámbito rural 1-2,499	2,712	0.9	1,893	0.4	2,766	0.5
Ámbito urbano 2,500-1,499	3,270	0.2	7,671	1.4	11,504	2.1
Ámbito urbano 15,000 y más	289,626	98.9	424,579	98.2	539,008	97.4

El Censo de Población y Vivienda de 2005, identificó en el municipio 126,608 hogares, con una estructura de tipo tradicional, donde cerca del 92% son de tipo familiar principalmente nucleares y ampliados, aunque se observa un ligero aumento en las últimas tres décadas de la proporción de hogares no familiares. El tamaño promedio de los hogares es de 3.9 integrantes y la jefatura del mismo es en mayor proporción masculina, ya que el 72.8% tienen a un hombre como jefe del mismo, porcentaje que también es descendente en 6.8 puntos porcentuales de 1990 a 2005 (Tabla 10).

Tabla 10. Principales características de los hogares de Tuxtla Gutiérrez (INEGI, 2005).

Hogares	2000	%	2005	%
Tipos de hogares	105,227	100.0	126,608	100
Familiar	97,613	92.8	116,406	91.9
No familiares	7,472	7.1	10,089	8.0
No especificado	142	0.1	113	0.1
Hogares según el sexo del jefe	105,227	100	126,608	100
Hombres	79,788	75.8	92,140	72.8
Mujeres	25,439	24.2	34,468	27.2
Tamaño promedio de los hogares	4.05	-	3.87	-

En la Figura 17 se muestra el grado de marginación existente en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, donde se aprecia que la zona residencial está al poniente de la ciudad, región de muy bajo grado de marginación; la zona centro de nivel bajo y la periferia de la ciudad con muy alto grado de marginación. Destacando la zona oriente en la conurbación con Tuxtla Gutiérrez, así como la zona nororiente con asentamientos irregulares dentro de la poligonal del Parque Nacional Cañón del Sumidero y la zona sur poniente. En el mapa de la Figura 17 se observa en color rojo intenso las zonas de mayor marginación de la ciudad y en verde intenso las menos marginadas.

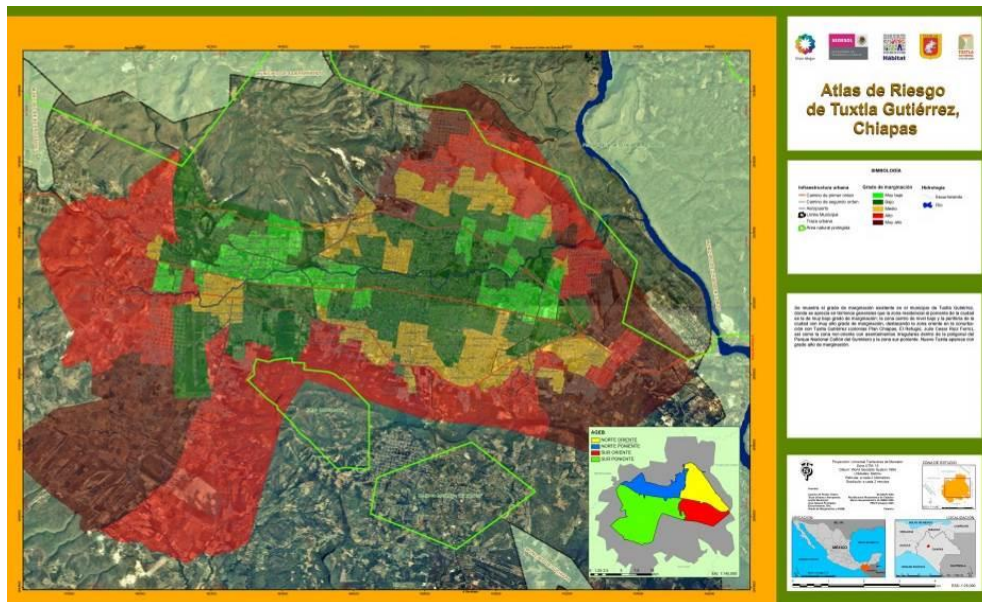


Figura 17. Grado de marginación en el municipio de Tuxtla Gutiérrez (SEDESOL, 2011).

Una de las fuentes que incrementan la vulnerabilidad se da a partir del desconocimiento de la región y los fenómenos que se manifiestan en esta, según el Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2005; 2010), 7,280 personas no vivían en Tuxtla Gutiérrez, que representan 1.64% de la población de 5 años y más. De estas, 95.18% provenían principalmente de México y el Distrito Federal, Oaxaca, Veracruz, Tabasco y Puebla. Los inmigrantes internacionales representan 4.82%, del total de migrantes, siendo

estadounidenses 2.87%. Por sexo, se observa que 50.4% de los migrantes son varones y 49.6% mujeres.

Otra variable que influye en la vulnerabilidad corresponde a la falta de manejo del idioma, lo que dificulta el ser capacitado por las instancias oficiales y construir redes de apoyo con los vecinos, por la dificultad que representa la barrera de la comunicación, por ello es importante considerar que la población en hogares indígenas según el Censo de Población y Vivienda 2005 (INEGI, 2005) en Tuxtla Gutiérrez es de 15,873 personas, que representa 3.2% de la población en hogares del municipio. Las lenguas indígenas más habladas son el Tzeltal y el Tzotzil en igual proporción de 31.9%. Le sigue el Chol con 8.1%, entre otras.

3.5. Aspectos físicos de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

3.5.1. Fisiografía de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Al ubicarse en la parte centro–noroeste del estado de Chiapas, y de acuerdo a la clasificación fisiográfica elaborada por Mullerried (1957), el municipio de Tuxtla Gutiérrez se localiza en la “*Depresión de Chiapas*”, la cual está compuesta por una serie de depresiones amplias de fondo plano a ondulado que son interrumpidas por montañas, lomeríos y colinas.

Mediante un análisis orográfico, hoy se conoce que el relieve del territorio municipal es heterogéneo, debido a la presencia de valles, los cuales están rodeados por otros tipos de relieve como son: a) colinas, b) lomeríos y c) montañas.

De acuerdo con lo anterior, las elevaciones de mayor altitud (hasta 1,300 m) se localizan en la parte noreste, dentro del Parque Nacional Cañón del Sumidero; sin embargo, éstas no son las únicas, ya que existen otras de menor altitud (hasta 1,000 m) como la Loma del Taraí y el Cerro Tapongozoc, que se localizan al norte y noroeste de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez (Paz, 2012b).

Contrastando con la orografía antes descrita, en la parte centro y suroeste del municipio se localizan los valles de Tuxtla y Suchiapa, los cuales destacan por ser las tierras más bajas, pues poseen un rango de altitud calculado entre los 400 y 600 m. Este tipo de orografía presenta poca pendiente con un fondo plano a ondulado.

Por último, en la zona sur y suroeste del valle se encuentra la Meseta de Copoya, la cual es una montaña que presenta una geometría considerada como plana a ondulada en sus partes altas; sin embargo, en el extremo oeste sobresale una elevación de 1,000 m de altitud conocida como “*El Cerro Mactumatzá*” (Figura 18).

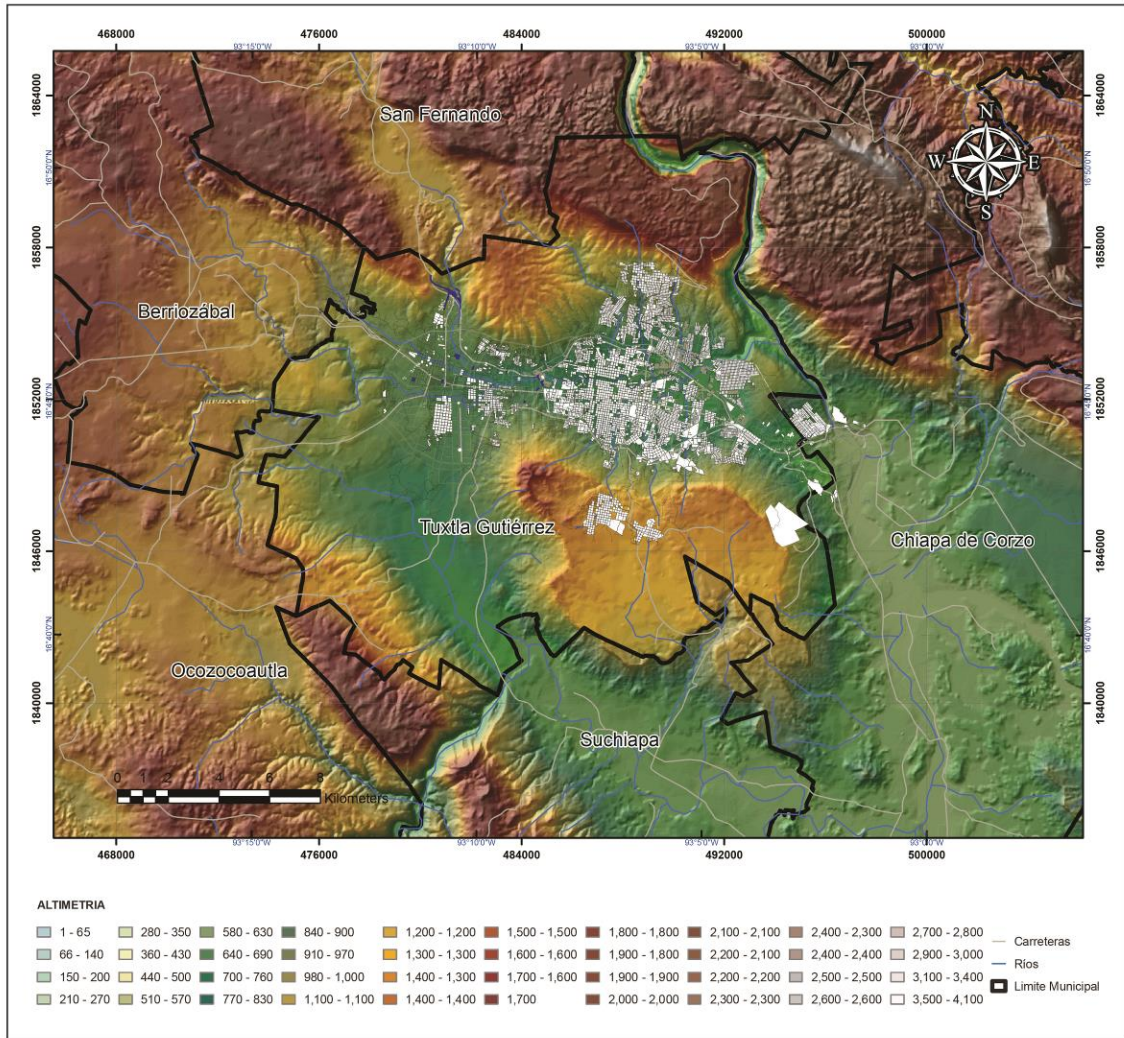


Figura 18. Altimetría de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (González *et al.*, 2013).

3.5.2. Geomorfología de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Lugo (1988) y Priego *et al.* (2008) reconocieron las siguientes geoformas: I) Montañas, II) Lomeríos, III) Piedemonte y IV) Valle (Figura 19).

Las montañas y lomeríos considerados como unidades superiores, junto con sus cimas y dolinas (unidades inferiores), están compuestos por roca caliza y dolomías. Éstas presentan erosión tipo kárstico, el cual se manifiesta como un proceso de disolución de los materiales calcáreos. Este relieve provoca una densidad de cauces de mediana a muy baja ($< 4,781 \text{ m/km}^2$), las pendientes por su parte describen terrenos moderadamente inclinados ($< 15^\circ$) a planos horizontales.

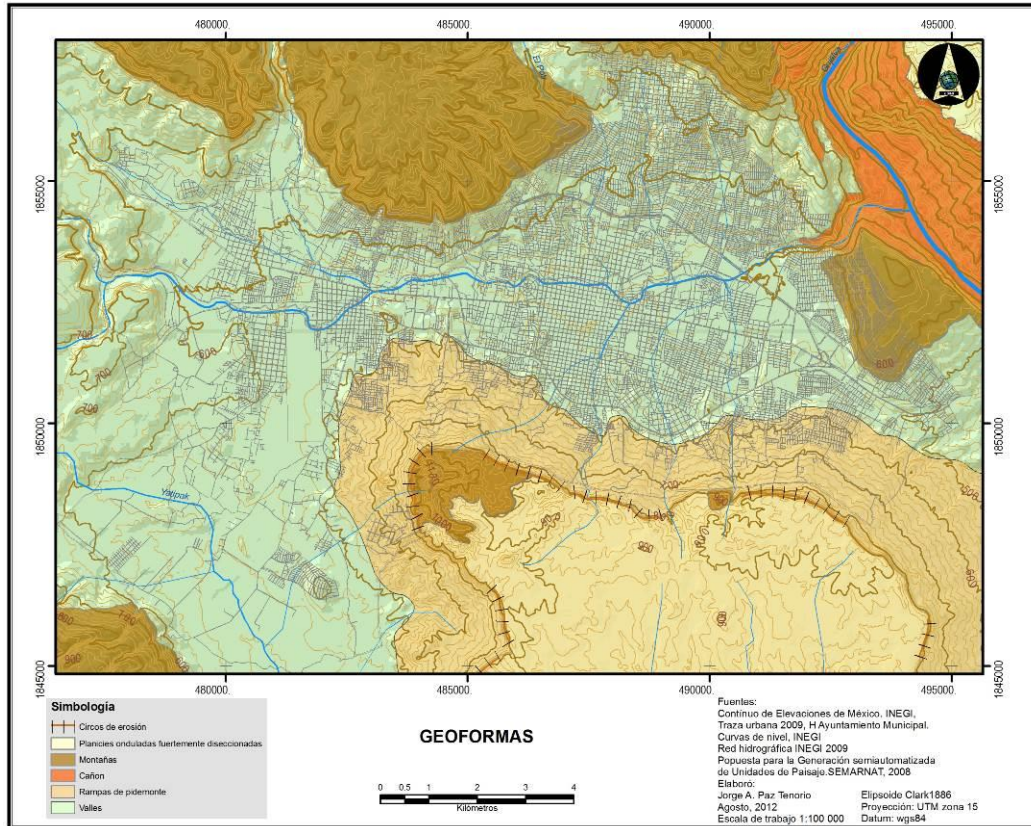


Figura 19. Geoformas en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Paz, 2012b).

Los suelos son de tipo expansivos Vertisol pélico y Rendzina, los cuales están alternados por suelos someros como el Litosol, sobre todo en aquellos terrenos en donde la pendiente es mayor a los 10°. Ante la estructura antes señalada y los procesos que se tienen en este tipo de relieve, los peligros geológicos y geomorfológicos más probables para este tipo de ambiente es disolución kárstica (Lugo, 1988; Priego *et al.*, 2008).

En la zona de estudio se reconoce una génesis del relieve de tipo fluvial, la cual contempla unidades superiores como las colinas, el pie de monte y los valles. Los valles son la parte más baja de la zona de estudio. Este tipo de relieve está constituido por materiales blandos no consolidados conocidos como depósitos aluviales. Éstos se formaron por los diferentes materiales que fueron arrastrados por los diversos cauces de los ríos que bajan de las montañas hacia el valle.

Con base en las condiciones abióticas (litología, geomorfología y climáticas), así como bióticas que se encuentran en el lugar, originan el establecimiento de suelos de tipo profundo y expansivos como es el vertisol, pélico y fluvisol, los cuales están sujetos a fenómenos de inundación de tipo ordinario como extraordinario (Lugo, 1988; Priego *et al.*, 2008), además de asentamientos diferenciales y daños a las construcciones mal desplantadas, así como amplificación sísmicas (Ordoñez, 2008).

3.5.2.1. Las elevaciones de Tuxtla Gutiérrez

Paz *et al.* (2011) proponen con base en las curvas de nivel y en el modelo digital de elevación la existencia de cuatro grandes laderas sobre las cuales se extiende la ciudad y se identificaron las colonias establecidas (Figura 20).

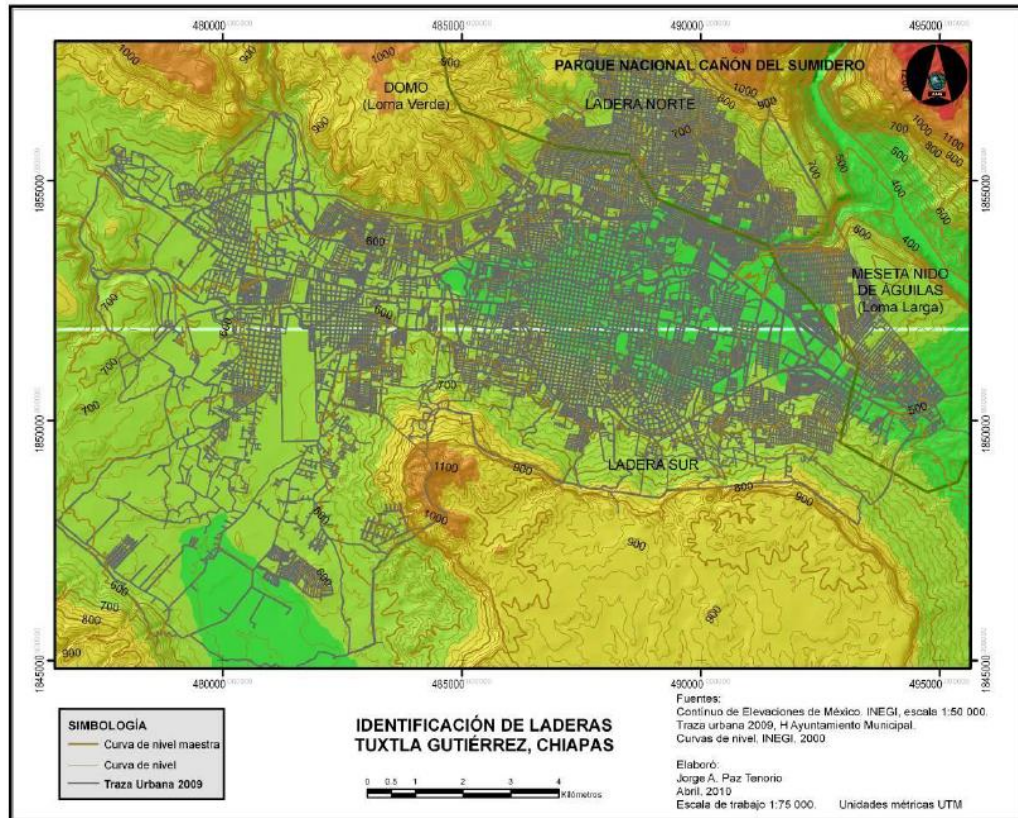


Figura 20. Mapa de identificación de laderas en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Paz *et al.*, 2011).

1. Meseta Nido de Águilas (Loma Larga). Situada al oriente, fue poblada gradualmente a partir de 1989 en su ladera poniente, por la expansión de la colonia Patria Nueva. Se constituye principalmente de roca caliza, de la formación La Angostura (Membrillo, 2006). Presenta una dirección noroeste-sureste en su eje mayor, que alcanza los 4.5 km. Hacia el norte se interrumpe por el pequeño cañón que forma el río Sabinal antes de desembocar en el Grijalva. Hacia el sur su pendiente decrece gradualmente de 700 hasta alcanzar los 540 msnm. Al igual que la ladera norte, parte se encuentra dentro del Parque Nacional Cañón del Sumidero.

2. Ladera Loma Verde (Domo). De la misma naturaleza litológica que la anterior, se caracteriza por roca caliza de color gris, que se aprecia en el mirador “*Los Amorosos*”, que corresponde con la margen izquierda del Cañón del Sumidero. La diferencia de alturas va de los 600 a los 980 msnm. Sobre esta geofoma, sus laderas orientadas hacia el este han sido ocupadas por gran cantidad de colonias; en la porción sur, se encuentran la UNICACH, Caleras Maciel y la planta de PROACTIVA. Por su forma cómica

presenta un evidente patrón de escurrimiento de tipo radial centrífugo, cuyos ríos provienen de la parte alta y sus corrientes han labrado profundos cauces y cavernas, la mayoría de las cuales se encuentran en las cañadas que corresponden a los cauces de los ríos (Fernández y Piero, 1999). Tiene una dimensión de 5.4 km en su eje este-oeste (INEGI, 2005). Presenta áreas deforestadas por la extracción de roca caliza para la fabricación de cal.

3. Ladera norte. Es la más densamente poblada, y hacia donde se ha dirigido la tendencia al crecimiento (H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez, 1988). Su pendiente es gradual de los 2° a los 7°. Las altitudes van de los 540 a los 740 msnm. Su parte más septentrional queda inmersa en la poligonal del Parque Nacional Cañón del Sumidero. Su forma es de abanico que se abre hacia el sur, teniendo un eje norte-sur de 3.6 km. Presenta una base mayor de 5 km y en la parte más angosta registra 1.4 km, limitada en su parte alta por los contrafuertes montañosos que evidencian la presencia de una falla geológica normal (Paz, 2012b). El relieve es irregular y se caracteriza por la presencia de barrancas. El río principal es el Potinaspak que desciende de la meseta de las Ánimas. Los asentamientos ubicados en la parte noreste de esta zona se están extendiendo hacia esa misma dirección, es una ladera de características geológicas semejantes a la Meseta Nido de Águilas.

4. Ladera sur. Esta ladera presenta con una pendiente menor de 7° que aumenta gradualmente hasta 15° (Figura 20). Los materiales que la componen son principalmente depósitos de talud (también llamados coluviones), generados por desprendimiento y transporte de las rocas que constituyen la parte alta denominada Meseta de Copoya, con pendientes desde 10° y hasta 70°. Membrillo (2006) menciona que predominan las rocas sedimentarias formadas en ambientes marinos someros. La parte superior de la ladera está compuesta por estratos de caliza y areniscas con espesor de hasta 100 m.

3.5.3. Características geológicas del estado de Chiapas

El marco geológico del estado de Chiapas es complejo, ya que en él se encuentran expuestas rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas que cubren un rango de edad desde el Paleozoico hasta el reciente. Ortega *et al.* (1991) dividen al estado de Chiapas en seis provincias geológicas (Figura 21).

- Cuenca deltaica de Tabasco: ocupa el extremo noroccidental del estado.
- Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Fallas: constituye la provincia geológica más extendida, ocupando prácticamente un 70% de la superficie estatal.
- Batolito de Chiapas: comprende una franja de rocas plutónicas alineada en dirección NW-SE, constituye una cadena montañosa que se levanta de manera paralela a la costa.
- Macizo Ígneo del Soconusco: provincia en la cual se incluye el entorno geológico del volcán Tacaná y las rocas volcánicas asociadas.
- Cuenca de Tehuantepec: en ella se incluyen depósitos sedimentarios recientes localizados en la zona costera de la entidad.

- La Provincia Cuicateca: en su mayoría se encuentra expuesta en el estado de Oaxaca, está constituida por un cinturón de rocas de afinidad vulcano-sedimentaria epimetamórfica que se localizan en la parte occidental del estado.

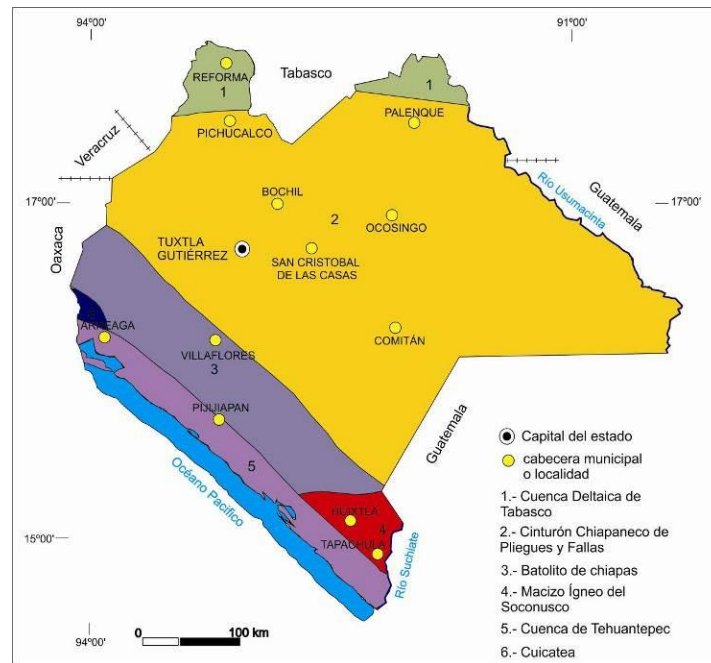


Figura 21. Mapa geológico del estado de Chiapas (Modificado de Castro-Mora *et al.*, 1999).

El Macizo de Chiapas es la unidad que constituye el basamento del estado y está compuesto por granitos, dioritas y gneis cuarzo-feldespáticos de edad pérmica (Castro-Mora *et al.*, 1999; Figura 22). Sobre estas rocas se encuentran otras del Paleozoico superior representadas por una serie detrítica perteneciente a las formaciones Paso Hondo, Vainilla y Grupera, así como por rocas metamórficas que incluyen serpentinitas, esquistos, gneises y cuarcitas. Tales rocas se encuentran afectadas por intrusiones ígneas que varían de rocas básicas (gabros) a rocas ácidas (granitos). Todas ellas pertenecen al Batolito de Chiapas, cuyas edades isotópicas son únicamente en el Pérmico (isócronas de Rb-Sr; Damon en Salas, 1975). Estas rocas constituyen lo que geográficamente se denomina como macizo granítico de Chiapas y afloran principalmente en el sector meridional de la entidad.

Cubriendo de manera discordante a las rocas del basamento, se tiene el conjunto de rocas mesozoicas marinas que van del Triásico-Jurásico al Cretácico Superior. Esta secuencia de rocas ha sido agrupada en las formaciones Todos Santos, Mogoñé, San Ricardo, Chinameca, Grupo Sierra Madre, Ocozocoautla y Méndez, las cuales afloran principalmente en la porción centro septentrional de la entidad. Constituyen zonas montañosas muy abruptas de anticlinorios y sinclinorios cuyos ejes axiales están orientados en dirección NW-SE siguiendo el patrón de deformación de la provincia geológica de Pliegues y Fallas, fisiográficamente conocida como Sierra Madre Oriental, (Castro-Mora *et al.*, 1999).

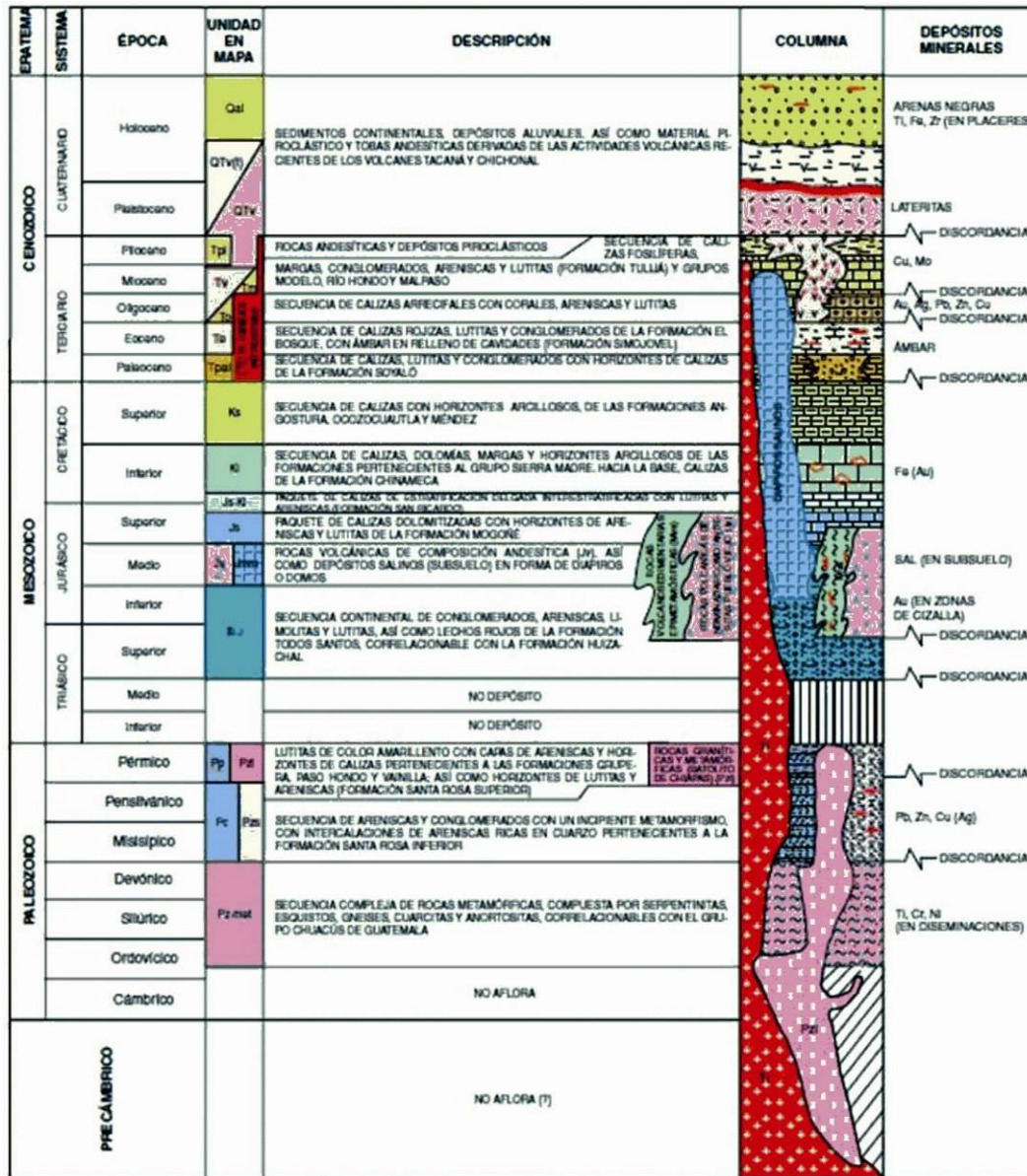


Figura 22. Columna litoestratigráfica del estado de Chiapas (Castro-Mora *et al.*, 1999).

Sobre la secuencia de rocas mesozoicas descansa concordantemente un paquete de rocas cenozoicas cuyo rango de depósito abarca del Paleoceno (Formación Soyaló) al Plioceno (Formación Tres Puentes). Las rocas de la Formación Soyaló son de origen marino y constituyen depósitos rítmicos tipo flysh. Por su parte las rocas eocénicas son de naturaleza mixta (continental y marina), las cuales presentan capas rojas hacia el límite con el Oligoceno marino, cuyas rocas están representadas por calizas (Formación Macuspana) y rocas detríticas (Formación La Laja), (Castro-Mora *et al.*, 1999).

Por su parte, las rocas del Mioceno son de origen marino y están conformadas por una serie arcillo-calcárea representadas, de base a la cima, por las formaciones Encanto, Amate inferior y superior, Tulijá y Belem, las cuales se encuentran mejor expuestas hacia

la porción septentrional de la entidad. Finalmente, durante el Plioceno-Holoceno se conformaron depósitos de limos, arenas, arcillas, así como depósitos piroclásticos derivados de las actividades volcánicas del Chichonal y del Tacaná, así como por materiales aluviales y suelos residuales (Castro-Mora *et al.*, 1999; Figura 22).

3.5.3.1. Características geológicas de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

El municipio de Tuxtla Gutiérrez, queda comprendido en un valle extenso en donde predominan los depósitos aluviales, provenientes de las diferentes vertientes de los ríos que fluyen desde las partes topográficamente altas. Geológicamente se encuentra rodeada por una secuencia predominantemente sedimentaria, mayoritariamente calcárea de origen marino, las cuales se encuentran plegadas en una serie de sinclinales y anticlinales, así como fallas, producto de la actividad tectónica terciaria que se llevó a cabo en la región. Algunas de estas estructuras fueron descritas por De la Rosa (1989; Tabla 11).

Tabla 11. Estructuras geológicas que se encuentran en la Subcuenca del río Sabinal (De la Rosa, 1989).

Provincias tectónicas	Plegamientos		Fallas
	Sinclinal	Anticlinal	
Sinclinal central	Sinclinal Grijalva Sinclinal Ocozocoautla Sinclinal Copoya	Anticlinal Copoya	
Fallas de transcurrencia	Sinclinal La Venta Sinclinal Malpaso Sinclinal Ixtapa Sinclinal Larráinzar Sinclinal Tenejapa Sinclinal Chanal Sinclinal Tenango	Anticlinal Ocozocoautla Anticlinal El Sumidero Anticlinal Mono Pelado Anticlinal Chenaló Anticlinal Canouc Anticlinal San Cristóbal Anticlinal Oxchuc Anticlinal Nazaret Anticlinal Comitán	Área Occidental Presa Malpaso a Ixtapa Falla Quintana Roo Falla La Venta Falla San Fernando Falla Malpaso Muñiz Falla Chicoasén Malpaso Falla Chacté, Ocosingo Área Oriental de Ixtapa a Ocosingo Falla Bajucú Falla Huitán Falla Oxchuc Falla Chacté, Ocosingo

De acuerdo con lo expresado por el Servicio Geológico Mexicano en la carta Geológica de la entidad (SGM, 2005b), en el Municipio de Tuxtla Gutiérrez, se encuentran aflorando rocas de origen sedimentario y depósitos aluviales recientes, se presentan a continuación las características principales, la ubicación y extensión de dichas unidades.

- Secuencia de carbonatos representada en su mayoría por calizas del Cretácico Superior, ubicadas principalmente en el noroeste, sur y sureste de la zona de estudio con un área estimada en 8,781 ha.
- Secuencia terrígena Terciaria (Paleógeno), comprendida en su mayoría por areniscas que se localizan principalmente en la parte norte, centro – oeste, centro – este y sureste del municipio, la cual ocupa un área estimada en 14,163 ha.

- Dentro de la misma secuencia de las rocas conformadas por sedimentos de origen terrígeno, se encuentra una unidad de limonita, también de edad Terciaria Paleógeno, la cual se presenta principalmente en las laderas de la Meseta de Copoya con una extensión calculada en 5,257 ha.
- Las lutitas correspondientes al Terciario Paleógeno se localizan en las laderas bajas de la Meseta, asociadas a la secuencia de limonita, ocupan un área de 1,705 ha.
- Los depósitos aluviales de Cuaternario, como ya se mencionó, se localizan en las partes bajas de los valles y tienen un área estimada en 4,239 ha.

Las unidades de roca (Figuras 23-28) fueron reconocidas en campo en distintas localidades en las inmediaciones de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. En los siguientes párrafos se describen sus características. En la parte norte de la carretera Tuxtla Gutiérrez – San Fernando aflora parte de la secuencia estratificada de caliza del Cretácico Superior pertenecientes a la Formación Ocozocoautla, que en este sector muestra un rumbo preferencial de N33°E y un espesor promedio que varía entre 20 cm y hasta 150 cm aproximadamente (Figura 23). Además, se aprecian grandes bloques debido a que dicha unidad se observa fracturada (Figura 24), asociada a una zona de falla con una dirección de 245°, rellena de calcita secundaria (Figura 25).

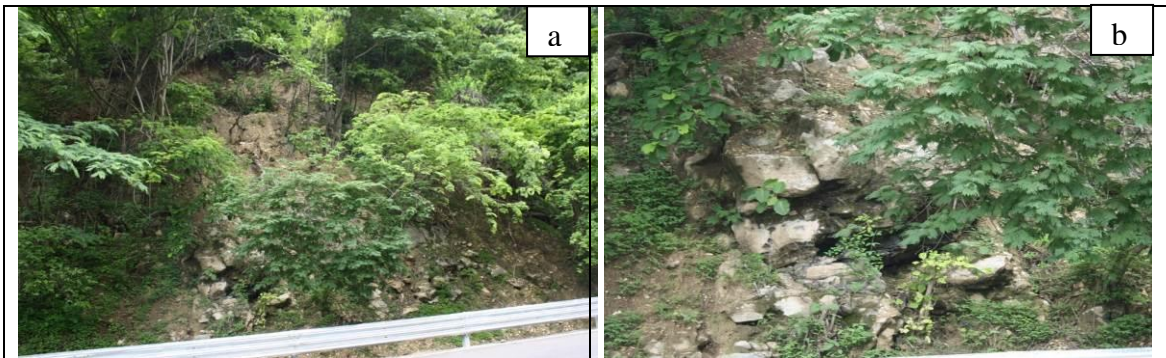


Figura 23. (a) Disposición de bloques de roca caliza. Tramo Tuxtla – San Fernando; (b) Bloques de caliza asociados a fracturamiento debido a fallamiento.

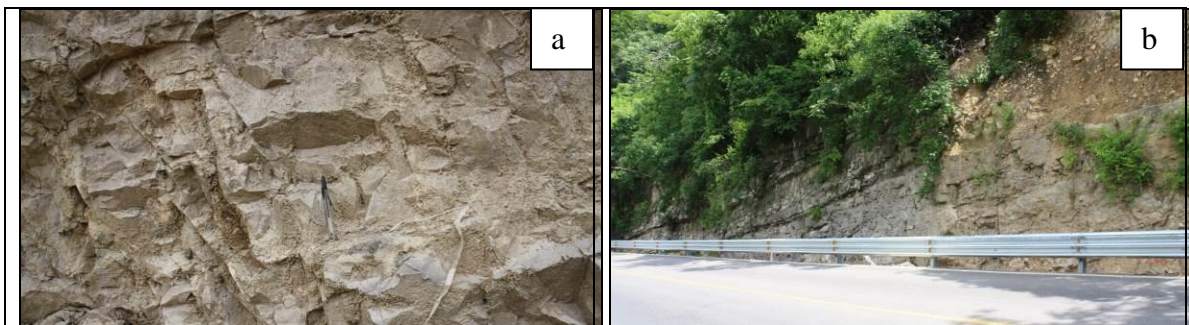


Figura 24. (a) Disposición estratificada del afloramiento; (b) Conformación de los estratos y ubicación de la falla.

En el sector NW del libramiento norte, se observa una secuencia estratificada e intercalada de conglomerados, lutitas y calizas correspondientes a la Fm Soyaló del Paleoceno. La facie conglomerática se compone de fragmentos de roca que van del tamaño de las arenas finas hasta las gravas (Figura 25). Los estratos de lutitas y calizas son de color beige a ocre, cuyo espesor aproximado es de entre los 10 y los 40 cm. Esta unidad se encuentra dispuesta con una inclinación de 26° y un rumbo de 181° (Figura 25).

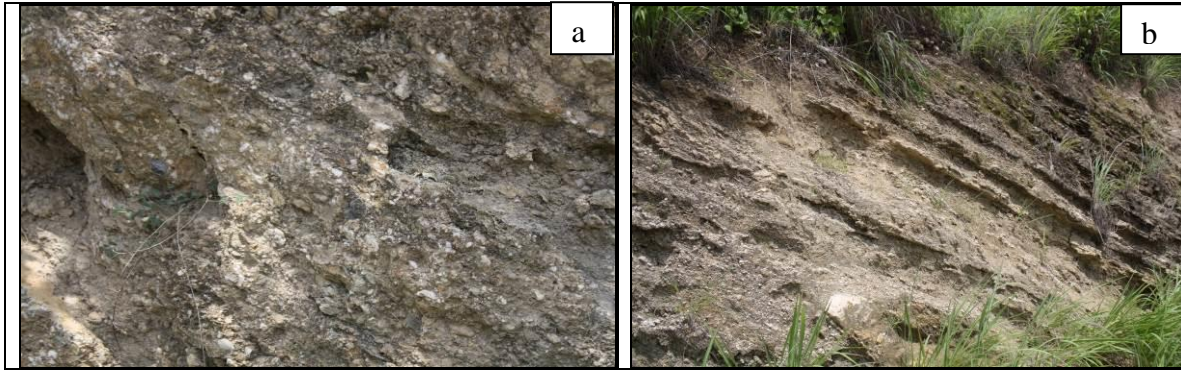


Figura 25. (a) Tamaño del grano del afloramiento; (b) Estratos inclinados pertenecientes a la Fm Soyaló.

En el sector SW de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, en la zona del relleno sanitario, se encuentra la secuencia estratificada de calizas de la Fm Ocozocoautla, afectada por una falla con orientación de 165° e inclinación de 87° hacia el S (Figura 26). Dicha falla ha producido deformación en la estratificación dispuesta en este punto, provocando que en los estratos de un lado tengan orientación E-W y en la otra sea contraria, causando fuerte fracturamiento en bloques angulosos (Figura 26). En otra de las secciones de este mismo afloramiento, las rocas se encuentran dispuestas con un rumbo de 95° e inclinación de 31° al S, en la última sección del afloramiento el rumbo es de 10° y la inclinación de 13° . Así mismo en esta misma zona se encuentran aflorando calizas estratificadas con diversas tonalidades de color gris y abundante presencia de fósiles marinos muy consolidada y algunas fracturas correspondiente a la Fm Sierra Madre (Figura 26).

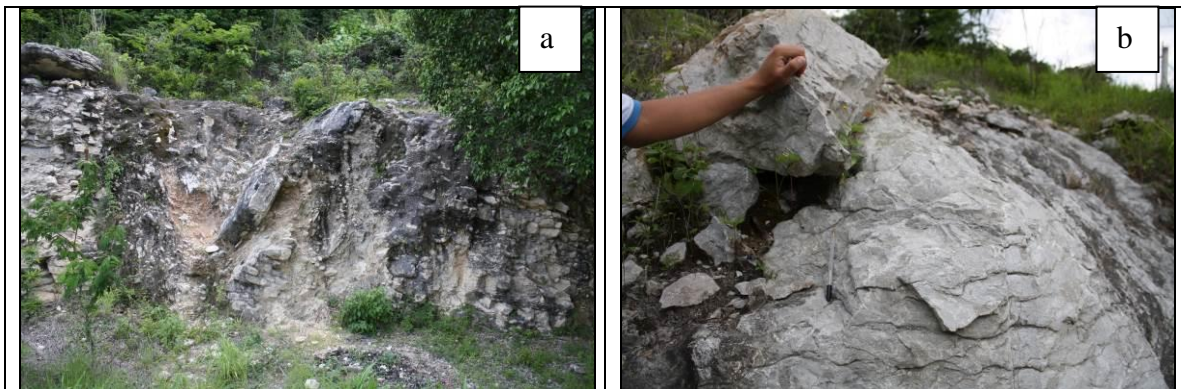


Figura 26. (a) Disposición estratificada del afloramiento en zona de falla con forma angulosa de los bloques expuestos; (b) Disposición estratificada del afloramiento con presencia de fósiles, calizas de la Fm Sierra Madre, estratificada y con fracturamiento intraformacional.

Por otra parte, en el Parque Nacional Cañón del Sumidero, en la zona NE de altos topográficos de Tuxtla Gutiérrez, se encuentra nuevamente aflorando una secuencia calcárea de la Formación Angostura. Esta zona aparece dispuesta de forma estratificada con rumbo de 155° e inclinación al SE en paredes verticales (Figura 27). En general, presentan tonalidades desde el blanco hasta el gris, con abundante presencia de fósiles de amonites y gasterópodos. Los espesores de los estratos son muy variados, desde aproximadamente 20 cm hasta 180 cm (Figura 27).

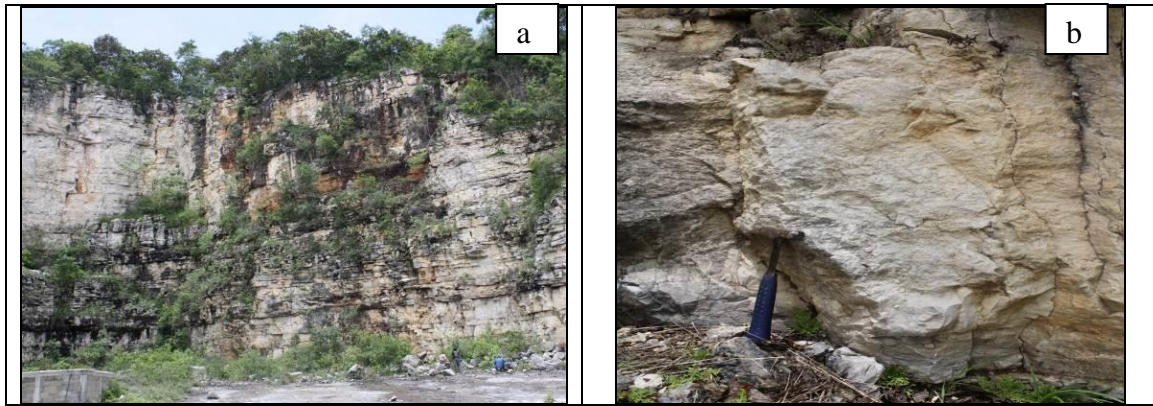


Figura 27. (a) Disposición estratificada del afloramiento de calizas de la Fm Angostura; (b) Calizas con presencia de fósiles de la Fm Angostura.

En esta sección, conforme se desciende topográficamente los estratos cambian su disposición con una inclinación de 20° NE y rumbo de 296° ; en las zonas topográficamente más bajas esta secuencia calcárea se encuentra en contacto con calizas de la Fm Ocozocoautla, en donde en general se presenta con textura de grano fino, con menor proporción de presencia de fósiles (Figura 28). En la zona del valle los estratos presentan una inclinación de 75° SE y un rumbo de 300° (Figura 28). El contacto entre estas unidades es de carácter estructural y está determinado por una falla lateral de componente izquierda, de dimensiones regionales conocida como Falla Tuxtla.

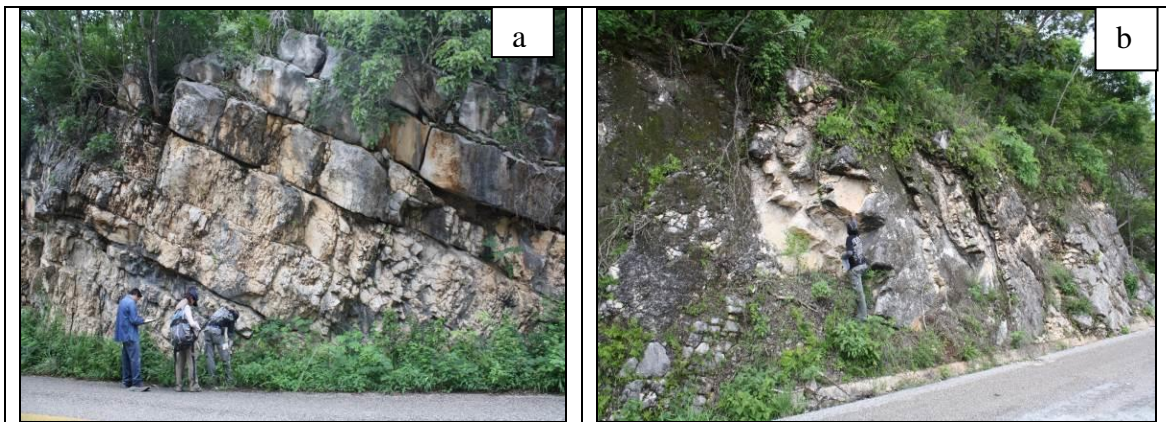


Figura 28. (a) Disposición estratificada de calizas de la Fm Ocozocoautla; (b) Disposición estratificada semivertical de calizas de la Fm Ocozocoautla.

Hacia el extremo sur de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez afloran las unidades más recientes conformadas en una secuencia sedimentaria de areniscas y lutitas indiferenciadas del Eoceno, formando parte de la estructura conocida como Sinclinal de Copoya. En el núcleo de esta misma estructura, geográficamente localizadas en la zona de la Meseta de Copoya, se encuentra una unidad de calizas parcialmente dolomitizadas, también de edad eocénica, de la Fm Lomut (SGM, 2005b).

La zona urbana se encuentra dispuesta predominantemente, sobre depósitos aluviales cuaternarios, que rellenaron el valle central de esta región del estado. La distribución espacial de las unidades geológicas antes mencionadas, así como sus características estructurales y la disposición que guardan entre sí, se aprecian en el mapa geológico global (Figura 29) y local (Figura 30).

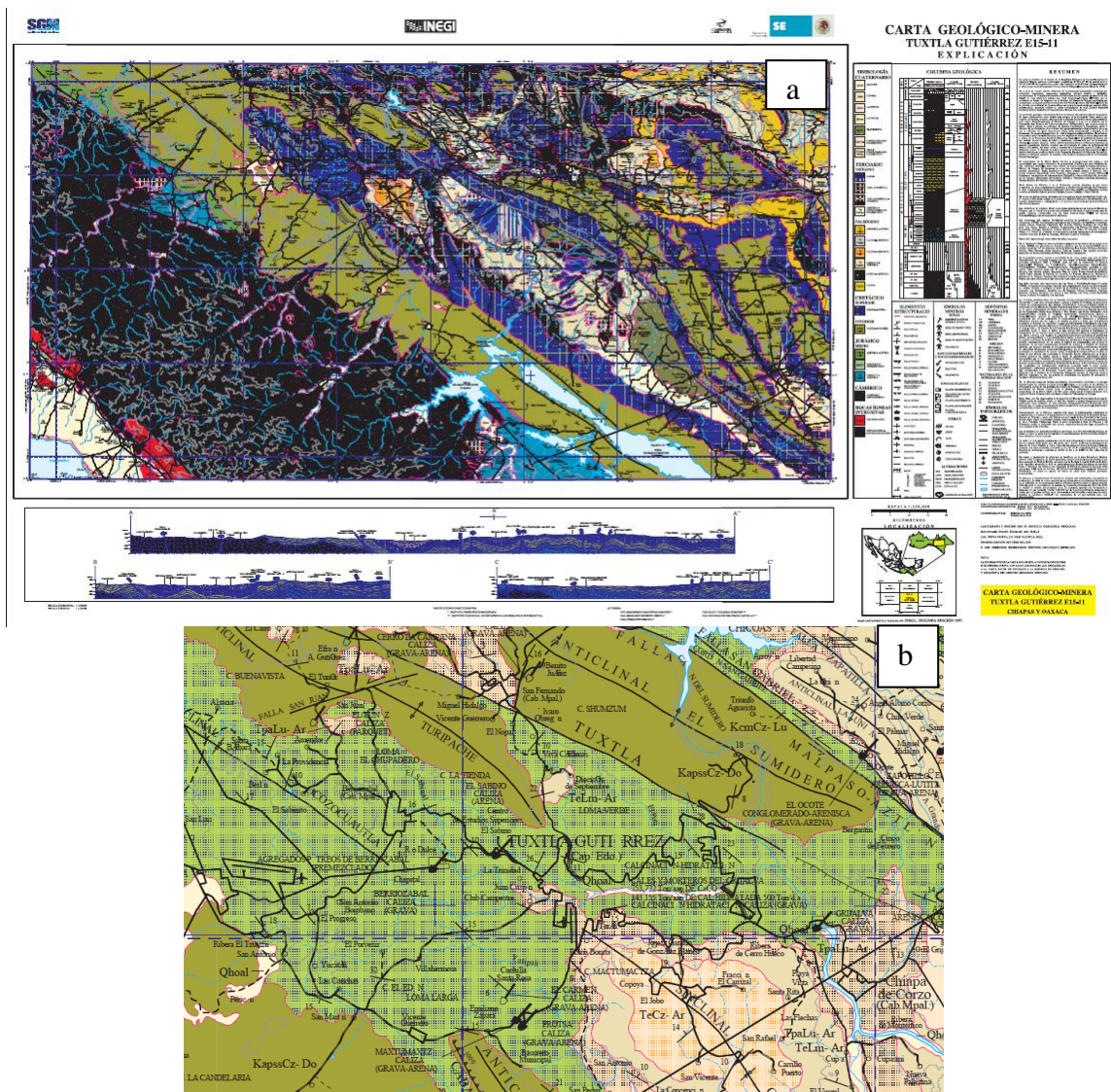


Figura 29. (a) Carta geológico-Minera de Tuxtla Gutiérrez E15-11 (INEGI y SGM, 2005); (b) Acercamiento a Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

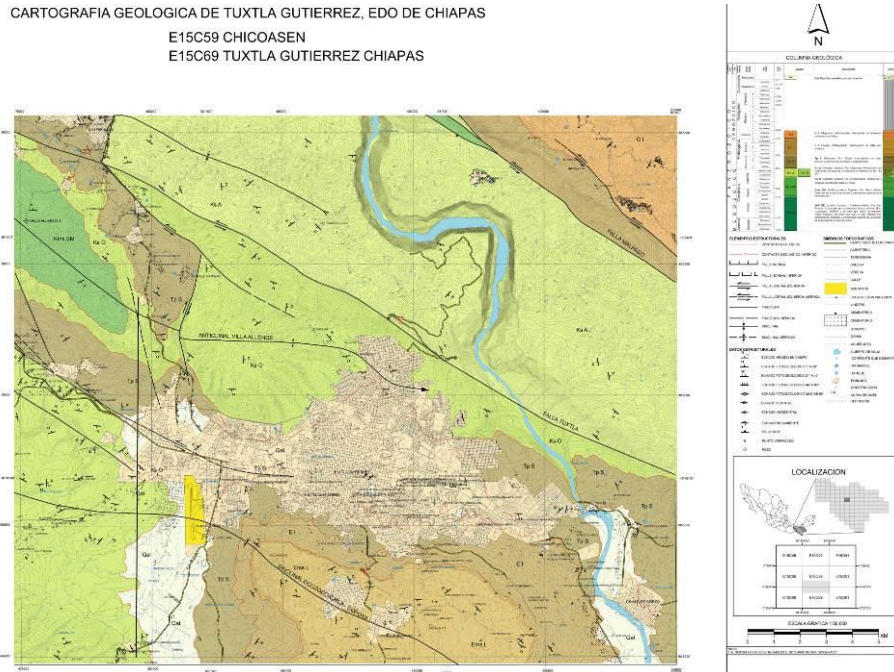


Figura 30. Mapa con la cartografía geológica de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (González *et al.*, 2012).

3.5.4. Características geotécnicas de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha desarrollado estudios geotécnicos en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, por parte de Espinosa (1976) quien consideró que la ciudad tenía dos tipos de suelos: materiales limosos y arenas, de buena capacidad y otra de depósitos aluviales con problemas de expansividad. Díaz *et al.* (2006) presentan una propuesta que la subdivide en tres zonas considerando la base de datos de estudios de mecánica de suelos de la UNACH y la empresa GEORTEC, S.A. de C.V. (Figura 31).

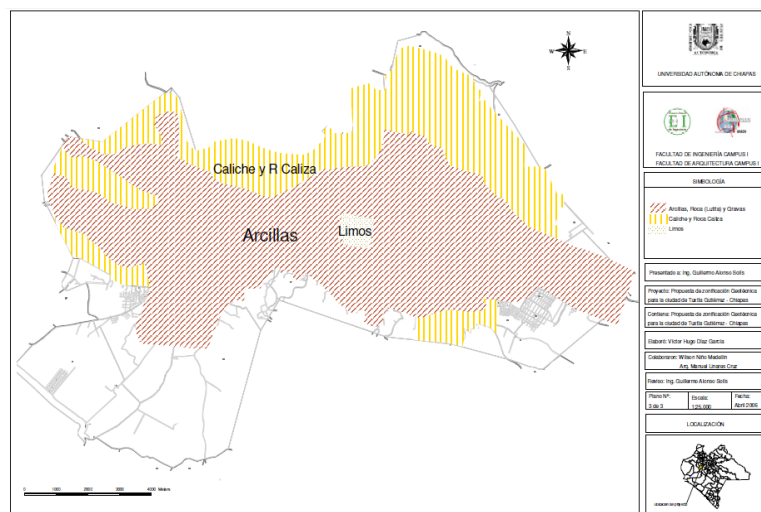


Figura 31. Mapa zonificación geotécnica de Tuxtla Gutiérrez, (Díaz *et al.*, 2006).

Ordóñez (1994; 2008) hace notar que existen estratos plásticos saturados de hasta 10 m de profundidad en la zona de la cuenca del río Sabinal, y divide a la ciudad en cuatro zonas. En la Figura 32 se muestra la zonificación geotécnica y en la Tabla 12 se muestran las propiedades mecánicas de las distintas zonas.

Las cuatro zonas que aparecen en el mapa de la Figura 32, son:

- Zona A' (color amarillo). Primer cuadro de la ciudad, (limos y arcillas de color café claro, no expansivo), zona III (CFE, 1993).
- Zona A (color gris). Resto del valle, arcillas de color gris oscuro a café claro, suelos expansivos, zona III (CFE, 1993).
- Zona B (color verde). Ladera sur, lutitas, zona II (CFE, 1993).
- Zona C (color salmón). Ladera norte, caliche y roca caliza, zona I, (CFE, 1993).

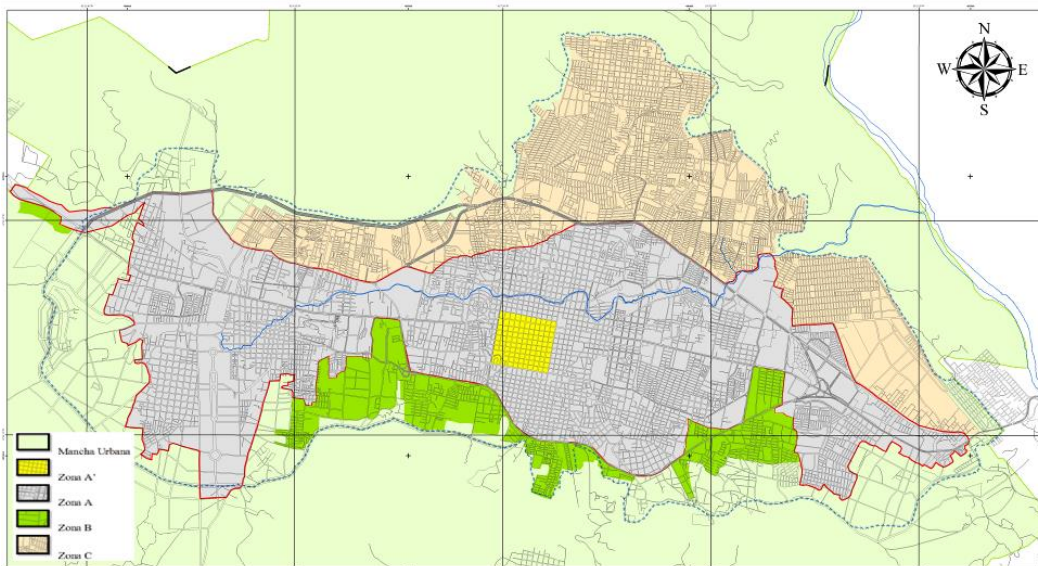


Figura 32. Zonificación geotécnica propuesta para Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (modificado de Ordóñez, 2008).

Tabla 12. Propiedades índice y de resistencia de los suelos en Tuxtla Gutiérrez (Ordóñez, 2008).

Zona	ω %	$G\omega$ %	Ss	WL %	WP %	PL %	F %	S %	G %
A'	15-24	65-80	2.5-2.7	25-55	13-22	22-30	85-100	5-15	0-15
A	12-36	70-100	2.35-2.60	40-80	11-30	25-60	90-100	0-10	0-2
B	10-28	25-95	2.5-2.7	41-65	15-35	20-50	60-90	8-40	0-8
C	12-24	12-70	2.5-2.7	15-45	13-22	8-25	85-100	5-15	0-15
Zona	γ_m Mg/m ³	e_0	Cs	Cc	qu KPa	ϕ_u	Pc KPa	P ₀ KPa	
A'	1.7-1.95	0.5-0.9	0.07-0.005	0.15-0.27	60-250	14°-28°	130-250	30-120	
A	1.3-1.7	0.6-1.1	0.07-0.00153	0.12-0.00435	50-200	6°-19°	40-75	25-55	
B	1.7-1.9	-	-	-	100-200	-	50-100		
C	1.7-1.95	0.4-0.65	-	-	60-250	14°-28°	130-250	30-120	

donde: ω , humedad natural, G_{ω} grado de saturación, S_s , densidad de sólidos, W_L , límite líquido, W_p , límite plástico, P_l , índice plástico, S , resistencia al corte, G , módulo de cortante estático, γ_m , peso volumétrico, P_o , presión inicial suelo consolidado, P_c , presión en suelo reconsolidado, q_u , capacidad de carga de falla del suelo, \bar{N} , número de golpes promedio de la Prueba de Penetración Estándar (SPT).

En la Figura 33 se presentan diferentes perfiles de los suelos en Tuxtla Gutiérrez, elaborados considerando 40 estudios de mecánica de suelos a lo largo de la mancha urbana de distintos laboratorios, principalmente de Ordóñez (2008). Estos estudios se emplean para comparar los perfiles de velocidades con los estratos del suelo.

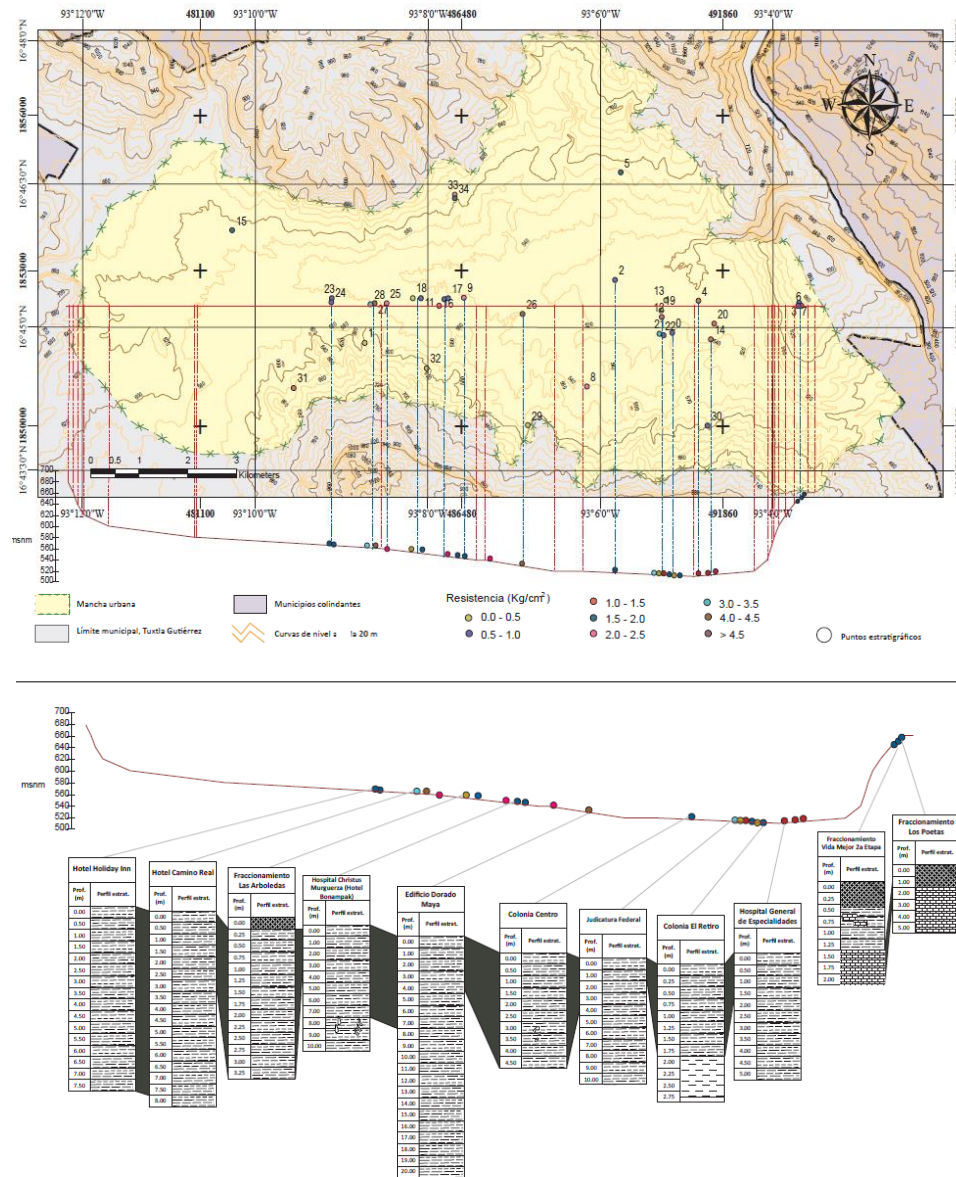


Figura 33. Perfiles de los suelos en el valle de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (González *et al.*, 2013).

De acuerdo con los estudios de Ordoñez (2008), las arcillas expansivas cubren gran parte del área urbana de Tuxtla Gutiérrez con espesores de hasta 4.5 m de profundidad y, de acuerdo con la experiencia que se ha tenido con ellas en el mundo, producen daños severos incluso en construcciones con demandas al suelo menores de 5 ton/m². Es decir, viviendas, escuelas, pavimentos, entre otras, las cuales corresponden a la mayoría del inventario constructivo presente en la ciudad.

Las presiones de expansión generadas por el peso de las construcciones y la actividad natural registrada, tienen un rango entre 1.0 y 1.5 kg/cm² (100 a 150 KPa). Los daños se observan en diversas regiones de la ciudad, zona del estadio Víctor Manuel Reyna, Colonias Las Palmas, El Retiro, Los Laureles, La ladera sur oriente y poniente, etc.

3.5.5. Características hidrológicas de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

La cuenca del río Sabinal está ubicada dentro de la región hidrológica N° 30 denominada Grijalva-Usumacinta, perteneciente a la cuenca administrativa Grijalva-Tuxtla Gutiérrez. El río Sabinal es un afluente del río Grijalva que drena un área aproximada de 407 km². Su confluencia con el Grijalva se efectúa a la altura de la meseta Nido de Águilas, punto de entrada del río al Cañón del Sumidero (Figura 34). La cuenca está formada por 14 subcuencas (SEDESOL, 2011).

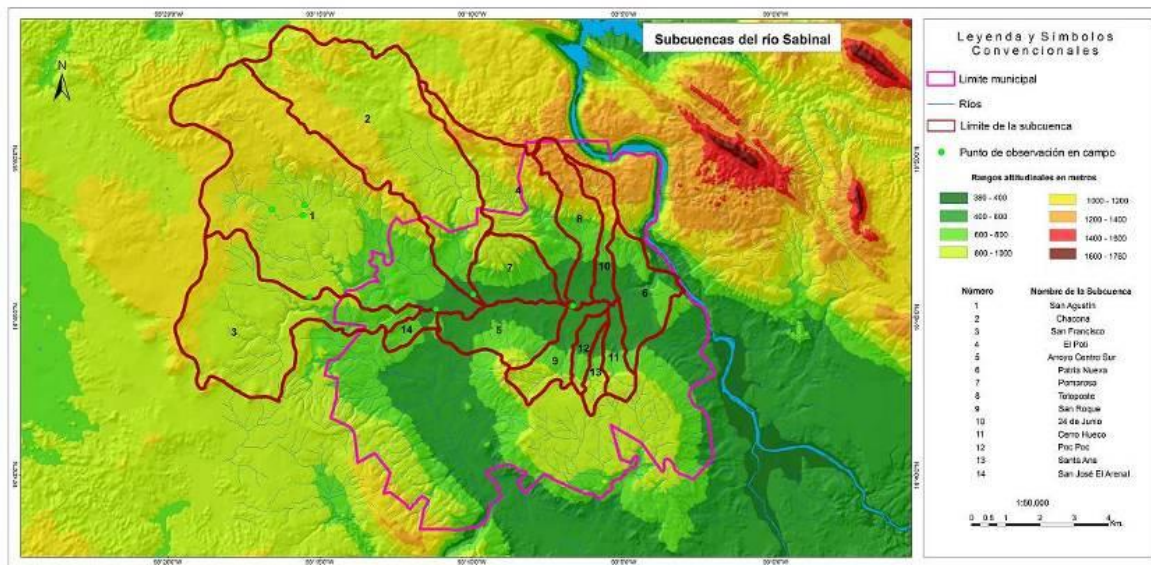


Figura 34. Cuenca y subcuencas del río Sabinal (SEDESOL, 2011).

Dentro de la cuenca se encuentran tres manchas urbanas importantes: San Fernando (0.99 km²), Berriozábal (2.32 km²) y Tuxtla Gutiérrez (78.08 km²) que en conjunto generan un área total urbanizada de 81.39 km², lo que representa 20% del área total de la cuenca. La mayor parte de esta área se encuentra en la zona más baja, correspondiente a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

De acuerdo a su génesis geológica, el municipio de Tuxtla Gutiérrez, presenta dos tipos de escurrimientos: a) superficiales y b) subterráneos. Los primeros se localizan en las cuencas del río Sabinal y del río Suchiapa; por su temporalidad dichos escurrimientos son clasificados como perennes y temporales. Por su parte, los ríos subterráneos se localizan en relieves constituidos por rocas calizas – dolomitas (kársticos), y por lo general presentan una carga de agua y sedimentos únicamente en la época de verano. Las principales corrientes hidrológicas superficiales que corren o atraviesan el municipio son: los ríos perennes Sabinal y Grijalva; y los ríos intermitentes Sabino, San Francisco, Poti, entre otros (Figura 35).

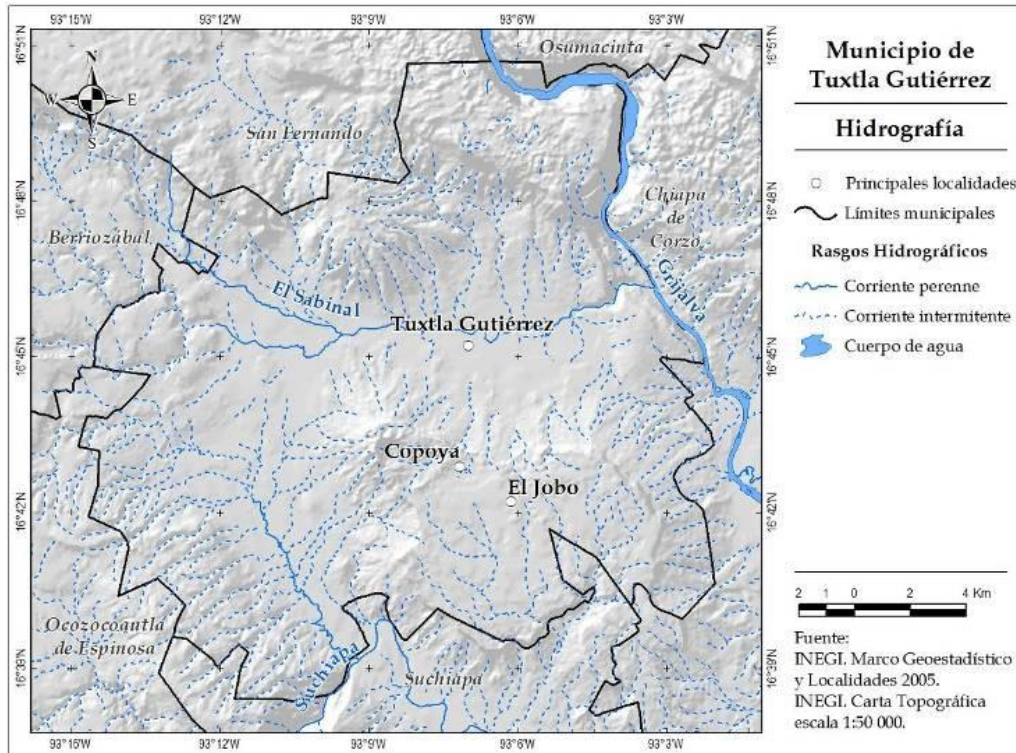


Figura 35. Hidrografía del municipio (SEDESOL, 2011).

La importancia del estudio de la variable hidrología en la evaluación del peligro sísmico es reciente, es por ello que se hace indispensable reconocer las zonas inundables, como el valle de Tuxtla Gutiérrez, ya que estas tienden a desarrollar mayores efectos de sitio, asentamientos diferenciales y hundimientos en las viviendas, debido a que reduce la capacidad de enfrentar las deformaciones impuestas por el paso de las ondas generadas por los sismos.

CAPÍTULO

4

4. PELIGRO SÍSMICO EN TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

4.1. Estudios de peligro sísmico; generalidades, retos y perspectivas

4.1.1. Estudios de peligro sísmico en el mundo

Los estudios de amenaza o peligro sísmico buscan establecer, para cada sitio de interés, un sismo que tenga una baja probabilidad de ser excedido en un lapso de tiempo que se considere adecuado como vida media de las edificaciones existentes o a construir, de acuerdo a la información disponible sobre las fuentes sísmicas que afecten a ese sitio. La amenaza sísmica representa la probabilidad de ocurrencia en un período específico y dentro de un área dada de un movimiento sísmico del terreno de un nivel de severidad determinado (Arellano *et al.*, 2003).

El peligro sísmico expresa las intensidades sísmicas relevantes para el comportamiento de las estructuras en términos de los periodos de retorno. Este se calcula de manera indirecta, evaluando primero la tasa de actividad sísmica en las fuentes generadoras, y después se integran los efectos que producen, en un sitio dado, los sismos que se generan en la totalidad de las fuentes.

La primera parte de un estudio de peligro sísmico se basa en la actividad tectónica del territorio y la sismicidad que las fuentes generan en una región determinada. Estas fuentes deben caracterizarse a través de ecuaciones basadas en los datos sísmicos existentes para la zona. Requiere una evaluación probabilística de ciertos parámetros debido a que la instrumentación y calidad de datos aún no es suficiente en gran parte de las regiones sísmicas del país.

La segunda parte necesita conocer en detalle las condiciones geotécnicas locales, las cuales permiten formular un modelo del subsuelo, de manera que puede estimarse

mediante la propagación de las señales en roca hasta la superficie del terreno, las respuestas esperadas en superficie, bien sea en términos de acelerogramas, espectros de aceleración, aceleraciones máximas o cualquier variable relacionada.

Una vez determinada la tasa de actividad de cada una de las fuentes sísmicas, es necesario evaluar los efectos que, en términos de intensidad sísmica, produce cada una de ellas en el sitio de interés. Relacionando la magnitud, posición relativa fuente-sitio e intensidad sísmica se obtienen las leyes de atenuación. Otro aspecto importante es el efecto del tipo de suelo (geología local) sobre la amplitud y la naturaleza de las ondas sísmicas, que ha sido reconocido desde hace mucho tiempo como crucial en la estimación del peligro sísmico (efecto de sitio).

El peligro sísmico se expresa en términos de la tasa de excedencia de los valores dados de intensidad sísmica que al ser representados en un mapa contemplando las diversas zonas pueden generarse para cada una de ellas espectros de peligro uniforme y espectros óptimos (PRODISIS, 2008). También puede cuantificarse en términos de los periodos de retorno (o sus inversos, las tasas de excedencia) de intensidades sísmicas relevantes en el comportamiento de las estructuras. Las intensidades se pueden medir en términos de los desplazamientos y/o de las ordenadas espectrales de desplazamientos, mismas que se empiezan a utilizar en los criterios de diseño basados en desplazamiento. La tasa de excedencia de una intensidad sísmica se define como el número de veces, por unidad de tiempo, en que el valor de esa intensidad sísmica es excedido (Ordaz, 2011).

En forma simplificada puede describirse el peligro sísmico mediante la función “ $V_Y(y)$ ”, la cual expresa las tasas de ocurrencia de movimientos sísmicos con intensidades “ Y ” mayores que cada valor de interés, “ y ”. La intensidad de un evento está relacionada con la amplitud del movimiento del terreno; el cual puede medirse en términos de diversas variables, tales como: los máximos valores absolutos de la aceleración, la velocidad del terreno y, las ordenadas del espectro de respuesta para un sistema de interés, aunque conviene medir las intensidades en términos de la ordenada del espectro de pseudoaceleraciones (Esteva, 2007).

Si en la ciudad en estudio predomina un conjunto de construcciones con periodo corto (como es el caso de Tuxtla Gutiérrez), se recomienda que se considere la máxima aceleración como parámetro de diseño. Aunque debemos considerar que de no haber suficientes datos estadísticos se debe recurrir a modelos probabilísticos que demandan la aceleración máxima esperada y su área de ruptura para cada fuente sismogénica, así como las relaciones de atenuación que consideran las irregularidades topográficas, el tipo de suelo, los perfiles de velocidad de onda y los espesores de los materiales en el subsuelo.

Esteva (2007) presenta la ecuación 3, empleada para determinar el peligro sísmico de manera probabilística:

$$V_Y(y) = \iint \left| \frac{d\lambda_M(m, x)}{dm} \right| P\{Y \geq y | m, x\} dm dV \quad (3)$$

siendo " $\lambda_M(m,x)$ " la tasa de ocurrencia por unidad de tiempo y unidad de volumen. Considerando los temblores con magnitud igual a " m ", con coordenadas " x ", para el volumen de ruptura " dV ", $P\{Y \geq y|m,x\}$ es la probabilidad de que un temblor " m ", con coordenadas " x " tenga una intensidad " $Y \geq y$ ".

Durante el desarrollo histórico de los estudios de peligro sísmico, en términos generales podemos considerar dos etapas: la primera, que consiste en descripciones y reportes de los efectos y los daños causados por importantes sismos históricos (intensidad del fenómeno). La segunda etapa corresponde a la fase instrumental, cuando se inicia la instalación de sismógrafos y posteriormente acelerógrafos, la cual es una historia reciente sólo las grandes ciudades, ya que han sido estudiadas desde principios del siglo pasado.

En el pasado, al no existir instrumentación para caracterizar el tamaño de un sismo se usaba la intensidad. Estos datos son importantes para determinar la amenaza histórica en sitios donde los eventos tienen un largo periodo de recurrencia, permitiendo considerar el sismo de diseño para algunas localidades. Estos datos aún se siguen empleando, por el bajo índice de instrumentación mundial.

De manera general, se puede decir, que metodológicamente el estudio del sitio o región se caracteriza por el empleo de los siguientes parámetros:

- a) Para caracterizar las fuentes sísmicas y sus tasas de generación:
 - Identificación de las placas tectónicas que participan en la actividad macro sísmica de la región.
 - Estudios de las fallas activas presentes que puedan generar sismos intraplaca sismicidad cortical.
 - Sismos históricos captados con instrumentos locales colocados en red o por triangulación de instrumentos en regiones cercanas.
 - Datos históricos de daño reportados en los archivos municipales y diarios de la región (intensidad regional con sus mapas de isosistas).
 - Relocalizaciones de los sismos.
 - Paleosismología.
- b) Para determinar modelos de estimación del movimiento fuerte del terreno (leyes de atenuación):
 - Distancia y profundidad a la ruptura.
 - Leyes de atenuación desarrolladas.
 - Análisis estadístico de la sismicidad histórica.
 - Implementación de redes instrumentales desde la costa.
 - Proceso de sismos captados en diversas estaciones.
- c) Para determinar efectos de sitio:
 - Efectos de sitio que condicionan la respuesta puntual en una región (considerando el comportamiento de las ondas en suelos blandos y duros) y el efecto de la topografía local (montañas, cañones, taludes, etc.).

- Estudios con registros de vibración ambiental y otras técnicas como SPAC.
- Estudios del potencial de licuación de suelos.
- Modelos del terreno a partir de información topográfica, geotécnica, geológica y geofísica.

d) Para determinar peligros encadenados:

- Determinación del potencial de movimientos de masas.
- Presencia de volcanes activos.
- Identificación de redes de gas, de transporte de combustible, etc.
- Características de presas, tanques de gran almacenamiento, etc.

De manera esquemática simplificada podemos caracterizar la fuente del sismo mediante el croquis que se muestra en la Figura 36, aunque cada uno de los elementos que conforma la caracterización es bastante complejo.

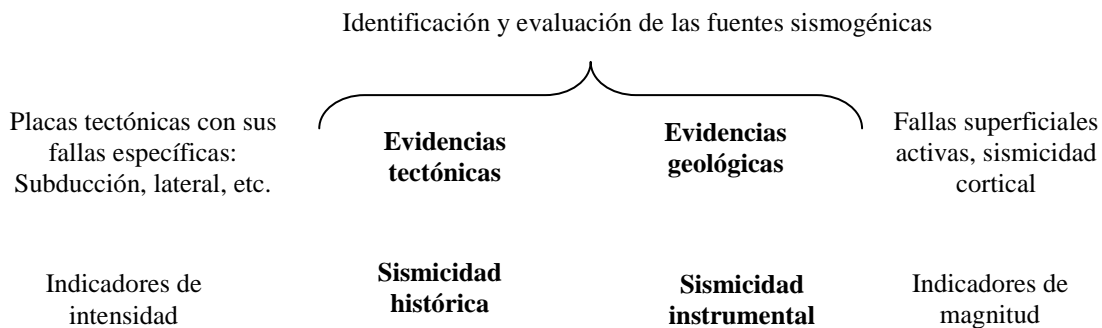


Figura 36. Caracterización de la fuente sísmica de manera esquemática.

La mayoría de los daños causados por sismos se deben a los movimientos fuertes del terreno. Eventos de grandes magnitudes han sido sentidos en áreas del orden de 5 millones de kilómetros cuadrados. Por esta razón, las decisiones de ingeniería se toman normalmente sobre la base de evaluaciones de grandes movimientos, expresados en términos de la máxima aceleración que se espera del movimiento del suelo en cada sitio (Ordaz, 2011).

El nivel de sacudida en una región del planeta puede ser caracterizado por parámetros de diseño del movimiento del terreno, lo cual es complejo y corresponde a una fase importante en las metodologías para determinar el peligro sísmico. El análisis de peligro sísmico incluye la estimación cuantitativa del movimiento del terreno sobre un sitio particular. El peligro sísmico puede ser estudiado de manera determinista cuando es asumido un escenario sísmico particular o de manera probabilística, cuando las incertidumbres son explícitamente consideradas en el análisis. Por ejemplo, son comunes parámetros como: el tamaño del sismo, su localización y el tiempo de ocurrencia.

Las metodologías de peligro sísmico consideran que los sismos que ocurrirán en el futuro serán de las mismas características que los sucedidos en el pasado. Como la hipótesis no

refleja necesariamente la realidad física, también se han considerado modelos no estacionarios que contemplan la diferente probabilidad de ocurrencia de los sismos antes y después de un evento de magnitud notable (Campos-Costa y Duarte, 1992).

Una metodología para la evaluación determinista (escenario) del peligro del sísmico del suelo se denomina por sus siglas en inglés DSHA (Deterministic Seismic Hazard Analysis), la cual es presentada por Kramer (1996); Gama (2010) y consideran los pasos siguientes:

- a. Identificación y caracterización de todas las fuentes sísmicas capaces de producir movimiento significativo en el sitio (determinar geometría y potencial sísmico).
- b. Selección de la distancia de la fuente al sitio para cada fuente (distancia epicentral o hipocentral).
- c. Selección del sismo predominante considerando la magnitud y atenuación del sitio de generación al sitio de estudio.
- d. El peligro es formalmente definido, usualmente en términos del movimiento del terreno producido en el sitio por el sismo determinante. Estas características son usualmente descritas por uno o más parámetros obtenidos en las relaciones de predicción (Aceleración pico, velocidad pico y ordenadas del espectro de respuesta).

Los cuatro pasos anteriores se observan esquemáticamente en la Figura 37.

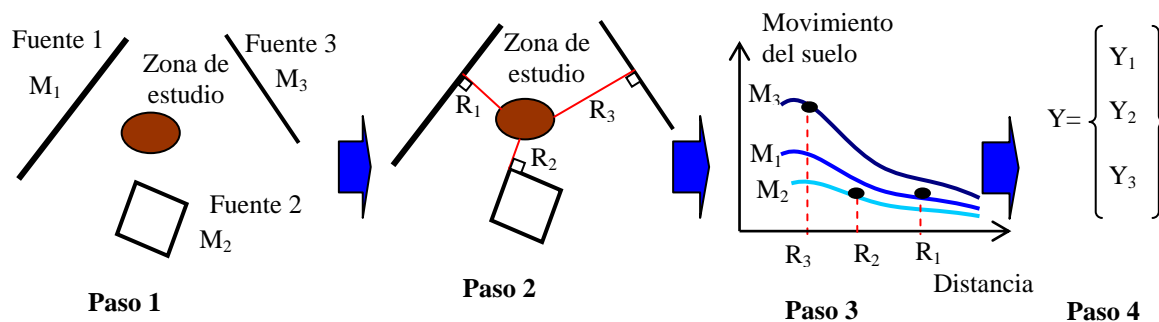


Figura 37. Pasos para la determinación determinista del riesgo sísmico (Kramer, 1996).

Gama (2010) señala que las hipótesis de partida del método determinista son muy discutibles, ya que es difícil estimar el máximo sismo potencial y además este puede no volver a repetirse con las mismas características. De hecho la práctica señala la ocurrencia en muchas fuentes sísmicas de sismos mayores que los comprendidos en el catálogo sísmico utilizado, ya que estos catálogos son a menudo incompletos.

En gran medida la dificultad en la determinación del diseño del movimiento del terreno resulta de la confianza que se tenga a decisiones subjetivas, aquellas que son hechas con información incompleta o incierta, lo cual es recurrente en los estudios para regiones donde no hay instrumentación suficiente como puede considerarse la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Adicionalmente, Kramer (1996); McGuire (2004); Gama (2010) describen la metodología para la evaluación probabilista del peligro del movimiento del suelo que se denomina por sus siglas en inglés PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Analysis), la cual consta de los pasos siguientes:

- Identificación y caracterización de la fuente sísmica idéntico al método APSD, excepto que la distribución de probabilidad de las localizaciones del potencial de ruptura dentro de la fuente debe también ser caracterizados.
- La sismicidad o distribución temporal de la recurrencia del sismo debe ser caracterizada. Una relación de recurrencia que especifique el índice promedio con que un sismo de algún tamaño podría ser excedido, si es usado para caracterizar la sismicidad de cada zona de la fuente.
- El movimiento del terreno producido en el sitio por los sismos de cualquier tamaño posible ocurriendo sobre cualquier posible punto en cada zona de la fuente sísmica, debe ser determinado con el uso de relaciones de recurrencia. Las incertidumbres inherentes a la relación predictiva debe ser además considerado en el método APSP.
- Finalmente, de las incertidumbres en la predicción los parámetros, de localización y tamaño del sismo y el movimiento del terreno, son combinados para obtener la probabilidad de que sean excedidos los parámetros del movimiento del terreno durante un particular período de tiempo.

Los cuatro pasos anteriores se observan esquemáticamente en la Figura 38.

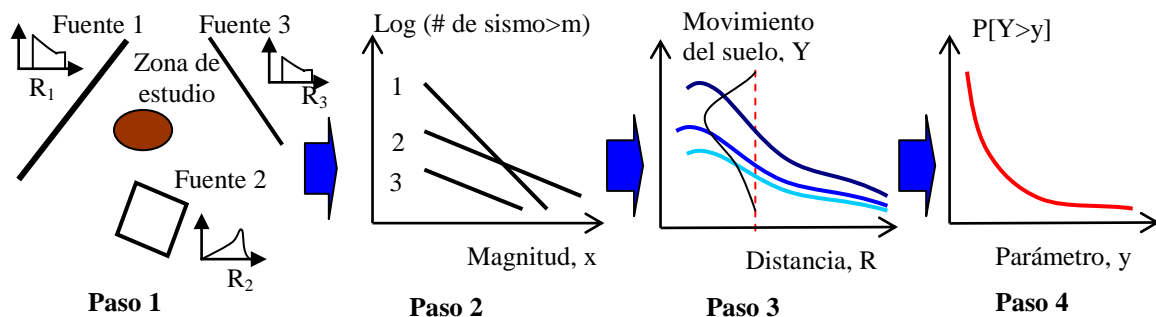


Figura 38. Pasos para la determinación probabilista del riesgo sísmico (Kramer, 1996).

Los enfoques probabilistas para la evaluación del peligro sísmico son más ad hoc con las tendencias actuales en la ingeniería sísmica para el desarrollo de reglamentos de construcción, normas técnicas y evaluación de técnicas de reducción de vulnerabilidad de las construcciones. Estas premisas son también retomadas por el software PSM, CRISIS y PRODISIS. No obstante cualquiera que sea el enfoque empleado debe considerar la capacidad destructiva de los sismos en la región en estudio. La capacidad destructiva de un sismo se determina principalmente:

- Por la magnitud y la naturaleza del proceso de ruptura; (desplazamiento entre bloques, velocidad en que se propaga la ruptura);

- La distancia del epicentro a las áreas urbanas (distancia focal va desde el foco del sismo hasta el punto de observación de las ondas);
- La profundidad del foco; (profundidad focal, distancia vertical entre el lugar del foco y el epicentro). Entre más superficiales son los sismos, son generalmente más destructivos y podrían presentar más réplicas.
- La respuesta local del suelo (determinada por el tipo y consistencia del terreno por donde se desplazan las ondas sísmicas; a suelos más sólidos, corresponde menores efectos de sitio y por ende menores amplificaciones y viceversa);

Cada país, considerando las fuentes sismogénicas que lo afectan, su instrumentación y cantidad y calidad de la información histórica procesada, hace modificaciones a las metodologías, ya sean deterministas o probabilistas.

4.1.2. Estudios de peligro sísmico en México

Existen estudios particulares de peligro sísmico para distintas regiones del país. En general los estudios han sido desarrollados por grupos de investigación: El Instituto de Ingeniería y de Geofísica de la UNAM, la Red Interuniversitaria de Ingeniería Sísmica (RIIS) liderada por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) y conformada por UPAEP (Puebla), UMSNH (Morelia), ITESO (Guadalajara), UAEM (Estado de México), ULSA (México, D.F.), UNACH (Chiapas), UCOL (Colima), UV (Veracruz), UAG (Guerrero) y UNICACH (Chiapas), el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) a través del Manual de Obras Civiles de diseño por sismo (MOC, 1993; 2008) y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

El Instituto de Ingeniería y/o Geofísica de la UNAM han trabajado en estudios de Peligro de ciudades como Tlaxcala, Puebla, Veracruz, Acapulco, Michoacán, Colima, Tapachula, Tuxtla Gutiérrez, Ciudad de México, Oaxaca, entre otras. La Red Interuniversitaria de Ingeniería Sísmica, ha trabajado en estudios de ciudades como Chilpancingo, Guadalajara, Veracruz, Puebla, Morelia, Toluca, Tapachula, Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo, Oaxaca, Ciudad de México, Colima, entre otras. El CICESE ha trabajado en estudios de peligro sísmico para Tijuana y su área conurbada y en otras ciudades de Baja California, Tuxtla Gutiérrez, Tapachula, Oaxaca, principalmente.

Estos trabajos académicos han sido la base de algunos de los reglamentos locales para las ciudades específicas, aunque desafortunadamente no en todos los casos se ha logrado (como en Tuxtla Gutiérrez y Tapachula, Chiapas). Sin embargo, no todos los estudios se concluyeron o contaron con el número de mediciones, trabajo de campo, modelos geotécnicos o geológicos o información suficiente para ser determinantes. Aunque si representan un avance en la evaluación del peligro y se tiene la posibilidad de ser complementados.

En el año de 1993 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de su Instituto de Investigación Eléctricas y con el apoyo de otros investigadores como los del Instituto de Ingeniería de la UNAM, elaboró un mapa de regionalización nacional del peligro sísmico, el cual dividía al país en cuatro grandes zonas denominadas: A, B, C y D, las

cuales van de menor a mayor nivel de peligro (Figura 39). Esta división surgió básicamente de los estudios y registros sísmicos que se tenían para cada zona y no contempló fenómenos como la amplificación de las ondas sísmicas en los suelos blandos (efecto de sitio). De acuerdo con la macrozonificación o regionalización de CFE, aproximadamente el 33% de los habitantes de nuestro país se ubican en zonas C y D (alto y muy alto peligro sísmico).



Figura 39. Mapa de regionalización sísmica de México (CFE, 1993).

Uno de los mayores problemas que presentaba el mapa CFE (1993) es que manejaba áreas muy extensas con peligro sísmico homogéneo, lo cual no es necesariamente cierto, al menos para el mismo periodo de retorno. Adicionalmente, en su metodología se consideraban básicamente sismos de subducción, lo que repercutía en generar un mapa con zonas representadas con franjas prácticamente paralelas a la costa (no observándose la participación de placas como la del Caribe).

No obstante la utilidad de la regionalización establecida por CFE en 1993, se hizo necesario actualizarla por lo señalado anteriormente. CFE en el año 2008, debido a que se contaba con mayor información del potencial sísmico de las distintas fuentes, además de que desde el año de 1993 ocurrieron diversos sismos que causaron daños en nuestro país, se densificaron y mejoraron tecnológicamente las redes, se actualizó la metodología para el cálculo del peligro, entre otras variables (Figura 40). No obstante la mejora en la metodología de CFE aún se tiene problemas para evaluar el peligro sísmico que se agudiza en las regiones donde se dispone de menos información, ya sea por el bajo número de sismos que se generan o por la densidad de equipos instalados. Sin embargo algunas de estas limitantes se pueden resolver desarrollando estudios para determinar los efectos de sitio y estructura de velocidades de la región a través del software PRODISIS que es parte de la metodología propuesta por CFE (2008).

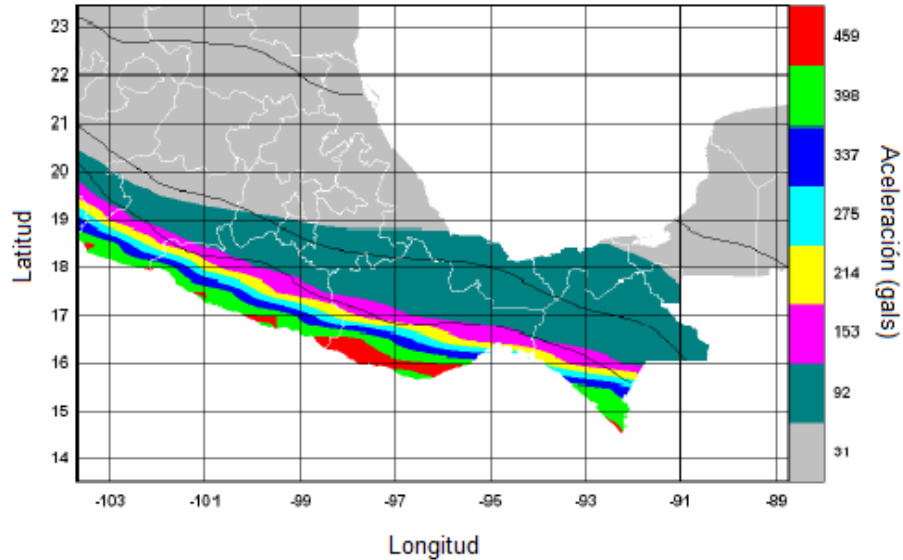


Figura 40. Mapa de regionalización sísmica de México, considerando un periodo de retorno de 50 años³ (CFE, 2008).

4.1.3. Estudios de peligro sísmico en Chiapas

La costa de Chiapas presenta una situación contradictoria, ya que aunque es una zona de alta sismicidad, se han realizado pocos estudios al respecto. Quizás esto sea debido a que los sismos propios de la región no tienen influencia importante en el centro del país. Desde mediados del siglo XX, no han ocurrido en Chiapas grandes terremotos debidos a la subducción de la placa del Pacífico, a diferencia de las costas de Jalisco, Colima, Michoacán y Guerrero, aunque son frecuentemente sentidos los sismos de magnitudes pequeñas y moderadas. Además que el 21 de octubre de 1995 se presentó un sismo de profundidad intermedia con mecanismo intraplaca de magnitud de momento 7.2, con epicentro en Cintalapa, Chiapas y sentido de manera intensa en Tuxtla Gutiérrez.

Existe aún gran desconocimiento de la historia sísmica del sitio de subducción, aunque cabe claramente la posibilidad de que la zona de subducción de la costa ha estado intermitentemente inmóvil durante más de 200 años, preparándose para un evento de grandes dimensiones (SSN, 2002). En contraste con esto, podría argumentarse que por algún motivo desconocido, el deslizamiento relativo entre las placas de Cocos y Norteamérica se lleva a cabo en forma continua, mediante un comportamiento plástico de la falla. Si esto fuese cierto, no habría energía elástica acumulada y no sería necesaria la existencia de enormes deslizamientos para liberarla, como sucede en las demás zonas de subducción. Sin embargo, cabe señalar, que este mismo argumento se utilizó con respecto

³ Entiéndase periodo de retorno (T_R) como el tiempo en que el espectro de diseño colocado en el reglamento puede ser excedido, cuando hablamos de 50 años, este tiene una probabilidad de ser excedido del 2%, mientras que cuando hablamos de 475 años, este periodo tiene una probabilidad de ser excedido del 0.2%.

a la brecha de Michoacán, antes de los sismos de septiembre de 1985, por lo que en estudios recientes se considera a esta hipótesis poco probable⁴ (SSN, 2002).

En el año de 2005 el Servicio Geológico Mexicano (SGM) desarrolló un estudio de peligros geológicos para el estado de Chiapas (SGM, 2005a). Para evaluar el peligro sísmico. Se empleó la base de datos del Servicio Sismológico Nacional contemplando el periodo de 1990 a 2003, sistemas de información geográfica y ecuaciones de Intensidades de Mercalli Modificadas (IMM) (ajustadas con un índice de marginación de la población). Con el estudio se encontró que el peligro sísmico está presente en todo el estado con un nivel de intensidad baja, sin embargo es medio y alto en los límites de las regiones de la Depresión Central y la Sierra Madre del Sur, por la presencia de fallas geológicas activas de los sistemas: La Concordia, La Trinitaria, Mapastepec, Polochic y Tacaná (Figura 41).

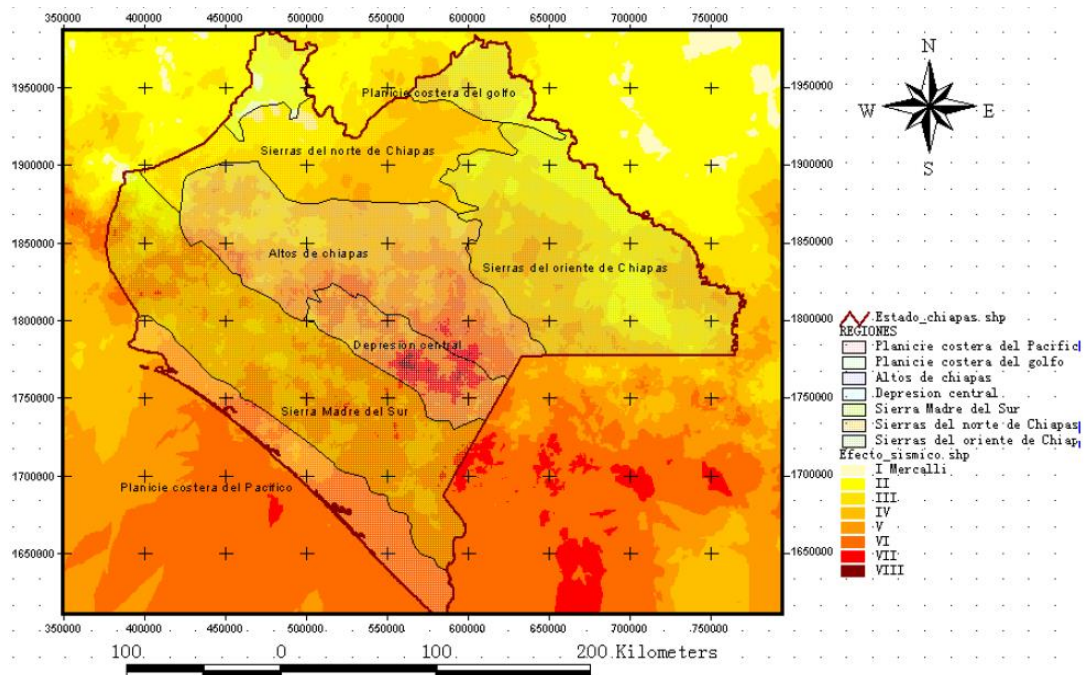


Figura 41. Mapa de efecto sísmico y regiones del estado de Chiapas, considerando la variable IMM (SGM, 2005a).

Los municipios más vulnerables por peligro sísmico con Intensidades de Mercalli Modificado (IMM) mayores a VI son: Comitán de Domínguez, La Concordia, Socoltenango, Tzimol, La Trinitaria, Chicomuselo, Frontera Comalapa, Ángel Albino Corzo, Bellavista, Siltepec, Amatenango de la Frontera, La Grandeza, Bejucal de Ocampo, Acacoyagua, Escuintla, Motozintla, El Porvenir, Mazapa de Madero y Tapachula, debido a su alto índice de marginación. En la Planicie Costera del Pacífico el peligro por sismo es alto para los municipios de Arriaga, Tonalá, Pijijiapan, Mapastepec, Acapetahua, Huehuetán, Mazatán, Frontera Hidalgo y Suchiate, en donde se presentan grandes sismos frecuentes (SGM, 2005a).

⁴ Sitio web del Servicio Sismológico Nacional, historia sísmica de México www.ssn.unam.mx

Aunque la marginación es una variable asociada directamente con la vulnerabilidad, este estudio la asociaba considerando que el sismo en una población marginada alcanzaría una mayor intensidad por los daños ocasionados, lo cual podría confundirse con riesgo sísmico. Debido a que Tuxtla Gutiérrez es el municipio con el menor índice de marginación en el estado de Chiapas, no alcanzó un alto IMM, como si lo alcanzaron otros municipios de la región central del estado. No obstante, otros estudios como el de Figueroa (1986) y el del Atlas Nacional de Riesgos considera a la capital del estado de Chiapas con una IMM de X, superior a cualquier otro municipio del estado.

En la Figura 42 se muestra otro estudio similar al generado por el SGM (2005), desarrollado para todos los países del mundo por parte de la Universidad de Columbia (Estados Unidos de América) empleando datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés). Considerando solamente la República Mexicana, se obtienen IMM desde V hasta IX+ en gran parte del territorio nacional. El estado de Chiapas alcanza valores desde V y hasta VIII para todo su territorio, mientras que para el municipio de Tuxtla Gutiérrez se alcanzan valores de IMM de VII.

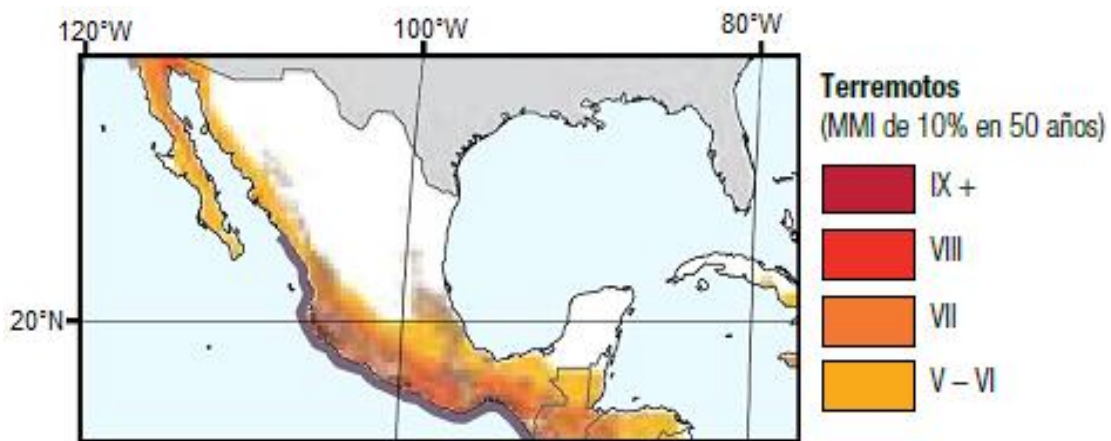


Figura 42. Mapa de intensidades de terremotos en escala de Mercalli Modificada (MMI) procesado por la Universidad de Columbia (2009).

4.1.4. Características geotectónicas del estado de Chiapas

Guzmán y Meneses (2000) dividen al estado de Chiapas en cuatro provincias tectónicas: la provincia de las Fallas Inversas, la provincia de las Fallas Laterales, el Batolito de Chiapas y las Fallas de Motagua-Polochic (Figura 43).

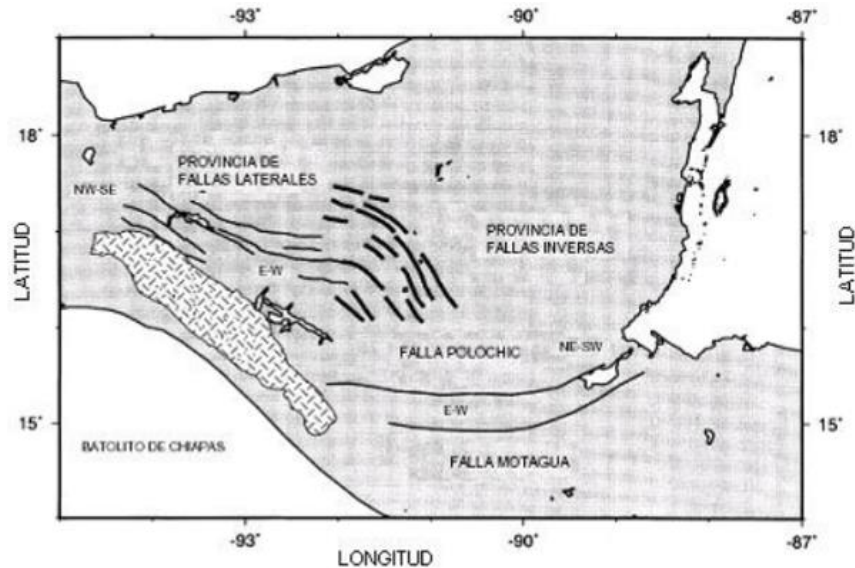


Figura 43. Elementos y provincias tectónicas del sureste de México (Guzmán y Meneses, 2000).

La provincia tectónica de las Fallas Laterales abarca la mayor parte del territorio de la Sierra de Chiapas. Esta provincia está compuesta por un conjunto de bloques que se hunden y se levantan, y por fallas laterales con movimiento izquierdo. En la parte este de la provincia las fallas tienen una orientación este-oeste, mientras que en las áreas centrales y occidentales las fallas se orientan en dirección de N 50° W. Existen nueve fallas en esta provincia siendo las de mayor longitud (120 – 170 km) las Fallas Tecpatán-Ocosingo, Malpaso y Telestaquín-San Cristóbal. La sismicidad en esta provincia tectónica se caracteriza por sismos moderados y someros (Guzmán y Meneses, 2000).

La provincia tectónica de fallas inversas ocupa la porción oriental de la Sierra de Chiapas y la parte centro-norte de Guatemala. Esta provincia tiene una morfología superficial en forma de una “Z” ancha, formada por anticlinales estrechos cortados a lo largo de sus flancos por fallas inversas. La sismicidad asociada a esta provincia tectónica es menor que en la provincia de las fallas laterales (Guzmán y Meneses, 2000).

El Batolito de Chiapas se extiende desde el Istmo de Tehuantepec hasta la frontera con Guatemala, tiene una longitud aproximada de 300 km con una orientación NW-SE y un ancho de aproximadamente 75 km, está compuesto por rocas intrusivas de composición graníticas a granodioríticas (Rodríguez, 2007). El Batolito de Chiapas se ubica en la porción occidental del estado de Chiapas muy cercano al contacto entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana.

Narcía (2002) realizó un estudio de los espesores de la corteza del estado de Chiapas, el cual define la geometría del contacto entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana, concluyó que la corteza tiene un espesor máximo en Tuxtla Gutiérrez de 49.4 km (± 10.6 km). En la Figura 44 se muestra el modelo propuesto por Narcía (2002), que representa la discontinuidad de Moho entre la corteza y manto superior, vista desde arriba.

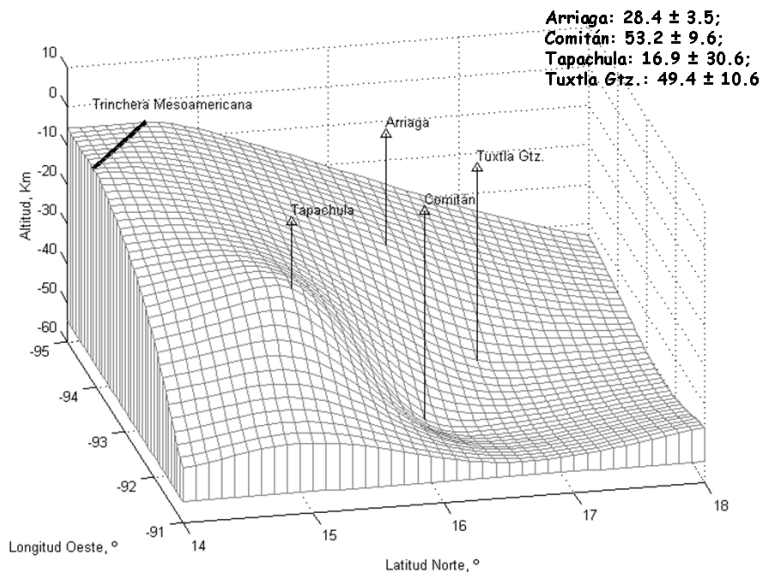


Figura 44. Modelo de la discontinuidad entre la corteza y el manto superior (Narcía, 2002).

El contacto entre la placa Norteamericana y la placa del Caribe se extiende desde el Caribe, pasa por Guatemala y se interna en el estado de Chiapas. Este límite ha sido definido por el Sistema de Fallas Motagua-Polochic en Guatemala y por varios sistemas de fallas y cabalgaduras que atraviesan el estado de Chiapas (Guzmán y Meneses, 2000).

Rodríguez (2007) presenta modelos de velocidad de ondas P para el estado de Chiapas y su frontera con Guatemala, como los que se muestran en la Figura 45, mientras que en la Figura 46, aparece un modelo tridimensional propuesto por el mismo autor para la frontera del estado de Chiapas con el estado de Oaxaca y con Guatemala, respectivamente.

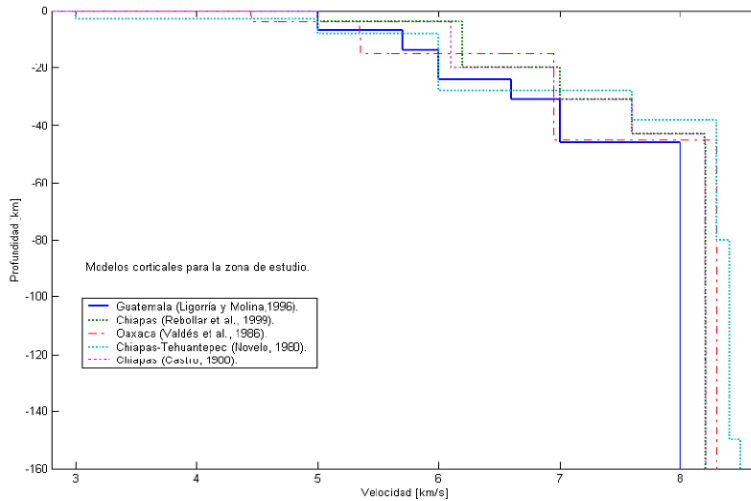


Figura 45. Modelos de velocidades promedio de ondas P de la corteza (1D) para Chiapas, Guatemala y Oaxaca (Rodríguez, 2007).

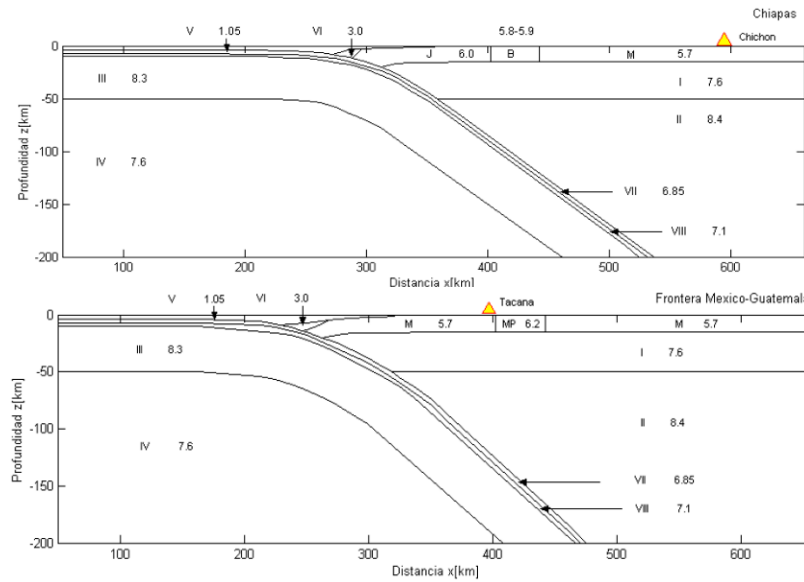


Figura 46. Estructura tridimensional de velocidades de ondas P para cada bloque de Chiapas en km/s (Rodríguez, 2007).

La mayor parte de la corteza continental del estado de Chiapas se encuentra dentro de la placa Norte Americana la cual está en contacto tectónico con la placa Caribe a lo largo de la zona de fallas Polochic – Motagua (Figura 47). Estas dos placas a su vez se encuentran en contacto por subducción con la corteza oceánica de la placa de Cocos, al poniente (Lay y Wallace, 1995).

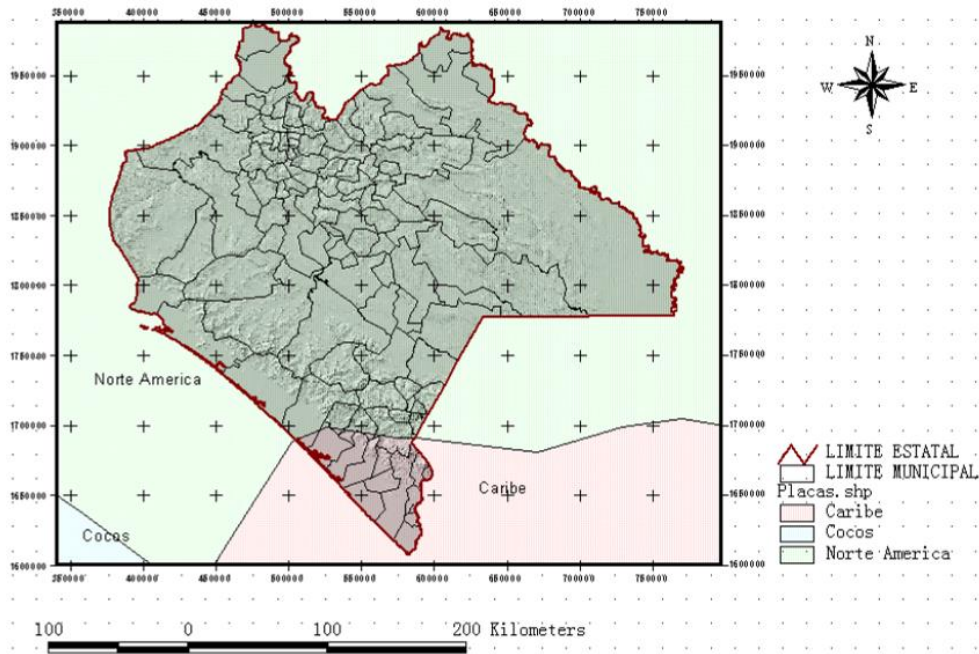


Figura 47. Mapa de las placas tectónicas que se presentan en el estado de Chiapas (SGM, 2005a).

En la zona de subducción conocida como fosa de Tehuantepec, se generan sismos por interacción entre placas o sismicidad “*interplaca*” y se almacena y disipa energía sísmica dentro de la corteza continental que genera sismos “*intraplaca*”.

No se tiene registro instrumental de grandes sismos cercanos al Istmo de Tehuantepec, por lo tanto no puede saberse, con bases puramente estadísticas, si se trata de una zona asísmica o es una brecha donde se acumula energía de deformación suficiente para producir un gran evento. Las implicaciones de esto son graves y la respuesta solo podrá provenir, de estudios tectónicos más profundos (Ordaz, 2011).

La ubicación de la placa del Caribe (sistema de fallas Polochic-Motagua) a lo largo del estado de Chiapas es una incógnita, ya que no se conoce con precisión su extensión a partir de su ingreso a nuestro país desde Guatemala a través de la sierra de Motozintla en Chiapas. Este conjunto de fallas representa un peligro importante para el sistema de presas hidroeléctricas del Grijalva. Guzmán (1980) desarrolló un estudio del peligro de esta falla para obtener sismos sintéticos que permitieran evaluar la seguridad de las presas hidroeléctricas, obtiene un valor de 643 gales para un período de retorno de 475 años.

4.1.4.1. Fuentes sismogénicas del estado de Chiapas

La alta sismicidad presentada en el estado de Chiapas se debe a la interacción de tres placas tectónicas: la placa oceánica de Cocos que se mueve en dirección contraria a las placas de Norteamérica y del Caribe, como puede apreciarse en la Figura 48.

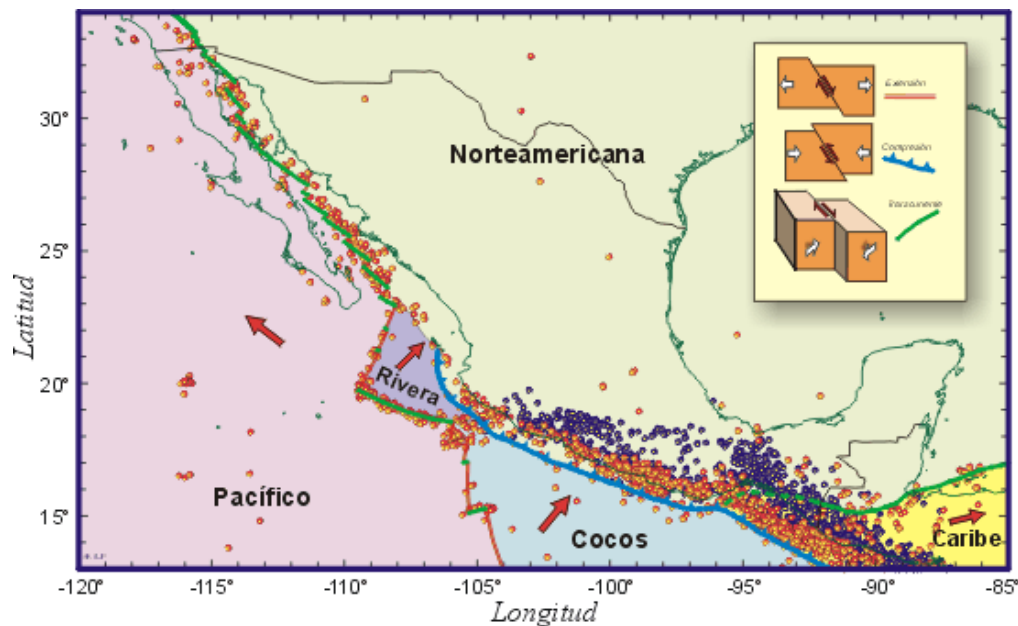


Figura 48. Distribución de placas tectónicas en México. Puntos rojos representan sismos superficiales (menores a 40 Km) y azules sismos intermedios y profundos (Kostoglodov y Pacheco, 1999).

Los sismos que han afectado al estado de Chiapas se han asociado a cinco fuentes sismogénicas. La primera y más importante, es la resultante del proceso de subducción de

la placa de Cocos por debajo de la placa Norteamericana, que ha da origen a sismos de gran magnitud ($M > 7.0$) ocurridos en toda la República Mexicana (Suárez y Singh, 1986; Pardo y Suárez, 1995). Los sismos producidos por esta fuente han alcanzado magnitudes de 7.7 e intensidades con isosistas en el estado de Chiapas desde VI a X, como en los sismos del 23 de septiembre de 1902 (Figueroa, 1973) y recientemente del 21 de enero de 2002, con magnitud de 6.7.⁵ Los sismos de subducción en la región de la costa de Chiapas pueden ocasionar tsunamis importantes (Farreras *et al.*, 2005). La evidencia histórica sugiere que en el algunas zonas de la República Mexicana las zonas de subducción han permitido sismos y tsunamis con magnitudes mayores que 8.2 (Jalisco, 1932) e incluso mayor que los 8.4 (San Sixto, Oaxaca, 1787) (Núñez *et al.*, 2008).

La segunda fuente sismogénica está constituida por la deformación interna de la placa subducida, lo cual produce sismos profundos (desde 80 hasta 300 km) del tipo intraplaca, como el sismo de Villaflores del 21 de octubre de 1995, con magnitud de 7.2, una profundidad de 165 km y un área de ruptura de $30 \times 10 \text{ km}^2$ (Rebollar *et al.*, 1999). La profundidad de subducción de la placa de Cocos es mayor, por lo que los sismos en las costas de Oaxaca, Guerrero y Michoacán no rebasan una profundidad de 80 km, mientras que en esta zona los sismos profundos en Chiapas alcanzan valores cercanos a los 250 km (Ponce *et al.*, 1992; Barrier *et al.*, 1998; Kostoglodov y Pacheco, 1999; Figura 49).

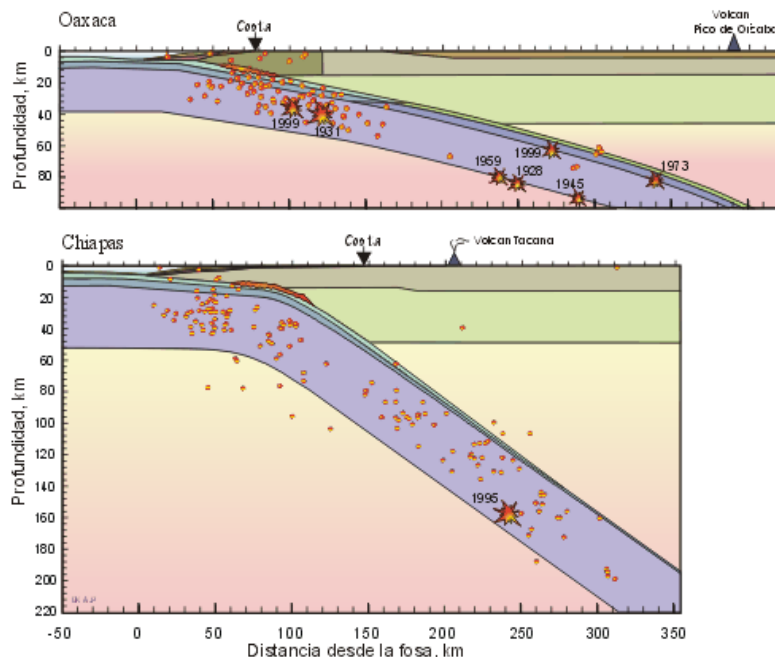


Figura 49. Estructura de la zona de subducción y localización de Sismos profundos en México (Kostoglodov y Pacheco, 1999).

Una tercera fuente corresponde a la deformación cortical debida a sistemas de fallas superficiales que originan temblores de pequeña profundidad (menores a 40 km) presentes en el estado. Figueroa (1973) enuncia al menos 15 fallas importantes. Esta

⁵ Revisar la página del Servicio Sismológico Nacional www.ssn.unam.mx para verificar el informe del sismo del 21 de enero de 2002.

fuente origina sismos de magnitud moderada que producen daños locales, ejemplo de esta fuente son los enjambres de sismos originados en Chiapa de Corzo entre julio y octubre de 1975 (Figura 50; Figueroa *et al.*, 1975). No obstante lo anterior, un grupo importante de la sismicidad cortical de la región ha sido atribuido a la construcción de las presas a finales de los años setenta y al llenado de las cortinas por presión de poro (Rodríguez *et al.*, 1985).

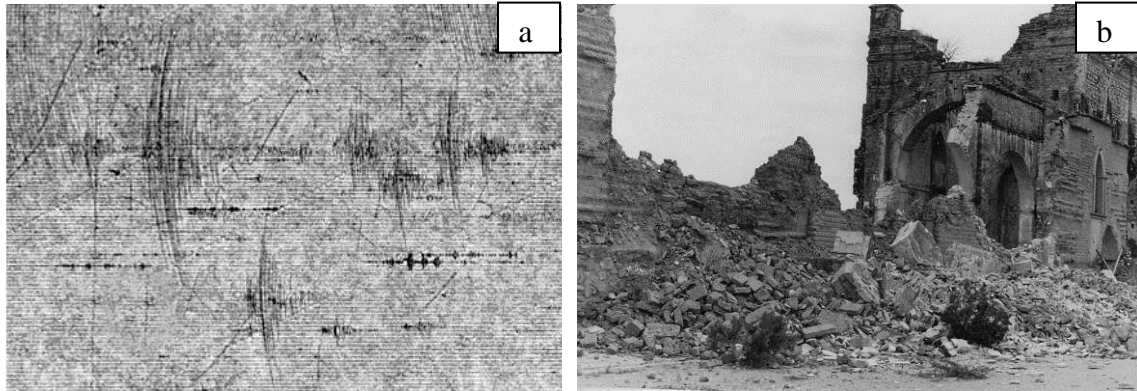


Figura 50. (a) Enjambre sísmico presentado en Chiapas durante la construcción de la presa Chicoasén (Figueroa *et al.*, 1975); (b) Daño en el centro histórico de Chiapa de Corzo (Alegría, 2011).

Una cuarta fuente sismogénica está constituida por la presencia de los volcanes activos en el estado de Chiapas: el Tacaná y el Chichonal o Chichón, este último mostró su potencial el 28 de marzo y el 3 y 4 de abril de 1982 donde tras su erupción se reportaron 1,770 personas muertas y 510 personas desaparecidas, 21,911 personas damnificadas, 41,411 ha dañadas y 205 millones de dólares en pérdidas (Figura 51). El volcán Tacaná tuvo actividad incipiente el 8 de mayo de 1986 alarmando a la población y generando fumarolas importantes y un enjambre sísmico en la ciudad de Tapachula (PCECH, 2003).

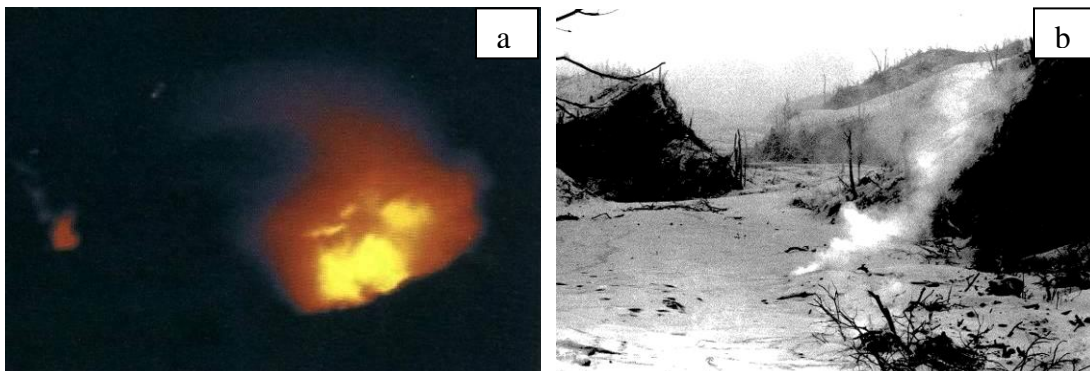


Figura 51. (a) Erupción del volcán Chichonal en Chiapas en marzo de 1982; (b) Consecuencias de la erupción del volcán (PCECH, 2003). Fotografías de Dr. Servando de la Cruz.

La última fuente sísmica asociada al fallamiento lateral izquierdo que corresponde al límite entre la placa Norteamericana y la del Caribe (Figura 52), que ha producido sismos muy importantes como el sismo del 18 de abril de 1902 que destruyó gran parte de los

monumentos históricos de la ciudad de Antigua Guatemala y que alcanzó intensidades de VIII en la zona del Soconusco en Chiapas (Benito *et al.*, 2001).

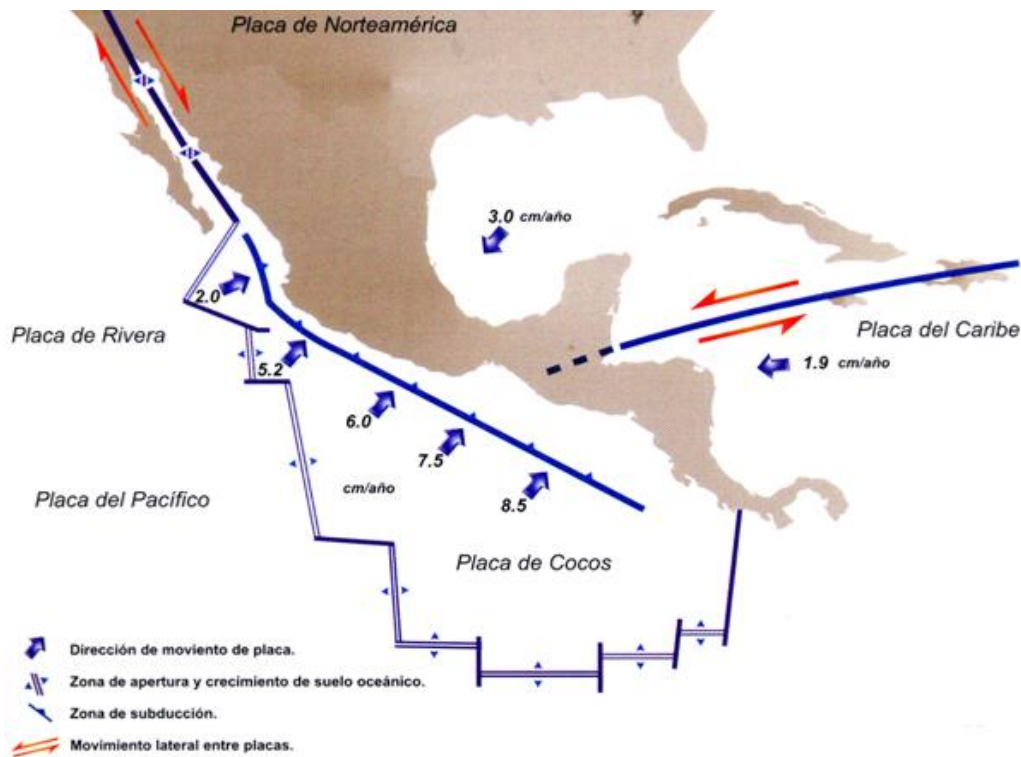


Figura 52. Marco tectónico de la República Mexicana (CENAPRED, 2001).

El peligro sísmico en la región no está bien definido a causa de la carencia de estudios sismológicos y parámetros físicos (aceleración, velocidad, desplazamientos). Otra causa que complejiza determinar el peligro sísmico es la falta de instrumentación distribuida de manera importante y homogénea en el estado, lo que dificulta establecer con precisión los periodos de retorno de cada una de las fuentes sismogénéticas, las características de propagación de las ondas en esta región, las áreas de ruptura, los contornos de esfuerzos en las placas, etc. Debido a lo anterior se puede señalar que hasta el momento hay aproximaciones del peligro sísmico en Chiapas.

En general, la información disponible sobre el peligro sísmico en el estado de Chiapas es escasa y con una incertidumbre importante, no obstante lo anterior, se han logrado detectar sismos históricos que han generado daños importantes como los que se muestran en la Figura 53.

Debido a la extensión y peligrosidad de la tercera fuente sísmica es necesario nombrar las fallas asociadas a la misma. Figueroa (1993 y el SGM (2005a) han realizado un estudio detallado de la misma y describen la relación de fallas geológicas mediante líneas de vuelos y referencia de la Secretaría de la Defensa Nacional (Figura 54) se relacionadas a continuación:

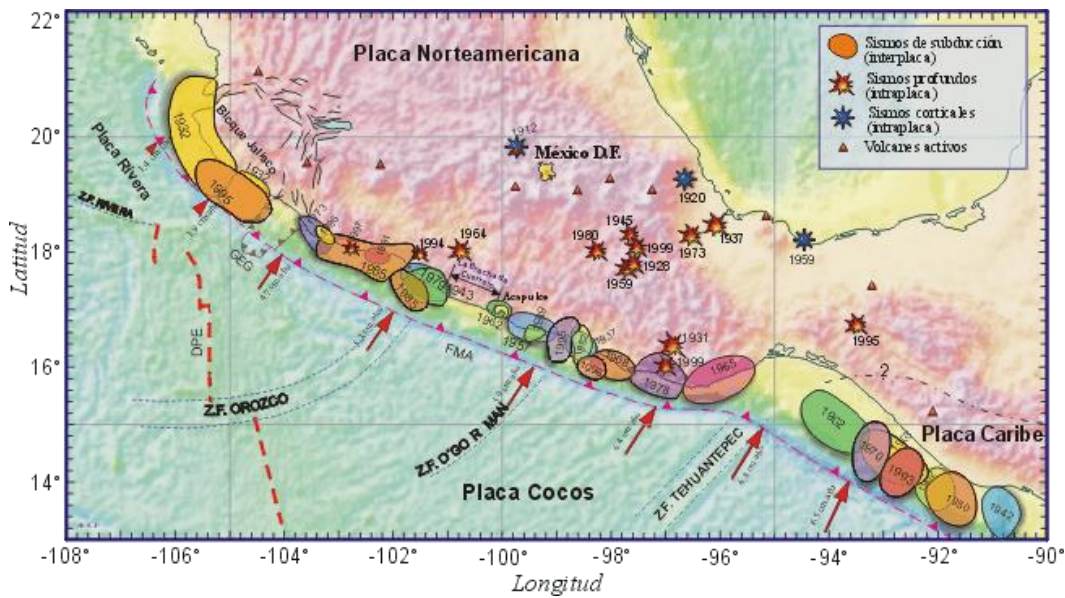


Figura 53. Principales sismos en el siglo XX en la República Mexicana (Kostoglodov y Pacheco, 1999).

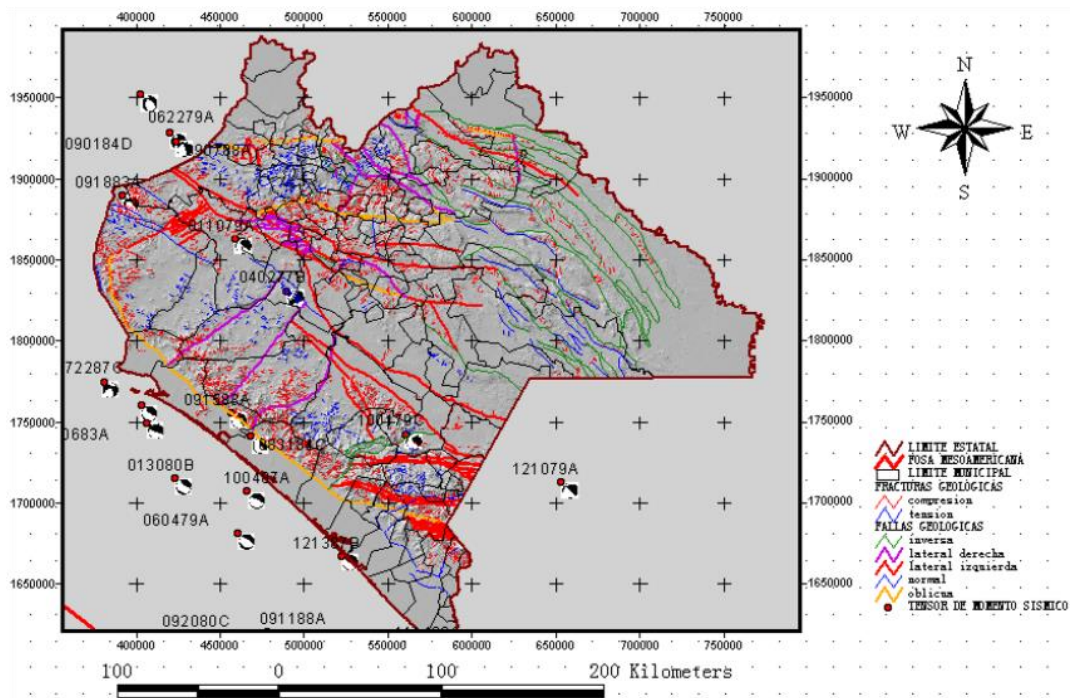


Figura 54. Mapa de tensor de momento sísmico y fallas geológicas del estado de Chiapas (SGM, 2005a).

- Mazapa de Madero – San Juan, EW.
- Comalapa – Nuevo México – La Concordia, ENW.
- Rodolfo Figueroa – Santa Elvira – El Carmen – San Juan (sobre el curso del río Grijalva), ENW.
- Tepancuapan W próxima a Comitán de Domínguez.

- e. San Quintín – Altamirano – Chanal.
- f. Altamirano – Colonia Victorico Grajales.
- g. Curso río Jatate, próximo a Tecojá.
- h. La Sombra – Trinitaria – Sur de Comitán – Soyatitán – San Bartolomé (hoy Venustiano Carranza, destruido por macrosismo el 27 de septiembre de 1902).
- i. Chiapa de Corzo – Tuxtla Gutiérrez – El Arenal.
- j. Transversales al curso del río Grijalva – Sumidero – Chiapa de Corzo.
- k. Ixtapa – Chicoasén – Copainalá – Tecpatán.
- l. Terán – Berriozábal – El Suspiro.
- m. Oeste de Tuxtla Gutiérrez, continuando al sureste más allá de Comitán de Domínguez.
- n. Copainalá – Malpaso, relacionada con la anterior.

La Falla de Motagua Polochic, con una longitud de 350 km, separando las placas de Norteamérica y del Caribe. Atraviesa el territorio chiapaneco por los municipios de Mazapa de Madero, Motozintla, Escuintla, Acacoyagua y Mapastepec.

La Falla de Mapastepec, que tiene una longitud aproximada de 60 km, corre de este a oeste atravesando los municipios de Frontera Comalapa, Bella Vista, Siltepec, Acacoyagua y Mapastepec.

La Falla de San Fernando, con una longitud de 50 km, aproximadamente, presenta una dirección general de NW-SE y se extiende por una región abrupta al norte de Tuxtla Gutiérrez, abarcando los municipios de Berriozábal, San Fernando y Tuxtla Gutiérrez.

La Falla de Malpaso-Muñiz, presenta una longitud de 165 km, aproximada. Se prolonga desde el Istmo de Tehuantepec y atraviesa la presa de Malpaso en el municipio de Tecpatán, pasa por los municipios de Copainalá, Usumacinta, Chiapa de Corzo y desaparece al sur de Ixtapa, en el municipio de Zinacantán.

La Falla Chicoasén Malpaso, se extiende alrededor de 150 km, intercepta la falla Malpaso-Muñiz en el cañón del río Grijalva en el municipio de Copainalá atraviesa los municipios de Ocosingo, Altamirano, Chanal, Huixtán, San Cristóbal las Casas, Chamula, Ixtapa, Soyoló y Chicoasén.

La Falla Chacté-Ocosingo, se extiende por una longitud de 120 km, aproximadamente, en una abrupta topografía, atravesando además los municipios de Chalchihuitán y el Bosque.

La Falla Bajacú, tiene una longitud aproximada de 58 km, pasa por los municipios de Altamirano, Huixtán, San Cristóbal las Casas y Zinacantán.

La Falla Tumbalá, se localiza en el municipio de Ocosingo y tiene una extensión aproximada de 60 km.

La Falla Yaxchilán, tiene una orientación de NE-SW, perpendicular a la falla de Tumbalá, se localiza en el municipio de Ocosingo y cuenta con una longitud de 30 km.

La Falla Sontic-Itzantun, se orienta de E-W y ha sido estudiada en el cañón del río Tacotalpa al norte de Huitiupán y Simojovel, se extiende a lo largo de 40 km.

La Falla Yajalón, se localiza al norte del municipio del mismo nombre y tiene una extensión aproximada de 20 km, influyendo además en el municipio de Chilón.

La Falla La Venta, se presenta hacia el sur de la presa Malpaso y su extensión da hacia el cauce del río La Venta cerca de Ocozocoautla.

4.1.4.2. Instrumentación sísmica en el estado de Chiapas

La instrumentación sísmica del estado de Chiapas se remonta al año 1955, donde se colocó la primera estación sismológica en la ciudad de Comitán de Domínguez, la cual estaba a cargo del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM), este equipo fue promovido por el Ing. Jesús Figueroa. La ubicación de este equipo permitió el inicio de la instrumentación, pero no fue suficiente para contar con registros locales de sismos intensos.

En 1967 se colocó un sismógrafo en la zona denominada Malpaso que funcionó de manera intermitente y que actualmente está en desuso. No fue sino hasta avanzada la década de los setentas cuando CFE, al construir las presas hidroeléctricas en el embalse del río Grijalva, colocó tres equipos en Malpaso y uno en la Angostura, los cuales estuvieron a cargo del IIUNAM, hasta que fueron retomados por CFE a mediados de los noventa. Tras la erupción del Chichonal en 1982 se instrumentaron los volcanes activos Tacaná y Chichonal, tal instrumentación ha ido mejorando y actualizándose no solo en la cantidad de equipos, sino en tecnología de los mismos y está a cargo del Instituto de Geofísica de la UNAM (IGUNAM), a través del Servicio Sismológico Nacional (SSN). La Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) desde el año 2004, mediante un convenio con CENAPRED y Protección Civil estatal y municipal tiene acceso a los resultados de los equipos ubicados en los dos volcanes activos del estado.

Con el ingreso de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) a la Red Interuniversitaria de Ingeniería Sísmica (RIIS) en el año 1986, tras un convenio con la UAM unidad Azcapotzalco, se dotó a la facultad de Ingeniería de un acelerógrafo (el cual registró el sismo de octubre de 1995 y derivó la primera Microzonificación para la ciudad, Figura 55).

A inicios de la década de los noventa, el Dr. Cecilio Rebollar del CICESE constituyó una red acelerográfica y sismológica en el estado de Chiapas a través de ocho equipos (Figura 56), desafortunadamente poco antes de su fallecimiento esta red dejó de operar.



Figura 55. Estación acelerográfica de la facultad de Ingeniería de la UNACH, la cual data de 1986 y que captó el sismo del 20 de octubre de 1995.

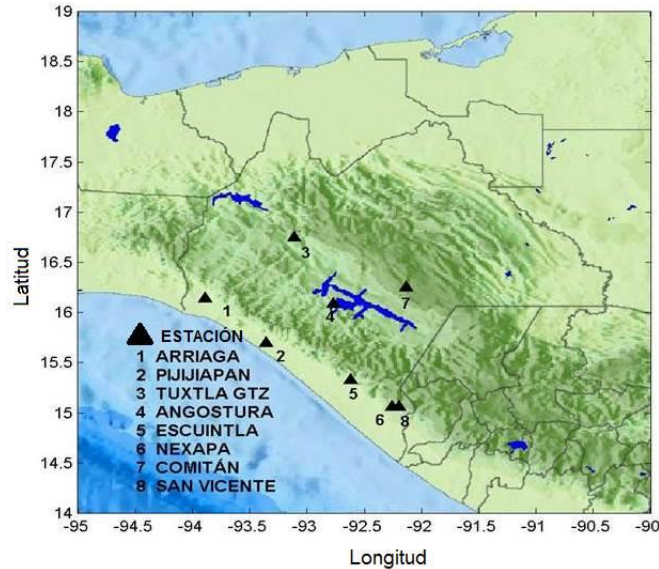


Figura 56. Red acelerográfica del Dr. Cecilio Rebolgar en el estado de Chiapas durante la década de los noventas (Narcía, 2009).

Actualmente en el estado el Instituto de Geofísica y de Ingeniería de la UNAM tienen en conjunto aproximadamente ocho equipos de banda ancha, además de los que están colocados en los volcanes. Adicionalmente la UNICACH y la UNACH tienen cuatro equipos que están en red con los de la RIIS. Lo anterior ha permitido que en los últimos años el estado de Chiapas tenga una instrumentación más adecuada para desarrollar investigaciones en torno al nivel de peligro del estado, no obstante cada una de las redes opera de manera individual. Aguirre *et al.* (2011) colocaron en la ciudad de Tapachula una red temporal de seis estaciones complementarias a las dos existentes, durante un periodo de seis semanas, esta red dio resultados interesantes.

4.1.5. Análisis estadísticos en los sismos en Chiapas

Aunque los inicios del Servicio Sismológico Nacional (SSN) se remontan a la primera década del siglo XX para México y de 1955 para Chiapas, la información registrada por instrumentos más modernos abarca un periodo de 38 años (desde 1974) y sólo en los últimos siete años se tiene un mayor número de equipos de banda ancha con precisión y buena distribución en la red sísmica nacional para la cobertura del estado.

Para el estado de Chiapas se han registrado alrededor de 5,000 sismos durante el periodo 1974 – 2010 por parte del Servicio Sismológico Nacional, de los cuales el 71% se localizan dentro de los límites de la placa Norteamérica, el 26% en la placa Caribe y el 3% en la placa de Cocos.

Cuando se toman solamente los datos del SSN en Chiapas (1974-2013) obtenemos un análisis estadístico con alta incertidumbre, ya que los datos deberían de relocalizarse, unificar las magnitudes e intentar completar el catálogo. En las Figuras 57 y 58 se muestran los epicentros de sismos ocurridos en Chiapas considerando la magnitud y la profundidad de los mismos, respectivamente, a partir de bases de datos del SSN contemplando el periodo de estudio comprendido entre los años 2006 a 2012.

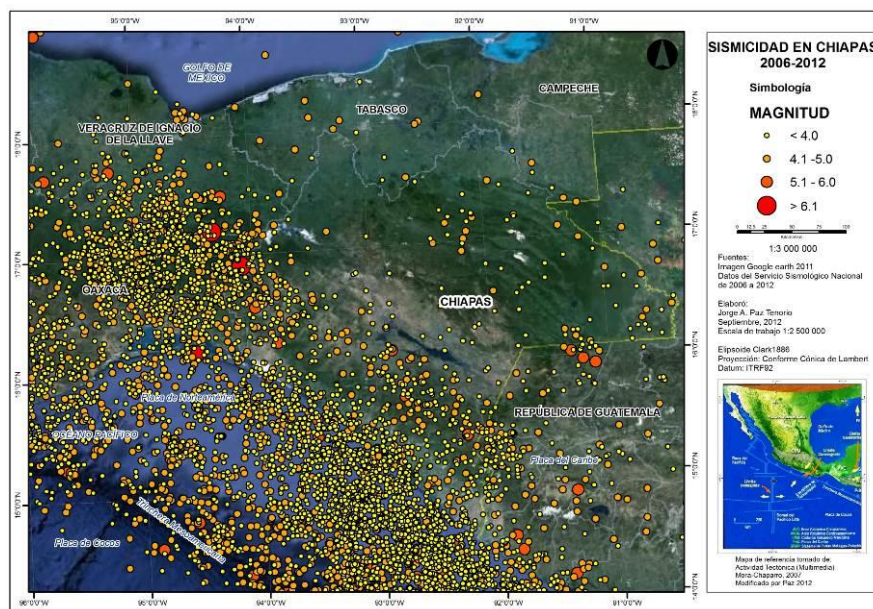


Figura 57. Epicentros sísmicos en Chiapas considerando su magnitud datos del SSN de 2006 a 2012.

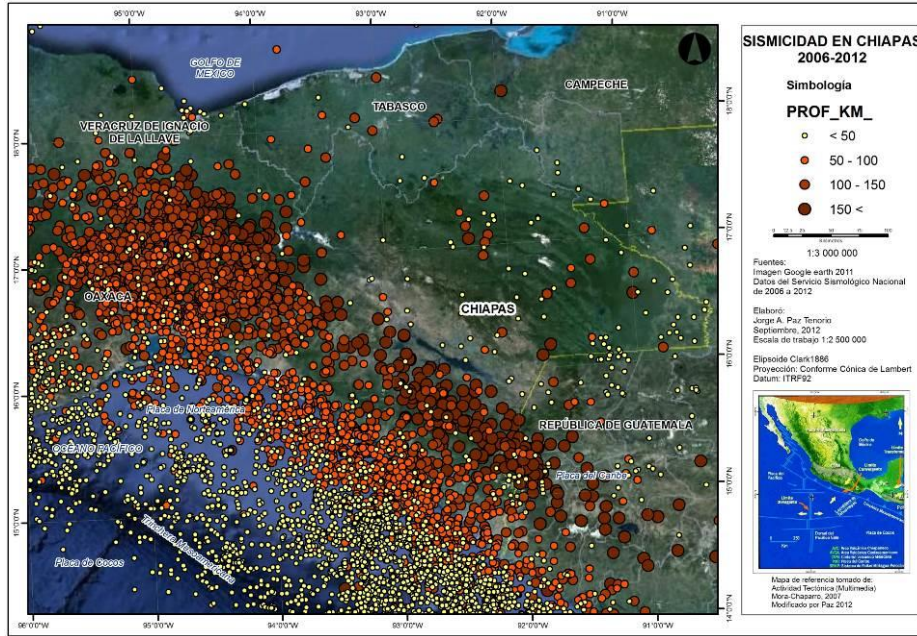


Figura 58. Epicentros sísmicos en Chiapas considerando la profundidad de los mismos a partir de datos del SSN de 2006 a 2012.

Los sismos ocurridos en el subsuelo de las regiones comprendidas entre Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de las Casas son de origen interplaca (Figura 59). Con base en la sección se ha determinado la zona de subducción y las características de la interacción entre la corteza oceánica y la continental, que muestra un ángulo bajo de 30 grados desde la fosa hasta la profundidad de 50 km en la zona de la costa e incrementa su ángulo de 45 a 50 grados a profundidades entre 50 y 250 km, bajo las regiones entre la zona de la costa del estado y la ciudad de San Cristóbal de las Casas, que se ubica a la mitad del estado.

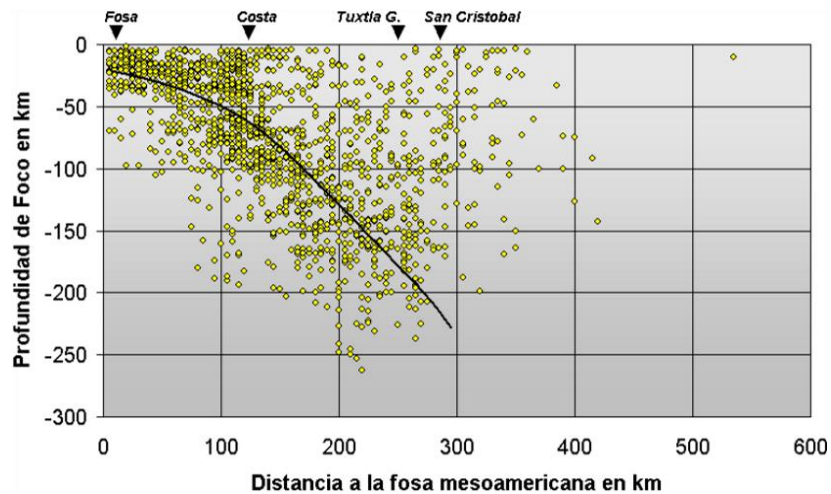


Figura 59. Sección sismotectónica con los focos ocurridos en Chiapas de oeste a este, vista hacia el norte. La línea negra es una línea de correlación que marca la tendencia de la subducción entre la placa de Norteamérica y la de Cocos (SGM, 2005a).

Utilizando la base de datos del SSN para el periodo de enero de 1974 a septiembre del 2010, en el área comprendida entre los 90°30' a 94°00' longitud oeste y los 14°00' a 18°00' latitud norte se ubicaron 4,943 eventos sísmicos. Empleando los valores de la magnitud y la profundidad, los registros sísmicos se agruparon utilizando el método del inverso de la distancia ponderada, un modelo determinista de interpolación que permite generar mapas bajo el supuesto de predicción a partir de zonas próximas a cada registro sísmico bajo un principio de proporcionalidad de la distancia al siguiente registro sísmico (ecuación 4; González *et al.*, 2011a):

$$IDW_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} M_i / d_{ij}^2}{\sum_{i=1}^{12} 1 / d_{ij}^2} \quad (4)$$

donde, IDW_j , es el valor de magnitud estimado para cada punto de agrupación sísmica a partir de los 12 registros sísmicos más cercanos al punto de predicción, considerando que la magnitud disminuye como una función inversa del cuadrado de la distancia (Figura 60, González *et al.*, 2011a).

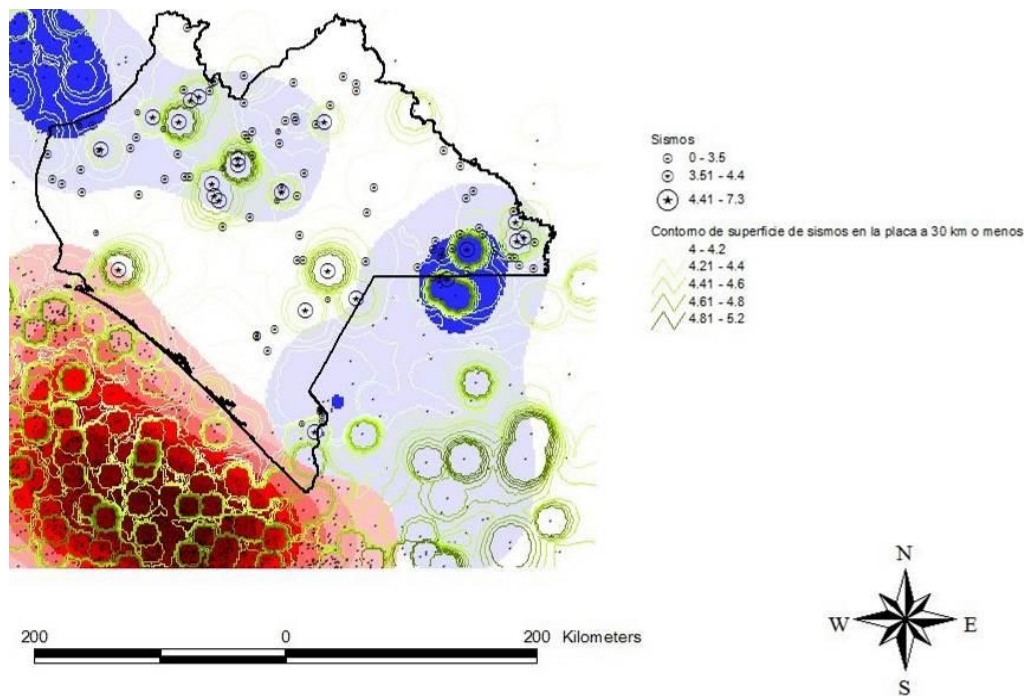


Figura 60. Puntos de agrupaciones sísmicas en el estado de Chiapas empleando la magnitud y la profundidad a partir de la ecuación 4 y con los datos del SSN de 1974 a 2010 (González *et al.*, 2011a).

En la Figura 61 se hace un acercamiento del mapa de conglomerados de sismos superficiales (menores a 30 km de profundidad) y se observa que en Tuxtla Gutiérrez se han presentado sismos de magnitud entre 3.8 y 4.7 ubicados dentro de la mancha urbana, los cuales, no obstante que su magnitud es moderada, por su poca profundidad (actividad cortical por fallas superficiales), tienen el potencial de generar daños.

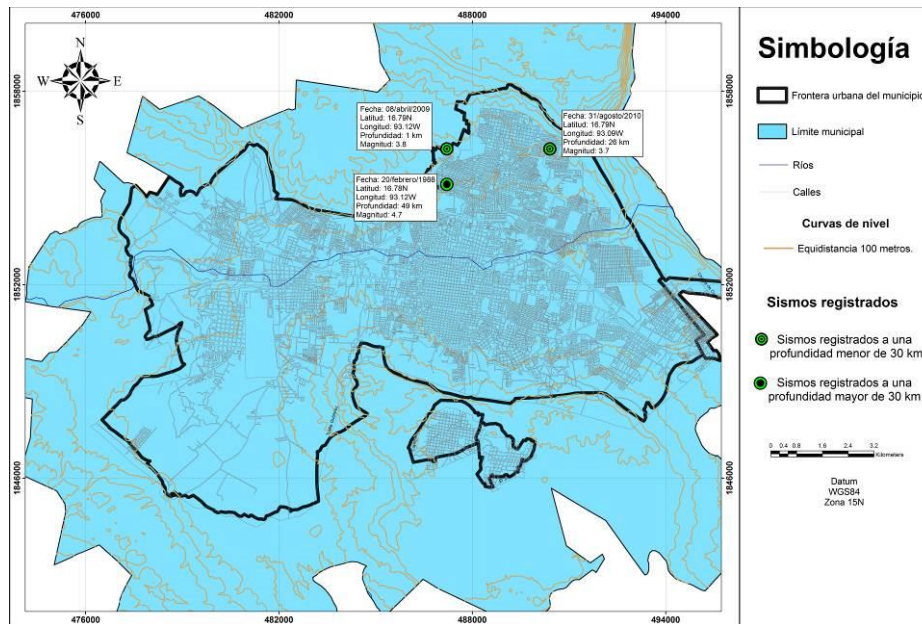


Figura 61. Epicentros de sismos localizados en el municipio de Tuxtla Gutiérrez (datos del SSN de 1974 a 2010).

La Figura 62 muestra la tasa de retorno de sismos en el estado de Chiapas considerando el promedio de todas las fuentes sismogénicas y las magnitudes de sismos importantes a partir de 6.5. Los datos de la Figura 52 corresponden a los reportados en las tablas de los Anexos 1 y 2, donde se emplearon diversas fuentes documentales. Se observa que para sismos con magnitud igual o mayor de 6.5, pero menor a 7.0, el periodo de retorno es de 4 años, para sismos de magnitud igual o mayor a 7, pero menor a 7.5 el periodo de retorno es de 11 años y para sismos con magnitud igual o mayor de 7.5, pero menor a 7.9 el periodo de retorno es de 55 años, considerando que la mayor aceleración generada en Tuxtla Gutiérrez es de 437 gals durante el sismo de Villaflores del 21 de octubre de 1995. Barrientos *et al.* (2007) después de un análisis estadístico de la base del SSN, obtienen un periodo de retorno de 71.64 años para un sismo mayor a 7.0.

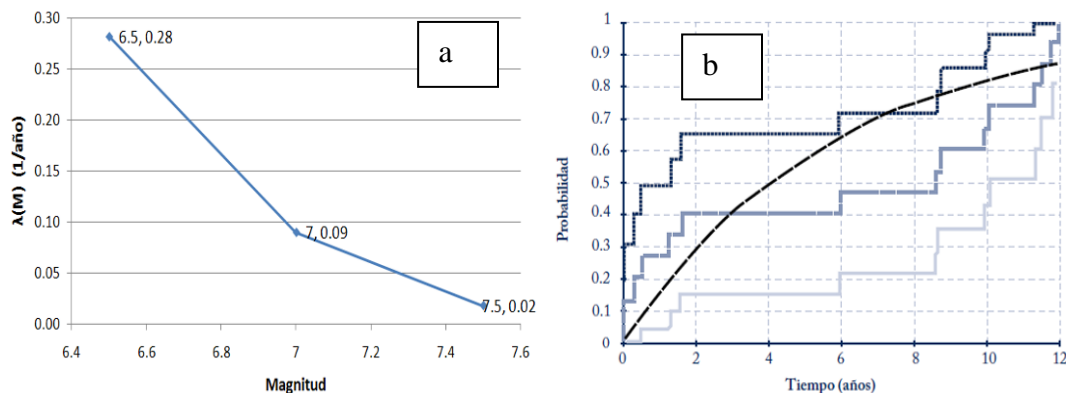


Figura 62. (a) Tiempo de retorno de sismos fuertes en el estado de Chiapas; (b) Curva Kaplan-Meier para los periodos de retorno en Chiapas.

Analizando las tablas de los Anexos 1 y 2, obtenidos de distintas fuentes documentales, se observa (Figura 63) que desde el año 1900 y hasta el año de 1970, la cantidad de sismos de magnitud igual o superior a 6.5, e intensidad igual o superior a VI, fueron superiores a los presentados del año 1971 en adelante. Esto no implica que la actividad sísmica haya cambiado en el estado, sino que actualmente hay equipos y personal con mayor calificación para determinar de manera más cercana a la realidad la frecuencia, magnitud y consecuencias de los sismos en la Chiapas. Además ha mejorado la capacidad sismoresistente de las construcciones a partir del reglamento de construcción de marzo de 1971.

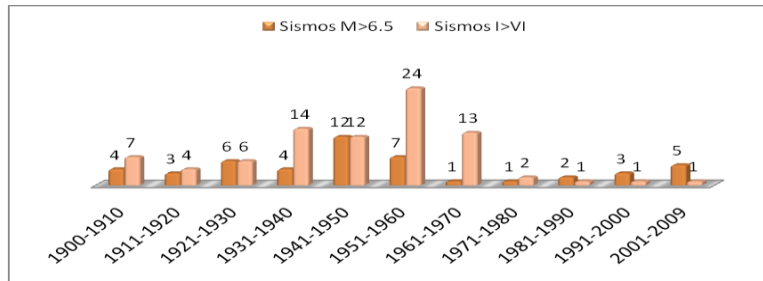


Figura 63. Histogramas conteniendo la frecuencia e intensidad de sismos moderados e intensos en el estado de Chiapas.

González (2010) realizó un análisis estadístico de los sismos en la región, empleando los datos del SSN del año 1974 a 2009, con lo que elaboró mapas de la región para los parámetros: frecuencia de sismos, energía liberada y profundidad media, respectivamente (Figuras 64-66).

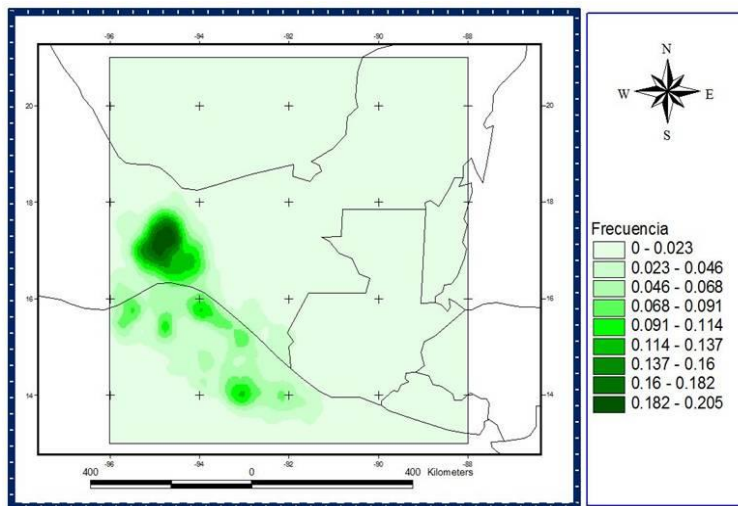


Figura 64. Frecuencia de los sismos en la región considerando datos del SSN 1974 a 2009 (González, 2010).

La Figura 64 muestra que la frecuencia sísmica es muy importante en la zona del Istmo de Tehuantepec y a lo largo de la zona de subducción. El Golfo de Tehuantepec presenta

intensos procesos tectónicos debido a su proximidad a la Trinchera Mesoamericana y a la presencia de fallas activas que cortan el Istmo de Tehuantepec, por lo que la ocurrencia de sismos es alta (SGM, 2005a). Algunas explicaciones los asocian al bloque Chortís (Guzmán, 2013). Respecto a los niveles de energía liberada (Figura 65), las zonas más críticas se encuentran en el Istmo y en la frontera del Soconusco con Guatemala, por lo cual se considera de suma importancia analizar la sismicidad de la frontera Chiapas-Oaxaca en la zona del Istmo de Tehuantepec, así como la sismicidad de la frontera del Soconusco con Guatemala.

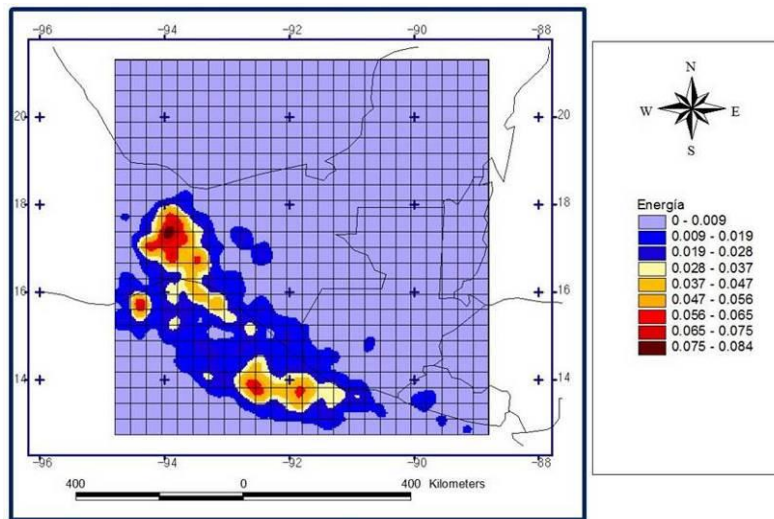


Figura 65. Energía liberada de los sismos en la región considerando datos del SSN 1974 a 2009 (González, 2010).

La Figura 66, muestra la zona de subducción con una inclinación de más de 45° , permite identificar las zonas sismogénicas con profundidades superficiales, intermedias y profundas.

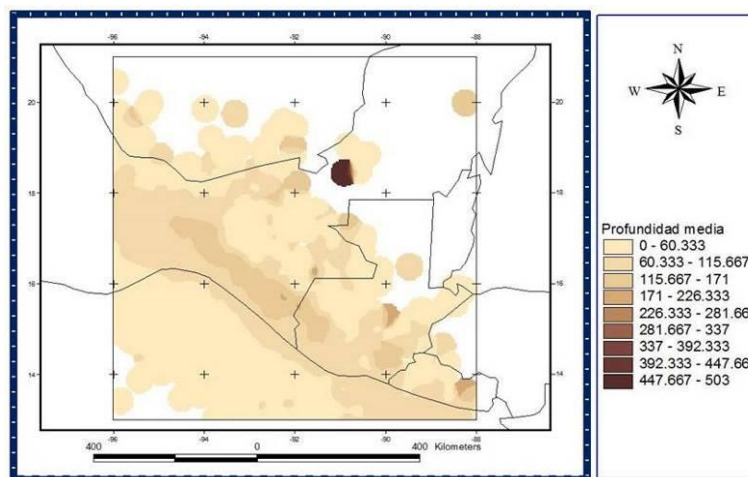


Figura 66. Profundidad media de los sismos en la región de estudio (datos del SSN 1974 a 2009; González, 2010).

Al analizar la frecuencia temporal de eventos por año y por mes en el periodo 1974-2010, observamos que en ciertos años hay aparentemente más sismos (Figura 67). Éstos incrementos se asocian a fenómenos como la construcción de las presas (la presión de poro) en la etapa correspondiente a la década de los setenta y parte de los ochenta, existe otra etapa de incremento de sismos y corresponde al periodo que inicia en el año 2006, esto se debe al incremento de equipos (densidad de la red del SSN) y la sensibilidad de los mismos, los cuales son capaces de registrar sismos de menor magnitud.

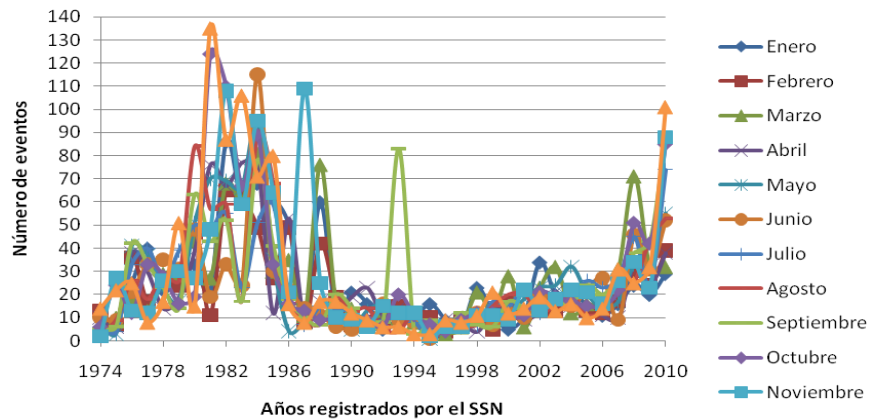


Figura 67. Análisis mensual de los sismos que se presentan en el área de influencia del estado de Chiapas considerando los datos del SSN desde 1974 hasta 2010.

En la Figura 68, se muestra un histograma conteniendo las magnitudes de los eventos sísmicos generados en el área de influencia del estado de Chiapas (entre los meridianos 88 y 96 de longitud oeste y los paralelos 13 y 21 de latitud norte). Normalmente el número de eventos aumenta cuando la magnitud disminuye. Sin embargo, en este histograma esto no se observa en los rangos de magnitud entre 0 y 4. Esto se debe a la dificultad que se tenía por la sensibilidad y densidad de los equipos de SSN en Chiapas para monitorear sismos de magnitudes menores a 3.5.

Actualmente la densidad y sensibilidad de los equipos permite captar sismos con magnitud hasta 2.0, ya que los menores no son de interés para evaluar el peligro sísmico. Los datos tienen una media aritmética de 4.2 y una desviación estándar de 0.63 y por lo señalado anteriormente parecería que es una distribución normal, lo cual es falso. Los sismos de interés para el peligro sísmico corresponden a la cola derecha (aquellos que son mayores a 6). Es importante señalar el concepto de completitud del catálogo, que debería empezar alrededor de magnitud 4. Para sismos de menor magnitud dependiendo de su ubicación podrían no ser captados por la red.

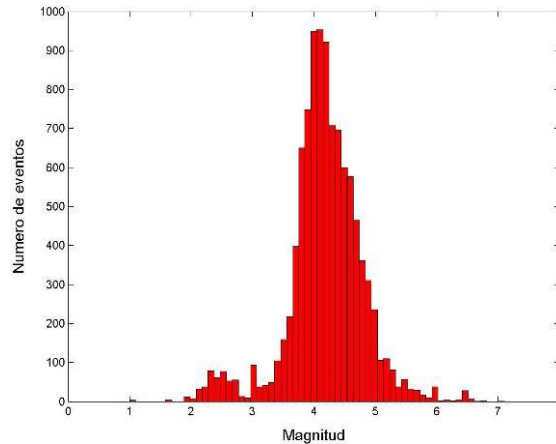


Figura 68. Histograma contemplando el número de evento de acuerdo con su magnitud, los datos corresponden al SSN y contemplan un rango desde 1974 y hasta 2009 (González, 2010).

4.2. Estudio de peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Para determinar el peligro sísmico debemos analizar tres partes básicas: lo que sucede en la fuente sísmica, el trayecto del sismo y el comportamiento del sitio con la llegada del sismo (Figura 69).

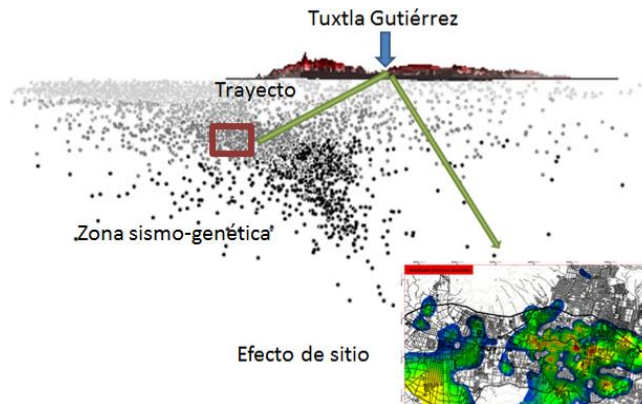


Figura 69. Elementos esenciales del análisis del peligro sísmico.

4.2.1. Análisis de la fuente sísmica

Esteva (1970) desarrolló la primera división del territorio nacional en 27 provincias tectónicas. Zúñiga y Tapia (1991), desarrollaron una división en 23 provincias tectónicas partiendo de un catálogo ordenado y corregido donde adicionalmente identifican los mecanismos focales, este estudio fue la base de la regionalización sísmica de CFE en el año 1993 y se emplearon para el software Peligro Sísmico en México (PSM, 2004) y CRISIS (2007). Pérez-Rocha *et al.* (2007) actualizaron la regionalización sísmica la cual fue la base de la actualización de CFE en 2008 y del software PRODISIS (2008).

La Figura 70 muestra las diversas provincias tectónicas del estado de Chiapas con base en la profundidad y la densidad de eventos registrados. Se observa que la limitada cantidad de eventos hace necesario tener una red más densa de acelerógrafos para estimar de mejor manera los niveles de peligro del estado de Chiapas.

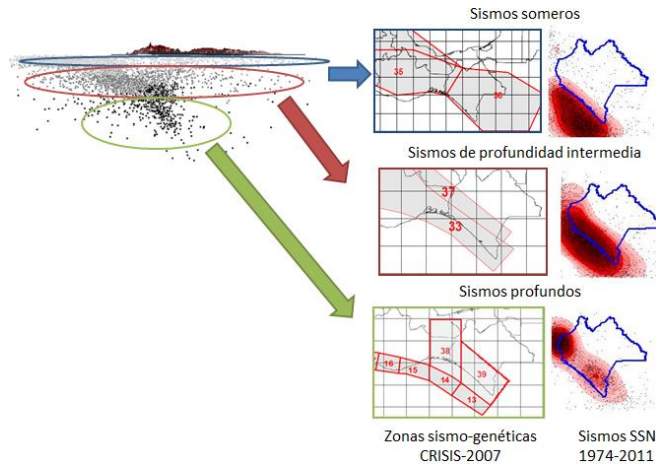


Figura 70. Zonas sismo-génicas relacionadas con la profundidad para el estado de Chiapas.

Partiendo del análisis de las Figuras 69 y 70 se dividió la región de alcance de la red en tres zonas sismogénicamente diferentes, donde se puede apreciar una transición de sismos someros y de deslizamiento oblicuo en los primeros kilómetros de la trinchera, a sismos profundos de componente puramente inversa y de echados pronunciados bajo la zona continental del estado de Chiapas (zona más crítica en daños históricos). Otra zona corresponde a la que presenta una serie de sismos someros y de componente lateral que podrían ser asociados al sistema transcurrente Motagua – Polochic, traza principal del contacto de las placas Norteamericana y del Caribe.

Analizando la propuesta de Zúñiga y Tapia (1991) (Figura 71) observamos que las regiones 2 y 6 corresponden a los sismos someros que se presentan en el estado. Sin embargo la región 4 debe ser más amplia para cubrir los sismos de profundidad intermedia y profundos generados en el estado de acuerdo con lo que se observa en la Figura 70.

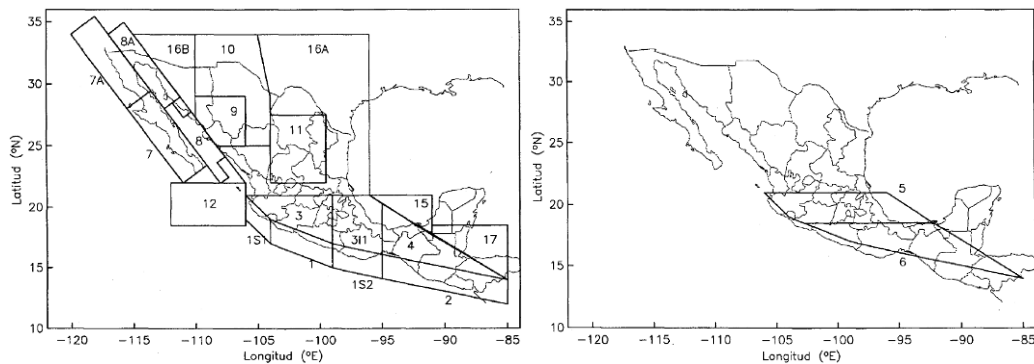


Figura 71. Regiones tectónicas del República Mexicana (Zúñiga y Tapia, 1991).

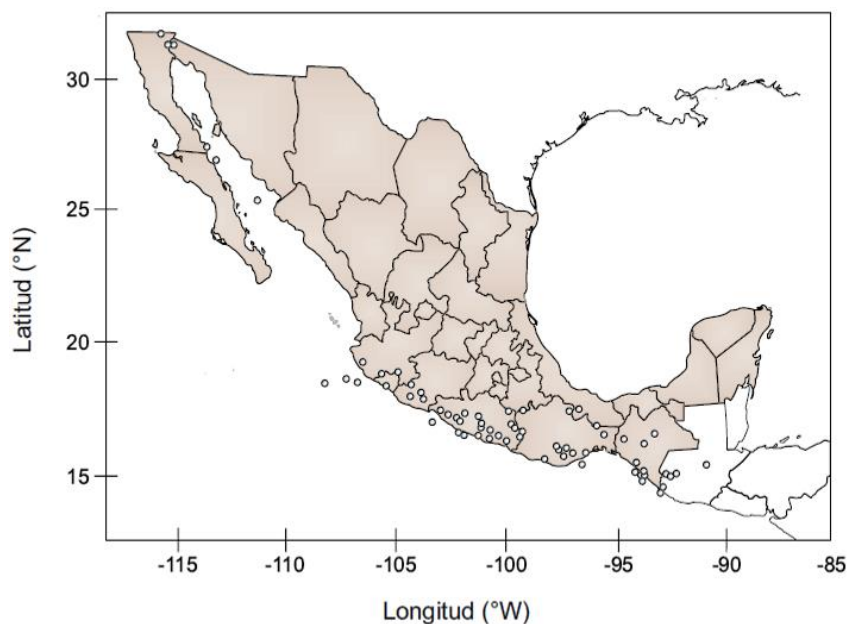


Figura 72. Sismos con magnitud mayor a 7 ocurridos en el siglo XX en la República Mexicana y su frontera con Guatemala (CENAPRED, 2006a).

Las diversas provincias tectónicas han generado sismos muy importantes históricamente en la República Mexicana. En el estado de Chiapas ocurrieron por lo menos diez sismos con magnitud igual o superior a 7 en el siglo XX. Es decir, un promedio de uno cada diez años (CENAPRED, 2006a; Figura 72; Tabla 13).

Debemos considerar que la instrumentación sísmica del estado de Chiapas es reciente. Figueroa la inició en 1955, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) la desarrolló a partir de la operación de las presas (1967), el Servicio Sismológico Nacional (SSN) a partir de 1974, el Grupo Interuniversitario de Ingeniería Sísmica (GIIS) a partir de 1994; debido a ello, pudo haber una mayor cantidad de sismos con magnitud mayor a 7, o incluso los sismos señalados en CENAPRED (2006a) pudieron haber sido de menor magnitud a la señalada.

Otro aspecto a considerar es el tipo de magnitud expresada por cada red, ya que ésta puede ser diferente dependiendo de la metodología usada para calcularla. El Servicio Sismológico Nacional ha empleado al menos dos tipos de magnitudes diferentes en su historia de 100 años. En la Tabla 13 se presenta una magnitud M_s (magnitud de ondas superficiales), adicionalmente se coloca el valor mayor de la magnitud reportada por diversos catálogos sísmicos. Actualmente se emplea la M_w (magnitud de momento), cuya metodología obtiene resultados más estables en un rango más amplio de valores por no tener el problema de saturación de escalas, no obstante no siempre es posible estimar la M_w sobre todo para sismos muy pequeños.

Tabla 13. Temblores de magnitud superior a 7.0 cercanos al estado de Chiapas en el siglo XX. Adaptado de CENAPRED (2006a).

Fecha	Lat° N	Long° W	Prof (km)	M (máx.)	Ms	Distancia a TGZ (Km)
1902 Sep 23	16.500	92.500	25	7.7	7.7	182
1903 Ene 14	15.000	93.000	S	7.6	7.6	177
1912 Dic 09	15.500	93.000	S	7.0	7.0	61
1914 Mar 30	17.000	92.000	150	7.2	-	165
1925 Dic 10	15.500	92.500	S	7.0	7.0	77
1935 Dic 14	14.750	92.500	S	7.3	7.2	35
1944 Jun 28	15.000	92.500	S	7.1	7.1	190
1970 Abr 29	14.463	92.683	44	7.3	7.1	100
1993 Sep 10	14.800	92.687	34	7.2	7.2	60
1995 Oct 21	16.811	93.474	160	7.1	6.5	180

Como puede advertirse en la Figura 73, la diferencia entre escalas puede ser de varios décimos de grado (el sismo de Villaflores de octubre de 1995 tuvo magnitudes entre 7.2 y 6.5), una diferencia importante si no se especifica de qué escala se habla.

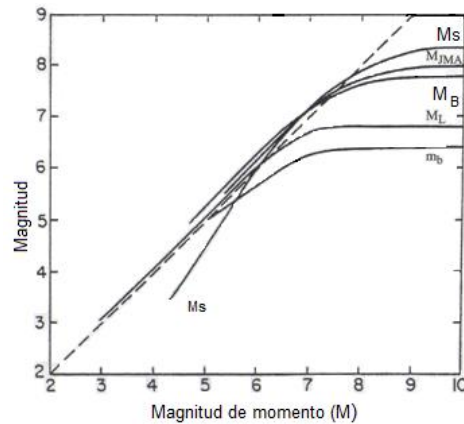


Figura 73. Comparación de escalas de magnitud sísmica (McGuire, 2004).

Para evaluar el comportamiento de la sismicidad regional se aplicó la ley de Gutenberg-Richter considerando las fuentes sísmicas, la tasa, la profundidad y magnitud de sismos generados en Chiapas en el periodo (1990-2012), los cuales corresponden al catálogo del SSN. La ecuación 5 representa la Ley Gutenberg-Richter colocando las constantes correspondientes (McGuire, 2004; Zuñiga y Wyss, 2001):

$$\log N = 6.75 - 1.01M_s \quad (5)$$

Para cada una de las regiones sísmicas que generan peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez se aplicó la distribución de Poisson (ecuación 6) para realizar la estimación probabilística de la recurrencia de sismos en diferentes periodos.

$$P[N \geq 1] = 1 - e^{(-Nt)} \quad (6)$$

4.2.2. Funciones de Green Empírica

Debido a que los datos sismológicos en el estado de Chiapas son limitados, podría considerarse no adecuado recurrir a un enfoque determinista, sin embargo (Panza *et al.*, 2008; Gama *et al.*, 2010) proponen emplear en un caso de estudio similar un escenario basado en un enfoque Neo-determinista. La principal ventaja del procedimiento Neo-determinista es el tratamiento simultáneo de la contribución de la fuente sísmica y la propagación de la onda sísmica para el movimiento fuerte, utilizando principios físicos básicos. En Gama *et al.* (2010) se establecen otras ventajas.

Para este método se requieren generar sismogramas sintéticos a través de funciones de Green empíricas. Los sismos sintéticos son razonablemente adecuados si las ondas del sismo real (semilla) y del sismo sintético recorren el mismo camino. Este proceso se emplea cuando no se tienen señales importantes por un insuficiente tiempo de muestreo o número de aparatos en la región, por la carencia de sismos, por desconocer o no hacerlo de manera adecuada la geometría de la falla, así como las características del medio entre la fuente y el sitio del registro.

Los sismos sintéticos son de dos tipos: Los puramente teórico matemáticos que son buenos cuando se cuenta con información de la fuente y los que parten de un sismo real, los cuales indirectamente presentan las características de la fuente siempre y cuando sea un sismo de mediana profundidad o profundo (mayor a 100 km) y con una distancia epicentral corta.

En la Tabla 14 se presentan las provincias sísmicas que se emplean en la determinación del peligro sísmico. Existen diferentes características de la fuente sísmica como son el mecanismo focal, la directividad, la distribución irregular de los desplazamientos sobre el plano de falla, las asperezas y su localización.

Tabla 14. Fuentes sísmicas que generan peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Fuente sísmica	Nomenclatura / Mecanismo	Distancia a Tuxtla Gutiérrez (Km)	Ubicación	Denominación
Sismos superficiales (40 Km)	A. Subducción	87.3	-95.0 a -94.0 W 14.0 a 15.0 N	Tonalá
Sismos superficiales (40 Km)	B. Cortical	41.5	-95.0 a -94.0 W 15.0 a 16.0 N	La Esperanza
Sismos semiprofundos (40-200 Km)	C. Intraplaca	87.7	-96.0 a -95.0 W 16.0 a 17.0 N	Villa Corzo
Sismos semiprofundos (40-200 Km)	D. Intraplaca	81.2	-94.5 a -93.5 W 16.0 a 16.5 N	Ocozacoautla

La Figura 74 muestra la ubicación de las asperezas y las cuatro regiones sísmicas que se emplearan para el análisis del peligro sísmico. Estas se seleccionaron por la cercanía con la ciudad, las dos primeras son corticales, el punto A es producto de la subducción, el punto B es una falla local y cercana de Tuxtla Gutiérrez, los puntos C y D corresponden a sismos intraplaca ubicados en el manto superior con profundidad entre 70 y 75 km.



Figura 74. Fuentes sísmicas que generan peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas y ubicación de las asperezas para las funciones de Green empíricas. Las características de estas fuentes se describen en la Tabla 15.

En este estudio se emplearon acelerogramas tomados de la Base Mexicana de Sismos Fuertes (Quaas *et al.*, 1995) y de la base del GIIS, que corresponden a registros captados en un acelerógrafo de la RIIS ubicado en la Facultad de Ingeniería de la UNACH. Este instrumento se encuentra instalado sobre sedimentos y tiene un efecto de sitio importante. Se buscaron registros de buena calidad cercanos a Tuxtla Gutiérrez y que se encontraran en el catálogo del CMT Harvard. En la Tabla 15 se presentan los datos de cada uno de los sismos semilla que se emplearon para escalar.

Tabla 15. Características de los sismos empleados como semillas en las funciones de Green empíricas (Datos CMT: Harvard).

Región	Fecha d/m/a	Hora GMT	M_w	Lat N°	Long O°	Prof. (Km)	M_0 (dina-cm)	Acimut	Echado	Áng. desliz.
A	30/9/1993	18:27:54.6	6.5	15.08	-94.83	15	5.98×10^{25}	299	20	99
B	5/5/1999	22:41:33.3	6.1	14.63	-94.86	15	1.89×10^{25}	313	44	-73
C	15/9/1985	7:57:51.8	6.0	17.70	-96.85	71.3	1.18×10^{25}	290	39	-90
D	7/6/1998	23:20:18.5	6.2	15.96	-93.99	75.5	2.68×10^{25}	316	1	82

Caracterización de la fuente a través de funciones de Green empíricas

El método de la función empírica de Green consiste en la superposición de eventos pequeños considerados como una función de Green empírica. La superposición de los subeventos sobre el área de falla del sismo objetivo se hace de tal forma que cubran las áreas que corresponden a las asperezas. Éstas equivalen a las áreas de generación de movimientos fuertes de donde se irradia casi el total de la energía observada en campo cercano.

Existen otros métodos que no se consideraron para este trabajo como: Método de la función estocástica de Green, Método estocástico para fallas finitas, Método de diferencias finitas, Método estocástico de modelado de falla finita basado en una frecuencia de esquina dinámica, Método determinístico-estocástico híbrido y Método empírico híbrido (Gama, 2010).

En el método de las funciones empíricas de Green, se involucran implícitamente incertidumbres como: la relación entre caída de esfuerzos, modelo de fuente, localización de las asperezas, localización del inicio de la ruptura de la falla, tipo de propagación de la ruptura y velocidad de la misma.

Utilizando el método sintético para el modelo espectral ω^2 propuesto por Aki (1967), se obtiene el número de subeventos necesarios para la modelación N^3 a partir de la relación entre los momentos sísmicos del sismo principal que será simulado y el sismo pequeño que se usa como función de Green. N^3 es el número de subfallas en dirección del rumbo N_x , del echado N_w y del número de eventos sumados en cada subfalla que generan el aumento de desplazamiento y duración N_T , (ecuación 7).

$$N^3 = N_x N_w N_T \quad (7)$$

Para calcular el parámetro N que sirve para estimar el área de la falla del sismo principal (dividida en $N * N$ subfallas), se emplea la ecuación 8 (Gama, 2010):

$$N^3 = \frac{\overline{U}_o}{\overline{u}_o} = \frac{M_o}{m_o} \quad (8)$$

donde: \overline{U}_o y \overline{u}_o corresponden al nivel plano de los espectros de Fourier de los registros de desplazamiento del sismo simulado y del sismo real, respectivamente. Así mismo, M_o y m_o son los momentos sísmicos del movimiento simulado y del sismo real, respectivamente. La relación para las frecuencias altas está dada por la ecuación 9 propuesta por Somerville *et al.* (2002):

$$N = \frac{\overline{A}_o}{\overline{a}_o} = \left(\frac{M_o}{m_o} \right)^{\left(\frac{1}{3} \right)} \quad (9)$$

donde: \overline{A}_o y \overline{a}_o corresponden al nivel plano de los espectros de Fourier de los registros de aceleración del sismo simulado y del sismo real para frecuencias mayores a f_c y menores a $f_{m\acute{a}x}$. El movimiento sintético del sismo principal $A(t)$, estará dado por el movimiento observado del sismo pequeño $a(t)$, con base en las ecuaciones (10-12) generadas por Irikura, (1986).

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_w} \left(\frac{r}{r_{ij}} \right) F_{ij}(t - t_{ij}) * a(t) \quad (10)$$

donde: r es la distancia de la estación al hipocentro del sismo real, r_{ij} es la distancia de la estación al elemento (i, j) del área de generación del movimiento sintético, t_{ij} es el tiempo de retraso para la ruptura del punto de salida del elemento (i, j) al sitio observado y F_{ij} es una función filtro para ajustar la diferencia entre el tiempo de dislocación del sismo sintético y del sismo real.

$$F_{ij}(t - t_{ij}) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n'} \sum_{K=1}^{(N-1)n'} \delta \left[t - t_{ij} - \frac{(K-1)\tau}{(N-1)n'} \right] \quad (11)$$

donde: n' es un entero apropiado para eliminar la periodicidad espuria, τ es el tiempo de ascenso (rise time) del sismo real.

$$t_{ij} = \frac{\xi_{ij}}{V_r} + \frac{(r_{ij} - r_o)}{\beta} \quad (12)$$

donde: r_o es la distancia de la estación al punto donde inicia la ruptura.

Para usar el movimiento del sismo real con caída de esfuerzos diferente a la del sismo sintético, se modifica la función de Green empírica, introduciendo un valor constante que sirve para corregir la diferencia entre la caída de esfuerzos del sismo sintético y del sismo real, como se muestra en la ecuación 13:

$$C = \frac{\Delta\sigma_{SP}}{\Delta\sigma_R} \quad (13)$$

donde $\Delta\sigma_{SP}$ es la caída de esfuerzos del sismo sintético y $\Delta\sigma_R$ es la caída de esfuerzos del sismo real. El nivel espectral es afectado por este factor, por lo que este fenómeno se puede expresar como se muestra en las ecuaciones 14 y 15:

$$CN'^3 = \frac{\overline{U_o}}{u_o} \quad (14)$$

$$CN' = \frac{\overline{A_o}}{a_o} \quad (15)$$

Las ecuaciones 10 y 11 de acuerdo con lo sugerido por Aguirre *et al.* (1994), se modifican reemplazando $a(t)$ por $Ca(t)$ y N por N' , resultando las ecuaciones 16 y 17:

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N'_x} \sum_{j=1}^{N'_w} \left(\frac{r}{r_{ij}} \right) F_{ij}(t-t_{ij}) * Ca(t)$$

(16)

$$F_{ij}(t-t_{ij}) = \delta(t-t_{ij}) + \frac{1}{n'} \sum_{K=1}^{(N'-1)n'} \delta \left[t-t_{ij} - \frac{(K-1)\tau}{(N'-1)n'} \right]$$

(17)

En la Figura 75 se muestra el esquema de falla finita contemplando algunas de las variables del método de las funciones de Green empíricas. Para obtener el momento sísmico a partir de una magnitud se empleó la expresión de Kanamori (1977), la cual se muestra en la ecuación 18.

$$M_w = \left(\frac{1}{1.5} \right) \log(M_o) - 10.73$$

(18)

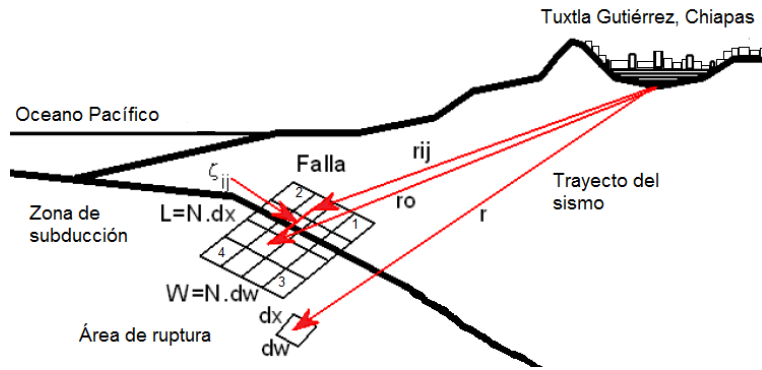


Figura 75. Esquema del modelo de falla finita con las variables empleadas en el método de funciones de Green empíricas (modificado de Gama *et al.*, 2010).

Para obtener la mayor área de aspereza se emplea la relación propuesta por Somerville *et al.* (2002) para los sismos empleados de subducción reproducida en la ecuación 19.

$$A_{asp} = 8.87 \times 10^{-16} (M_o)^{\left(\frac{2}{3}\right)}$$

(19)

donde: el área de la aspereza A_{asp} estará dada en km^2 y M_o en dina-cm.

Las funciones de Green empíricas obedecen las leyes de escalamiento para cumplir en magnitud, duración, etc., las características del registro original. El tiempo de dislocación se conoce como "rise time", para obtenerlo Somerville *et al.* (2002) propusieron la expresión que se muestra en la ecuación 20:

$$T_R = 1.79 \times 10^{-9} (M_o)^{\left(\frac{1}{3}\right)} \quad (20)$$

donde: T_R es el “rise time” y M_o es el momento sísmico. La velocidad de ruptura se consideró $V_r = 0.9 \times V_s$. Gama *et al.* (2010) señalan que el punto de inicio de la ruptura suele estar alejado de la posición de las asperezas. Somerville *et al.* (2002) proponen la ecuación 21 para estimarla.

$$R_A = 1.76 \times 10^{-8} (M_o)^{\left(\frac{1}{3}\right)} \quad (21)$$

Para determinar los acelerogramas sintéticos se usó el programa de cómputo EGF MPC, proporcionado por el Dr. Jorge Aguirre González, en lenguaje Fortran, el cual calcula la historia de aceleraciones, velocidades y desplazamientos del sismo sintético. En la Tabla 16 se presentan las máximas aceleraciones en cm/seg^2 de cada una de las zonas y en la Figura 76 se muestran las señales sintéticas de los máximos valores de aceleración de los sismos generados.

Tabla 16. Características de los sismos simulados y aceleración máxima alcanzada para las regiones de la Figura 74.

Región	Magnitud M_w	Área (Km^2)	Distancia (Km)	Profundidad (Km)	PGA (cm/seg^2)	T_R (años)
A	7.7	50x40	87.3	15.0	318.612	73
B	7.0	35x30	41.5	15.0	188.485	29
C	7.5	45x40	87.7	72.0	413.188	56
D	8.0	50x50	81.2	75.0	589.117	115

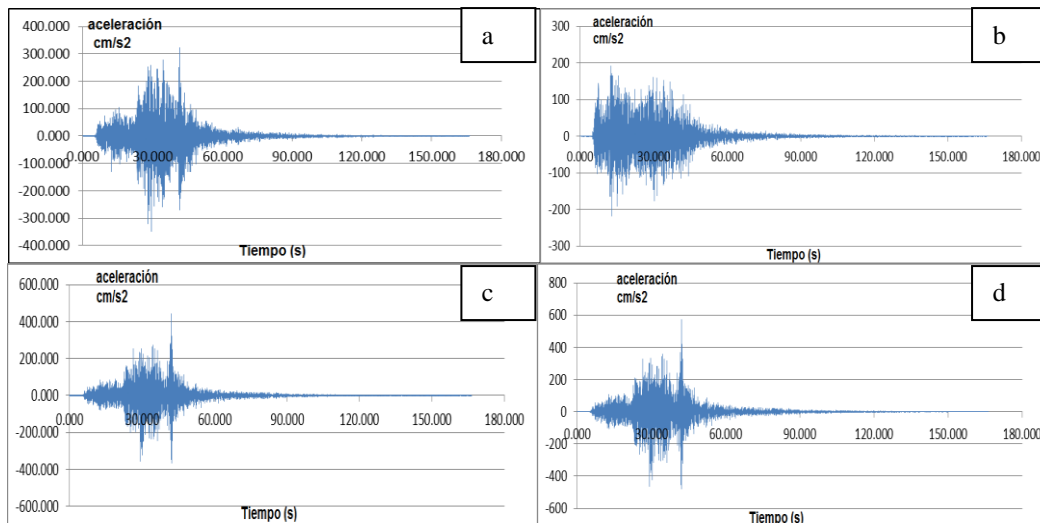


Figura 76. a), b), c) y d). Acelerogramas sintéticos desarrollados para cada una de las cuatro regiones A, B, C y D, respectivamente (Figura 74). En el eje x se ubica el periodo en segundos y en el eje y se gráfica la pseudoaceleración en cm/seg^2 .

Las aceleraciones obtenidas muestran valores importantes aunque inferiores a los obtenidos con fallas corticales resultaron menores (318.612 cm/seg^2 y 188.485 cm/seg^2) que los de profundidad intermedia. La distancia es similar (con excepción del denominado *B* que está a la mitad de la distancia), la dirección E-W es la que presenta las mayores aceleraciones, con excepción del denominado *B* (que corresponde a N-S), mostrando un claro efecto de directividad en las amplificaciones.

En la Figura 77 se muestran los espectros de pseudoaceleración de respuesta elástica con amortiguamiento crítico del 5% para cada una de las cuatro regiones estudiadas. En todos los casos se observan amplificaciones importantes en el orden entre 0.2 y 0.5 s. El espectro se compara en cada caso con el del sismo del 21 de octubre de 1995, el mayor registrado instrumentalmente en el estado de Chiapas (437 gals en su componente E-W).

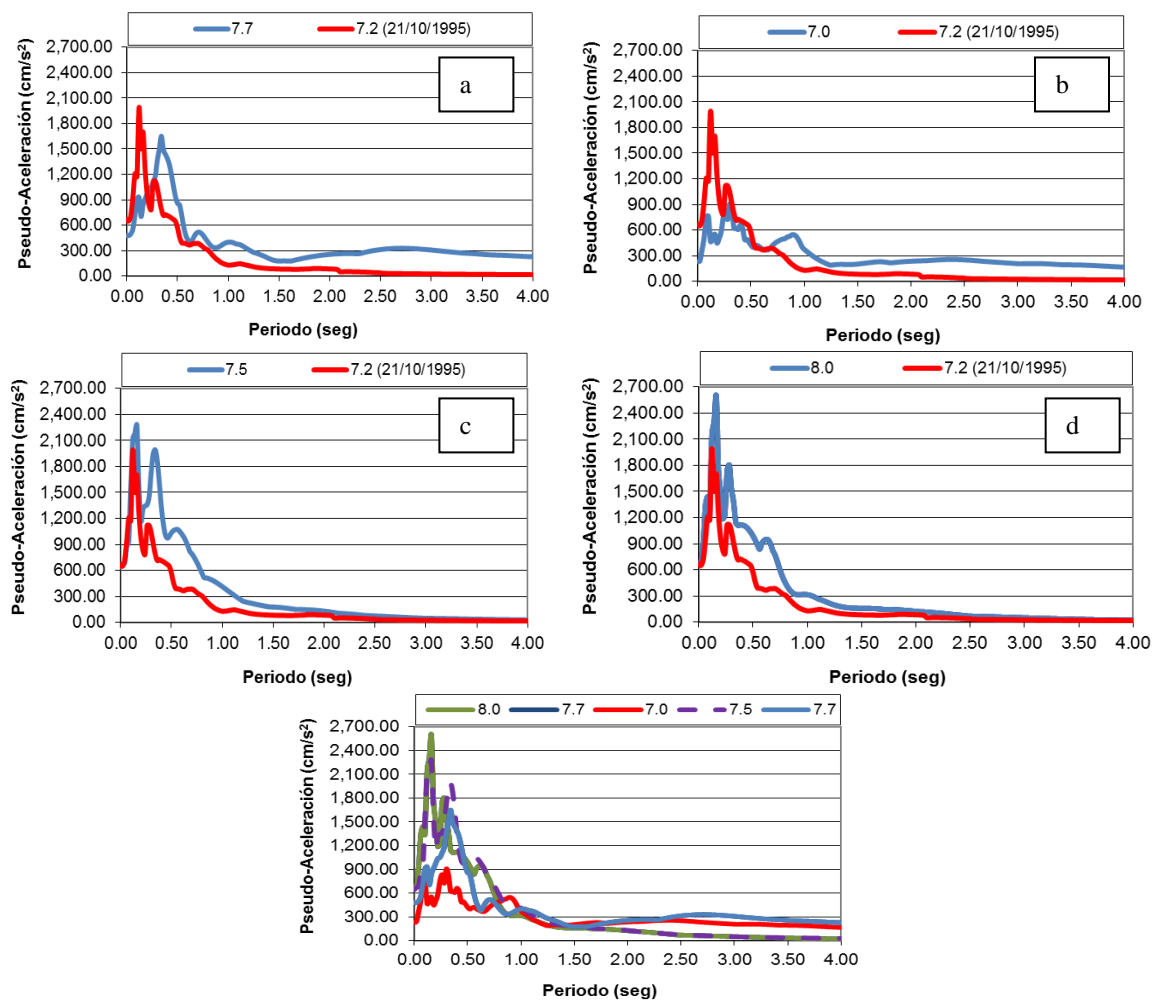


Figura 77. a), b), c) y d). Espectros sintéticos de respuesta desarrollados de pseudoaceleración con el 5% de amortiguamiento crítico para suelo sedimentario en el valle de Tuxtla Gutiérrez, para cada una de las cuatro regiones A, B, C y D, respectivamente (Figura 74). En el eje *x* se ubica el periodo en segundos y en el eje *y* se gráfica la pseudoaceleración en cm/seg^2 .

4.2.2.1. Peligro sísmico empleando funciones de Green empíricas

En la Tabla 16 se presentan los tiempos de recurrencia históricos estimados (T_R) para las diferentes fuentes sísmicas (Nishenko y Singh, 1987) para la ocurrencia de un sismo característico. Los tiempos de recurrencia históricos, fueron estimados con base en probabilidades condicionadas para la recurrencia de grande y gran sismo interplaca a lo largo de la zona de subducción de la costa del Pacífico Mexicano. En la Figura 64, se presentan las relaciones $M-\lambda(M)$ que caracterizan el potencial y actividad de las distintas fuentes sísmicas estudiadas, debido a que las fuentes presentan un comportamiento similar se presenta la tasa media de excedencia de la magnitud.

Rebollar *et al.* (1999) presentan una ley de atenuación a partir del sismo del 21 de octubre de 1995, la cual se presenta en la Figura 78 Para ese sismo se contaba con una red temporal de ocho estaciones en el estado de Chiapas. Existen otras leyes más recientes cómo las que presentan Benito *et al.* (2001) y Vidal (2012), no obstante ambas relaciones son más adecuadas para Tapachula y no para Tuxtla Gutiérrez.

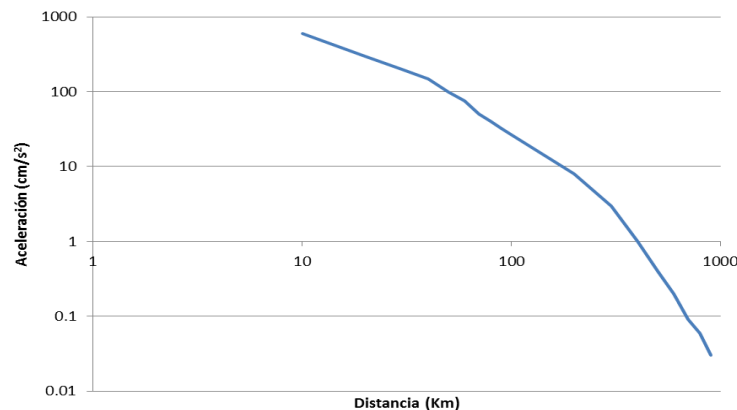


Figura 78. Ley de atenuación propuesta por Rebollar *et al.* (1999), con información del sismo del 21 de octubre de 1995.

En la Figura 79 se presenta la curva de peligro sísmico para suelo sedimentario del valle de Tuxtla Gutiérrez obtenidas a través de acelerogramas sintéticos de la fuente sísmica denominada Ocozocoautla. Esta curva expresa la tasa de excedencia de la aceleración horizontal máxima del terreno; el inverso de λ indica el periodo de retorno para el cual puede excederse cierto nivel de PGA. Ocozocoautla, representa el más alto peligro sísmico para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, donde para un periodo de retorno de alrededor de 115 años, las aceleraciones horizontales máximas del terreno pueden exceder de 590 cm/s^2 .

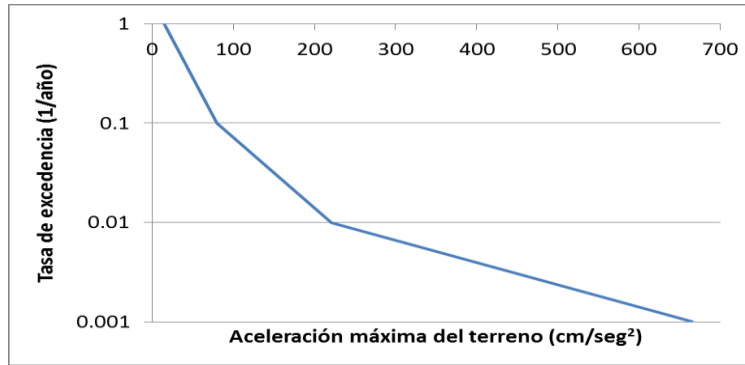


Figura 79. Curva de peligro para suelo sedimentario en el valle de Tuxtla Gutiérrez en cm/seg^2 , a partir de sismos simulados con la fuente Ocozocoautla.

4.2.3. Análisis del peligro sísmico considerando la metodología del MOC-CFE (1993; 2008) contemplando PRODISIS (2008)

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) en su Manual de Obras Civiles, capítulo “*Diseño por Sismo*” de 1993, divide a la República Mexicana en cuatro zonas sísmicas. El estado de Chiapas contempla tres de ellas (Figura 80). Para esta macrozonificación sísmica se utilizaron catálogos de sismos de la República Mexicana registrados desde inicios del siglo pasado, considerando los registros históricos de daños y la aceleración probable del suelo de algunos de los grandes temblores ocurridos en nuestro país.

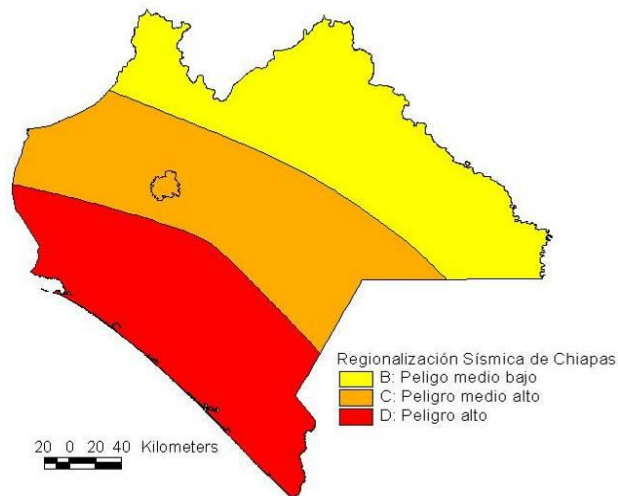


Figura 80. Regionalización sísmica de Chiapas y del municipio de Tuxtla Gutiérrez (CFE, 1993).

La zona A es una zona donde no se tienen registros, ni reportes históricos de sismos en los últimos 80 años y no se espera que las aceleraciones del suelo sean mayores a 10% de la aceleración de la gravedad, mientras que la zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos con bastante frecuencia y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad. Las otras dos zonas (B y C) son zonas intermedias baja y alta, donde se registran sismos no tan frecuentemente como la

zona D, o son afectadas por aceleraciones que no sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad (CENAPRED, 2006).

En la Figura 80 el municipio de Tuxtla Gutiérrez se ubica en la zona C del mapa de regionalización sísmica del MOC-CFE-1993; encontrándose que todo el municipio es altamente afectado por sismos cuyas intensidades pueden llegar a tener valores del 36% de aceleración para el periodo de retorno de 100 años. Sin embargo, la localización en el mapa de regionalización sísmica no es suficiente para conocer el peligro local, ya que todo el municipio no está expuesto al mismo peligro, pero nos da una idea clara de la frecuencia y magnitud de los sismos esperados en la ciudad.

Los mapas de peligro sísmico, en términos de intensidades de aceleración de terrenos asociados a periodos de retorno de vida útil de edificaciones, son necesarios para que los especialistas en el diseño realicen nuevas construcciones más seguras, así como aportar espectros para tener elementos firmes que permitan la modificación o refuerzo de las construcciones e infraestructura existente. Estos mapas son, por lo tanto, instrumentos claves en la reducción de la vulnerabilidad y por consiguiente del riesgo sísmico, ya que permiten diseñar las estructuras con demandas más realistas durante el periodo de vida útil de estas.

En su versión reciente del año 2008 el MOC-CFE modificó su metodología para evaluar el peligro sísmico, eliminando la zonificación sísmica y sustituyéndola por un mapa de aceleraciones esperadas, considerando la zona geográfica y la importancia del sistema constructivo, aportando espectros de diseño de peligro uniforme (espectros que son más realistas ya que llegan a la aceleración del terreno natural) y aceleraciones esperadas para un periodo de retorno (Pérez-Rocha *et al.*, 2007). En la Tabla 17 se ubican las aceleraciones esperadas para cada tipo de estructura para periodos de retorno de 475 años calculadas con el software PRODISIS versión 2.0 del MOC-CFE (2008).

Tabla 17. Aceleraciones esperadas en Tuxtla Gutiérrez considerando MOC-CFE-2008.

Tipo de estructura	Aceleración esperada (gals)
B	168
A	252
A+	258

El PRODISIS versión 2.0 del MOC-CFE (2008) tiene la posibilidad de establecer el peligro mediante el empleo de perfiles de velocidad, para lo cual se consideran los obtenidos mediante SPAC (ver apartado 4.2.5. de evaluación del efecto de sitio).

Es de vital importancia conocer los periodos de retorno para eventos sísmicos con valores de aceleración de 15% de la gravedad o superior ($1g=980$ gals, $gal=cm/s^2$). Es este valor límite inferior de aceleración que provoca afectaciones a los sistemas constructivos, estructuras de mampostería, que predominan en el país y en la ciudad. Por tal motivo, la CFE generó el mapa actualizado de Periodos de Retorno para aceleraciones de 0.15 de la gravedad utilizando información de la actualización del MOC-CFE-2008 (Figura 81).

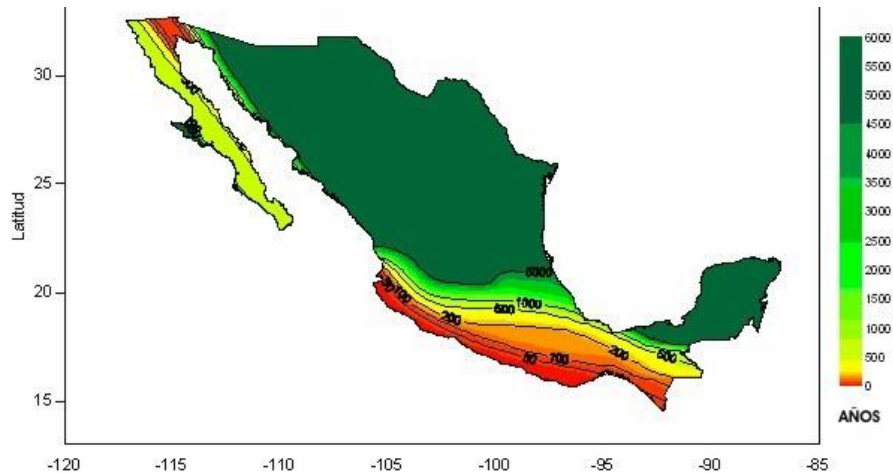


Figura 81. Mapa de periodos de retorno para aceleraciones de 0.15% de gravedad o mayores (CFE, 2008).

Con base en este mapa, a cada estado de la República Mexicana se le han asignado las prioridades para la evaluación de la seguridad de las construcciones ante un sismo, adicionalmente contar con parámetros ingenieriles básicos para el diseño (espectros de diseño). Se han catalogado, mediante un algoritmo de interpolación, las 752 poblaciones con más de 10,000 habitantes de acuerdo a las cifras oficiales más recientes, proporcionadas por INEGI (CENAPRED, 2006a).

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez, según el mapa digitalizado de aceleraciones (Figura 82), se localiza en la región frontera con periodos de retorno entre 200 y 475 años para un evento sísmico que produzca aceleraciones del orden de 15% o mayores de la gravedad. Lo anterior es para fuentes de subducción y considerando aceleraciones en roca sin efecto de sitio.

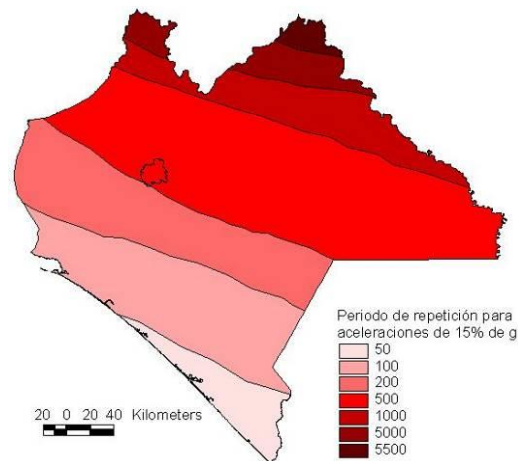


Figura 82. Mapa de periodos de repetición para aceleraciones de 0.15% de gravedad o mayores en Chiapas.

En la Tabla 18 puede consultarse el periodo promedio de retorno de una aceleración mínima que puede ocasionar daños a construcciones y cuyo periodo de retorno es de 0.42 eventos por siglo, una cifra engañadora si pensamos en los daños históricos reportados,

esto se debe a que este estudio no considera las amplificaciones locales por el tipo de suelos y la topografía (efecto de sitio).

Tabla 18. Periodos de retorno (T_R) para aceleraciones de 0.15 g o mayores, modificado de CENAPRED, 2006.

Municipio	Long °N	Lat °W	Alt (m)	Población	T_R (años)
Tuxtla Gutiérrez	-93.1167	16.7528	600	424,579	235

4.2.4. Análisis de los daños e intensidades por sismo en Tuxtla Gutiérrez

Un elemento clave a considerar para entender el peligro sísmico de una región y desarrollar una microzonificación sísmica considerando elementos imprescindibles, son los daños históricos que los sismos han generado en ella. Éstos se pueden representar con un mapa de intensidades sísmicas, como el desarrollado por Figueroa (1986) utilizando 49 mapas de isosistas (líneas que separan áreas de igual intensidad de daños), que toman en cuenta los sismos más importantes ocurridos en nuestro país, entre el 7 de abril de 1845 y el 19 de septiembre de 1985.

Los mapas de intensidades han sido empleados como elementos de entendimiento de la peligrosidad desde que no existían registros instrumentales y posterior a ella se han hecho esfuerzos para relacionar las intensidades Modificadas de Mercalli versus la PGA (aceleración pico del suelo), la PGV (velocidad pico del suelo) y la PGD (desplazamiento pico del suelo). En la Tabla 19 se presenta un conjunto de modelos que relacionan intensidades versus aceleraciones pico modificado de Gama (2010). Estas relaciones corresponden a diversas regiones del mundo y emplean una mayor cantidad de información, no obstante de que sirven de referencia de que a partir de intensidades de VII debería haber daños por presentar aceleraciones cercanas a 150 cm/s^2 , que es un valor empleado en México para entender la presencia de daños.

Tabla 19. Relación entre la IMM y la PGA para distintos autores modificado de Gama (2010).

IMM (cm/s^2)	a	a	A	$a_{\text{máx.}}$	$a_{\text{máx.}}$	a_H	a_V	$a_{\text{máx.}}$
I	0.5	0.3	0.7	2.0	-	-	-	-
II	1.4	0.9	1.4	4.0	-	-	-	-
III	2.5	2.5	3.1	8.0	-	-	-	-
IV	4.5	6.6	6.6	16.0	10.0	16.6	11.0	7.0
V	14.0	17.8	14.0	32.0	25.0	34.0	17.0	14.0
VI	44.0	47.9	30.0	64.0	50.0	66.0	45.0	48.0
VII	89.0	128.8	64.0	130.0	100.0	126.0	83.0	142.0
VIII	190.0	346.7	138.0	265.0	200.0	251.0	166.0	235.0
IX	331.0	933.3	295.0	538.0	400.0	501.0	331.0	347.0
X	616.0	1,258.0	631.0	1,094.0	800.0	1,000.0	676.0	589.1*
Modelo	Kawasumi (1951)**	Hershberger (1956)**	Richter (1958)**	Neumann (1954)**	Medvedev-Sponheuer (1969)**	Trifunac-Brady (1975)**	Trifunac-Brady (1975)**	Tuxtla Gutiérrez

*.Obtenido en este trabajo con Funciones de Green Empíricas.

** Los autores citados fueron retomados de Gama (2010).

En la Figura 83, se observa que considerando los daños sísmicos reportados en el periodo de tiempo del estudio de Figueroa (1986), para el caso del estado de Chiapas, la ciudad de Tuxtla Gutiérrez es la única ciudad del estado que ha registrado intensidades sísmicas de hasta X⁶, mientras que la ciudad de Tapachula presenta intensidades de IX⁷, el resto de los municipios del estado muestran intensidades entre VI y VII. Las intensidades sísmicas al estar directamente relacionadas con los daños observados son un buen indicador del peligro sísmico, lo cual permite considerar que Tuxtla Gutiérrez presenta un nivel de peligro sísmico importante.

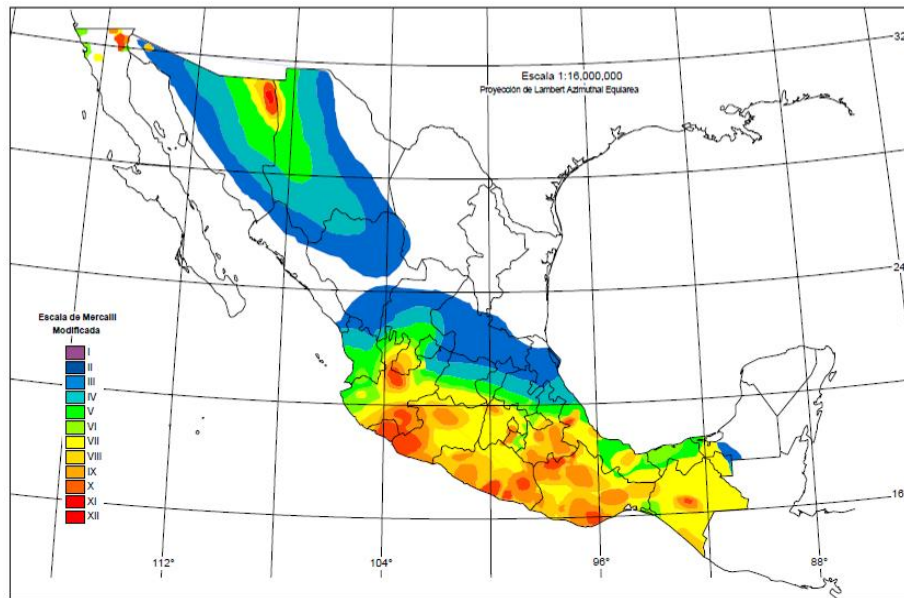


Figura 83. Mapa de intensidades sísmicas máximas (Figueroa, 1986).

Gutiérrez *et al.* (1991) construyeron un sistema computarizado llamado DPS el cual retoma los trabajos de isosistas de Jesús Figueroa y algunos otros (40 mapas en total), el cual construye histogramas de intensidades para distintas regiones del país, en este trabajo se mantiene el nivel de intensidades de Tuxtla Gutiérrez en X. La evolución de este trabajo se trasladó al Atlas Nacional de Riesgos desarrollado por CENAPRED, el cual considera un periodo de estudio de las isosistas de sismos hasta el año 1999 y emplea 52 mapas de isosistas de sismos importantes (Figura 84).

6 En escala de Intensidades de Mercalli Modificada (IMM) en la intensidad X se destruyen gran parte de las estructuras de mampostería, los cimientos de las estructuras de madera, algunas estructuras de madera bien construidas, incluso puentes. Se producen grandes daños en represas, diques y malecones. Se generan grandes desplazamientos del terreno en los taludes. El agua de canales, ríos, lagos, etc., sale proyectada a las riberas. Cantidades apreciables de lodo y arena se desplazan horizontalmente sobre las playas y terrenos planos. Los rieles de las vías férreas quedan ligeramente deformados.

7 En IMM en la intensidad IX se produce pánico general. Las estructuras de mampostería mal proyectadas o mal construidas se destruyen. Las estructuras de mampostería bien construidas se dañan y a veces colapsan. Las estructuras de madera son removidas de sus cimientos. Sufren daños considerables los depósitos de agua, gas, etc. Se quiebran las tuberías (cañerías) subterráneas. Aparecen grietas aun en suelos secos. En las regiones aluviales, pequeñas cantidades de lodo y arena son expelidas del suelo.

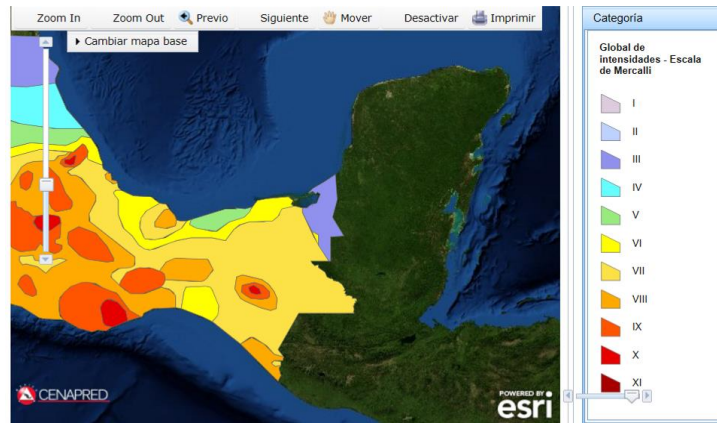


Figura 84. Mapa de intensidades sísmicas máximas basadas en la Escala Modificada de Mercalli para temblores de gran magnitud ocurridos entre 1845 y 1999⁸.

De acuerdo con los trabajos de Castro (2001); García y Suárez (1996); González *et al.* (2010); González *et al.* (2011a); González *et al.* (2011b) en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez se han presentado varios sismos que generaron afectaciones, las cuales han provocado pánico en la población y, en algunos casos, daños moderados y hasta importantes. En el presente trabajo se consideran tres eventos sísmicos particulares que fueron seleccionados por la cantidad de daños en Tuxtla Gutiérrez y porque se contaba con información suficiente para su localización, descripción y análisis.

- El 23 de septiembre de 1902 se presentó un sismo por el fenómeno de subducción, de la placa de Cocos por debajo de la placa Norteamericana, a 25 km de profundidad con magnitud de 7.7 e intensidades de X en la ciudad capital, alcanzando daños muy importantes y generalizados (Figueroa, 1973; García y Suárez, 1996). Estos daños de acuerdo con los sistemas constructivos locales en esa época debió dañar prácticamente a todas las construcciones presentes, esa es una de las causas que en Tuxtla Gutiérrez no hay construcciones históricas del siglo XIX entre otras causas señaladas en capítulos anteriores.
- El 21 de octubre de 1995 un fuerte terremoto con epicentro cercano a Ocozocoautla, Chiapas, sacudió a Tuxtla Gutiérrez y la región frailescana del estado que fue la más afectada, cuya capital es Villaflores, lo que le dio el nombre al evento. El sismo presentó una profundidad de 165 km, lo cual evitó la generación de réplicas y propició que los daños fueran menos importantes de lo que fueron en la capital y regiones cercanas a esta. Este evento fue de magnitud 7.2 e intensidad de VII en esta ciudad ocasionando cuarteaduras de edificios y colapso de algunas viviendas, daño de gran parte de la infraestructura educativa, dos fallecimientos, la caída de bardas y pánico generalizado en la población (González *et al.*, 2011b; Figura 85).

⁸ Tomado de la página del Atlas Nacional de Riesgos del CENAPRED en la dirección electrónica: http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=170

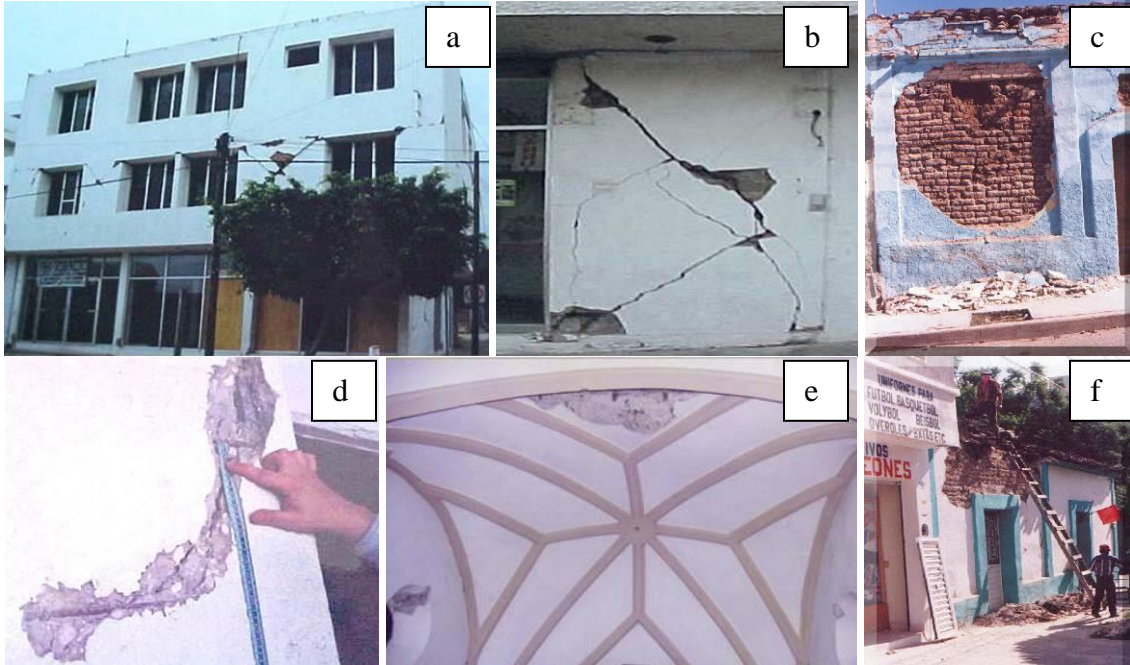


Figura 85. Fotografías de los daños debidos al sismo de Villaflores de octubre de 1995 en edificios públicos de Tuxtla Gutiérrez (González *et al.*, 2011b). (a, b) Edificio público del centro de la ciudad con sistema a base de muros de cortante sin refuerzo adecuado; (c) Daño estructura de adobe; (d) Daños en la rectoría de la UNACH; (e) Daños en la catedral de San Marcos; (f) Daños en construcciones de adobe.

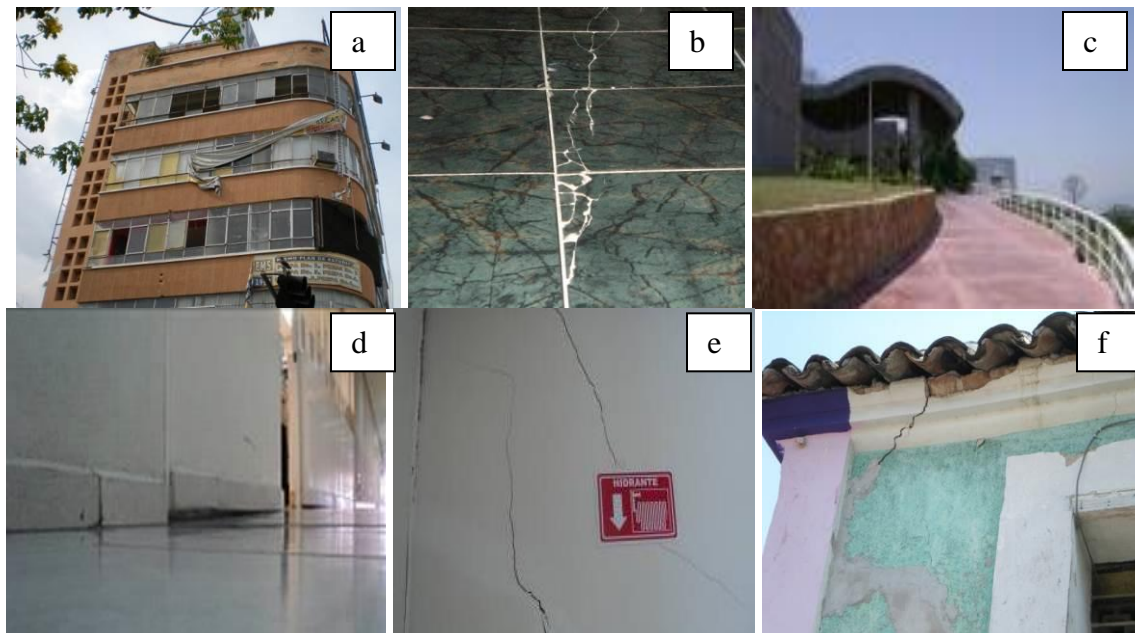


Figura 86. Fotografías de los daños causados por el sismo de Las Choapas de 2011 en edificios públicos de Tuxtla Gutiérrez (González *et al.*, 2012). (a) Daños edificio Corzo; (b) Hundimiento en rectoría de la UNICACH; (c) Fracturas y asentamientos en instalaciones de COCYTECH; (d, e) Daños en hospital de especialidades “*Vida mejor*”; (f) Daño a vivienda en el centro de la ciudad.

- El tercer evento para analizar no es tan importante en daños, pero es significativo por lo reciente y los daños que generó en la ciudad básicamente, no obstante de no ser la región más cercana al epicentro. Este sismo se generó el 7 de abril de 2011, con una magnitud de 6.7 e intensidad de VI. Ocurrió a 83 km de las Choapas, Veracruz y generó en Tuxtla Gutiérrez un conjunto de daños significativos en edificios públicos, viviendas, bardas, entre otras estructuras, los cuales no debieron presentarse por la distancia de la fuente, la profundidad (167 km) y la magnitud del evento (González *et al.*, 2012; Figura 86). Sin embargo, esto se debió al efecto de sitio en ciertas regiones de la ciudad donde se alcanzó una aceleración de 15% de la gravedad.

Contemplando los daños de los sismos referidos anteriormente, en la Figura 87 aparece un mapa que relaciona los daños ocasionados por el sismo del 23 de septiembre de 1902 (polígono verde, los cuales pese a no estar censados pueden representarse por el área que ocupaba la mancha urbana en 1892), el sismo del 21 de octubre de 1995 y el sismo del 7 de abril de 2011. Se observa que los daños se concentraron en la zona de suelos blandos conformados por arcillas expansivas, los cuales han sido estudiados y reportados por Ordoñez (2008), los que se encuentran en el primer cuadro de la ciudad y zonas aledañas al río Sabinal y sus tributarios.

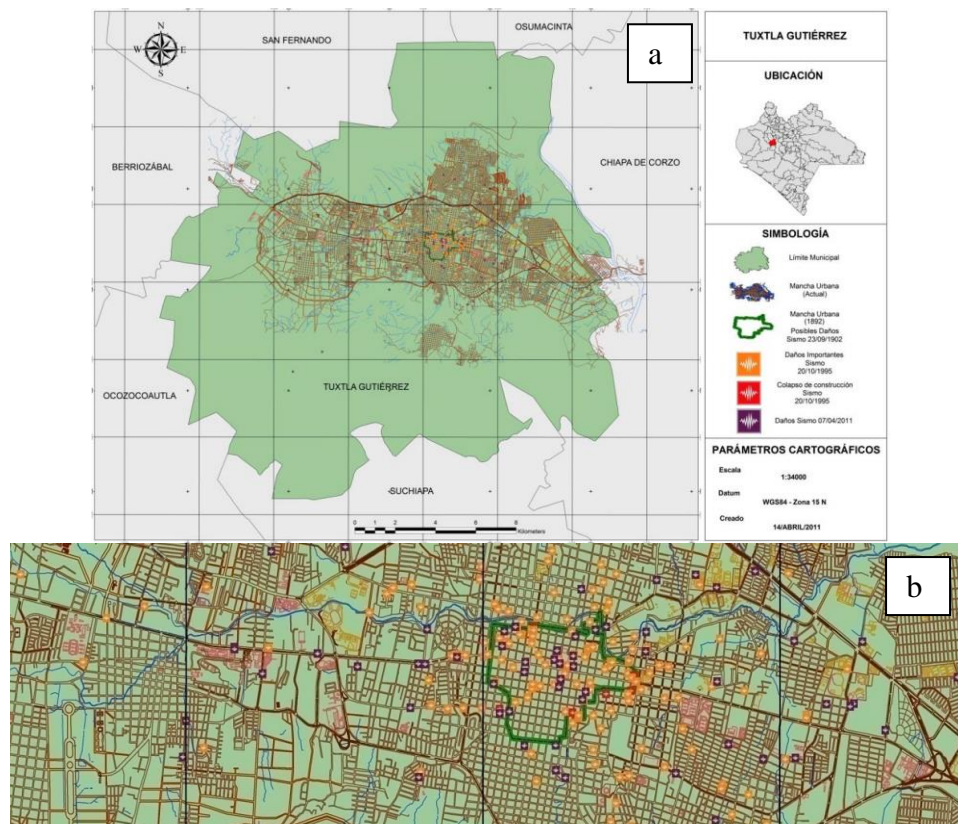


Figura 87. Daños históricos por sismo en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (González *et al.*, 2012). (a) Mancha urbana; (b) Acercamiento del centro de la ciudad. El polígono verde representa la mancha urbana de 1892, daños del sismo de 1902; los puntos naranjas, daños del sismo de 1995 y los puntos morados, daños del sismo del 7 de abril de 2011.

En la Figura 88 se muestra la ubicación de los daños causados por los sismos del 21 de octubre de 1995 y del 7 de abril de 2011, de acuerdo con el uso de las construcciones. En ella se observa cómo sobresalen las construcciones de uso habitacional y edificios de escuelas de todos los niveles educativos. También es importante notar que los hospitales han sufrido daños que, aunque son daños menores, se debe considerar esta experiencia y mejorar las estructuras para nuevos hospitales y rehabilitar de forma urgente las existentes. La mayoría de las habitaciones dañadas son construcciones de adobe o de mampostería sin el refuerzo (Figuras 85 y 86).

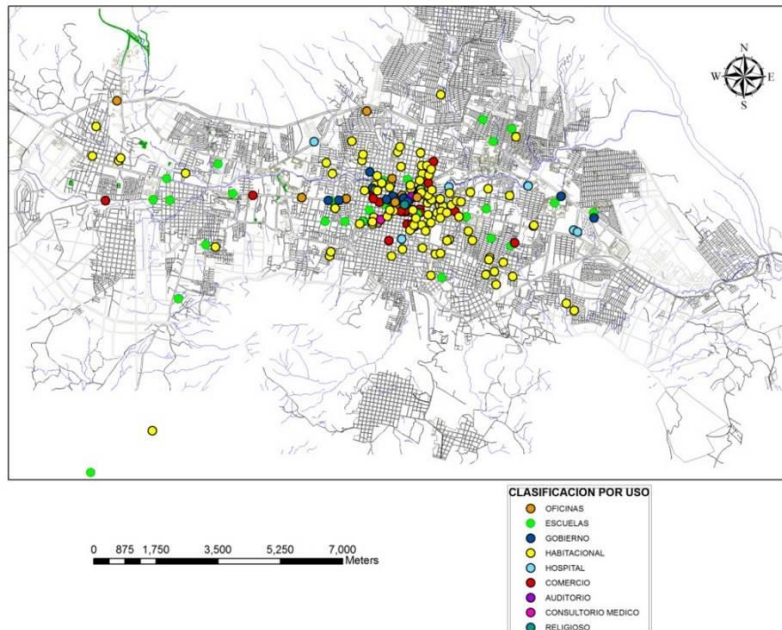


Figura 88. Localización de daños de los sismos del 21 de octubre de 1995 y del 7 de abril de 2011, considerando el uso de las construcciones.

Otro factor importante en la concentración de daños, considerando los mismos sismos, es la edad de las construcciones, como se muestra en la Figura 89. Se puede observar que es en el centro de la ciudad donde existen construcciones con antigüedad considerable (30 años o más), aunque también se han dañado estructuras que tienen menos de 10 años de construcción. Sin embargo, las construcciones jóvenes dañadas son de materiales precarios, o ubicadas cercanas a los tributarios del río Sabinal y construidos mayoritariamente en la ladera y obedecen a construcciones que no fueron diseñadas, construidas, supervisadas con asistencia ingenieril.

En la Figura 90 se observa que el periodo fundamental de las estructuras que sufrieron daños era muy pequeño, correspondiendo principalmente a construcciones de uno y dos niveles. Las construcciones de tres o cuatro niveles que sufrieron daños fueron localizadas muy cerca del río Sabinal o cercanas a alguno de sus tributarios. Algunas estructuras de más de cuatro niveles que fueron afectadas se localizan también en el centro de la ciudad, donde los espesores de sedimentos son mayores.

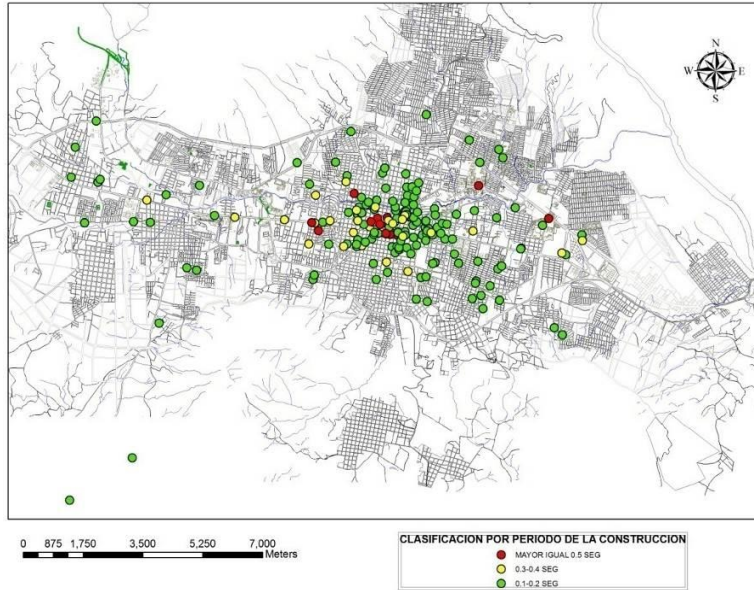


Figura 89. Localización de daños de los sismos del 21 de octubre de 1995 y 7 de abril de 2011, considerando el periodo natural de vibración de las construcciones.

Los sistemas estructurales que fueron dañados por los sismos son muy variados (Figura 91), predominado la mampostería sin refuerzo o con refuerzo insuficiente, así como las construcciones de adobe y bajareque. Adicionalmente, las estructuras de otros materiales (concreto y acero) han sido afectadas por errores en la construcción o en su diseño de acuerdo con las visitas a las mismas y los análisis con mayor profundidad que se hicieron a los distintos sistemas constructivos que fueron dañados por los sismos de 1995 y 2011. Los daños en estructuras de mampostería se concentran en el centro, mientras que las estructuras de concreto y acero se distribuyen a lo largo del cauce del río Sabinal.

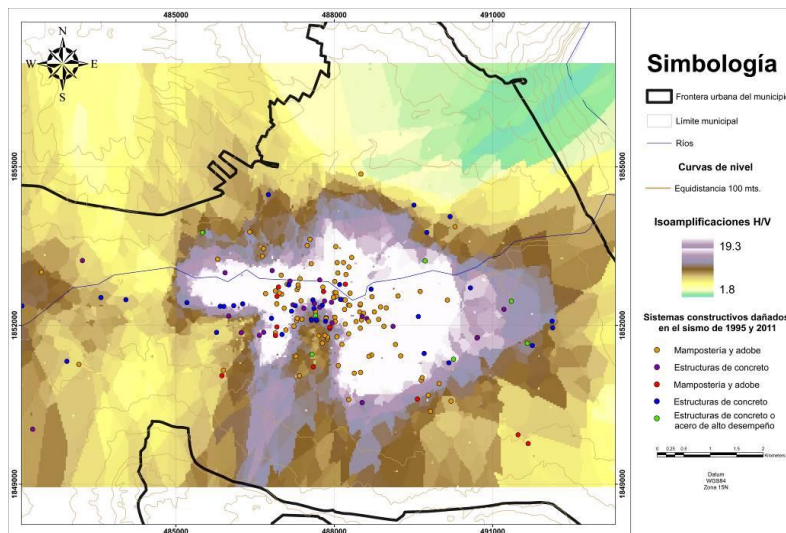


Figura 90. Localización de daños de los sismos del 21 de octubre de 1995 y 7 de abril de 2011, considerando los sistemas constructivos empleados.

Las características del inventario de las construcciones locales (de uno a cuatro niveles en promedio) hacen que los periodos bajos o frecuencias altas de éstas sean similares a las del suelo, lo que permite generar fenómenos de coincidencia del periodo de las construcciones con la zona de frecuencias donde se concentró la energía sísmica. Esta coincidencia puede detonar en resonancia, la que se produce con movimientos de tipo armónico de larga duración. En la Figura 92 se muestra un análisis donde los puntos rojos corresponden a los casos de daños donde el periodo del suelo y de la construcción son prácticamente los mismos, los puntos amarillos donde hay una diferencia desde 0.1 s hasta 0.15 s entre ambos periodos y en punto verde donde hay más de 0.16 s de diferencia entre ambos periodos. De acuerdo con la distribución las estructuras de mampostería ubicadas en el centro de la ciudad, difícilmente se dañaron por la posibilidad de incurrir en resonancia, pero en la ladera sur existe una alta probabilidad por la cantidad de puntos amarillos. Las estructuras de concreto se concentran en el centro de la ciudad y en el cauce del río Sabinal.

Cabe mencionar que el área blanca del mapa ubicada en el valle de Tuxtla Gutiérrez, es la zona donde se concentran la mayor parte de daños los cuales fueron analizados contemplando las variables amplificación, resonancia y sistema constructivo (uso, edad y sistema constructivo). No obstante, también se encontró que estos daños estaban asociados a un conjunto de embovedados de diversos tributarios del río Sabinal, lo cual se analizará en el siguiente apartado de la tesis.

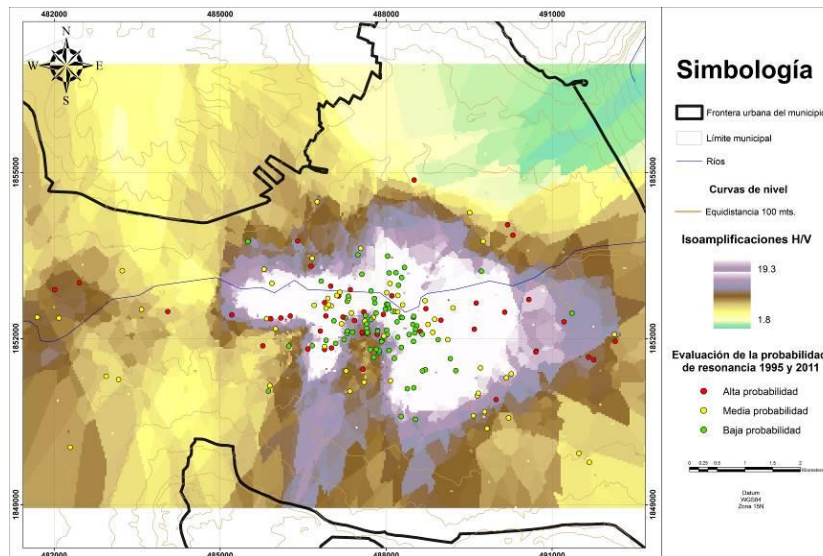


Figura 91. Localización de daños de los sismos del 21 de octubre de 1995 y 7 de abril de 2011, considerando la posibilidad de resonancia de los sistemas suelo construcción.

En la Figura 93 se presenta una imagen modificada de Bilham (2009) donde se muestran sismos de distintas magnitudes que han ocasionado daños y muertes, principalmente por la calidad de la construcción y las características dinámicas del suelo donde se desplantan. Hay contrastes muy grandes al presentarse sismos de mediana magnitud, pero con alto impacto en muertes como el de Bam (2003) en Irán y Haití (2010), respecto a sismos muy grandes con pocas muertes como el de Chile (2010).

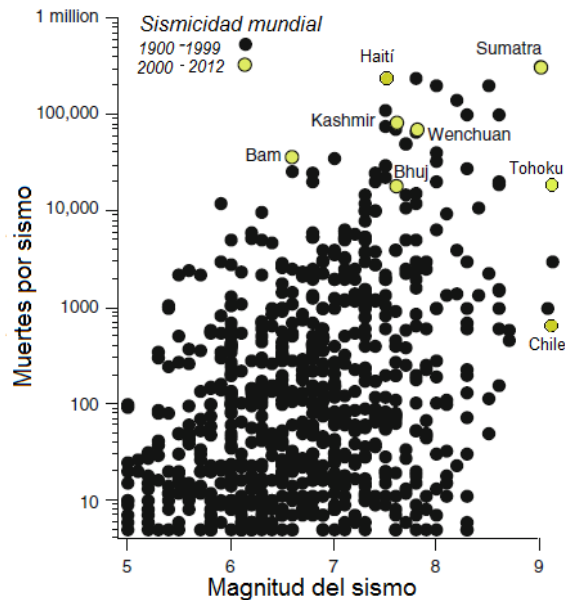


Figura 92. Muertes debidas a sismos con diferentes magnitudes, se colocan círculos en verde para sismos entre 2000 y 2009 (modificado de Bilham, 2009).

4.2.4.1. Efecto de los embovedados en los daños en Tuxtla Gutiérrez

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez se fundó en el valle fluvial y en las márgenes del río Sabinal. Toda el agua de lluvia escurre por una serie de afluentes, de temporal y permanentes, hasta llegar al cauce principal del Sabinal y de allí al Grijalva. Desafortunadamente, los cauces naturales de estos escurrimientos fueron cubiertos en forma de embovedados o tapados por el crecimiento de la ciudad, con sus asentamientos alrededor del centro de la ciudad (Figura 94).

Al realizar el análisis de los daños en las construcciones y relacionarlos con la ubicación de los antiguos cauces de los ríos, se encontró que un porcentaje importante de los daños se localiza sobre algunos de los antiguos cauces de los afluentes que irrigaban el río Sabinal en el primer cuadro de la ciudad. Es decir, la existencia de éstos bajo construcciones importantes, incluidos edificios públicos de varios niveles, hace que aumente el riesgo de las mismas.

En la Figura 95 se presenta un plano de localización de los principales embovedados con líneas de color rojo, que abarca las zonas de los barrios de San Marcos, El Calvario, San Pascualito, Los Milagros, Barrio Guadalupe, Fraccionamiento San Roque, Colonia Moctezuma y Colonia las Palmas.

Todo lo anterior aumenta por la razón de que los embovedados presentan deterioro importante en su estructura, debido a la falta de mantenimiento, fatiga y a que ya rebasaron los años de vida útil con que fueron diseñados. Además, el proceso de deterioro se aceleró porque en ellos corre un importante número de descargas de aguas negras

domiciliarias. En la Figura 95 se muestra el estado actual de tres de los principales embovedados. Mediante una variación del método de Autocorrelación Espacial (SPAC) denominado Calicatas-SPAC, se evaluó la ubicación de algunos de los embovedados y su relación con los daños presentados en los sismos históricos. El nombre de Calicatas proviene de la técnica usada con sondeos eléctricos y que permite construir perfiles de resistividad.

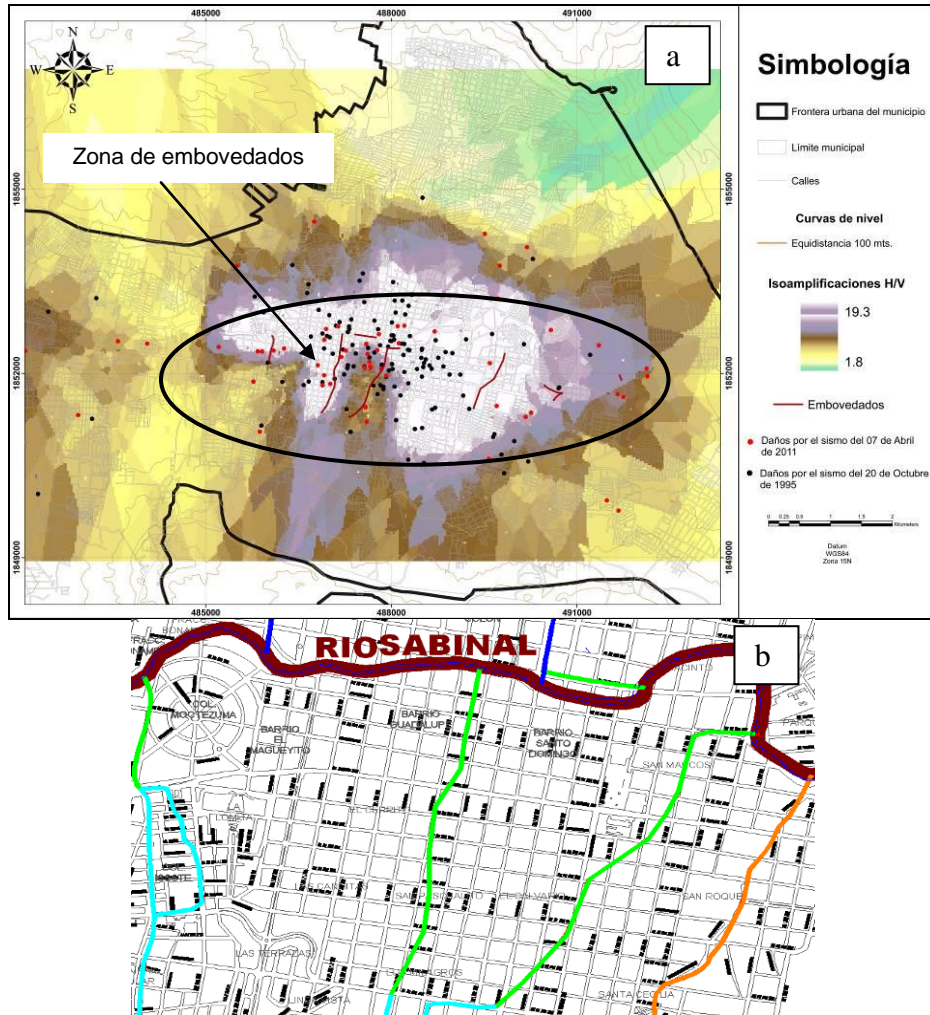


Figura 93. (a) Mapa de toda la ciudad; (b) Acercamiento del centro de Tuxtla Gutiérrez. Se muestra la ubicación de los embovedados siguiendo la trayectoria de las líneas color verde.

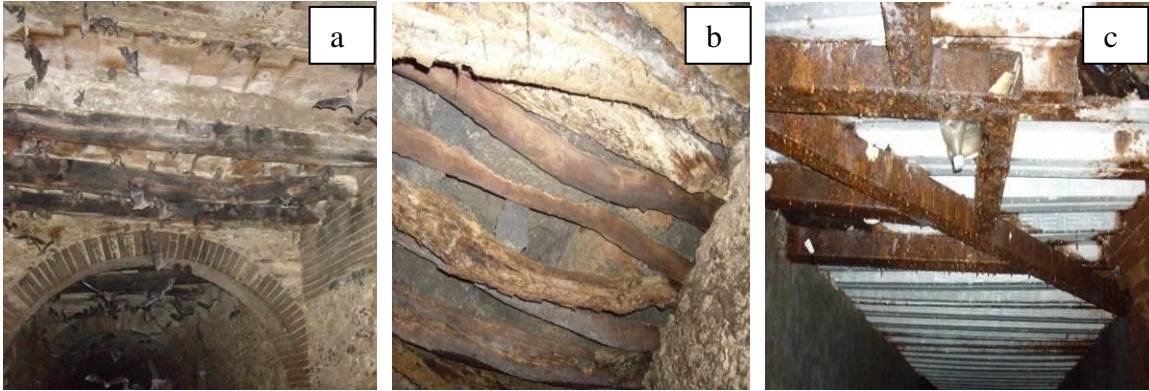


Figura 94. (a) Deterioro en estructura del embovedado de 4ª Norte y 4ª Oriente; (b) Corrosión en estructura del embovedado del barrio San Roque; (c) Deterioro y corrosión de la estructura del embovedado de 5ª Poniente en el Barrio Guadalupe. Las fotografías corresponden al recorrido realizado por personal de Protección Civil Estatal y Protección Civil Municipal durante el mes de marzo de 2008.

Actualmente el deterioro en los embovedados sigue incrementándose, lo que puede resultar en colapsos parciales de los mismos, incluso sin la presencia de sismos. Las deformaciones que se observan en algunos de sus tramos, debilitan la estructura de las construcciones vecinas y las que sustentan, lo cual se manifiesta por medio de la aparición de fisuras generadas por los asentamientos diferenciales. La participación de los embovedados en los daños fue menor de lo que se esperaba y solo se ve influencia de estos en los daños en las construcciones que colindan con estos.

4.2.5. Análisis del efecto de sitio en Tuxtla Gutiérrez

A mediados del siglo XIX ya se conocía que el movimiento sísmico no se producía de igual forma en todas las zonas del terreno. En ese tiempo se había observado que en algunas áreas se producían concentraciones de daños mayores que en otras. El origen de esta concentración se debe al fenómeno de amplificación y periodo fundamental del movimiento del suelo, el cual aumenta tanto la aceleración, como la velocidad y el desplazamiento de la superficie en puntos concretos del terreno. Esta amplificación puede deberse a la naturaleza, composición y morfología de las capas superficiales del subsuelo. Al conjunto de estos fenómenos se le conoce como “*efectos locales*”, “*efecto local*”, “*respuesta local*” o “*efectos del sitio*” (Rodríguez, 2005).

Los estudios de microzonificación sísmica consisten en la identificación y caracterización de unidades de suelos y unidades litológicas subyacentes, para determinar la respuesta dinámica de los suelos frente a terremotos, esta respuesta constituye el efecto de sitio. Además de los suelos, en un estudio de microzonificación se incluyen los efectos inducidos por fallas, licuación y otros, y se valora su peligro. Los mapas resultantes, o mapas de microzonificación, se presentan en una base cartográfica útil para fines de edificación y planificación urbana (Tupak, 2009).

Tupak (2009) afirma que los aspectos más significativos a considerar en los estudios de microzonificación son los siguientes:

- Propiedades geotécnicas de los suelos, espesor, densidad, velocidad de ondas transversales, módulo de rigidez, resistencia, profundidad del nivel freático, etc.
- Susceptibilidad frente a la licuación, deslizamiento y roturas superficiales por fallas.
- Susceptibilidad de laderas de sufrir procesos de remoción.
- Condiciones topográficas que puedan amplificar la respuesta sísmica.
- Peligrosidad frente a tsunamis en zonas costeras.

4.2.5.1. Estudios de microzonificación sísmica en Tuxtla Gutiérrez

Generalmente los sedimentos blandos amplifican el movimiento del suelo causado por sismo en mayor proporción que los estratos más rígidos o incluso los intermedios. La ingeniería sísmica y la geotécnica han desarrollado a partir de la década de los 80's, motivadas por lo ocurrido en los sismos de Michoacán de septiembre de 1985 un conjunto de estudios locales que han evidenciado este efecto. El efecto de sitio se incrementa debido a factores relacionados con la topografía, la geología y la geotecnia. Estas condiciones han sido evaluadas para temas como procesos de remoción en masas (Castro *et al.*, 2001).

A mediados de los años noventa, la UAM Azcapotzalco (Alonso *et al.*, 1995; Alonso *et al.*, 1999) coordinó a un equipo de especialistas que en conjunto con académicos locales (UNACH) desarrolló el primer mapa de Microzonificación para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez (Figura 96), donde mediante vibración ambiental se estudiaron 75 puntos de la ciudad considerando espectros de Fourier.

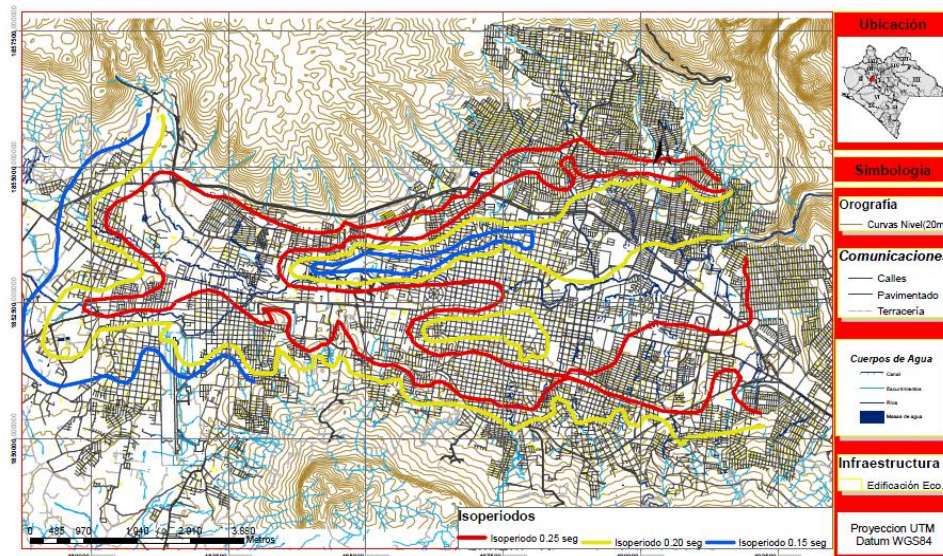


Figura 95. Mapa de isoperíodos de Tuxtla Gutiérrez (modificado de Alonso *et al.*, 1995).

Los trabajos desarrollados por Alonso *et al.* (1995; 1999), incluyeron un mapa de isoperíodos que identificaron en la ciudad un suelo homogéneo con tres isocurvas de 0.15, 0.20 y 0.25 segundos. Debido a los resultados anteriores se propuso un solo

espectro de diseño para suelo firme con amortiguamiento crítico del 5.0% y con un coeficiente sísmico de 0.60.

Los estudios de microzonificación para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas continuaron en los años 2004 a 2006, con los trabajos desarrollados por la UNACH y la UNICACH (Narcía *et al.*, 2006). Mediante estos estudios se complementó el mapa de microzonificación para la ciudad, considerando las nuevas colonias y refinando puntos del estudio previo (se pasó de 75 a 96 puntos de medición). Los resultados se observan en la Figura 97. El estudio encontró que el periodo natural de los suelos de Tuxtla Gutiérrez es de 0.10 a y hasta 0.53 s y las amplitudes encontradas son del orden de 13.

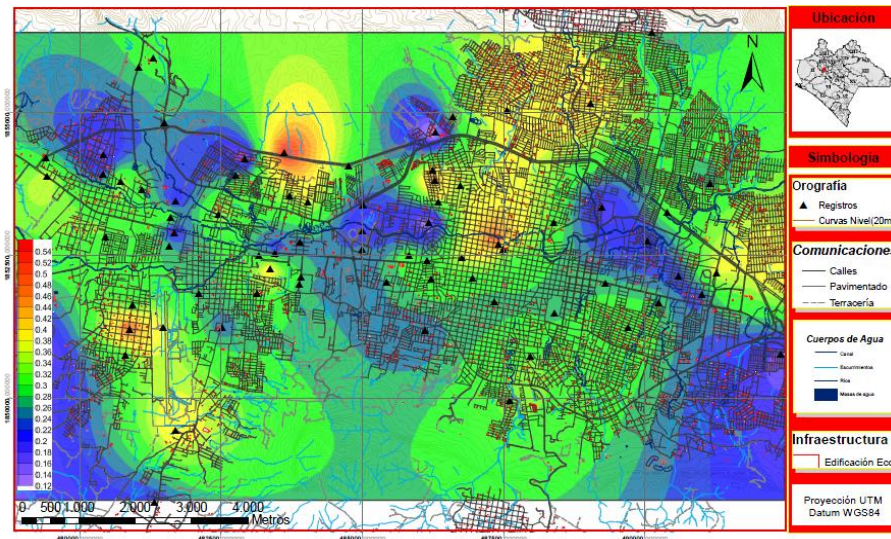


Figura 96. Período natural de vibración del suelo de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (modificado de Narcía *et al.*, 2006).

El estudio de Narcía *et al.* (2006) empleó la técnica de cocientes espectrales de Nakamura (1989). En este estudio se retoman las mediciones de Alonso *et al.* (1995), algunas de las cuales no contaban con componente vertical por condiciones del equipo usado, para resolverlo se empleó una técnica basada en un modelo de Newmark y Rosenbleuth (1976), la cual relaciona el periodo fundamental del suelo y la velocidad de las ondas de corte, mediante la ecuación 22. Con esta solución se obtuvo la variación de los espesores de sedimentos que aportan al efecto de sitio para el suelo de la ciudad con una velocidad promedio de ondas de corte $\beta=150$ m/s.

$$T = 4 \sum_i^n \frac{h_i}{\beta_i} \quad (22)$$

En la Figura 98 se presentan los espesores de los sedimentos que van desde 3.82 hasta 19.95 m. Se concluyó que el terreno debe clasificarse como firme para la mayoría de laderas e intermedio para la mayoría del valle. La falta de equipo para continuar el trabajo de campo limitaron los resultados del proyecto encabezado por Narcía, por lo cual

para este trabajo se propuso actualizar la microzonificación con equipo de precisión y contemplando un mayor número de mediciones.

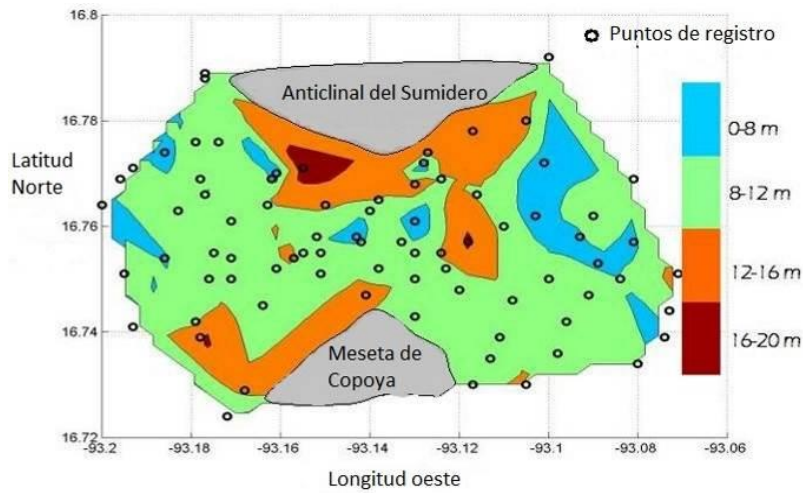


Figura 97. Espesores de los sedimentos para Tuxtla Gutiérrez (Narcía *et al.*, 2006).

4.2.5.2. Actualización de la Microzonificación Sísmica de Tuxtla Gutiérrez

El estudio de actualización de la microzonificación para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez se desarrolló con trabajo de campo durante prácticamente todo el 2011, mediante el uso de la técnica de microtemores (vibración ambiental), la cual permite obtener la estimación de la respuesta de un sitio. Esta técnica fue introducida en Japón en los años cincuenta (Kanai y Tanaka, 1961). Las mediciones de microtemores presentan un alto atractivo para la caracterización de la respuesta de sitio, tanto por su sencillez de operación y su bajo costo, como por la rapidez con que permiten obtener resultados.

Una de las técnicas, introducida para estimar efectos de sitio usando registros de microtemores, es el cociente espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro denominada técnica de Nakamura (H/V), propuesta originalmente para interpretar mediciones de microtemores (Nakamura, 1989). Lermo y Chávez-García (1994) compararon resultados de microtemores contra el cociente espectral estándar de registros de temblores y concluyeron que los microtemores, cuando son analizados con dicha técnica, determinan con buena precisión el periodo dominante (T_0) en sedimentos sujetos a amplificación dinámica en un intervalo de frecuencias entre 0.5 y 10 Hz.

Para el estudio de microzonificación se realizaron registros de vibraciones en toda la mancha urbana de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez con el objetivo de determinar el periodo fundamental de vibración del suelo, así como las amplitudes relativas asociadas. Para la adquisición de estos registros se utilizaron dos grabadoras Altus modelo Makalu con sensores modelo Episensor con una sensibilidad de $\frac{1}{4}$ de g y sensores de velocidad Lenartz de un segundo. Los registros se tomaron con 200 muestras cada segundo a lo largo de 30 minutos de muestreo por cada punto.

En la distribución de estos registros se tomó con base en la densidad de población y a una distancia no mayor de 400 m entre los distintos puntos, buscando cubrir una mayor superficie del terreno para tener una interpolación más adecuada. Con lo anterior delimitamos, con una mayor aproximación, las zonas con un comportamiento dinámico similar para identificarlas en el mapa de isoperiodos (Figura 99).

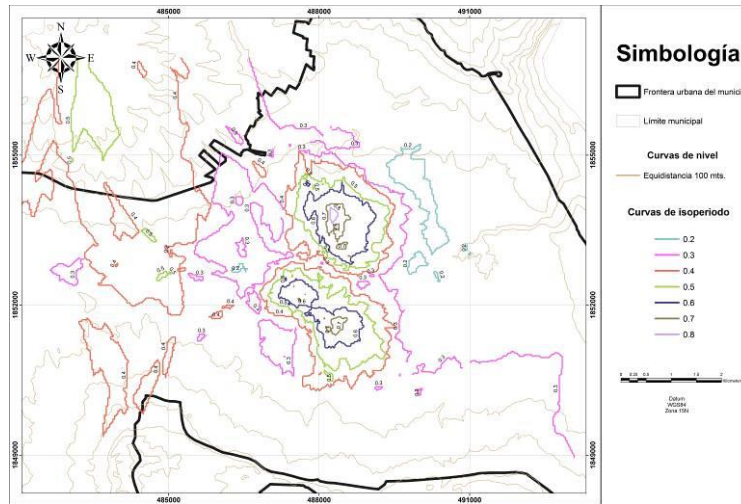


Figura 98. Mapa de isoperiodos de Tuxtla Gutiérrez (González *et al.*, 2012).

El trabajo se desarrolló concentrando el mayor número de registros en la zona centro de la ciudad (separación máxima de 200 m), debido a los daños históricos que se presentaron en sismos recientes e incluso algunos de los señalados por García y Suárez (1996). En la Figura 100, se muestra la distribución espacial de los puntos de medición en las laderas y valle de la ciudad.

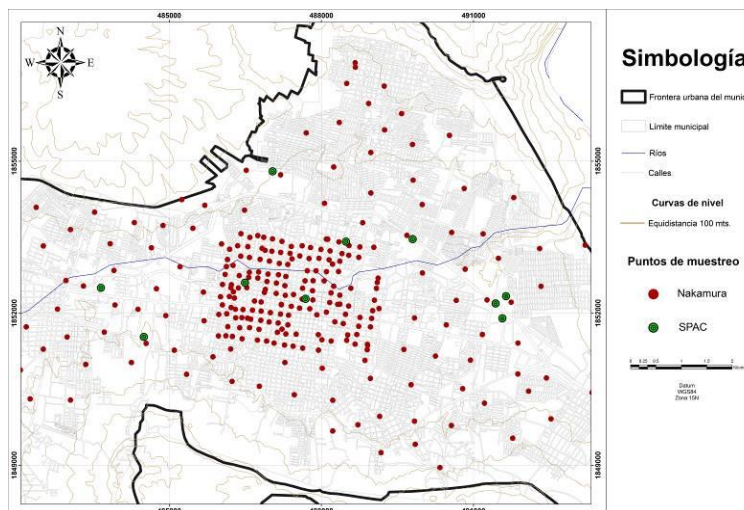


Figura 99. Mapa con la distribución espacial de los puntos de medición en Tuxtla Gutiérrez.

Dentro de los registros se seleccionaron ventanas de entre 30 segundos de duración para cada punto, las cuales se utilizaron para calcular espectros de Fourier. Al seleccionar varias ventanas de registro para cada punto, permite obtener estimaciones más robustas del espectro de amplitudes de Fourier para cada punto.

Los resultados muestran variación en sus frecuencias dominantes de 1 a 15 Hz (1 a 0.07 s de periodo) y una amplificación relativa máxima promedio de hasta 25 veces. Sin embargo, estas amplificaciones han de tomarse con reserva debido a que se han reportado que las reales pueden ser mayores (Bard, 1999).

Los datos obtenidos varían desde 0.06 y hasta 1 s, siendo los periodos de 0.06 hasta 0.5 s los que predominan en la ciudad. Los periodos de 0.51 hasta 1 segundo se presentaron principalmente en el centro y otras zonas de la ciudad cercanas al río Sabinal y sus tributarios. Lo anterior es ocasionado por un mayor espesor de sedimentos deformables, material constitutivo menos denso constituido básicamente por arcillas expansivas, entre otros factores.

Finalmente, del análisis de estos puntos en la ciudad, donde se estimó el efecto de sitio, se presenta un mapa con la distribución espacial de este efecto que presenta dos zonas. En el mapa de la Figura 101 se ha dividido la ciudad en dos zonas, donde el periodo dominante (T_0) del suelo presenta valores de periodos desde 0.06 segundos y hasta 1 s (frecuencias de 15 y 1 Hz, respectivamente), en este rango se puede ubicar una zona de transición. En el mapa de la Figura 102, se muestra la amplificación relativa asociada, la cual varía desde 2 hasta 25 veces, en una distribución dispersa en toda la ciudad, pero encontrando tendencias debidas a características del suelo concentrándose la mayor amplificación en el centro y las partes cercanas al río Sabinal y sus tributarios.

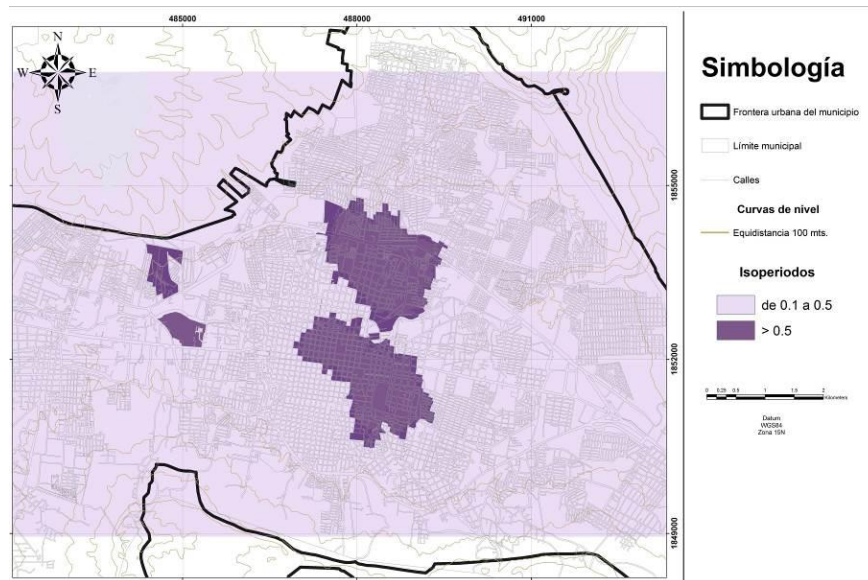


Figura 100. Zonificación de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez considerando el periodo fundamental.

Ninguna de las estaciones sísmicas de Tuxtla Gutiérrez está instalada en roca, para calcular las amplificaciones no se podía usar el método de la estación de referencia (SBSR), y como alternativa se aplicó el método HVSR. Se obtuvieron las razones espectrales H/V de ondas S (por ser la fase más energética).

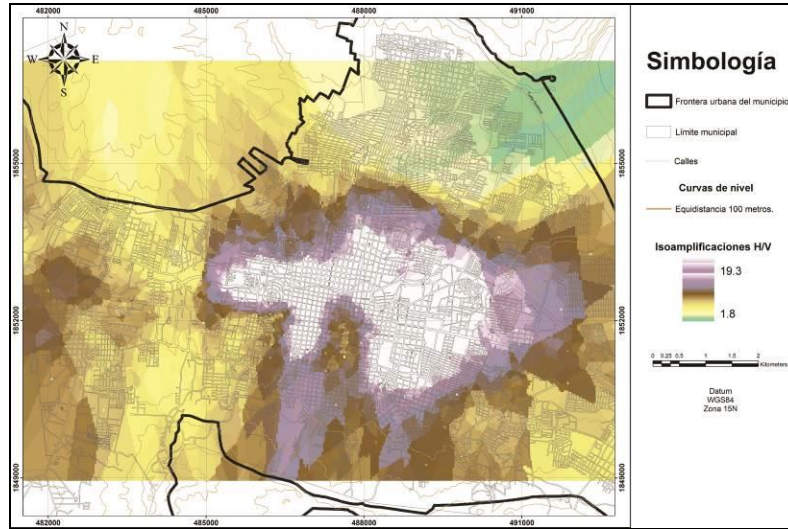


Figura 101. Mapa de amplificaciones relativas asociadas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

4.2.5.3. Determinación de la estructura de velocidades mediante el método de Autocorrelación Espacial (SPAC)

Los microtremores están conformados básicamente por ondas superficiales, y asumiendo que son estacionarios en el espacio y en el tiempo. Aki (1957) propuso el método SPAC, el cual tiene el propósito de obtener el modelo estructural de velocidades. Para ello se requiere registrar microtremores simultáneamente en por lo menos dos estaciones que conforman un arreglo instrumental equidistante. Tras procesar la información se obtiene la curva de dispersión de ondas Rayleigh, que posteriormente se usa para determinar la estructura de velocidades (Aguirre *et al.*, 2006). La metodología descrita por Aki (1957) considera un arreglo de estaciones dispuestas en forma de un triángulo equilátero inscrito en un círculo para la observación de microtremores.

El movimiento del suelo en dos localizaciones de la superficie (x, y) y $(x + \xi, y + \eta)$ pueden ser caracterizados como $u(x, y, t)$ y $u(x + \xi, y + \eta, t)$. Siendo la función de correlación espacial $\phi(\xi, \eta, t)$. Para el caso en dos dimensiones Aki (1957) la definió con la ecuación 23:

$$\phi(\xi, \eta, t) = \overline{u(x, y, t) \cdot u(x + \xi, y + \eta, t)} \quad (23)$$

donde $\bar{u}(t)$ es la media de la función $u(t)$ en el dominio del tiempo. Reemplazando (ξ, η) por las coordenadas polares, Aki (1957) demuestra que el promedio azimutal de la función de la correlación espacial puede expresarse como la ecuación 24:

$$\bar{\phi}(r) = \frac{1}{2\pi} \int \phi(r, \psi) d\psi \quad (24)$$

donde r y ψ son las coordenadas polares definidas por $\xi = r \cos \psi$ y $\eta = r \sin \psi$. Aki (1957) demostró que el promedio azimutal de la función de autocorrelación espacial $\phi(r)$ y la densidad de poder espectral $\Phi(\omega)$ del campo de ondas u , donde ω es la frecuencia angular y se relaciona como la ecuación 25.

$$\bar{\phi}(r) = \frac{1}{\pi} \int \Phi(\omega) J_0\left(\frac{\omega r}{c}\right) d\omega \quad (25)$$

donde J_0 es la función Bessel de orden cero. Para aplicarla al caso de dispersión de ondas, solo se requiere sustituir $c(\omega)$ por c . La densidad espectral se expresa conforme la ecuación 26:

$$\Phi(\omega) = P(\omega_0) \delta(\omega - \omega_0) \quad (26)$$

donde $P(\omega_0)$ es la densidad de poder espectral para la frecuencia ω_0 y la función Dirac es $\delta(\omega)$. En el caso del promedio azimutal de la función de correlación espacial puede escribirse como la ecuación 27 (Aki, 1957):

$$\bar{\phi}(r) \equiv \bar{\Phi}(r, \omega_0) = P(\omega_0) J_0\left(\frac{\omega_0 r}{c(\omega_0)}\right) \quad (27)$$

De acuerdo con lo establecido por Aki (1957) el coeficiente de autocorrelación está definido por la ecuación 28:

$$\rho(r, \omega_0) = \frac{\phi(r, \psi, \omega_0)}{\phi(0, \psi, \omega_0)} \quad (28)$$

Como $\rho(\omega)$ no depende de la posición, se escribe el promedio del coeficiente de autocorrelación espacial como en la expresión (29):

$$\rho(r, \omega_0) = J_0\left(\frac{\omega_0 r}{c(\omega_0)}\right) \quad (29)$$

El coeficiente SPAC $\rho(r, \omega)$ puede ser obtenido directamente en el dominio de la frecuencia usando la transformada de Fourier de los microtremores observados, de la siguiente forma (30):

$$\rho(r, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Re[S_{cx}(\omega, r, \theta)]}{\sqrt{S_c(\omega) \cdot S_x(\omega, r, \theta)}} d\theta \quad (30)$$

donde $Re[S_{cx}(\omega, r, \theta)]$ es la parte real de un valor complejo, $S_c(\omega)$ y $S_x(\omega, r, \theta)$ son los espectros de potencia de los microtremores en los sitios, C y X respectivamente, y

$S_{cx}(\omega, r, \theta)$ es el espectro cruzado (Cross spectrum) entre los dos sitios. Esta ecuación significa que los coeficientes SPAC son obtenidos por medio del promedio de una función de coherencia normalizada definida como co-espectro (co-spectrum) entre dos sitios con respecto a la dirección θ . La ecuación (30) puede ser obtenida directamente a partir de los microtemores observados usando técnicas como el método FFT. La velocidad de fase puede ser calculada para la frecuencia (ω) a partir del argumento de la función Bessel de la ecuación (29).

Yokoi y Margaryan (2008) presentaron una interpretación teórica del trabajo de Aki (1957) basada en la teoría de la interferometría sísmica. No obstante, los principales cambios que se han presentado en la propuesta original de Aki (1957) están en la libertad de los arreglos lineales tales como las Calicatas-SPAC que se presentan en este trabajo.

Método de Autocorrelación Espacial SPAC en Línea

Chávez-García *et al.* (2005) presentaron una extensión del método SPAC, donde las curvas de dispersión de velocidad de fase fueron obtenidas a partir de los registros de datos de un arreglo sísmico temporal con una geometría muy irregular. La diferencia básica con respecto al método propuesto por Aki (1957), fue el sustituir el promediado azimutal por el promediado temporal. Los buenos resultados obtenidos en ese trabajo condujeron a proponer arreglos de estaciones tan diferentes como fuera posible de un triángulo, por ejemplo una línea de estaciones (Chávez-García *et al.*, 2006). Los resultados permitieron liberar al método SPAC de las restricciones geométricas en la forma del arreglo usado a que estaba sujeto (Aguirre *et al.*, 2006).

Pese a esto todavía no se conocen las causas de la estabilidad de las correlaciones, o de qué factores dependen los valores de éstas. Falta investigar sobre la relación con la distancia, la litología, los posibles cambios en ésta, el tiempo, e incluso las condiciones meteorológicas existentes en el momento de la medición (Aguirre *et al.*, 2006).

No obstante que las mediciones hechas sólo con dos estaciones implican más cuidado y tiempo en el análisis de los datos, además de que se elimina la redundancia de los datos; tienen la gran ventaja de que sólo se requieren dos instrumentos para encontrar un modelo de velocidades a partir de registros de microtemores (Flores, 2004).

Por último, pese a que se considera que el uso de los microtemores puede ir más allá de sólo proporcionar información acerca de la frecuencia fundamental de un sitio, el análisis cuidadoso de los registros de microtemores y el uso de ciertos métodos puede llevar a información más completa acerca de la estructura de velocidades de un área de estudio. Además, es una herramienta de utilidad para completar los mapas de microzonificación en algunas ciudades del país (Flores, 2004).

Descripción de los sitios de estudio SPAC

El trabajo de campo se desarrolló en los meses de junio y julio de 2011 considerando diferentes arreglos SPAC. Los lugares donde se realizaron los arreglos SPAC son ocho

(Figura 103; Tabla 20). Adicionalmente, se incluyeron dos perfiles de velocidad de dos zonas de las que no se tenían datos. Estos perfiles fueron obtenidos de dos estudios de efecto de sitio desarrollados en el Hospital bicentenario, en la zona norte oriente (Aguilar *et al.*, 2009), y cerca de las instalaciones de Home Depot, zona sur poniente de la ciudad (Aguilar *et al.*, 2006).

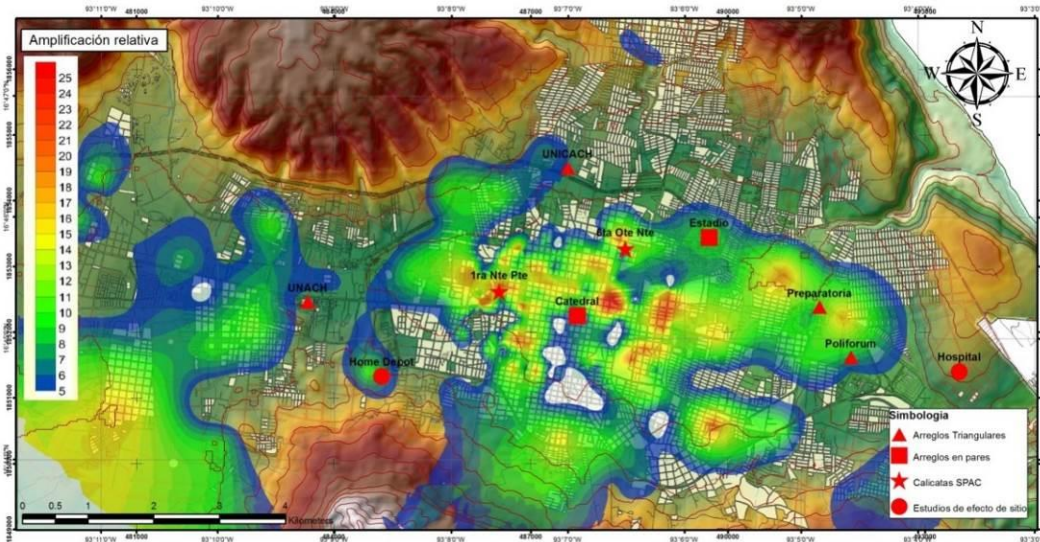


Figura 102. Ubicación de los sitios donde se desarrollaron estudios SPAC.

El interés por conocer la estructura de velocidades de estos sitios, se debió a que en cinco de los puntos se observaron daños estructurales asociados a efecto de sitio, de acuerdo con estudios anteriores (Narcía *et al.*, 2006; Piña, 2012). En tres de los sitios restantes (estacionamiento del estadio, Facultad de Ingeniería de la UNACH y cercanías de la Torre Chiapas) el propósito se debió a que era posible contar con espacio suficiente para hacer arreglos hasta de 400 m por lado de los triángulos equiláteros convencionales y correlaciones lineales, así como poder tener el perfil de velocidades de los dos puntos donde hay una estación acelerométrica fija UNICACH (ladera norte) y UNACH (centro poniente de la ciudad) (Figura 103; Tabla 20).

Tabla 20. Características de los estudios SPAC realizados en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Lugar	Tiempo de registro (min)	Tamaño y características del arreglo (m)
Ciudad Universitaria, UNICACH	30	5, 15, 30, 50 y 75
Preparatoria CETIS 138	30	5, 15, 30, 50, 75 y 100
Campo de futbol de la facultad de Ingeniería de la UNACH	30	5, 15, 30, 50 y 75
Polifórum, Chiapas	30	5, 15, 30, 50, 75 y 100
Calicatas-SPAC en 6 ^a Oriente Norte entre 12 y 13 Norte*	30	10 de 100 m lineales
Calicatas-SPAC en 1 ^a Norte Poniente entre 12 y 13 Poniente	30	5 de 100 m lineales
Estacionamiento del estadio de futbol Víctor Manuel Reyna	120	Pares de 50 y 70
Explanada de la Catedral de San Marcos	60	Pares 30 y 60

* En este punto se desarrollaron dos tipos de arreglos: Calicatas-SPAC y correlación lineal. El nombre de Calicatas proviene de la técnica usada con sondeos eléctricos y que permite construir perfiles.

Respecto al equipo de adquisición de datos, los registros se recopilan con dos consolas Kinematics, modelo Makalu de seis canales de 24 bits con sistema electrónico. A estos equipos se les conectó de manera externa un sensor triaxial marca EpiSensor modelo FBA ES-T, uno triaxial de velocidad marca Leennartz electronic LE-3Dlite MKII y una antena GPS. Para estudios SPAC el sensor de aceleración es opcional. En la Tabla 21 se presentan las características técnicas de la registradora y sensores empleados.

Tabla 21. Especificaciones técnicas de la registradora y sensores empleados.

Registradora: Kinematics Makalu	
Canales para sensores	Seis
Ganancia	Selección del usuario x2, x6, x20, x60 y x200
Rango dinámico	>130 dB a 200 sps
Frecuencia de respuesta	DC 80 Hz a 200 sps
Modos de adquisición	Continua o por disparo
Formato de salida	24 bits (3 bytes)
Temperatura de operación	Desde -20° hasta 70° C (de 0° a 160° F)
Humedad	0-100%
Sensor de aceleración: EpiSensor FBA ES-T	
Rango dinámico	155 Db
Ancho de Banda	Hasta 200 Hz
Rango de escala completa	Seleccionada por el usuario: ± 0.25 g, ± 0.50 g, ± 1 g, ± 2 g y ± 4 g
Salidas	± 2.5 V y ± 10 V (terminal única) y ± 5 V y ± 10 V (diferencial)
Linealidad	$< 1000 \mu\text{g/g}^2$
Histéresis	< 0.1 % de la escala completa
Consumo de energía	12 mA \pm 12 V (amperaje estándar), 35 mA \pm 12 V (amperaje de bajo ruido)
Temperatura de operación	Desde -20° hasta 70° C (de 0° a 160° F)
Sensor de velocidad: Leennartz electronic LE-3Dlite MKII	
Rango dinámico	136 Db
Ancho de Banda	Hasta 100 Hz
Amortiguamiento	0.707 del crítico
Salidas	± 2.5 V y ± 10 V (terminal única) y ± 5 V y ± 10 V (diferencial)
RMS Ruido	< 3 nm/s
Consumo de energía	12 mA \pm 12 V (amperaje estándar), 35 mA \pm 12 V (amperaje de bajo ruido)
Temperatura de operación	Desde -15° hasta 60° C (de 10° a 140° F)

Resultados de la técnica SPAC y Calicatas-SPAC

Se obtuvieron registros de 3,600 segundos de grabación a 100 muestras por segundo en cada triángulo equilátero en que se midieron simultáneamente en las estaciones ubicadas en los vértices (Figura 104). Para un tiempo de grabación de 60 minutos se tomaron ventanas de 60 segundos, por lo tanto se cuenta con 90 espectros de potencia en cada vértice del triángulo equilátero.

Una vez obtenidos los registros, solo se tomó la componente vertical y se filtraron las señales con el software Matlab, utilizando un filtro ventana Von Hann pasa bajas de 100 muestras por segundo con frecuencia de corte de 50 Hz. Una vez filtradas las señales, se utilizó en el software Geopsy, el cual tiene una herramienta para procesar con la técnica de SPAC, donde se introducen los parámetros: frecuencia de muestreo, componente y

coordenadas espaciales. Una vez reconocida la señal, se procede a correlacionar los puntos a través de los anillos generados por el software Geopsy.



Figura 103. (a) Arreglo de Calicatas-SPAC en la avenida 1ª Norte entre 12 y 13 Poniente; (b) Arreglo SPAC en el campo de futbol de la facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas.

Posteriormente se obtienen las correlaciones entre pares de estaciones, donde se verificó que la forma de las funciones de correlación observadas se asemejara a las funciones Bessel de primera especie y orden cero (Figura 105), condición que debe cumplirse para obtener resultados confiables (Campillo, 2006). El promedio de las correlaciones de las 90 ventanas de cada triángulo permite estimar el coeficiente de autocorrelación y el primer cruce de esta función por cero es la frecuencia de interés para cada triángulo.

Se relacionó el coeficiente de autocorrelación con la función Bessel, en cuyo argumento aparece la dependencia de la velocidad de fase de las ondas Rayleigh con la frecuencia. A partir de los coeficientes de autocorrelación se obtiene la variación de la velocidad de fase en función de la frecuencia de las estaciones de cada triángulo. Se calcularon tres curvas de velocidad de fase para cada triángulo, las cuales representan el promedio y su correspondiente desviación estándar (superior e inferior). Con las velocidades de fase definidas se construye la curva de dispersión de cada arreglo, con las que es posible obtener la ley de velocidades en el sitio estudiado.

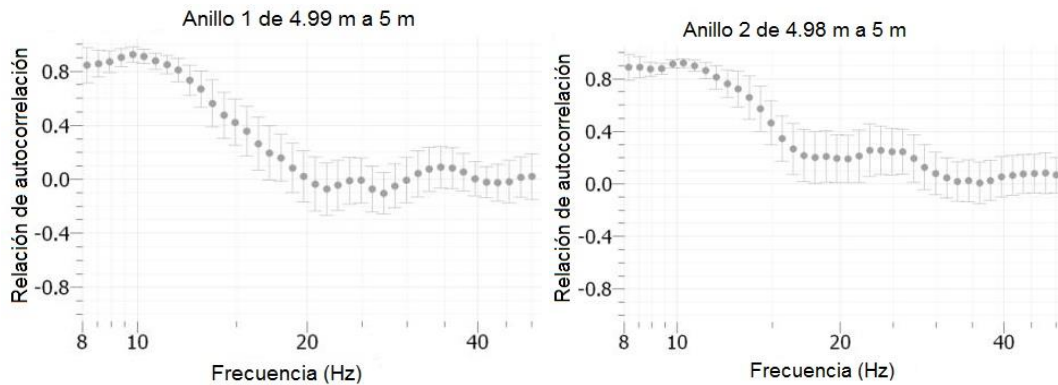


Figura 104. Coeficiente de autocorrelación para un arreglo de 5 m.

Posteriormente, se obtiene la curva de dispersión a partir de la curva de autocorrelación, para después invertir la curva teniendo un modelo inicial del modelo estratigráfico del sitio estudiado. Después se invierte la curva de autocorrelación, obteniendo un perfil de velocidades de ondas de compresión (V_p) y de cizalla (V_s). En la Figura 106, se muestra la curva de dispersión para el modelo obtenido de la inversión de la curva de autocorrelación, donde el desajuste corresponde al margen de error del ajuste de la curva de dispersión.

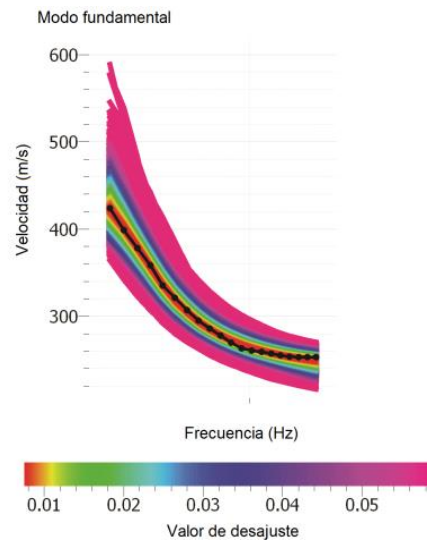


Figura 105. Curva de dispersión para el modelo obtenido de la inversión.

Utilizar varios arreglos del mismo tamaño, recorridos en forma lateral sobre una línea, nos permitió generar perfiles que muestran la variación lateral de las propiedades elásticas y espesores de los estratos.

Las Figuras 107 y 108 muestran los resultados obtenidos realizando las Calicatas-SPAC.

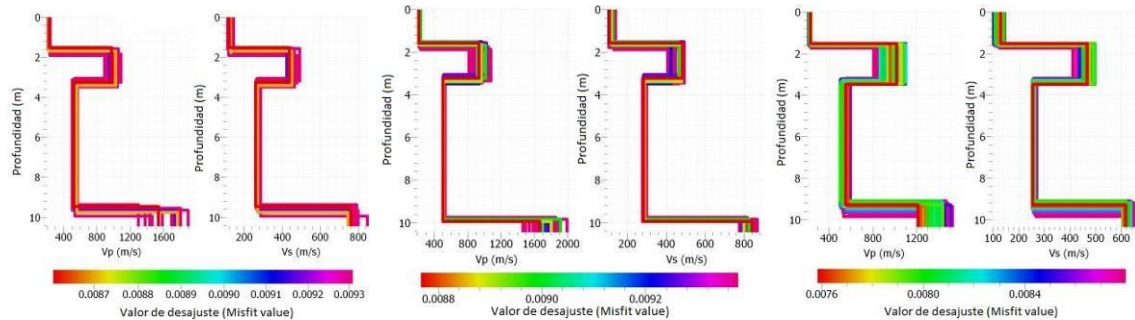


Figura 106. Perfil de velocidades para los arreglos de las Calicatas-SPAC en la avenida 1ª Norte entre 12 y 13 Poniente, V_p (izquierda) y V_s (derecha).

En la Figura 107 se despliega el conjunto de perfiles de velocidad para cada arreglo de las Calicatas-SPAC, para las ondas de compresión (V_p) y de cizalla (V_s) del punto estudiado.

En la Figura 108 se presenta una tomografía de las velocidades V_p (Figura 108a) y V_s (Figura 108b) considerando los arreglos realizados en la zona.

El perfil de velocidades obtenido con cada arreglo SPAC, se correlacionó con el perfil geotécnico elaborado (Figura 33), considerando al menos 40 estudios de mecánica de suelos a lo largo de la mancha urbana, como los presentados por Ordóñez (2008).

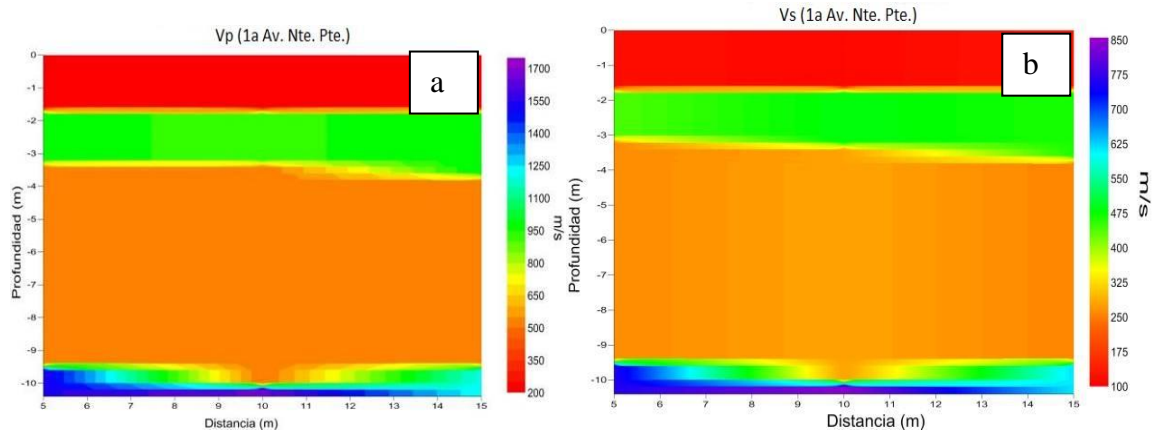


Figura 107. Tomografía para el perfil de velocidades para los arreglos de las Calicatas-SPAC en la avenida 1ª Norte entre 12 y 13 Poniente, (a) V_p ; (b) V_s .

Las Calicatas-SPAC permitieron generar perfiles que muestran la variación lateral de las propiedades elásticas y espesores de los estratos en la zona del centro de la ciudad, no obstante que solo se emplearon en dos sitios. El empleo de éstas permitió descartar la presencia de paleocanales en dos sitios estudiados y ubicar el basamento ingenieril (estrato donde se superan las velocidades de onda S de 720 m/s) a 8 m de profundidad. En la Figura 109 se sintetizan la ubicación y los perfiles de velocidad V_p y V_s de seis de los arreglos SPAC realizados.

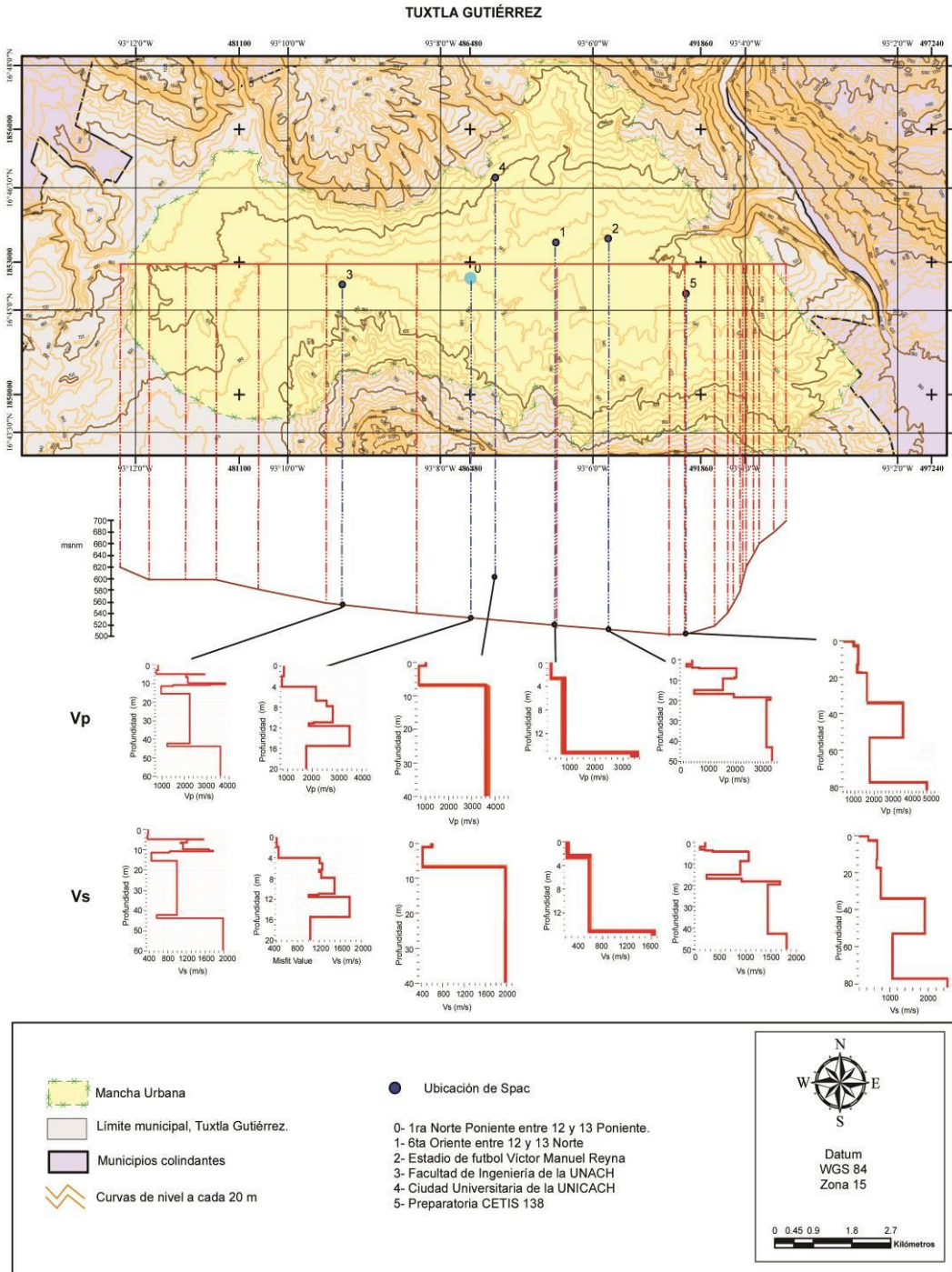


Figura 108. Perfiles de velocidad V_s y V_p , obtenidos en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Análisis y discusión de resultados de la técnica SPAC

Las gráficas mostradas en la Figura 110, presentan la superposición de los perfiles de velocidades realizados y en ellas se observan, de manera global, los tipos de perfiles en que se puede clasificar el comportamiento sísmico de la ciudad y su correlación con las

amplificaciones relativas reportadas (González *et al.*, 2013). Para la construcción de las gráficas se emplearon los perfiles de los ocho arreglos SPAC. Las profundidades alcanzadas dependen de las características de las longitudes propias del arreglo, así como de las propiedades de los sensores.

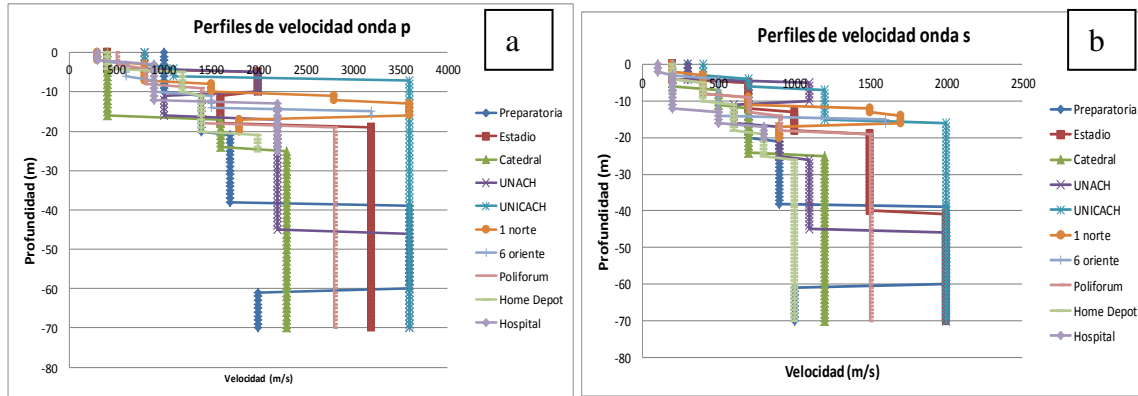


Figura 109. (a) Perfiles de velocidades V_p ; (b) Perfiles de velocidades V_s , obtenidos en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Para evaluar el peligro sísmico, considerando los efectos de sitio, se empleó el software PRODISIS versión 2 del Manual de Obras Civiles de CFE (2008) el cual permite obtener un espectro de diseño en roca para peligro uniforme. Adicionalmente, se puede introducir el perfil de velocidad V_s para considerar los efectos de sitio. Cabe mencionar que este manual de diseño sísmico es empleado en el estado de Chiapas al carecer éste de normas técnicas complementarias al reglamento de construcción.

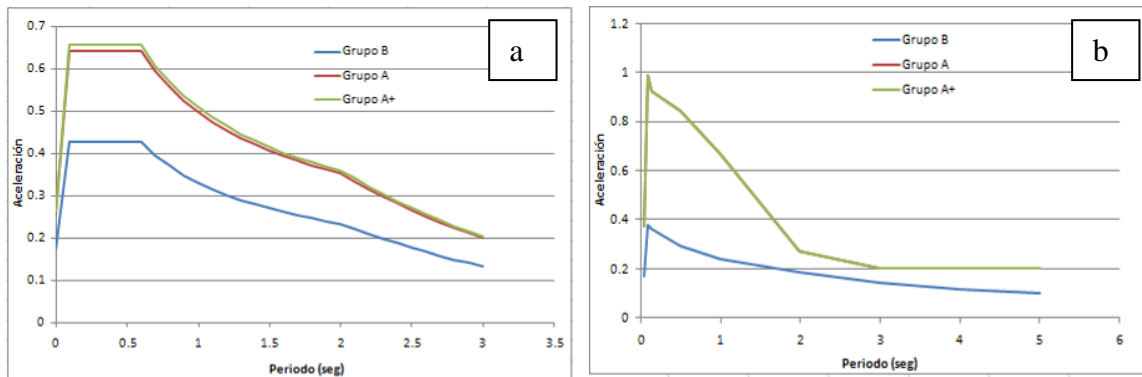


Figura 110. (a) Espectros de diseño en roca; (b) Espectros de diseño de peligro uniforme, respectivamente, obtenidos con datos del programa PRODISIS 2.0 (CFE, 2008).

Mediante la metodología de PRODISIS se generan los espectros de roca y espectros de peligro uniforme considerando periodos de retorno de 50 años (grupo *B*), 100 años (grupo *A*) y 475 años (grupo *A+*), los cuales se consideran para tres grupos de construcciones, con base en su importancia (*B* edificaciones comunes, *A* edificaciones importantes, *A+* edificaciones esenciales). En la Figura 111 se observa que para el grupo de importancia *A*

y el grupo A+ no es considerable la diferencia del espectro para roca y es el mismo espectro de peligro uniforme.

Para conocer el efecto de sitio se introduce en el software de CFE-2008 el perfil promedio de velocidades de la zona centro, obteniendo así un espectro de diseño que incluye el efecto de sitio. En la Figura 112 se observa que al incluir el efecto de sitio los espectros de diseño obtenidos con PRODISIS presentan amplificaciones del orden del 45%.

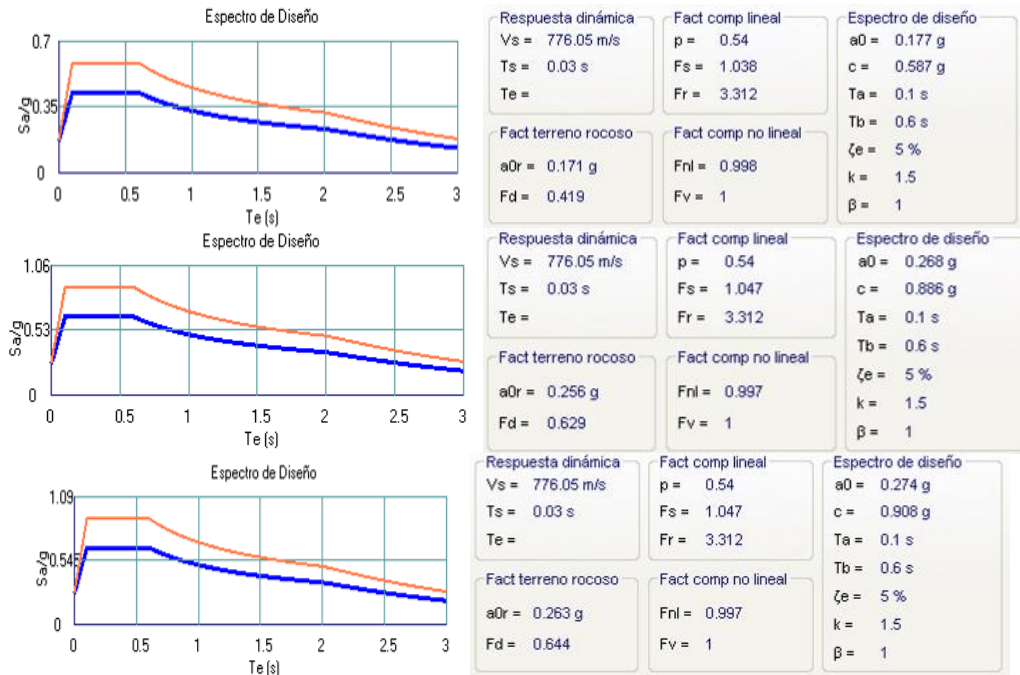


Figura 111. Espectros de diseño en roca considerando el efecto de sitio y la importancia estructural: B, A y A+, respectivamente, con el programa PRODISIS 2.0 (CFE, 2008).

El basamento ingenieril, o suficientemente rígido para la cimentación de construcciones, se encuentra en los puntos que rebasan las velocidades de 720 m/s, los cuales se asocian con profundidades de 6 a 10 m en promedio en los sitios donde se realizaron los estudios (salvo en 6ª oriente y catedral, en el centro, y Home Depot, en la ladera sur, que alcanzan hasta 30 m). La región donde se concentraron los daños importantes de acuerdo a los reportes de sismos históricos en la ciudad, el basamento ingenieril tiene profundidades de entre 10 y 20 m.

No obstante que PRODISIS permite la determinación del peligro sísmico a través de un espectro de diseño que incluye efectos de sitio, se observa que la forma del espectro es muy conservadora debido a que el efecto de sitio lo amplifica de igual manera a lo largo de prácticamente todo el espectro de diseño y no se concreta con mayor énfasis en la zona del periodo natural de vibración del suelo.

Realizando una correlación entre los distintos perfiles Vs, considerando la profundidad en que esta velocidad alcanza el basamento ingenieril (720 m/s) y normalizando este valor con respecto al punto más rígido entre las mediciones realizadas, se encuentra que las instalaciones de la UNICACH (en el libramiento norte poniente) alcanzan dicho basamento a 6 m de profundidad. Con base en esto desarrollamos la Tabla 22 y la Figura 113, donde se correlaciona espacialmente esta normalización.

Tabla 22. Estudios SPAC y su relación con las propiedades dinámicas del suelo en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Lugar	Periodo (s)	Amplificación relativa H/V	Normalización $H / V_{s=720 \text{ m/s}}$
Ciudad Universitaria, UNICACH	0.2	2	1.0
Preparatoria CETIS 138	0.8	11	3.3
Campo de futbol de la facultad de Ingeniería de la UNACH	0.5	4	2.8
Polifórum, Chiapas	0.3	8	3.5
Calicatas-SPAC en 6ª Oriente Norte entre 12 y 13 Norte*	0.6	16	2.4
Calicatas-SPAC en 1ª Norte Poniente entre 12 y 13 Poniente	0.6	14	2.1
Estacionamiento del estadio de futbol Víctor Manuel Reyna	0.7	10	2.9
Explanada de la Catedral de San Marcos	0.6	8	2.4
Hospital de especialidades Bicentenario	0.4	4	2.8
Home Depot Libramiento Sur Poniente	0.3	7	3.4

* En este punto se desarrollaron dos tipos de arreglos SPAC: Calicatas-SPAC y correlación lineal.

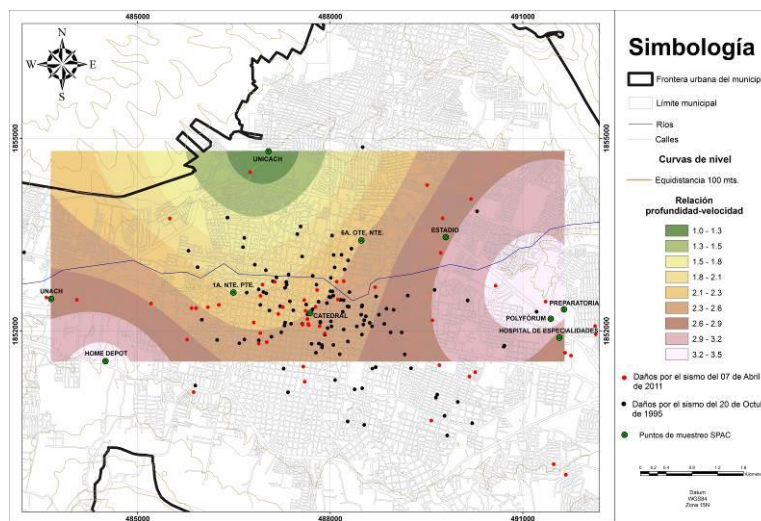


Figura 112. Relación normalizada de la velocidad de corte hasta (720 m/s) respecto a la profundidad donde esta es alcanzada, considerando el punto más rígido (UNICACH).

En la Figura 113 se observa que existe correlación entre los daños y las amplificaciones obtenidas para los casos donde los daños se ubican en la zona localizada entre los rangos 2-3 de la normalización, mismo que corresponden a profundidades entre 12 y 18 m. Estas profundidades son características de estratos saturados de arcillas expansivas (Ordóñez, 2008) y/o depósitos de sedimentos de baja consolidación, recordando que donde se concentran los daños es en el primer cuadro de la ciudad, área donde se concentraron

hasta siete afluentes del río Sabinal, los cuales han sido embovedados, desviados o secados y rellenados para el crecimiento de la mancha urbana.

Asimismo, se asume que el daño que sufre una edificación por las ondas de un sismo depende en gran parte del tipo de terreno sobre el cual está construida y de los materiales empleados para su construcción (Garduño *et al.*, 2009), por lo que el efecto de sitio contribuye a los daños, además de las características de las construcciones que fueron dañadas.

Finalmente, de acuerdo con los estudios desarrollados podemos concluir que la técnica de Calicatas-SPAC es útil para determinar perfiles de velocidad en zonas donde sea complicado realizar perfiles más grandes. Adicionalmente, permite evaluar la presencia de paleocanales o irregularidades geotécnicas que sean causantes del efecto de sitio.

4.2.5.4. Efecto de sitio empleando sismos reales en Tuxtla Gutiérrez

Un elemento clave para valorar la importancia de la microzonificación sísmica, es determinar el efecto de sitio y los niveles de amplificación en cada parte de la ciudad, esto queda de manifiesto al evaluar mediante sismos y no solo con ruido ambiental las amplificaciones relativas en diversas partes de la ciudad. Para ejemplificar esta circunstancia se desarrolla el análisis del sismo sucedido el 7 abril del 2011 con una magnitud 6.7 a 83 km de distancia de las Choapas, Veracruz, a una profundidad 167 km (datos tomados de <http://www.ssn.unam.mx/>). Este movimiento fue captado en Tuxtla Gutiérrez en dos sitios: Las instalaciones de la escuela de ingeniería ambiental de la UNICACH (libramiento norte poniente) y en la Facultad de Ingeniería de la UNACH (en la zona del valle en el poniente de la ciudad). En la Figura 114 se muestra el lugar de estas dos estaciones acelerográficas.

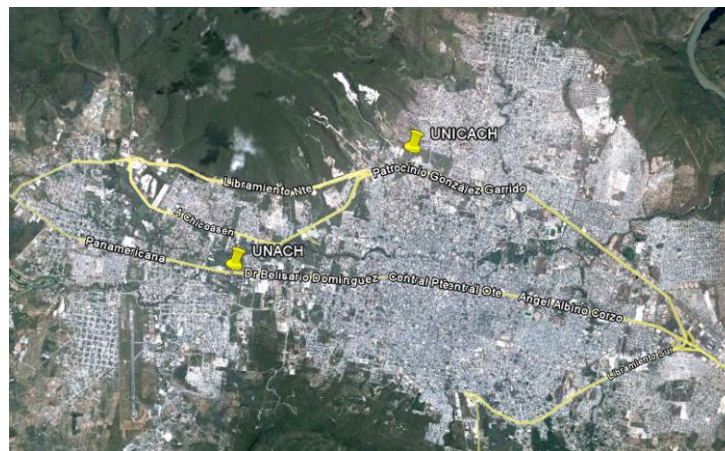


Figura 113. Ubicación de los acelerógrafos fijos de la escuela de Ingeniería ambiental de la UNICACH y la facultad de Ingeniería de la UNACH.

La Figura 115 muestra los acelerogramas obtenidos en estos dos lugares durante el sismo. Los acelerogramas al estar a la misma escala muestran que existe una amplificación del movimiento en la estación acelerográfica de la UNACH con respecto a la UNICACH. La

Tabla 23 indica las aceleraciones máximas en cada dirección de los acelerogramas y las amplificaciones relativas normalizando en torno a la señal correspondiente de la UNICACH, en la cual se resume que la aceleración máxima presentada en la estación de la UNICACH es de 48 gal en dirección N-S y para la estación UNACH en la misma dirección N-S tiene una aceleración máxima registrada de 115 gal. Al realizar un comparativo entre estas aceleraciones, indica que para la estación de la UNACH la aceleración es aproximadamente 2.4 veces con respecto a la UNICACH para esa componente y 4.23 para la vertical.

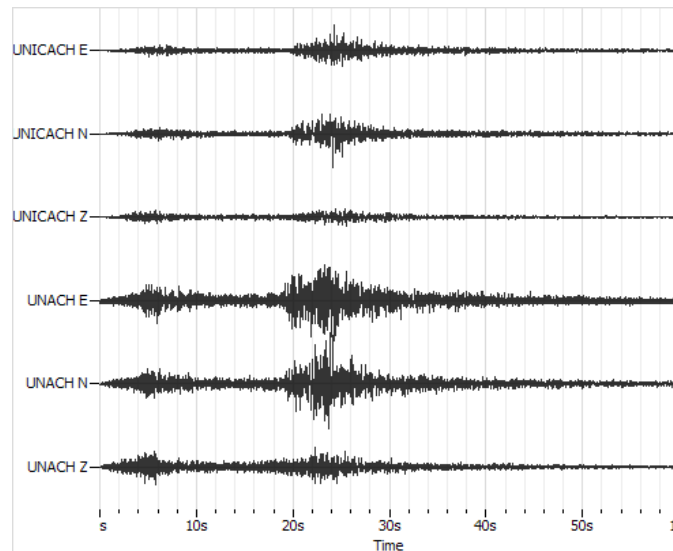


Figura 114. Acelerogramas del sismo del 7 de abril de 2011 se encuentran en la misma escala, los tres primeros registros corresponden a la UNICACH y los tres siguientes a la UNACH (Piña, 2012).

Tabla 23. Datos de los acelerogramas del sismo registrado el 7 de abril de 2011 en dos estaciones.

Lugar	Dirección	Aceleración Máxima (gal)	Nivel de amplificación relativa
UNICACH	E-O	38	1.00
	N-S	48	1.00
	V	13	1.00
UNACH	E-O	102	2.68
	N-S	115	2.40
	V	55	4.23

Los acelerogramas obtenidos en dos diferentes puntos del mismo evento sísmico, tras realizar el cociente espectral H/V, indica que en la señal de la UNICACH se observa un pico predominante en las frecuencias de 8.5 Hz con una amplitud relativa de 4. Para la relación H/V de la UNACH el pico predominante lo observamos en la frecuencia de 3.5 Hz con una amplificación relativa de 7. En la Figura 116 se muestran las dos curvas de cocientes espectrales H/V. Este procesamiento es similar al realizado para los microtremores, con la variante de que en estos cocientes espectrales H/V solo se analizó paquete de ondas S.

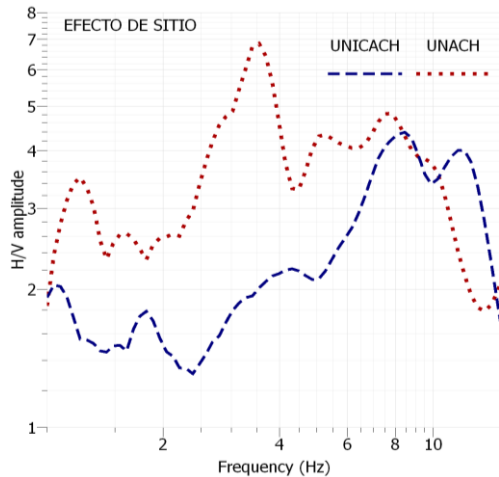


Figura 115. Gráfica de cocientes espectrales H/V en dos sitios de la ciudad para el sismo del 7 de abril de 2011. La línea azul corresponde a la UNICACH, la línea roja a la UNACH (Piña, 2012).

Comparando los cocientes espectrales H/V del sismo con respecto a los cocientes espectrales H/V obtenidos de registro de microtremores, como se muestra en la Figura 117 no varían el comportamiento de los cocientes espectrales H/V e indican aproximadamente el periodo fundamental de vibración del suelo, con respecto a las amplificaciones.

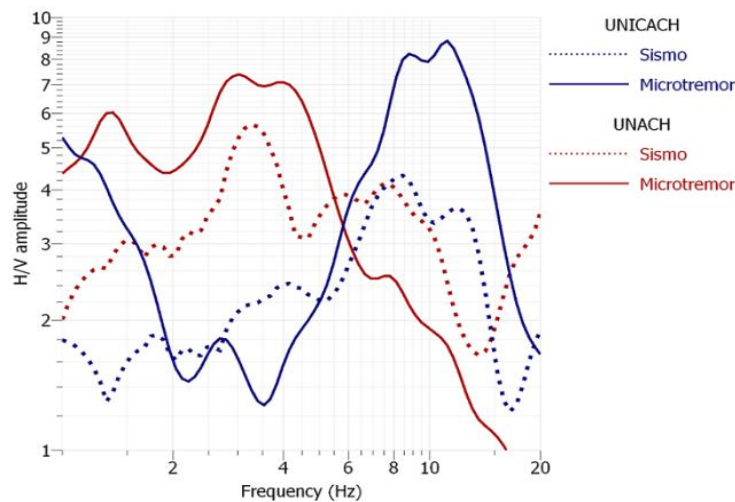


Figura 116. Gráficas de H/V de microtremores (línea continua) y sismo (línea discontinua) (Piña, 2012).

Los microtremores presentan mayor amplificación relativa que las obtenidas con movimientos fuertes. Esto puede ser debido a varios factores, al nivel de ruido en el que se encontraba expuesto el sensor, la hora de tomar las mediciones, el lugar de posicionamiento del sensor, que en el caso de los microtremores fue en pavimento, y las condiciones y características del suelo donde se registraron los eventos y el registro del sismo y los microtremores.

4.2.6. Análisis del peligro sísmico considerando la metodología de Crisis (2007)

Los antecedentes del software Crisis (2007, versión 5.2), corresponden al Software Peligro Sísmico en México (PSM), versiones desde 1996, hasta 2004, a partir de este software se empleaban mapas de peligro que en términos de periodo de retorno de aceleraciones (tiempo medio, medido en años, que tarda en repetirse un sismo con el que se exceda una aceleración dada).

Crisis (2007) permite realizar un modelo probabilístico de Poisson, para lo cual se requiere conocer las siguientes características sísmicas de cada una de las fuentes:

- M_o . Magnitud mínima.
- $\lambda(M_o)$. Tasa de excedencia de magnitud M_o , en unidades [sismos/año].
- La esperanza del parámetro β de la fuente.
- Coeficiente de variación del parámetro β .
- Valor esperado de la magnitud máxima de la fuente.
- Desviación estándar de la máxima magnitud.
- M_1 . Límite inferior. Mínimo valor posible para la magnitud máxima.
- M_2 . Límite superior. Máximo valor posible para la magnitud máxima.

Los parámetros de magnitud mínima, tasa de excedencia, esperanza y coeficiente de variación de β son determinados a partir del cálculo de la ley Gutenberg–Richter para cada fuente. La magnitud máxima en tanto, se establece como el máximo terremoto que pudiera ocurrir en cada fuente. Es decir, una magnitud 7.7 para sismos intraplaca oceánica, 8.0 para sismos interplaca y 7.0 para sismos corticales.

Para el municipio de Tuxtla Gutiérrez se procedió a la digitalización de los diferentes mapas de valores de aceleraciones sísmicas esperadas para los distintos periodos de retorno obtenidos mediante el programa Crisis (2007). Los mapas elaborados por medio de este programa son definidos para un suelo rocoso con impedancia acústica (sísmica) favorable, es decir, sin amplificación de efecto de sitio. Los mapas obtenidos se presentan en la Figura 118 (a) $T_R=10$, (b) $T_R=100$, (c) $T_R=475$ y (d) $T_R=2,500$.

Estos mapas son esenciales para la comprensión de las aceleraciones máximas esperadas en un período de retorno dado, el cual se asocia a la probabilidad de falla en el periodo de la vida útil de la construcción; 10 años corresponden a construcciones eventuales; 50 años son viviendas y edificaciones habitacionales convencionales; 100 años estructuras importantes, hospitales, escuelas, estaciones de bomberos, de policía, de protección civil; 475 años estructuras muy importantes como puentes, museos que contienen el patrimonio histórico de la ciudad o del estado, etc., y 2,500 años estaciones nucleares, presas hidroeléctricas.

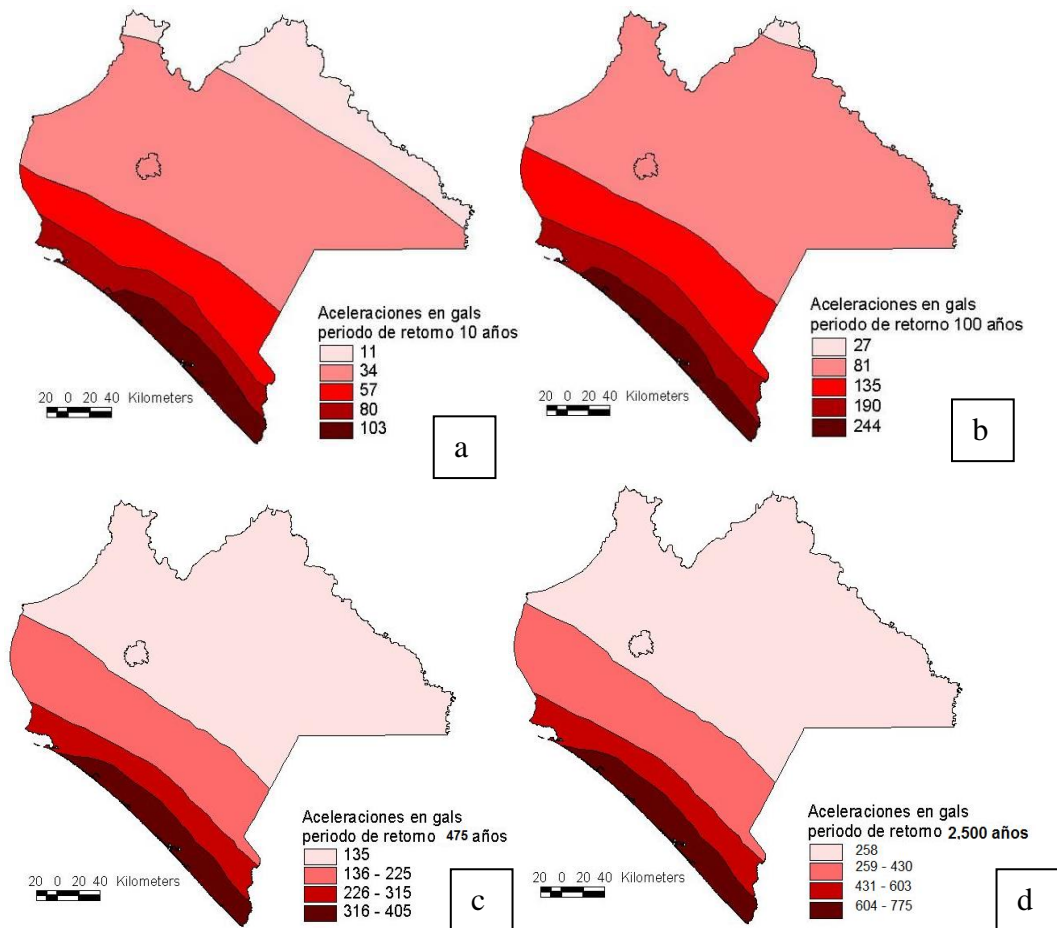


Figura 117. Mapa de aceleración sísmica asociados a un periodo de retorno de (a) 10, (b) 100, (c) 475 y (d) 2,500 años para Tuxtla Gutiérrez (Crisis, 2007).

La importancia de una edificación está definida por la necesidad de esa edificación después de un siniestro, o el daño secundario que causaría a la ciudad o a otras construcciones el que la primera no estuviera operando después de la ocurrencia del sismo o que su operación fuera disminuida por los daños generados no solo en su estructura, sino en sus contenidos.

4.2.7. Análisis del peligro sísmico considerando la metodología de SGM

Empleando SIG con una correlación línea basada en el modelo de “kriging” y la SGM (2005a; Figura 119) y considerando la base de datos del SSN (1974-2012) se propone un mapa de Intensidades sísmicas calculadas en la escala Mercalli (Esteva y Rosenbleuth, 1964). Para la el análisis de la intensidad sísmica se emplea la ecuación 31:

$$I=8.16+1.45M-2.46 \log_{10}(F) \quad (31)$$

donde I es la intensidad en la escala de Mercalli, M es la magnitud en la escala Richter (Richter, 1958) y F es la profundidad del foco sísmico en kilómetros (Lomnitz, 1974).

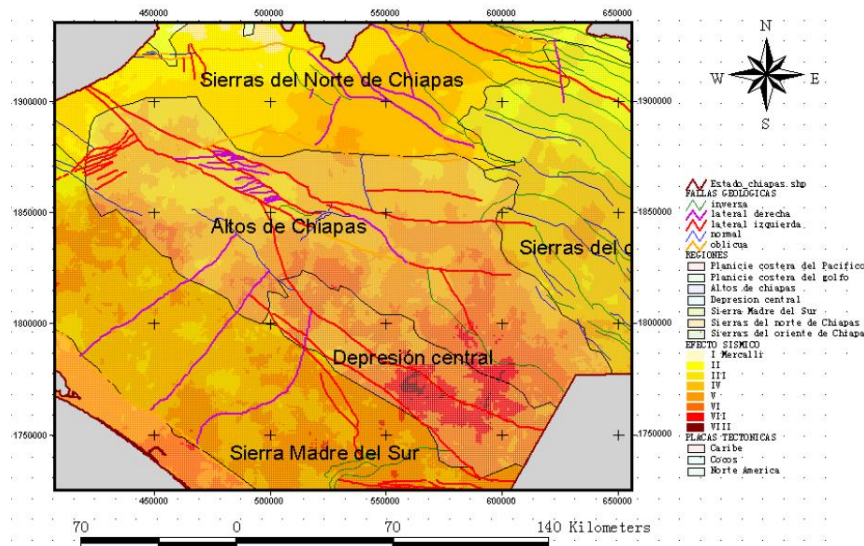


Figura 118. Efecto sísmico en la región central (Altos de Chiapas) con intensidades de VI a VIII de la escala IMM (Modificado de SGM, 2005a).

El modelo de intensidad resultante (Figura 119) muestra que los valores más altos en la escala de Mercalli, entre VI y VIII grados, se presentan en la porción central del estado (donde se ubica Tuxtla Gutiérrez), en las regiones Altos de Chiapas y Depresión Central, lo que sugiere que en estas regiones la disipación de energía sísmica es alta. También se observa que la región comprendida entre Mapastepec y Motozintla ocurre una concentración de valores altos de intensidad, así como en el extremo sur de la Sierra Madre del Sur, debido a la actividad del sistema de fallas Polochic-Motagua. Lo anterior demuestra que los sismos intraplaca son importantes, así como los interplaca para definir el peligro sísmico del estado tal como ocurrió en las otras metodologías.

4.2.8. Espectros de diseño propuestos para Tuxtla Gutiérrez

Los espectros de diseño se pueden obtener a partir de manuales, normas o reglamentos de construcción, leyes de atenuación espectral o espectros de sitio; y se representan graficando los periodos de vibrar en las abscisas en segundos y las aceleraciones en las ordenadas. En Tuxtla Gutiérrez, tradicionalmente los espectros de respuesta se han tomado del MOC-CFE-1993, lo anterior debido a la falta de estudios y por la sencillez de aplicación de la propuesta de Comisión Federal de Electricidad (Figura 120).

Los tipos de suelo, identificados en el municipio (I, II y III) corresponden a terreno firme, de transición y blando, respectivamente, y para el área en estudio corresponden a lo mostrado en la Figura 121:

- Zona I – Estrato firme compuesto por rocas calizas;
- Zona II – Depósitos de suelos constituidos por estratos de limos y arcillas de consistencia firme;
- Zona III – Depósitos de suelos arcillosos muy plásticos.

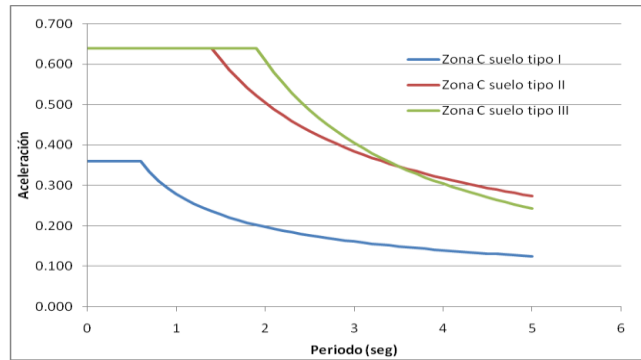


Figura 119. Espectros de diseño en el rango del periodo para el municipio de Tuxtla Gutiérrez (CFE, 1993).

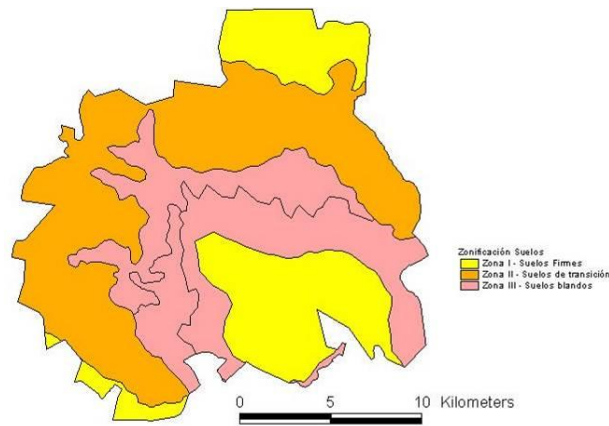


Figura 120. Zonificación de suelos propuesta para Tuxtla Gutiérrez.

El trabajo desarrollado para obtener la microzonación sísmica de 1995 por Alonso *et al.* (1999), produjo un solo espectro para suelo firme con amortiguamiento del 5.0% y con un coeficiente sísmico de 0.60, el cual difiere de las propuestas desarrolladas para Tuxtla Gutiérrez. En la Figura 122 se presenta una comparación de los espectros de diseño obtenidos en cada uno de los estudios y en la Tabla 24 los coeficientes sísmicos propuestos.

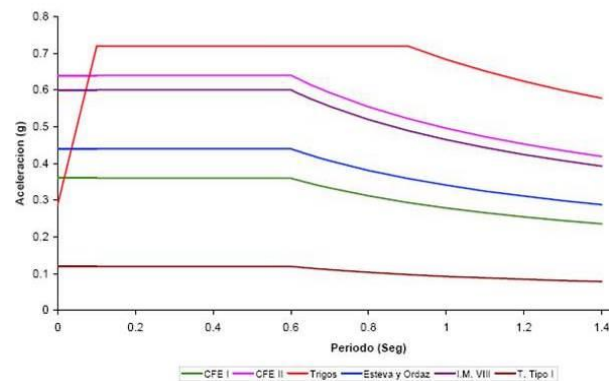


Figura 121. Espectros de diseño propuestos en estudios para Tuxtla Gutiérrez (González *et al.*, 2011b).

Tabla 24. Coeficientes sísmicos propuestos por diversos estudios con un amortiguamiento crítico del 5% (González *et al.*, 2011b).

Autor de la propuesta	Coefficiente sísmico (c)
MOC-CFE Grupo B (2008)	0.42
MOC-CFE Grupo A (2008)	0.64
MOC-CFE Grupo A+ (2008)	0.66
Alonso <i>et al.</i> (1999) (IMM VIII)	0.60
Trigos (1998)	0.72
Reglamento Tuxtla Gutiérrez suelo tipo I (1995)	0.12
Reglamento Tuxtla Gutiérrez suelo tipo II (1995)	0.24
Reglamento Tuxtla Gutiérrez suelo tipo III (1995)	0.36
MOC-CFE suelo tipo I (1993)	0.36
MOC-CFE suelo tipo II (1993)	0.64
MOC-CFE suelo tipo III (1993)	0.64
Esteva y Ordaz (1988)	0.44

Espectros de diseño del MOC-2008 convergen al desplazamiento máximo del terreno para periodos largos y se reducen por cada uno de los conceptos que se han distinguido como relevantes en el diseño sismoresistente más actualizados, como son ductilidad (Q y Q'), sobrerresistencia (R), redundancia (ρ) y comportamiento degradante (A_{cd}). Al presentar una opción de espectro de diseño sísmico que transparenta el uso de estas propiedades de los sistemas estructurales, se proponen como los ideales para las normas técnicas de Tuxtla Gutiérrez una vez obtenido los espectros de respuesta de los sismos máximos probables. En la Figura 123 se presentan los espectros de diseño comparativamente contra los máximos escenarios obtenidos de las Funciones de Green empíricas.

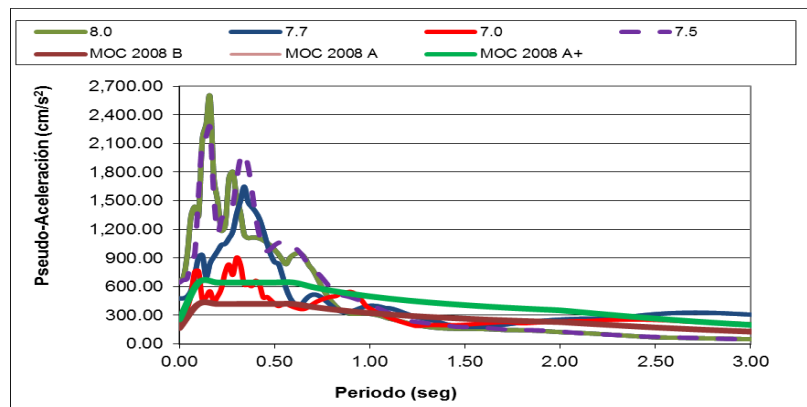


Figura 122. Espectros de respuesta propuestos en este estudio.

4.2.9. Discusión

Sí bien la peligrosidad obtenida fue dispar entre las distintas metodologías CRISIS (135 gales) y PRODISIS (258 gales), con las funciones de Green empíricas se obtuvieron las mayores aceleraciones (589 gales). Se puede señalar en lo general con los datos aportados por esta tesis, no obstante las incertidumbres, se reconoce la alta posibilidad de que en el

estado se presente un sismo de magnitud 8.0 para un periodo de retorno de aproximadamente 475 años y un sismo de 7.7 para un periodo de retorno de 100 años, en ambos casos Tuxtla Gutiérrez tendría daños importantes. La magnitud propuesta es similar a las que se proponen para el estado de Chiapas Zúñiga y Wyss (2001) y Guzmán (2013).

Un aspecto importante que permitió las diferencias de aceleraciones tan determinantes entre las tres metodologías empleadas fue el que CRISIS y PRODISIS obtienen aceleraciones en roca, de considerar el factor amplificación asociado al efecto de sitio aumentarían considerablemente (tan solo en el sismo del 7 de abril de 2011, se encontraron diferencias entre las dos estaciones fijas con las que se contaba de hasta 3 veces). Se identificó que el efecto de sitio es determinante para la generación de daños históricos en la ciudad, lo cual se encontró tras analizar los daños de los sismos del 23 de septiembre de 1902, 21 de octubre de 1995 y 7 de abril de 2011.

A continuación se enuncian algunos de los elementos que deben ser atendidos para evaluar el peligro sísmico con mayor precisión no solo para la capital sino para todo el estado.

Un elemento a considerar que no fue explorado en este trabajo es la hipótesis del Graven de Tehuantepec ya que de acuerdo con Zúñiga y Wyss (2001) se ha determinado que en las brechas sísmicas es donde se encuentran las mayores probabilidades de generarse sismos intensos, ya que indican la acumulación de energía o tensión elástica, los tres brechas más importantes del país son:

- La Brecha de Guerrero (cerca de 100 años de acumulación de energía elástica),
- La Brecha de Jalisco (aproximadamente 70 años) y,
- La Brecha de Chiapas (Tehuantepec) (con más de 300 años).

Estas regiones se denominan brechas sísmicas por su ausencia de grandes sismos. Medidas continuas de deformación permitirán definir en un futuro si estas zonas son asísmicas (regiones donde la energía se disipa sin producir grandes temblores) o son potencialmente peligrosos.

Respecto a la falla Polochic-Motagua no se conoce su extensión y potencial de peligro en el estado de Chiapas. En este trabajo se parte de la premisa que los sismos que vienen de esta falla por evidencia histórica no son los que más daños han causado en Tuxtla Gutiérrez, no obstante es imperante estudiarla con precisión.

Otro elemento es la gran cantidad de fallas corticales en el estado y el poco estudio que se ha desarrollado sobre estas, por falta de instrumentación o lo reciente de esta, trabajo de campo insuficiente y el trabajo de gabinete es limitado debido a que los catálogos de sismos instrumentales son incompletos y contienen errores de localización de los focos, magnitudes, entre otros. Para remediar las incertidumbres se emplea la sismicidad histórica como el trabajo de García y Suárez (1996), desafortunadamente Chiapas es un estado rural, 66.8% de comunidades rurales en censos de población y vivienda (INEGI,

2005) y la mayoría de los sismos reportados son aquellos que causen daños de manera masiva, por lo que incluso al emplear esta alternativa se encuentran limitaciones. Por todo lo señalado es necesario realizar estudios probabilísticos de peligro sísmico para el estado.

No existen leyes de atenuación para suelos blandos que sean confiables para el estado de Chiapas y las desarrolladas para otras regiones pueden ser muy imprecisas. En este trabajo se consideró la correspondiente al sismo del 21 de octubre de 1995 desarrollada por Rebollar *et al.* (1999). En la Figura 124 se muestra como la ley de atenuación desarrollada para el Pacífico por Ordaz *et al.* (1989), subestima los registros obtenidos del sismo de Villaflores, Chiapas (21-10-1995, $M_w=7.2$).

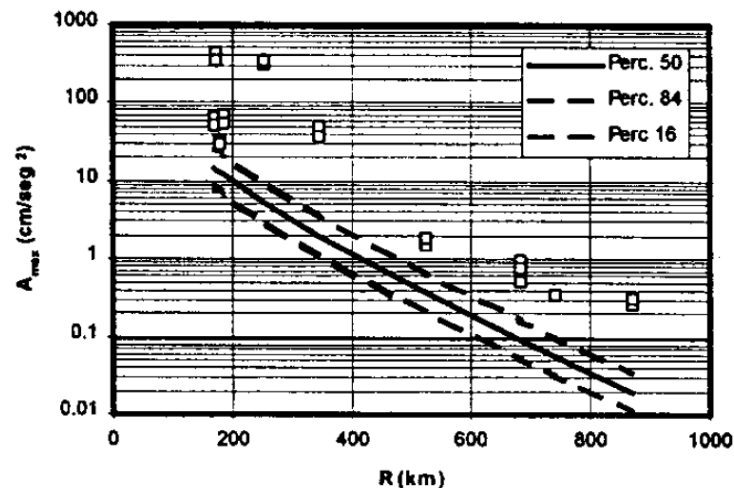


Figura 123. Ley de atenuación para el sismo de Villaflores del 21 de octubre de 1995 (Ordaz, 2011).

Determinar el peligro conlleva un esfuerzo muy importante del conocimiento regional, de correlación de variables, de empleo de modelos complejos, lo cual demanda de interacción de diversos especialistas tanto de la sismología como de la ingeniería sísmica, que tan cercana sea esta interacción determinará la fortaleza del trabajo. El escenario propuesto con magnitud máxima de 8.0, pero derivado de los escasos estudios previos de la región es un escenario probable e importante en las demandas que propone a la gestión del riesgo una vez conocido el peligro.

CAPÍTULO

5

5. VULNERABILIDAD SÍSMICA EN TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

5.1. Estudios de vulnerabilidad sísmica

Vulnerabilidad sísmica de una estructura es la relación entre la intensidad sísmica y el nivel de daño. El nivel de daño se puede estimar considerando el máximo desplazamiento lateral de entrepiso como parámetro de referencia⁹. Otro parámetro empleado es la máxima distorsión de entrepiso¹⁰. Para evaluar la posibilidad de que una estructura sufra daño, se emplean variables como el tipo estructural, el tipo de suelo, el año de construcción, el nivel de mantenimiento, la aceleración espectral a que está sometida la estructura, entre otros. La vulnerabilidad puede ser incrementada por factores como irregularidades en planta o en altura, golpeteo con edificaciones vecinas, daños previos no reparados, columnas cortas, piso blando, entre otras.

Vulnerabilidad sísmica: (de una estructura, de un grupo de estructuras o de una zona urbana completa) se define como su predisposición intrínseca a sufrir daño ante la ocurrencia de un movimiento sísmico de una severidad determinada, estando directamente relacionada con las características de diseño de la estructura y es independiente de la peligrosidad del emplazamiento, pues una estructura puede ser vulnerable pero no estar en riesgo si no está localizada en un lugar con un nivel alto de peligrosidad sísmica (Arellano *et al.*, 2003).

La vulnerabilidad sísmica de una edificación se presenta mediante curvas de vulnerabilidad (curva que relacionan el daño en los elementos estructurales y no

⁹ El máximo desplazamiento lateral de entrepiso se calcula como el desplazamiento relativo entre dos niveles contiguos, dividido entre la altura del piso.

¹⁰ La expresión que se emplea para determinar la distorsión de entrepiso incluye la relación entre el máximo desplazamiento lateral de la estructura en el nivel superior y el desplazamiento espectral, para un modelo de comportamiento lineal.

estructurales con el aumento de la intensidad sísmica). Para determinar las curvas de vulnerabilidad se generan modelos analíticos para reproducir el comportamiento de la estructura ante un sismo con características definidas. En la medida que se disponga de información acerca de las propiedades de los materiales utilizados en la construcción y la geometría de la estructura, es posible generar curvas de vulnerabilidad específicas.

Por lo general los estudios de vulnerabilidad, y de manera paralela los de riesgo sísmico, se centran en los daños físicos que sufre una edificación. Los daños se ubican en diferentes escalas de medición, estas pueden ser tanto cuantitativas como cualitativas, las cuales intentan describir el estado global de la estructura después de un sismo o cualquier otra excitación accidental.

Algunas de las variables vulnerabilidad que han sido estudiadas por distintas investigaciones a nivel mundial, se encuentran clasificadas en vulnerabilidad física y social (Sánchez, 2005; EERI, 2005):

Vulnerabilidad física:

- Casi nula asistencia técnica, el 75% de las construcciones en México son del tipo autoconstrucción.
- Falta de reglamentos de construcción y normas técnicas complementarias de diseño regionales.
- Antigüedad de construcción.
- Tipo de cimentación y su complementariedad con el tipo de suelo donde se desplanta la construcción.
- Poca redundancia del sistema estructural.
- Características dinámicas de la estructura respecto al suelo que posibilitan la resonancia.
- Peso de los contenidos.
- Daño por eventos anteriores.
- Irregularidad en elevación y planta.
- Sistema constructivo y materiales empleados.
- Control de calidad y errores constructivos durante la ejecución.
- Colindancia y golpeteo con construcciones vecinas.
- Falta de mantenimiento de la construcción durante su vida.
- Remodelaciones o reparaciones no compatibles con el sistema original.
- Uso diferente al proyectado.
- Sistema resistente a las fuerzas horizontales inadecuado o insuficiente.

Vulnerabilidad social:

- Desconocimiento por los usuarios de la recurrencia de fenómenos naturales.
- Percepción de riesgo en función de régimen de propiedad.
- Escasa conciencia del riesgo, favorecida por los amplios periodos de retorno de sismos intensos, en comparación con otras amenazas.
- Invasión de zonas protegidas, derechos de vía federales, sitios comunicados, laderas y zonas carentes de servicios.

- Regularización de las zonas invadidas trasladando el riesgo a las personas que compraron o construyeron legalmente.
- Las necesidades básicas de la población compiten con otras que se consideran menos importantes a la luz de su nivel socioeconómico.
- Poca preparación institucional y social para enfrentar el riesgo.
- Visiones dispares del modelo de desarrollo de la ciudad de los habitantes, los empresarios y las autoridades de los distintos órdenes de gobierno.
- Ausencia de un mapeo actualizado del patrimonio edificado, de su estado físico constructivo, de uso e intensidad de uso e incluso de su estatuto jurídico.

Por lo general el daño reportado por una construcción depende de la acción sísmica y de la capacidad sismoresistente de la estructura para soportarla, por lo cual la evaluación de la vulnerabilidad está vinculada directamente a la definición de la acción y el daño sísmico reportado. El término daño, se emplea para representar el deterioro físico de los diferentes elementos o el impacto económico asociado (Safina, 2003).

5.1.1. Metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica en el mundo

Cuando se evalúa la vulnerabilidad sísmica de edificaciones individuales, es necesario un estudio detallado que permita conocer la susceptibilidad de la edificación de experimentar un determinado nivel de daño para un movimiento específico. Por tanto, la acción sísmica y el daño sísmico constituyen los elementos fundamentales para la caracterización de la vulnerabilidad sísmica.

Cuando buscamos calificar la vulnerabilidad sísmica que presentan las construcciones, contamos con diferentes metodologías, las cuales se utilizan tanto en términos relativos (clases e índices de vulnerabilidad), como en términos absolutos (matrices de probabilidad de daño, funciones de vulnerabilidad y curvas de fragilidad).

Las clases e índices de vulnerabilidad califican de manera relativa la mayor o menor tendencia de una estructura a sufrir daño, pueden emplear las experiencias de sismos pasados y lo reportado en la literatura. Las matrices de probabilidad de daño (MPD), funciones de vulnerabilidad y curvas de fragilidad estiman de manera directa los daños esperados para los diversos niveles de la acción sísmica mediante el uso de relaciones explícitas.

Las funciones de vulnerabilidad son expresiones matemáticas que expresan una relación entre la intensidad del fenómeno y la probabilidad de daño del sistema expuesto. Miranda (2008) clasifica los daños en:

- Falla general, parcial y local del sistema.
- Daños en elementos estructurales.
- Daños en elementos no estructurales, acabados arquitectónicos e instalaciones.
- Daños en contenidos, equipos, mobiliario.

Si se aplica sobre una misma estructura cada una de las metodologías que a continuación serán descritas, puede dar origen a muchas diferencias en los resultados, difíciles de interpretar y en algunos casos puede dar origen a conclusiones erróneas. Por tanto, se recomienda combinar los métodos analíticos y empíricos, con algún método o técnica experimental que permita incrementar la confiabilidad del análisis de vulnerabilidad (Safina, 2003).

El resultado de un estudio de vulnerabilidad sísmica está condicionado a la manera de cómo se haga la descripción del daño y del movimiento sísmico. La relación entre estos dos parámetros suele formularse discretamente con el desarrollo de funciones propias que reflejen los aspectos constructivos y culturales representativos de cada región. Estas pueden obtenerse analíticamente a partir de la vulnerabilidad calculada, con la simulación de la respuesta sísmica de estructuras de un mismo tipo, o con la observación de los daños causados en las estructuras por sismos, cuyo estudio estadístico define la vulnerabilidad observada (Barbat, 1998).

Barbat (1998) señala que las técnicas de evaluación de la vulnerabilidad dependen principalmente de los siguientes factores:

- Objetivo del estudio.
- Información disponible.
- Características del elemento que se pretende estudiar.
- Metodología de evaluación empleada para evaluar el riesgo.
- Resultado esperado.
- Destinatario de la información.

González (1998), propone un método para analizar la vulnerabilidad, el cual sigue los siguientes pasos:

- Clasificar las construcciones.
- Definir los grados de daños esperados para estos sistemas estructurales.
- Establecer una distribución estadística de los daños en función del grado de intensidad sísmica previamente definida.
- Determinar la clase de vulnerabilidad empleando la Escala Macro sísmica Europea EME-1964.

5.1.1.1. Metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica

Una de las primeras metodologías en desarrollarse, siendo aún una de las más utilizadas para determinar la vulnerabilidad de las estructuras, consiste en establecer un catálogo de sistemas constructivos empleados en la región, para los cuales se obtiene la clase de vulnerabilidad, la cual será más confiable cuando para calificar a cada sistema se cuente con estadística y conocimiento suficiente del posible daño presentado para eventos de ciertas características. En países como Italia y Japón, se cuenta con suficiente información estructurada de manera ordenada y secuencial, siendo además nacional y

pública, lo que les permite determinar la llamada vulnerabilidad observada (Maffei *et al.*, 2006).

En los Estados Unidos de América, las metodologías para evaluar la vulnerabilidad actualmente se basan en el análisis de dos parámetros globales básicamente: la distorsión de entrepiso (IDR Interstory drift ratio) y la aceleración de piso (PFA Peak Floor Acceleration). Estos parámetros han surgido de metodologías como la ATC (Applied Technology Council), financiadas por el FEMA (Federal Emergency Management Agency).

El ATC-13 (1985) desarrolló una metodología para la clasificación de la información y evaluación de los daños por sismo de acuerdo a juicio de expertos sobre 78 tipos estructurales. El ATC-25 (1991) estudia la interrupción de líneas vitales por causa de sismos, el ATC-20-3 (1997), ATC-21 (2002) y FEMA-154 (2005) utilizan un enfoque para la evaluación rápida de la seguridad de edificios en el área epicentral posterior al sismo. Este enfoque utiliza tres estados elementales a través de la inspección de daños en los elementos estructurales y no estructurales: daños menores, moderados y severos.

Elementos a considerar para determinar la vulnerabilidad de acuerdo con las metodologías ATC-21 (2002) y FEMA-154 (2005):

- Estimación de presupuesto de edificación.
- Revisión de planos ejecutivos de la construcción.
- Visita de inspección exterior y si se puede interior.
- Fotografías de la edificación.
- Analizar la información de acuerdo con los formatos.

Dentro de la Comunidad Económica Europea se han desarrollado pocas técnicas generales para el estudio de la vulnerabilidad, siendo las italianas y españolas las más importantes, dentro las cuales tenemos:

Corsanegro y Petrini, (1990), agrupan las técnicas de evaluación de la vulnerabilidad sísmica, en función del tipo de resultado que producen, esto es:

- Técnicas directas, predicen en una sola etapa el daño causado.
- Técnicas indirectas, relacionan el daño con la intensidad sísmica. (métodos tipológicos –clases de vulnerabilidad - y mecánicos – índices de daño -)
- Técnicas convencionales, manejan un índice de vulnerabilidad, independientemente de la predicción del daño, mediante relaciones capacidad demanda.
- Técnicas híbridas, combinan elementos de los métodos anteriores con juicios de especialistas.

Existen otros métodos propuestos por Caicedo *et al.* (1994), en los cuales, el resultado pretende hacer una descripción global del daño que experimentaría una estructura de una tipología dada, sometida a la acción de un sismo determinado. Con base en la

clasificación anterior, Dolce (1994), propone un nuevo criterio de clasificación, fruto de examinar las etapas fundamentales que comprenden un análisis de vulnerabilidad. Se consideran tres métodos:

- Métodos estadísticos, estos se basan en un análisis estadístico de las construcciones.
- Métodos mecánicos, en los que se estudian los parámetros que rigen el comportamiento dinámico de las estructuras.
- Métodos basados en juicios de expertos, se evalúan los factores que gobiernan el comportamiento sísmico de las construcciones.

Para Dolce (1994) las técnicas de evaluación de la vulnerabilidad pueden clasificarse también en función de los pasos fundamentales que caracterizan el camino metodológico como sigue:

- Según los datos de entrada que están disponibles para desarrollar el problema, como datos de daños pasados, geométricos y cualitativos: mecánicos, de sismos, geológicos y geotécnicos.
- Según el método o la técnica empleada para determinar el grado de vulnerabilidad, ya sean estadísticos, analíticos o basado en juicio de expertos.
- Según los datos de salida o tipo de datos a obtener, pudiendo ser la vulnerabilidad absoluta, representada por funciones de probabilidad, curvas de fragilidad o la vulnerabilidad relativa, que emplea evaluaciones empíricas o experimentales en las que nos indica una correlación entre el daño y el tamaño del sismo.

Adicionalmente Dolce (1994), agrupa a los métodos en cinco categorías en función de la fuente de información que prevalece para determinar la vulnerabilidad:

- Métodos empíricos, se basan en la experiencia del comportamiento de los tipos de edificaciones en un sismo por parte de expertos, incluyen métodos tanto de categorización como de inspección y puntaje (antes y después de un evento).
- Métodos de categorización o caracterización, éstos clasifican a la estructura según su tipo, en clases de vulnerabilidad con la experiencia en el desempeño sísmico que han tenido edificaciones similares ante diversos terremotos.
- Métodos de inspección y puntaje, identifican y caracterizan las deficiencias sísmicas de una edificación, asignando valores numéricos a cada componente de la misma, que en función de su importancia relativa, conduce a la determinación de la clase de vulnerabilidad.
- Métodos analíticos o teóricos, evalúan la resistencia de las estructuras a los movimientos del terreno utilizando como base modelos mecánicos de respuesta estructural, involucrando las características mecánicas de las estructuras.
- Métodos experimentales, utilizan ensayos dinámicos para la determinación de las propiedades mecánicas y otras características esenciales de las estructuras, tales como la interacción suelo-estructura o la incidencia de los elementos no estructurales en su comportamiento.

Otra clasificación empleada y aún más simplificada se basa en el tipo de medida que se utiliza para medir la vulnerabilidad:

- Técnicas cuantitativas, crean las probabilidades de daño o relaciones determinísticas en términos numéricos.
- Técnicas cualitativas, recurren a descripciones cualitativas, tales como vulnerabilidad baja, media y alta.

Considerando la propuesta de Safina (2003), se clasifica la vulnerabilidad de la siguiente manera:

1. Vulnerabilidad predefinida, esta vulnerabilidad se estima en función de las variables que intervienen en el diseño y construcción, como son: la mano de obra, los métodos constructivos, el cálculo estructural, los materiales, etc.
2. Vulnerabilidad observada, ésta se estima utilizando la base estadística de daños causada por terremotos anteriores. Este método es conveniente usarlo en todas las construcciones, incluso en las que no fueron proyectadas para soportar la acción sísmica, o realizadas con materiales de baja calidad.

Después del 11 de septiembre del 2001 y considerando la vulnerabilidad que mostraron las torres gemelas ante los ataques terroristas, un conjunto de expertos del MCEER, (The Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research), trabajó en el desarrollo de metodologías para el diseño de estructuras esenciales, ya que consideran que se debe buscar la seguridad de las poblaciones ante amenazas naturales y las causadas por los hombres (Bruneau *et al.*, 2002). Estas metodologías son extremas en complejidad, número de pasos, entre otros, y no representan los alcances de este trabajo, pero si ejemplifican el que cada vez los análisis de vulnerabilidad se vuelven más complejos y consideran demandas sobre las construcciones no convencionales.

5.1.2. Metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica en México

La Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), desarrolló una variante de la metodología Escala Macro sísmica Europea EME-1998 (Grunthal, 1998), la cual se probó en la colonia Roma del Distrito Federal, ya que tras los sismos de Michoacán de septiembre de 1985 se contaba con suficiente información de las estructuras dañadas, su sistema constructivo, uso y características generales (Arellano *et al.*, 2003; Juárez *et al.*, 2004; Gómez *et al.*, 2006), así como para la ciudad de Chilpancingo, Guerrero (Arellano *et al.*, 2002), la metodología permitió obtener resultados satisfactorios.

En la Tabla 25 se muestra la clasificación de los sistemas constructivos encontrados en la mayoría de las ciudades mexicanas con las que se clasifica su vulnerabilidad, las cuales van desde la A (más vulnerable) hasta F (menos vulnerable). Esta clasificación se modificó para adaptarla a los sistemas constructivos de Tuxtla Gutiérrez de acuerdo con el trabajo de González (2010).

Tabla 25. Clasificación de los tipos de construcción en las clases de vulnerabilidad en escala EME-92, modificada por González (2010).

Tipos de Construcción	Clases de vulnerabilidad					
	A	B	C	D	E	F
a. Adobe. Tapial. Mampostería de piedra unida con barro. b. Bajareque y cantos rodados. c. Mampostería de piedra braza (sillería). d. Mampostería sin refuerzo. e. Mampostería con refuerzo insuficiente f. Mampostería con refuerzo interior. g. Mampostería confinada. h. Madera.	• •	• • •	•	• •		
i. Concreto reforzado sin diseño sísmico (antes de 1971). j. Concreto reforzado con nivel mínimo de diseño sísmico (construidos entre 1971 y 1995). k. Concreto reforzado con nivel moderado de diseño sísmico (construidos entre 1996 y 2005). l. Concreto reforzado con nivel alto de diseño sísmico (construidos entre 2006 a la fecha).			•	•	•	•
m. Estructuras de acero con nivel mínimo de diseño sísmico (construidos entre 1971 y 1995). n. Estructuras de acero con nivel moderado de diseño sísmico (construidos entre 1996 y 2005). ñ. Estructuras de acero con nivel alto de diseño sísmico (construidos entre 2006 a la fecha).				•	•	•

En las Tablas 26 y 27 se esquematizan los grados de daño de las construcciones: grado 1 (sin daño) hasta grado 5 (colapso) para estructuras de mampostería y concreto, respectivamente. Para el método de la UAM se debe desarrollar un censo de construcciones, que contempla los siguientes elementos:

- Ubicación detallada e información fotográfica.
- Información estructural, de general a específica.
- Uso de la construcción.
- Tipo de materiales.
- Tipología estructural, Sistema de piso y de cimentación.
- Daño previo, mantenimiento, etc.

Posteriormente, se desarrollan mapas donde se pueden observar las zonas más vulnerables de la ciudad, lo cual es útil para desarrollar planes de evacuación, gestión de riesgo, inventario de construcciones, etc. Los siguientes mapas son ejemplo de algunos que pueden desarrollarse:

- Tipo de estructuras.
- Clase de vulnerabilidad asignada.
- Información del grado de daño de las estructuras.

Las metodologías basadas en clases de vulnerabilidad como las propuestas por la UAM, así como las que emplean juicios de expertos como las propuestas por Maldonado *et al.*

(2007); González y Vidaud (2009) no han sido muy populares en México y la mayoría de las propuestas actuales se han encaminado hacia el empleo de índices de vulnerabilidad como el propuesto por CENAPRED (2006b) y curvas de fragilidad.

Tabla 26. Clasificación del daño observado en estructuras de mampostería (Arellano *et al.*, 2003).






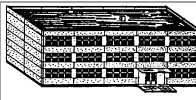
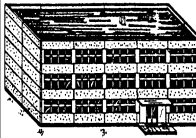
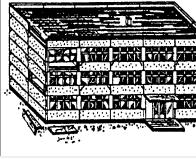
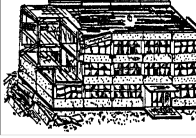

	Grado 1: Daños de despreciables a ligeros (<i>ningún daño estructural, daños no estructurales ligeros</i>). Grietas superficiales en muy pocos muros. Caída sólo de pequeños trozos de recubrimiento. Caída de piedras sueltas de las partes altas de los edificios en muy pocos casos.
	Grado 2: Daños moderados (<i>daños estructurales ligeros, daños no estructurales moderados</i>). Grietas en muchos muros. Caída de trozos grandes de recubrimiento.
	Grado 3: Daños de importantes a graves (<i>daños estructurales moderados, daños no estructurales graves</i>). Grietas grandes y generalizadas en la mayoría de los muros. Se sueltan tejas del tejado. Fallas de elementos individuales no estructurales (muros divisorios, hastiales y tejados).
	Grado 4: Daños muy graves (<i>daños estructurales graves, daños no estructurales muy graves</i>). Se dañan seriamente los muros; falla estructural parcial de techos y losas.
	Grado 5: Destrucción (<i>daños estructurales muy graves</i>). Colapso total o casi total.

Tabla 27. Clasificación del daño observado en estructuras de concreto armado (Arellano *et al.*, 2003).

	Grado 1: Daños de despreciables a ligeros (<i>ningún daño estructural, daños no estructurales ligeros</i>). Grietas finas en el recubrimiento de marcos o en la base de los muros. Grietas finas en tabiques y muros divisorios.
	Grado 2: Daños moderados (<i>daños estructurales ligeros, daños no estructurales moderados</i>). Grietas en vigas y columnas de marcos y en muros estructurales. Grietas en tabiques y muros divisorios; caída de enlucidos y revestimientos frágiles. Falla del mortero de las juntas de muros prefabricados.
	Grado 3: Daños de importantes a graves (<i>daños estructurales moderados, daños no estructurales graves</i>). Grietas en columnas y en uniones viga columna en la base de los marcos y en las uniones de los muros acoplados. Desconchamiento del recubrimiento del concreto, pandeo de las varillas de refuerzo. Grandes grietas en tabiques y muros divisorios; falla de muros prefabricados divisorios individuales.
	Grado 4: Daños muy graves (<i>daños estructurales graves, daños no estructurales muy graves</i>). Grandes grietas en elementos estructurales con falla en compresión del concreto y fractura de las barras de refuerzo; falla en la trabazón del refuerzo de las vigas; ladeo de columnas. Colapso de algunas columnas o colapso individual de un piso superior.
	Grado 5: Destrucción (<i>daños estructurales muy graves</i>). Colapso de la planta baja o de partes (por ejemplo alas) del edificio.

CENAPRED (2006b) propuso e identificó la vulnerabilidad de las construcciones de los estados de la república mexicana, en una primera instancia solo considerando los

materiales y sistemas constructivos, así como la peligrosidad sísmica del estado a partir de la zonificación de CFE (1993) (Figura 125). El estado de Chiapas se ubica como el segundo en cantidad de viviendas elaboradas con muros y techos con materiales vulnerables, información que se obtuvo de las estadísticas de los censos de población y vivienda del INEGI (1990; 2000).

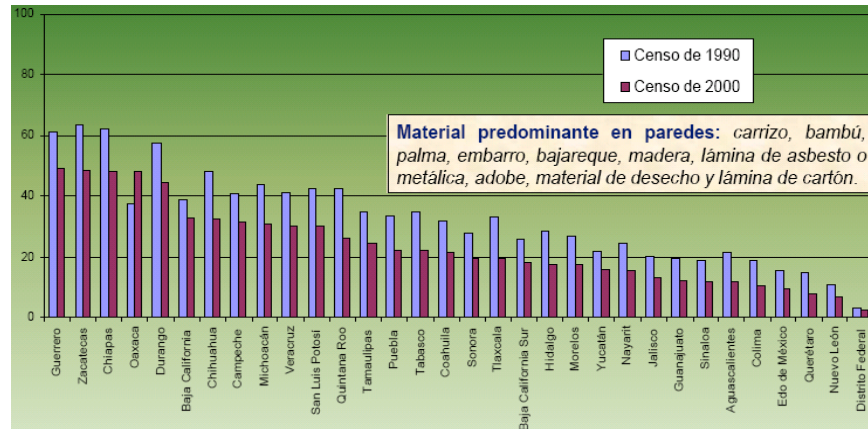


Figura 124. Comparativo de la distribución porcentual de viviendas consideradas vulnerables (Sánchez, 2005).

El índice de vulnerabilidad física (I_{VF}) usado por el CENAPRED corresponde a la ecuación 32:

$$I_{VF} = \frac{V_i P_i}{V_p P_M} \tag{32}$$

donde: V_i representa la calificación por desempeño (sismo) según el tipo de vivienda (Tabla 28), V_p representa la calificación del peor desempeño, $V_p=10$, P_i es el peligro por sismo (Tabla 29) y P_M es el peligro máximo por sismo $P_4=0.80$.

Tabla 28. Clasificación de la vivienda (CENAPRED, 2006b).

Tipo	Características de la vivienda
1	Muros de mampostería confinada o reforzada con diafragma rígido
2	Muros de mampostería confinada o reforzada con diafragma flexible
3	Muros de mampostería no confinada ni reforzada con diafragma rígido
4	Muros de mampostería no confinada ni reforzada con diafragma flexible
5	Muros de mampostería sin refuerzo con diafragma rígido
6	Muros de mampostería sin refuerzo con diafragma flexible
7	Muros de adobe con diafragma rígido
8	Muros de adobe con diafragma flexible
9	Muros de madera con diafragma flexible
10	Muros de materiales débiles con diafragma flexible

Tabla 29. Nivel de peligro por sismo (CENAPRED, 2006b).

P_i	Zona
$P_1=0.08$	A
$P_2=0.14$	B
$P_3=0.36$	C
$P_4=0.80$	D

Ramírez de Alba *et al.* (2007) proponen un índice de susceptibilidad de daños por sismo que permite estimar el número probable de viviendas afectadas comparando los resultados de daños estimados en viviendas mediante el procedimiento propuesto con datos de dos sismos de Tehuacán 1999 y Colima 2003. En este trabajo se encontró una relativa correlación entre daños de sismos reales y los obtenidos con él.

Las primeras funciones de vulnerabilidad en México fueron desarrolladas por Esteva (1963), actualizadas por Esteva *et al.* (1988); Ordaz *et al.* (1992); Ordaz y Montoya, (1995). Sin embargo, a partir del trabajo de Miranda *et al.* (1996) y sus posteriores actualizaciones, la mayoría de las investigaciones que evalúan funciones de vulnerabilidad en México y otros países las contempla como adecuadas.

El nivel de daño esperado de acuerdo con Ordaz (2011) se define en función de la excitación como se muestra en la ecuación 33:

$$E[\beta] = E[E(\beta / \gamma)] \quad (33)$$

donde: β es la pérdida bruta relativa y γ es un parámetro definido por el comportamiento del sistema estructural.

5.1.3. Metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica en Tuxtla Gutiérrez

González y Aguilar (2004), elaboraron una relación de las patologías regionales que presentan los sistemas constructivos, de proyecto estructural, ejecución de obra, y de materiales regionales.

Guillén (2005; Figura 126) y Hernández (2005) estudiaron la vulnerabilidad estructural del primer cuadro de la ciudad capital del estado de Chiapas. En este estudio se empleó la metodología que la UAM, se consideró una selección de la zona de estudio por inferencia estadística (Aldama *et al.*, 2008).

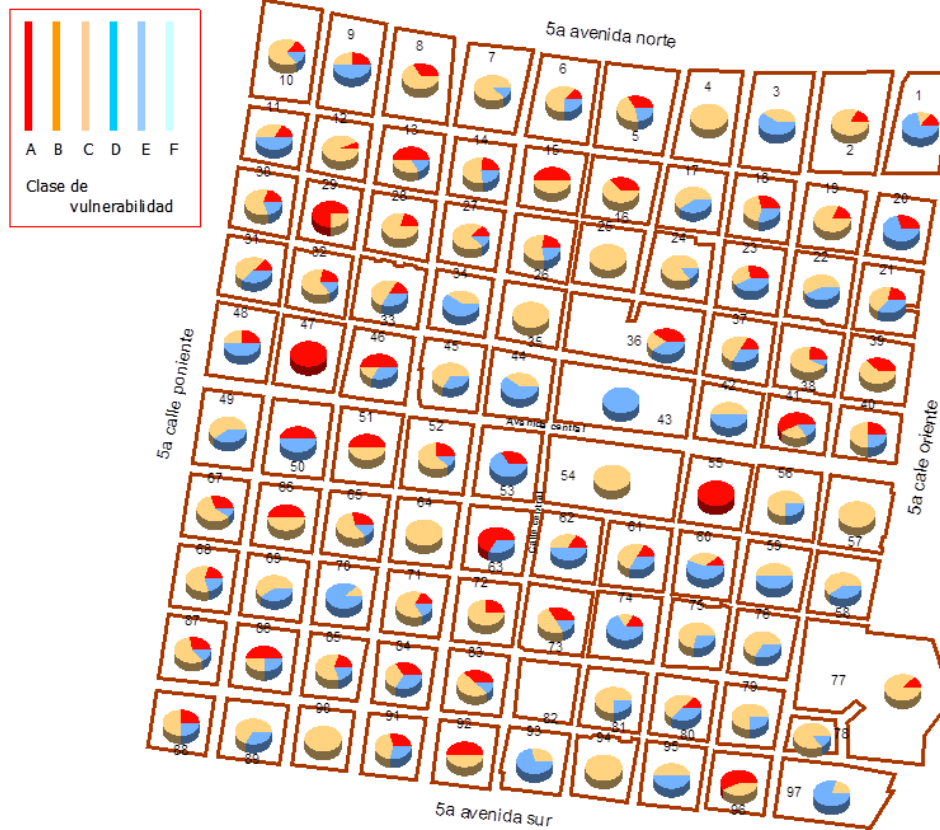


Figura 125. Clases de vulnerabilidad para el primer cuadro de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Guillén, 2005). Las gráficas de pastel representan el porcentaje de las clases de vulnerabilidad por manzana.

Aguilar (2006) determinó la vulnerabilidad de estructuras esenciales que se emplean como albergue para desastres mediante las características dinámicas obtenidas con vibración ambiental. Mediante esta técnica se realizan medidas simultáneas del periodo en distintos puntos y en la base de la estructura para deslindar el efecto del suelo. Se seleccionaron dos refugios temporales, cuatro centros de acopio y un edificio de oficinas, estructuras de mampostería y concreto de entre uno y cuatro niveles. Los periodos resultantes están entre 0.04 y 0.38 s, lo cual indica que el periodo medio del suelo (0.2 - 0.4 s) es muy parecido al de las construcciones.

González (2010); González *et al.* (2010a) evaluaron la vulnerabilidad estructural de Tuxtla Gutiérrez con la EME-98 modificada y obtuvieron el mapa que se muestra en la Figura 127. Se observa concentración de altas vulnerabilidad en el centro de la ciudad y en las periferias donde se ubican zonas de invasión o afluentes del río Sabinal.



Figura 126. Clases de vulnerabilidad de Tuxtla Gutiérrez, elaborado mediante la EME-98 (González *et al.*, 2010; González, 2010).

Alonso *et al.* (2012) propusieron una metodología para evaluar las viviendas a partir de dos factores denominados índice estructural e índice funcional, donde la suma de ambos determina el índice de estado de condición (índice de vulnerabilidad). Evaluaron 77 estructuras sin tener resultados concluyentes y reconociendo lo limitado de la base de datos.

No obstante ninguno de los estudios anteriores presenta alguna curva de vulnerabilidad, la que tiene como fin, predecir el nivel de daño estructural que se va a presentar en las construcciones de un mismo tipo, en un sitio de interés, cuando se presente un evento sísmico que produzca cierta intensidad en ese lugar. La obtención de una curva de vulnerabilidad conlleva un buen número de complicaciones, la mayoría de ellas asociadas a la falta de información suficiente y confiable, relacionada con los parámetros que la definen. Lo anterior hace que las conclusiones que se obtengan a partir de ella, tengan cierto nivel de incertidumbre (Salgado, 2005).

Zuccaro (1998) propuso una matriz de probabilidad de daño para mampostería sin reforzar en Italia. Salgado (2005) implementó la matriz a una investigación con los sismos de Ometepec (1995), Oaxaca (1999) y Colima (2003). Con los resultados del estudio Salgado (2005) calibró la matriz para viviendas rurales típicas del sureste mexicano. De acuerdo al modelo probabilístico de Poisson (Feller, 1991), los periodos de retorno del sismo de diseño asociados a los centros históricos son 150, 475 y 975 años. Con lo anterior Salgado (2005) propone la Tabla 30 para Chiapa de Corzo (ciudad ubicada a 10 km de Tuxtla Gutiérrez).

Tabla 30. Daños medios esperados en la vivienda tradicional de Chiapa de Corzo, Chiapas (Salgado, 2005).

Periodo de retorno (años)	Daño medio esperado (por ciento del costo total)
150	0.22
475	0.37
975	0.45

5.1.4. Parámetros para evaluar la vulnerabilidad de Tuxtla Gutiérrez

Los estudios de vulnerabilidad encontrados en la literatura contemplan, por lo general, varios parámetros. De todos los parámetros que se han aplicado, se seleccionaron siete que son los que se indican en la Tabla 31, los cuales se emplearon en el software SORIS.

Tabla 31. Parámetros propuestos para el estudio de la vulnerabilidad de estructuras típicas de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Parámetro	¿Cómo se pretende evaluar?
Previo al evento	
1. Condiciones dinámicas de suelo. Tipo de suelo y cimentación	Análisis de las zonificaciones geotécnicas desarrolladas para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Espinosa, 1976; Ordóñez, 2008). De la aplicación de las encuestas se determinan los sistemas de cimentación empleados.
2. Regularidad estructural en planta, en elevación, piso blando, golpeteo, etc.	Desarrollo de factores para evaluar la regularidad en planta de acuerdo con estudios desarrollados por González y Gómez (2008); González <i>et al.</i> (2009a).
3. Antigüedad y Material	Censo de las tipologías de mampostería, retomada de los estudios a las piezas locales (Ruíz y Aguilar, 2006; González <i>et al.</i> , 2009b; González <i>et al.</i> , 2010b). La antigüedad se obtiene con las encuestas aplicadas.
4. Sistema estructural. Distorsiones angulares, distorsiones de entrepiso	De la aplicación de las encuestas se determinan los sistemas empleados, así como con el respaldo del censo INEGI (2010) y con parámetros obtenidos de modelos elaborados con SAP2000 y NONLIN que consideran las propiedades mecánicas, sistemas estructurales, capacidad de deformación y características dinámicas. Medir periodos de vibración de sistemas estructurales típicos y su comportamiento en el rango de no linealidad mediante NONLIN.
5. Elementos no estructurales y contenidos	De la aplicación de las encuestas en las viviendas seleccionadas se determinan las características de los elementos no estructurales empleados y tan solo se obtiene el porcentaje de participación en el costo de la construcción contemplando (González y Gómez, 2007).
Daño posterior al evento	
6. Mantenimiento y daños previos	De la aplicación de las encuestas se determinan el mantenimiento y daños previos en las construcciones. Se retoma lo propuesto por la EME-98.
7. Uso	De la aplicación de las encuestas se determinan los porcentajes de usos en los distintos sistemas empleados.

5.1.5. Caracterización de los sistemas constructivos en Tuxtla Gutiérrez

En esta sección se describen los antecedentes históricos de la construcción en Tuxtla Gutiérrez, la normativa que regula el diseño, supervisión y construcción de estructuras, los sistemas constructivos y los materiales empleados. Partiendo de estos elementos se evaluó la vulnerabilidad estructural empleando distintas metodologías.

5.1.5.1. Antecedentes históricos de la vivienda en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Los primeros asentamientos que dieron lugar a la formación de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez fueron alrededor del año 7,000 antes de nuestra era. El sitio arqueológico más antiguo se localiza en la cueva del rancho Santa Martha cerca de Ocozocautla, Chiapas. (Cedillo y López, 1995).

Entre los años 1,500 y 1,000 antes de nuestra era, en el estado de Chiapas existieron grupos que vivían del cultivo del maíz, de la caza y la recolección, agrupados en pequeños asentamientos comenzaron a construir chozas y jacales, las cuales estaban hechas a base de troncos de árboles y palmas. Los zoques, habitantes del actual Tuxtla Gutiérrez, tenían una vivienda tradicional construida con techo de paja, paredes de bajareque y piso de tierra. Actualmente ésta sólo se encuentra en las zonas rurales del municipio o en los cinturones de miseria del área periurbana.

Las viviendas desde esta época siguieron desarrollándose a base de madera o bajareque para muros y paja para la cubierta. Con la llegada de los españoles las nuevas construcciones emplearon piedra y adobe, el bajareque y la madera, se mantenían en las construcciones más humildes, que correspondían a los indígenas. López (2003) señala que hasta principios de los años cuarenta del siglo pasado en Tuxtla Gutiérrez se empleaban construcciones de adobe para muros, cimentación de piedra, las cubiertas a dos aguas, techadas con teja de barro y armaduras de madera.

En el siglo XVI los Dominicanos fundan las capillas de San Roque, Santo Domingo, San Miguel y San Jacinto. Los Jesuitas erigen el templo de San Marcos, donde se utilizó teja de barro para los techos de los templos, en esos tiempos no existían grandes construcciones (Paula, 2008). De aquí en adelante la teja se utilizó para la construcción en el centro de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, como la catedral de San Marcos o el Palacio de Gobierno.

Entre los siglos XVII, XVIII y XIX se construyeron muchas casas para comercio, gubernamentales o templos, las construcciones más apreciadas, que se caracterizaban por sus tejados uniformes de una o dos aguas, construidas a base de piedra braza para muros y cimentación, madera y teja para cubierta.

En el resto del siglo XIX y hasta mediados del siglo XX las construcciones fueron de adobe con características técnicas homogéneas, de estas construcciones quedan pocos vestigios en la ciudad capital. Las viviendas de la ciudad en la actualidad tienen un promedio menor a 50 años de edad, ya que gran parte de las viviendas fueron destruidas por el sismo de magnitud 7.7 del 23 de septiembre de 1902 (Figuroa, 1973). Las restantes construcciones de adobe, madera, piedra o bajareque han sido demolidas en el primer cuadro de la ciudad para la ampliación de la avenida central a finales de los setenta y para la modernización del centro, debido al alto costo del suelo, considerándose la necesidad de construcciones verticales.

5.1.5.2. Antecedentes de la normativa de construcción en Chiapas

El primer Reglamento de Construcciones para el estado de Chiapas fue presentado el 24 de marzo de 1971. Este reglamento estaba compuesto por 271 artículos, fue validado para ser empleado en ocho municipios. La selección de los municipios fue con base en su número de habitantes, más allá de similitudes, de condiciones geológicas, geotécnicas, sísmicas, constructivas o técnicas. Los municipios eran Tuxtla Gutiérrez, Tapachula de

Córdova y Ordoñez, Comitán de Domínguez, San Cristóbal de Las Casas, Tonalá, Arriaga, Huixtla y Villaflores.

En 1997 se actualizó el Reglamento de Construcción de Tuxtla Gutiérrez, tras el sismo de octubre de 1995. Este reglamento se ha modificado al menos tres ocasiones, su última versión es la del año de 2005 y consta de 454 artículos, así como de una guía normativa para la preservación de la imagen urbana de Tuxtla Gutiérrez, el Jobo y Copoya.

De acuerdo con los archivos de la Secretaría de Infraestructura del Estado de Chiapas, existen 16 Reglamentos de Construcción aprobados y tres en proceso de elaboración. Adicionalmente, se trabaja en la revisión de las Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo de los reglamentos de Tuxtla Gutiérrez y Tapachula.

Es importante recalcar que los reglamentos de construcciones y sus normas técnicas deben ser elaborados a nivel municipal, actualmente son estatales. En la mayoría de las ciudades y en algunos estados se toma como base el reglamento y las normas técnicas del Distrito Federal, lo cual no siempre es recomendable, debido a que los materiales del subsuelo, los procesos constructivos, los peligros por viento y sismo y las técnicas que se emplean en cada región son diferentes.

La mejor manera de hacer frente a los fenómenos sísmicos es que cada municipio o cada ciudad de los diferentes estados tengan sus propias Normas Técnicas de Construcción sismoresistente. Aguilar *et al.* (2004), denominan a estas normas mínimas de seguridad estructural, las cuales marcan los lineamientos para construir de forma segura, de acuerdo con las condiciones locales tomando en cuenta el comportamiento de los suelos ante la actividad sísmica y los materiales utilizados en los procesos constructivos locales. Las normas técnicas no son una solución absoluta de seguridad ya que una vez establecidas deben de ir acompañadas por:

- Difusión mediante cursos de capacitación para su mejor entendimiento y aplicación.
- Un sistema de supervisión, el cual debe estar constituido por un grupo de supervisores externos certificados.
- Laboratorios de materiales especializados que realicen los estudios sobre la calidad de los materiales.
- El establecimiento de las normas técnicas de construcción debe ser proceso integral y tender a volverse virtuoso.

La falta de normativa técnica de diseño tiene varias líneas de influencia en una región: el impedimento no escrito, pero si funcional de la implementación e introducción de sistemas constructivos, la dificultad para el uso de los llamados nuevos materiales y más allá de todo lo que podemos considerar como innovador. La imposibilidad de llevar un control normado por parte de las autoridades de los incumplimientos de una normativa que aun no estando escrita es de uso nacional y que pueda ocasionar perjuicios a terceros y desvirtuando el trabajo de los ingenieros como profesionales.

5.1.5.3. Características mecánicas de los materiales constructivos empleados en Tuxtla Gutiérrez

En el estado de Chiapas se presentan cambios importantes en las características de los materiales de construcción que surgen del subsuelo (principalmente piezas para mampostería –bloques, tabicones y tabiques– y agregados –gravas y arenas–), por lo cual, deben hacerse investigaciones para identificar las condiciones de cada región haciendo muestreos en distintos bancos de material y plantas de fabricación.

Ruíz y Aguilar (2006); González *et al.* (2009); González *et al.* (2010b) realizaron una investigación estadística en la capital del estado, donde se ejecutaron pruebas en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNACH a las piezas, morteros y mamposterías, adobes y piezas especiales de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Las pruebas se realizaron de acuerdo con lo solicitado en el protocolo de pruebas del apéndice A de las NTC-DM-RCDF-2004 (Normas Técnicas Complementarias de Mampostería del Reglamento de Construcción del Distrito Federal) y la NMX-C-404-ONNCCE-1997 (Normas Mexicanas y el Organismo Nacional de Normalización de Materiales Componentes y Sistemas Estructurales).

De los resultados de las pruebas en el laboratorio se puede afirmar que en Tuxtla Gutiérrez se presentan piezas con capacidades a la compresión en rangos desde 1.5 y hasta 4 MPa (desde 15 y hasta 40 kg/cm²), lo cual es muy pobre considerando que las NTC-DM-RCDF-2004 permite emplear piezas con resistencias superiores a los 6 MPa (60 kg/cm²), lo que algunas piezas elaboradas por materiales reciclados superan (González *et al.*, 2010b). Los resultados enfatizan la variación y poca resistencia de las piezas en el estado, siendo mayor este fenómeno en la zona norte y en la región central, donde se ubica Tuxtla Gutiérrez. Las piezas con mayor resistencia se ubicaron en el Soconusco (González *et al.*, 2008).

Analizando los requisitos para el desarrollo de mampostería estructural dados por las NTC-DM-RCDF-2004 y retomado por el reglamento de Construcciones de Tuxtla Gutiérrez (2004), se realizó un estudio que muestra el efecto de considerar las resistencias reglamentarias del mortero estructural. Los valores de resistencias empleados van desde los 4 MPa para mortero tipo N y hasta 12.5 MPa para mortero tipo M (desde 40 y hasta 125 kg/cm²). Los resultados obtenidos se combinaron con las resistencias para piezas encontradas por Ruíz y Aguilar (2006) resultando las resistencias de los muros que se construyen en Chiapas.

En la Tabla 32 se muestran los rangos de resistencias de tabiques y bloques avaladas por los reglamentos de construcción del Distrito Federal (2004) y los valores de resistencias encontrados por Ruíz y Aguilar (2006); González *et al.* (2010b) para Tuxtla Gutiérrez. También se consideran los tres tipos de morteros estructurales solicitados por los reglamentos de construcción. Con la combinación analítica de estos parámetros se obtienen las resistencias del conjunto de piezas y mortero, el cual técnicamente se denomina mampostería.

Tabla 32. Comparativa de resistencias de piezas, morteros y mampostería para el Distrito Federal y la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Resistencia a la compresión de piezas (f _p), con base en área neta, (kg/cm ²) RCDF	Resistencia a la compresión de la mampostería (f _m), con base en el área neta, (kg/cm ²)			Resistencia a la compresión de piezas (f _p), con base en área neta, (kg/cm ²) encontradas en Tuxtla Gutiérrez	Resistencia a la compresión de la mampostería (f _m), con base en el área neta, (kg/cm ²)		
	M	S	N		M	S	N
<i>Tabiques</i>				<i>Tabiques</i>			
500	160	130	110	50	48	39	33
400	140	110	90	40	42	33	27
300	120	90	70	30	36	27	21
200	80	70	50	20	24	21	15
150	60	60	40	15	18	18	12
100	40	40	30	10	12	12	9
0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Bloques</i>				<i>Bloques</i>			
200	100	90	80	20	30	27	24
150	75	60	60	15	22.5	18	18
100	50	45	40	10	15	13.5	12
0	0	0	0	0	0	0	0

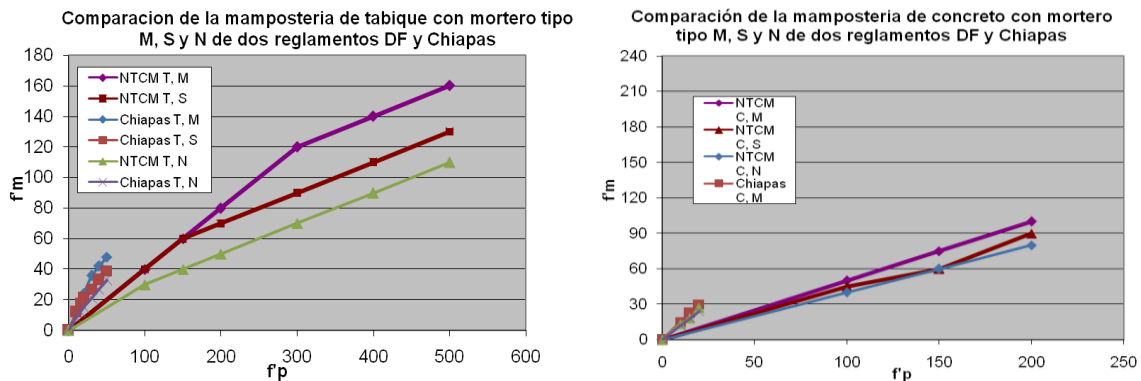


Figura 127. Comparación de las resistencias de mampostería de piezas de tabique y bloques de concreto de acuerdo con RCDF-2004 y RCTGZ-2004.

En la Figura 128 se muestra la debilidad estructural de los muros construidos con piezas que no cumplen con los estándares, lo que permite prever que las construcciones presentaran un comportamiento más frágil del deseable (propenso a fallas súbitas) y que el proyecto arquitectónico demandará mayores longitudes de muros o espesores de éstos en ambas direcciones de análisis (longitudinal y transversal), lo cual generalmente no se hace, como sucede en las plantas arquitectónicas de proyectos tipo arquitectónicos de viviendas de interés social.

Observamos morteros elaborados con una cantidad excesiva de agua, que disminuye la resistencia del producto e incrementa el agrietamiento y la contracción de la muestra. Esto provoca que al usar relaciones agua cemento muy altas, el agua al evaporarse deja vacíos que posteriormente son la dirección por donde los esfuerzos dañan al material. Estas patologías inciden directamente en la vulnerabilidad estructural y durabilidad de las construcciones.

5.1.5.4. Identificación de los sistemas constructivos empleados en Tuxtla Gutiérrez

Con la información obtenida al levantar alrededor de 6,000 encuestas (Anexo 3) de un inventario de alrededor de 145,000 viviendas, lo que representa una muestra con confiabilidad del $97\% \pm 1.5\%$ de error seleccionadas al azar por inferencia estadística de acuerdo con la metodología propuesta por Guillén (2005); Aldama *et al.* (2008). Dentro de las distintas estructuras existentes en la ciudad se encontró que existe una gran gama de materiales, desde los materiales tradicionales hasta los más modernos. Durante la investigación se hallaron en el entorno de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, la cantidad de 21 combinaciones de sistemas de muros y losas (sistemas constructivos), los que se resumieron por comportamiento estructural en 13 sistemas constructivos (Tabla 34).

En las Tablas 33 y 34 se presentan los distintos tipos de construcciones que emplean diversos materiales para techos y muros. En la Figura 129 se presenta un mapa mostrando la distribución de los puntos de las encuestas y en la Figura 130 los diversos sistemas constructivos que se encontraron en la ciudad.

Tabla 33. Sistemas constructivos encontrados en Tuxtla Gutiérrez (González *et al.*, 2010a).

Material de muro	Material de losa
Adobe	Lámina de acero, lámina de asbesto, madera y madera con teja.
Bajareque	Lámina de acero, lámina de asbesto, madera y madera con teja.
Block o tabicón de concreto	Lámina de acero, lámina de asbesto, madera y madera con teja, losa maciza.
Ladrillo de barro o tabique	Lámina de acero, lámina de asbesto, madera y madera con teja, losa maciza.
Madera	Lámina de acero, lámina de asbesto, madera y madera con teja.
Piedra	Lámina de acero, lámina de asbesto, madera y madera con teja.
Concreto o concreto celular	Losa maciza.

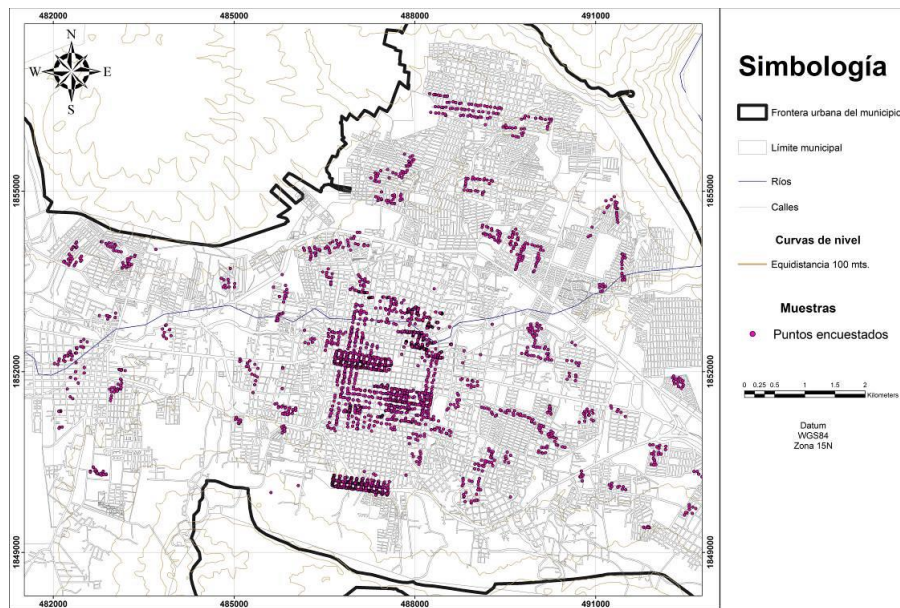


Figura 128. Puntos de construcciones encuestadas por inferencia estadística.

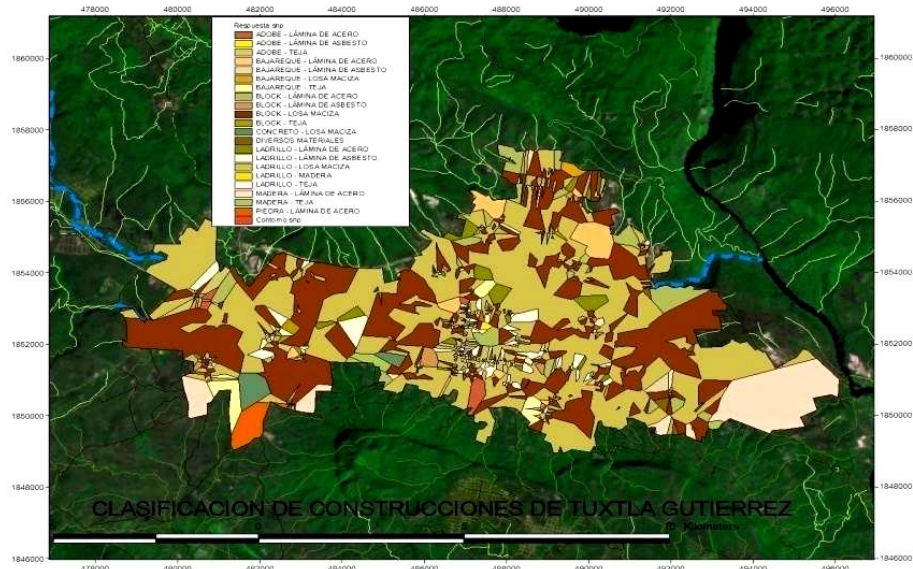








Figura 129. Clasificación de construcciones de Tuxtla Gutiérrez, según sistemas constructivos para cubiertas y para muros (González *et al.*, 2010a).

Tabla 34. Descripción de los sistemas constructivos en Tuxtla Gutiérrez (González *et al.*, 2012)

Núm.	Fotografía	Nombre	Descripción	%, Cantidad
1		Mampostería sin refuerzo	Muros de mampostería sin refuerzo ni confinamiento. Las fuerzas laterales son resistidas por los muros. Diafragmas rígidos con losas aligeradas o macizas. Cimentación de zapatas aisladas, ligadas o losa de cimentación.	5.63 338
2		Mampostería reforzada o confinada con diafragma rígido	Muros de mampostería con piezas sólidas de arcilla o concreto. Refuerzo con castillos y cadenas. Las fuerzas laterales son resistidas por muros. Diafragmas rígidos con losas aligeradas o macizas. Losa de cimentación, zapatas corridas o asiladas.	69.24 4,180
3		Mampostería reforzada o confinada con diafragma flexible	Similar al sistema 2, excepto por tener diafragma flexible, con viguetas de madera o de acero. No deben incluirse en este grupo las construcciones de dos o más niveles en las que sólo el último nivel tenga un diafragma flexible.	16.47 988
4		Construcción informal (mampostería mal confinada o mal reforzada)	Similar al sistema 3, pero con unidades inadecuadas de mampostería o con insuficiente confinamiento.	4.08 245

5		Adobe o bajareque	Construcción de adobe con muros de gran espesor en el primer nivel y estructura de mampostería en el segundo. Fuerzas laterales resistentes por muros. Diafragmas flexibles constituidos por viguetas de madera y entablados. Cimentación con zapatas aisladas o de piedra brasa.	2.72 136
6		Marcos de concreto resistentes a momento	Estructura con marcos de concreto armado. Los pisos son losas aligeradas, que pueden ser con viguetas prefabricadas o losas macizas. Las cargas laterales son resistentes por los marcos, en los que puede tenerse un pequeño número de muros ligados. Los diafragmas son rígidos. Cimentación con zapatas aisladas ligadas o losa de cimentación.	0.15 9
7		Marcos de concreto arriostrados con muros de concreto	Similar al caso 6, excepto porque la mayor parte de la fuerza lateral es resistentada por muros de concreto armado de gran rigidez.	0.02 1
8		Marcos de concreto arriostrados con muros de mampostería	Similar al caso 7 excepto porque algunos muros de mampostería están ligados, y resisten una parte importante de la carga lateral.	0.03 2
9		Estructura de concreto celular	Estructura de losas y muros de concreto armado. Las cargas laterales son resistentes por los muros. La cimentación con losa de cimentación o cimientos corridos.	1.03 62
10		Marcos de acero resistentes a momento	Edificio compuesto por marcos con vigas y columnas de acero con uniones capaces de desarrollar momento. Los diafragmas son losas de concreto o sistemas de placa steel deck. Fuerzas laterales resistentes por los marcos. Cimentación con zapatas aisladas ligadas.	0.03 2
11		Marcos de acero arriostrados con diagonales o muros	Similar a sistema 10 excepto porque la rigidez lateral es proporcionada por marcos arriostrados con diagonales de acero.	0.03 2
12		Estructura de perfiles livianos (naves industriales)	Estructura metálica de poco peso compuesta por entramados de perfiles livianos, generalmente con cubiertas de lámina o paneles.	0.07 4

13		Estructura de madera	Construcciones de uno o dos pisos. Los pisos y techos están contruidos con viguetas que se apoyan sobre pie derechos. Excepcionalmente pueden emplear columnas aisladas. Las acciones de sismo son soportadas por muros, cuya rigidez depende del revestimiento. Los diafragmas son flexibles con entablados de madera.	0.50 30
----	---	----------------------	---	------------

El diseño y la construcción en el estado de Chiapas en lo general y para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en lo particular, puede clasificarse para fines de este diagnóstico en tres grandes sectores: edificación ejecutada por profesionales de ingeniería y arquitectura, la ejecutada por constructores empíricos y la ejecutada por el propio usuario, denominado autoconstrucción.

En el mapa de clasificación de construcciones (Figura 131) encontramos que los sistemas constructivos se han movido durante el paso de los años. Existen aún algunas construcciones de adobe y bajareque (2.72%), las cuales están en muy mal estado y no se consideran como monumentos históricos. El 69.24% de las construcciones están elaboradas con los sistemas ladrillo-losa maciza y block-losa maciza. Ambos sistemas ocupan tres cuartas partes de la mancha urbana.



Figura 130. Clasificación de construcciones de Tuxtla Gutiérrez, según la edad en que se desarrollaron (González *et al.*, 2010a).

Las construcciones de bajareque, tradicionales desde que los zoques habitaban en la ciudad, aún existen. Se ubican en los barrios más antiguos y son una especie de reliquia, muchas de ellas se encuentran en mal estado por la falta de mantenimiento, estando más propensas a sufrir daño cuando se presente un sismo. Se observa en la periferia de la ciudad construcciones con mampostería confinada (block o tabique), pero con diafragma flexible (cubierta de lámina o madera), (16.47%), además de estructuras de madera improvisadas, las que son vulnerables a las ráfagas de viento y a los incendios.

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez ha presentado cambios en sus sistemas constructivos, lo anterior se debe a una dinámica de costo del terreno, modas constructivas y economía de mercado. Sin embargo, es muy lenta y representa menos del 5% del inventario constructivo. En la Figura 131 se muestra el mapa de las edades de las estructuras, en él se observa que en la parte central de la mancha urbana existen construcciones con edades mayores a los 30 años, así como en regiones tradicionales de la ciudad como Terán, Rivera Cerro Hueco o Copoya. No obstante, la edad media de las construcciones de la ciudad está entre los 10 y los 20 años.

En la Figura 132 se muestra un mapa de las colonias que han presentado daños a partir de lo observado en los recorridos de campo para obtener las encuestas y de la información que fue proporcionada por el Instituto de Protección Civil para el Manejo de Riesgos de Desastres del Estado de Chiapas. Para el desarrollo del mapa se aplicó la metodología de CENAPRED (2006b) obteniendo el índice de vulnerabilidad física (I_{VF}).

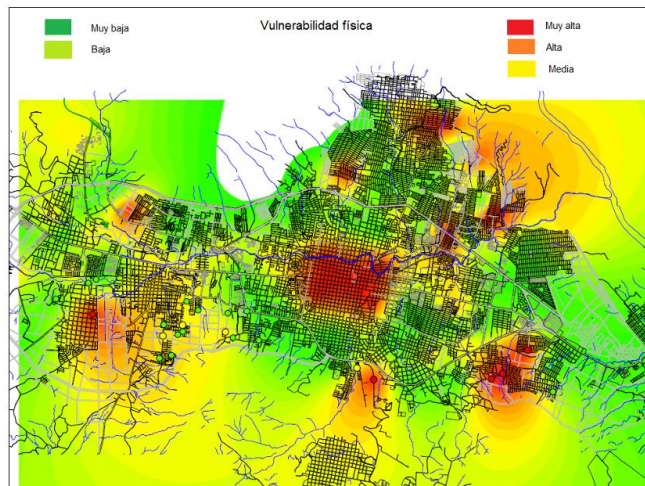


Figura 131. Mapa de daños observados en los recorridos de las encuestas en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas y considerando los datos del IPCMIRDECH. Se empleó la metodología de CENAPRED (2006b).

Puede afirmarse que si bien, algunas de las características de la mampostería simple, tales como: fragilidad, poca capacidad de absorción y disipación de energía, elevado valor de la relación: peso, sobre resistencia, degradación de rigidez, etc., la muestran como un material poco apto para soportar acciones sísmicas; mediante la adecuada incorporación del acero de refuerzo, ya sea en las modalidades de mampostería confinada o reforzada interiormente (sistema común en la región, González y Aguilar, 2004), presenta un buen comportamiento en sismos (Bazán y Meli, 2003).

Medir la vulnerabilidad mediante metodologías simplificadas tras la ocurrencia de un sismo no es cosa sencilla, ya que no todos los sismos son iguales en características de vibración e intensidad local. Ciertas familias o grupos de edificaciones pueden sufrir poco daño en un sismo y mucho en el siguiente. Entre uno y otro sismo la opinión pública y aun la opinión profesional pueden sobre valorar edificaciones que en realidad tienen alta vulnerabilidad.

5.1.6. Evaluación de la vulnerabilidad mediante SORIS en Tuxtla Gutiérrez

En esta sección se presentan los fundamentos de la metodología empleada para evaluar la vulnerabilidad a través del software SORIS, así como el efecto de las irregularidades constructivas en la vulnerabilidad estructural.

5.1.6.1. Fundamentos del software SORIS para determinar la vulnerabilidad

El daño de las estructuras depende de las demandas máximas de deformación, por lo que la deformación máxima es un factor clave para evaluar la vulnerabilidad (Figura 133). Se observa que mientras más grave es la pérdida de propiedades estructurales asociadas al daño, menor es la capacidad de deformación que la estructura permite antes del colapso, lo cual se debe a dos factores:

- El cortante máximo resistente y el actuante son prácticamente iguales (se agotó la capacidad de la estructura de recibir esfuerzos, $V/V_{máx.}$).
- La rigidez inicial prácticamente se degradó y ahora es mucho menor que la estructura requiere para tomar los esfuerzos, K/K_o , por lo que la rigidez degradada no soportará por más tiempo los esfuerzos inducidos por el sismo y el reacomodo de la distribución de masas en la estructura.

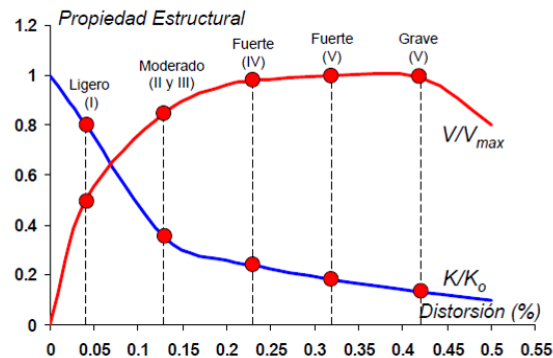


Figura 132. Daño estructural en mampostería en función de la demanda de deformación lateral (Terán y Zúñiga, 2007).

En esta investigación se considera la vulnerabilidad estructural como la relación entre la intensidad sísmica y el nivel de daño. En este enfoque la intensidad sísmica se mide con la aceleración espectral. El nivel de daño se estima tomando el desplazamiento máximo de entrepiso como parámetro de referencia. Se considera el desplazamiento relativo entre dos niveles contiguos, dividido entre la altura del piso. Existe un número importante de estudios que concluyen que dicho parámetro de la respuesta estructural presenta la mejor correlación con el daño estructural registrado (Bertero *et al.*, 1991; Moehle, 1992; Mayes, 1995; Moehle, 1996; Miranda, 1997; Priestley, 1997; Sozen, 1997; Aguiar, 2006; Miranda, 2007; Terán y Zúñiga, 2007).

El método empleado en esta tesis está basado en el parámetro “desplazamiento máximo de entrepiso”, mismo que presenta una excelente correlación entre el daño producido y la intensidad de los sismos. Dicho método busca considerar el sismo máximo probable en los periodos de retorno que sean compatibles con el inventario de construcciones, así como los usos y la economía de la región, para determinar el riesgo sísmico. Dado lo anterior considero que el empleo de éste es más apropiado que otras metodologías que, a diferencia de éste, basan la estimación del daño en observaciones del estado de las construcciones o en clases e índices de vulnerabilidad que los relacionan con la Intensidad de Mercalli Modificada, obteniendo resultados estables para sismos moderados, no así en sismos intensos.

A partir de la aceleración espectral es posible determinar la máxima distorsión de entrepiso de distintos sistemas constructivos (ecuación 34; Miranda, 2007):

$$\gamma_i = \frac{\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 (\eta N^\rho)^2}{4\pi^2 N h} S_a(T) \quad (34)$$

donde: β_1 , es la relación entre el máximo desplazamiento lateral en el nivel superior de la estructura y el desplazamiento espectral, considerando un modelo de comportamiento elástico lineal (Figura 134). Este factor depende del sistema estructural y del número de pisos. Se calcula a partir de la solución de la ecuación diferencial que describe el comportamiento de un sistema acoplado, compuesto por una viga continua de cortante y otra de flexión, sometido a carga lateral que varía con la altura (Miranda, 1997).

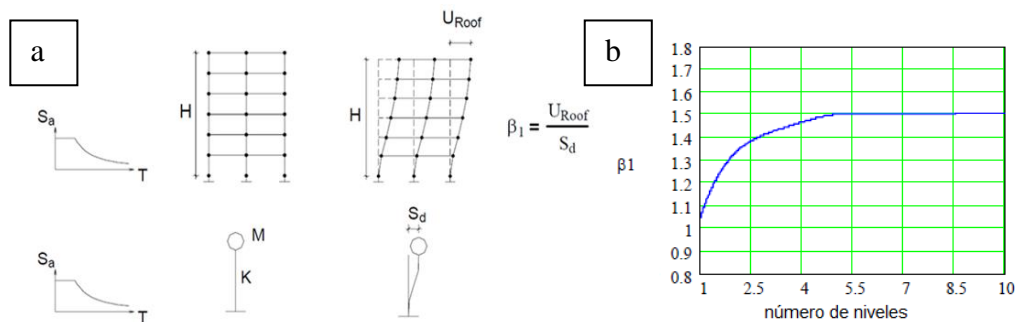


Figura 133. (a) Correlación entre el desplazamiento elástico de azotea de un SMGD vs S1GL (modificado de Proaño y Zavala, 2003); (b) Análisis de β_1 en estructuras tipo 1, donde se normaliza a 1.5 a partir de 5 niveles y es 1.0 para estructuras de un nivel.

β_2 , describe la relación entre la máxima distorsión de entrepiso y la distorsión global de la estructura, que se define como el máximo desplazamiento lateral en la azotea dividido por la altura total (Figura 135). β_2 depende del grado de participación de las deformaciones laterales de corte y flexión “ α ”, y del sistema estructural. Tiene en cuenta el hecho que en general las deformaciones laterales durante un sismo intenso no se distribuyen uniformemente con la altura de la edificación, pero que hay una tendencia a concentrar grandes deformaciones de entrepiso en algunos niveles (Miranda, 1997).

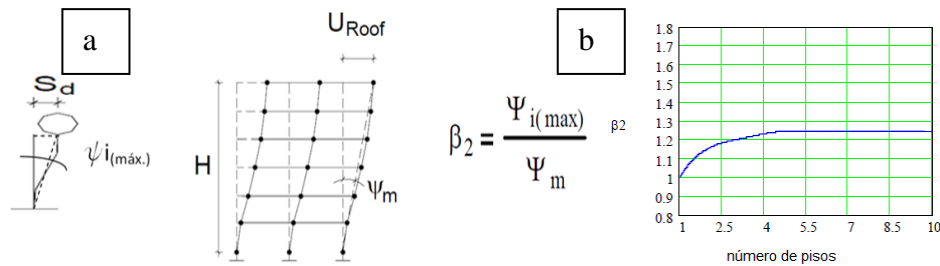


Figura 134. (a) Correlación entre la distorsión máxima elástica de un SMGD vs S1GL (modificado de Proaño y Zavala, 2003); (b) Análisis de β_2 en estructuras tipo 1, donde se normaliza a 1.25 a partir de 5 niveles y es 1.0 para estructuras de un nivel.

β_3 , expresa la relación entre el máximo desplazamiento lateral del modelo de comportamiento inelástico, y el desplazamiento máximo del modelo elástico lineal (Figura 136). Este factor depende de la demanda de ductilidad al desplazamiento, el periodo fundamental de vibración de la estructura y el tipo de suelo. Es calculado con funciones que han sido calibradas con estudios estadísticos de relaciones entre el máximo desplazamiento lateral de osciladores de un grado de libertad con comportamiento inelástico (NONLIN), y sus contrapartes en comportamiento elástico (SAP2000). Dichas calibraciones han sido realizadas para osciladores sometidos a acelerogramas registrados en Chiapas (Quaas *et al.*, 1995; RIIS; sismos sintéticos desarrollados en esta tesis).

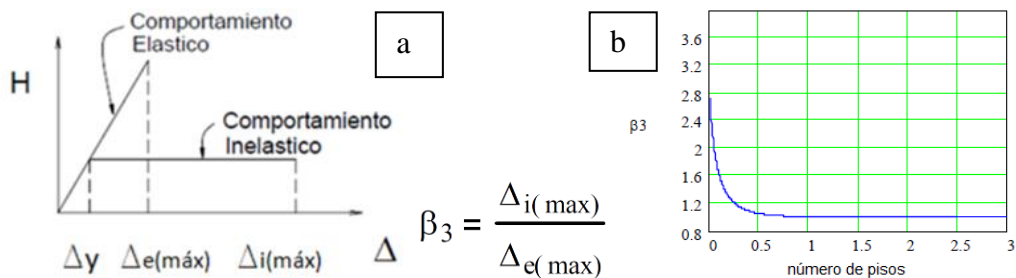
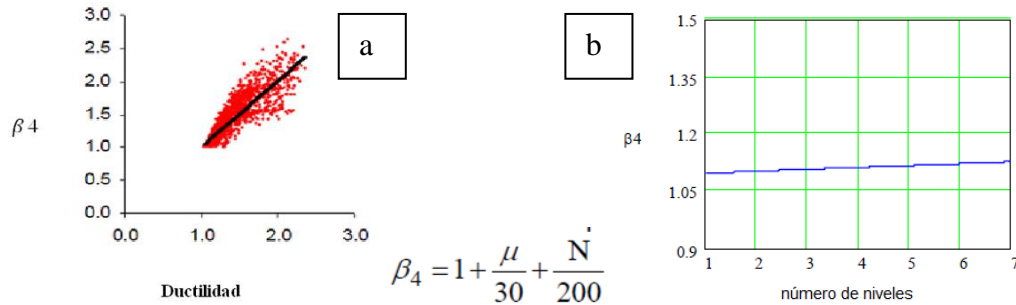


Figura 135. (a) Correlación entre el máximo desplazamiento lateral del modelo de comportamiento inelástico versus el del modelo elástico lineal (modificado de Proaño y Zavala, 2003); (b) Análisis de β_3 en estructuras tipo 1, donde se normaliza a 1.00 a partir de 1 nivel.

Para estructuras sobre suelos blandos, β_3 no sólo depende del periodo fundamental de vibración de la estructura sino más bien de la relación entre éste y el periodo dominante del suelo (tomado de la microzonificación sísmica realizada para el estudio de efecto de sitio). La demanda de ductilidad global de la estructura se estima con la aceleración espectral asociada al periodo de vibración de la estructura, la resistencia ante cargas laterales de la misma, y el factor de reducción de las cargas aplicadas. La resistencia lateral de la estructura depende del sistema estructural, el tipo de suelo, el mantenimiento y la edad, entre otros, lo que hace posible clasificar las estructuras en términos de reglamento de construcción vigente en el momento de ser construidas.

β_4 , este factor tiene en cuenta que la distribución de la carga lateral con la altura es diferente en el modelo elástico y en el inelástico. En el caso de comportamiento inelástico

se produce una gran concentración de la fuerza. Este factor depende del número de pisos y del nivel de deformación inelástica de la estructura, que se mide en términos de la demanda de ductilidad al desplazamiento (Figura 137). Siendo: N el número de pisos y μ la ductilidad de demanda de la estructura (Aguilar, 2006).



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

Figura 136. (a) Correlación entre el número de pisos y la demanda de ductilidad (modificado de Proaño y Zavala, 2003); (b) Análisis de β_4 en estructuras tipo 1, donde se tiene un comportamiento lineal con pendiente asociada a la demanda de ductilidad de 1.10 hasta 1.15.

Estos factores dependen de la ubicación de la estructura, el tipo estructural, el tipo de suelo y el año de construcción. Se tienen en cuenta el hecho de que la rigidez lateral de las estructuras localizadas en zonas de alta sismicidad es mayor que el de estructuras ubicadas en zonas de baja sismicidad (al menos así debería ser). También consideran que las estructuras construidas sobre suelos blandos son más flexibles que las construidas en suelos firmes debido a la flexibilidad de la cimentación. Estos parámetros han sido calibrados con modelos analíticos y medidas experimentales (Miranda, 2007).

T es el periodo y se considera importante, ya que no solo está asociado al número de niveles y al tipo de suelo donde se desplanta, sino también al sistema estructural y la demanda de ductilidad asociada. h es la altura de cada piso de la estructura. $S_a(T)$ es la aceleración espectral, que depende del peligro sísmico en el sitio, del efecto en la zona y del suelo donde se desplanta la estructura.

En esta investigación se reconoce que hace falta considerar de manera transparente el efecto de las irregularidades para determinar la distorsión máxima de entrepiso de la estructura y con ella obtener su vulnerabilidad. A los factores incrementales de la vulnerabilidad por irregularidades se les asignó el nombre de β_5 . Los factores incrementales son los siguientes: irregularidades en planta o en elevación, golpeteo con edificaciones vecinas, daños previos no reparados, columnas cortas, piso blando, entre otros. Debido a este cambio la ecuación 34 propuesta por Miranda (1997) y con posteriores modificaciones por el mismo autor y otros colegas (Miranda, 2007), quedaría propuesta en esta investigación de la siguiente manera (ecuación 35):

$$\gamma_i = \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \beta_5 \frac{S_a T^2}{4\pi^2 H} \quad (35)$$

Finalmente el valor esperado del daño de la estructura, dado un valor de distorsión máxima de entrepiso, se expresa como (ecuación 36):

$$E(\beta / \gamma_i) = 1 - \exp \left| \ln 0.5 \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_o} \right)^\varepsilon \right| \quad (36)$$

donde β es la pérdida bruta, γ_o y γ_i son parámetros de vulnerabilidad estructural que dependen del sistema estructural y de la fecha de construcción. $E(\beta / \gamma_i)$ es el valor de pérdida esperado. Nótese que por definición, β es la proporción entre el costo de reparación y el costo total, y su valor está entre 0 y 1, siendo 1 el 100% del costo total de construcción el de reparación. En el Anexo 4 se presenta el algoritmo completo del software SORIS, tanto en el análisis de la vulnerabilidad como en el de costos.

¿Porque es importante analizar la irregularidad de la estructura para determinar la vulnerabilidad?

En la Tabla 35 se resume las causas de los daños por sismos en estructuras de concreto y mampostería durante algunos terremotos que han sido importantes en la historia. La estructura de la tabla y algunos de los sismos estudiados se refieren al trabajo de Solomon y Murat (2008), no obstante para el análisis deseado en este trabajo, se identificaron efectos de irregularidad y se incluyeron eventos adicionales, los cuales preferentemente tienen una tipología estructural y constructiva similar a la zona de estudio.

De manera intencional se modificó la estructura de la Tabla 35 colocando, en las primeras columnas, deficiencias que están relacionadas con las irregularidades en planta y elevación, para destacar la importancia de esta variable. Como se observa en esta Tabla 35, prácticamente en todos los 21 sismos analizados se presentan daños por al menos tres patologías relacionadas con irregularidades. Tras lo anterior se puede afirmar que cualquier tipo de irregularidad es una de las causas más recurrente en los daños que se presentan durante los sismos en todo tipo de edificaciones, lo cual se reafirma en la Figura 138.

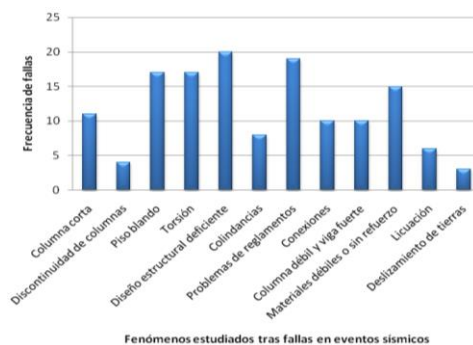


Figura 137. Frecuencia de daños durante eventos sísmicos asociados con distintas patologías de diseño, geométricas, constructivas, o geotécnicas con los datos de la Tabla 35.

Tabla 35. Resumen del efecto de sismos recientes en construcciones de concreto y mampostería, modificada de Solomon y Murat (2008), tomada de González y Gómez (2008).

Nombre del sismo	Fecha	M _w	Referencia	Columna corta	Discontinuidad de columnas	Piso blando	Torsión	Diseño estructural deficiente	Colindancias	Problemas de reglamentos	Conexiones	Columna débil y viga fuerte	Materiales débiles o sin refuerzo	Licuefacción	Deslizamiento de tierras
El Asnam, Argelia	10/10/80	7.3	EERI, 1983	•		•	•	•	•	•		•	•		
Viña del Mar, Chile	03/03/85	7.8	ICH, 1988		•		•	•		•		•	•	•	
Michoacán, México	19/09/85	8.1	Popov, 1987; Tena, 2004	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
Loma Prieta, Estados Unidos	17/10/89	6.9	EERI, 1989			•			•	•				•	
Spitak, Armenia	07/12/88	6.8	Tena, 2004				•	•		•	•		•		
Luzon, Filipinas	16/07/90	7.8	Hopkins, 1993			•	•	•					•	•	
Erzincan, Turquía	13/03/92	6.7	Saatcioglu and Bruneu, 1993	•		•	•	•		•		•	•		
Northridge, Estados Unidos	17/01/94	6.7	Tena, 2004	•			•	•		•	•				
Kobe, Japón	17/01/95	6.9	Tena, 2004				•	•	•	•	•		•	•	
Kocali, Turquía	17/08/99	7.4	Naeim et al., 2000	•		•	•	•		•	•	•	•		
Chi-Chi, Taiwan	21/09/99	7.6	Tsai et al., 2000	•	•	•		•		•	•	•	•		
San Salvador, El Salvador	13/01/01	7.6	Alarcón, 2005			•	•	•	•	•		•	•		
Bhuj, India	26/01/01	7.7	Humar et al., 2001	•		•	•	•			•			•	
Tecomán, México	21/01/03	7.8	Alcocer y Klinger, 2006			•	•	•		•			•		
Bingöl, Turquía	01/05/03	6.4	Dogangün, 2004	•		•		•	•	•	•				•
Lefkade, Grecia	14/08/03	6.2	Karakostas et al., 2005	•		•	•	•		•					
Bam, Irán	26/12/03	6.5	Tena, 2004			•	•	•		•			•		
Sumatra, Indonesia	26/12/04	9.3	CAEE, 2005	•		•		•		•	•	•	•		
Java, Indonesia	27/05/06	6.3	EERI, 2006		•	•	•	•		•		•		•	•
Pisco, Perú	15/08/07	8.0	Klinger, 2007; Elnashai et al., 2008			•	•	•	•	•	•		•		
Wenchuan, China	12/05/08	8.3	Xiao, 2008	•		•	•	•	•	•		•	•		•

Para determinar los parámetros correspondientes a las distintas betas (β_1 a β_5) señaladas en la metodología propuesta para evaluar la vulnerabilidad, se modelaron un conjunto de prototipos constructivos (Tabla 34) y los cuales fueron divididos en tres grupos:

- Estructuras básicamente a cortante (muros), (sistemas 1, 2, 3, 4, 5, 9 y 13).
- Estructuras a base de marcos no contraventeados (sistemas 6 y 10).
- Estructuras a base de marcos contraventeados (sistema mixto marcos y muros), (sistemas 7, 8, 11 y 12).

Una de las complicaciones para el modelado es definir el nivel de detalle a desarrollar en SAP2000, principalmente para muros, para lo cual retomamos la propuesta de Pérez-Gavilán (2007) y se revisaron los modelos de columna ancha con elementos tipo “frame” (CA-1, CA-2 y CA-3), modelos de elemento finito MEF con elementos tipo “shell y frame” (EFSV-1, EFSV-2, EFSV-3 y EFSV-4) y los modelos de elemento finito MEF con elementos tipo “membrane y frame” ó metodo de paneles (EFCV-1, EFCV-2, EFCV-3 y EFCV-4; Figura 139).

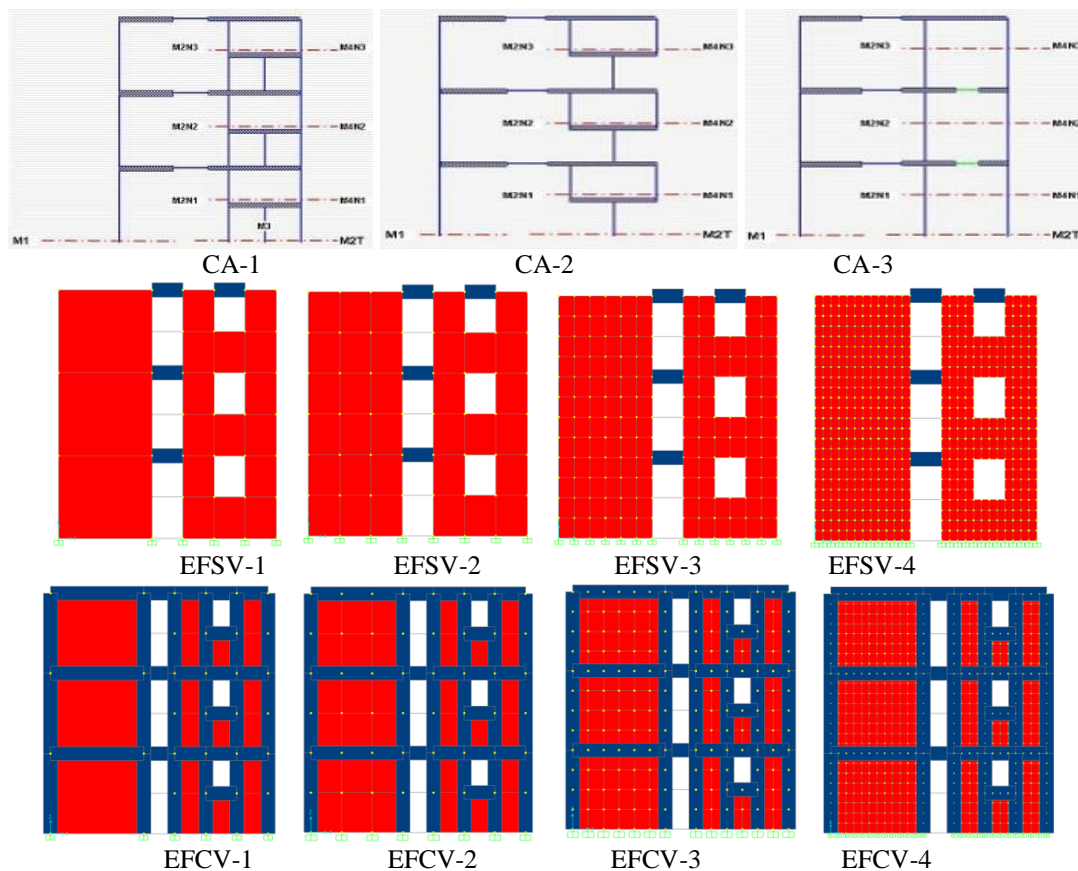


Figura 138. Alternativas de modelado de muros: Columna ancha, MEF con elementos tipo Shell y MEF con elementos tipo Membrane, respectivamente (modificado de Pérez-Gavilán, 2007).

En la Figura 140 se relacionan los tres modelos analizados en sus once variantes, comparando su comportamiento para estimar deformaciones de los nudos ante el análisis de empujón (pushover) aplicado mediante SAP2000. Se observa que los modelos que emplean elementos finitos MEF tipo Membrane o de paneles con castillos y cadenas modelados con elementos Frame o barras, tienen más precisión para determinar deformaciones que los modelos de elemento finito que utilizan elementos del tipo Shells, además de acercarse a los resultados que se obtienen con el método de columna ancha propuesto por Bazán y Meli (2003) y adoptado por la NTC-DS-RCDF-2004.

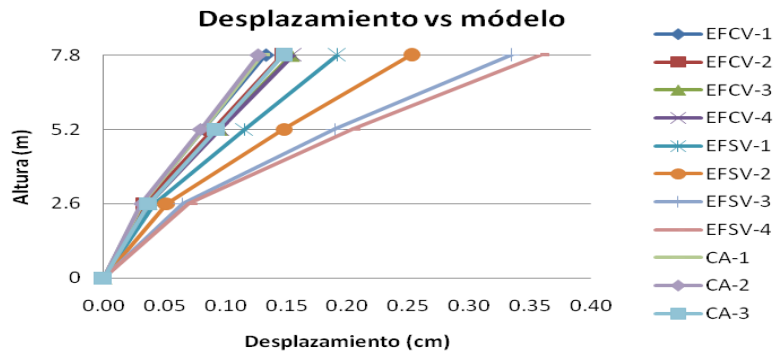


Figura 139. Comparación de los distintos modelos CA (Columna ancha), ESCV MEF con Membrane y EFSV MEF con Shells.


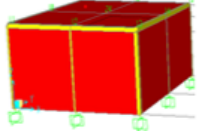
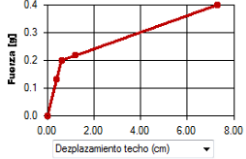

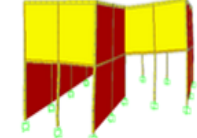
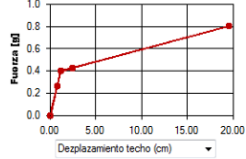

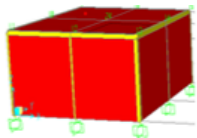
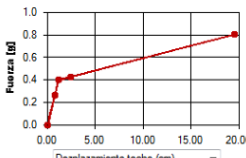

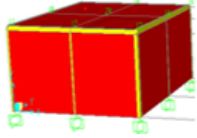
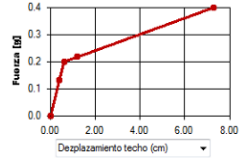

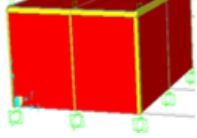
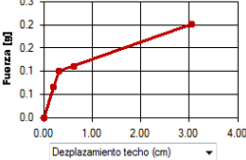

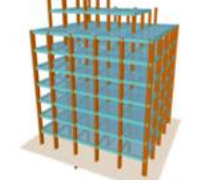
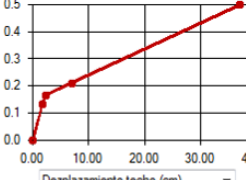

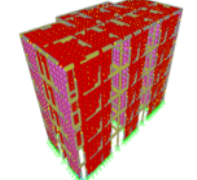
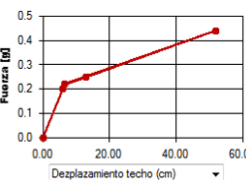

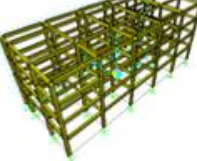
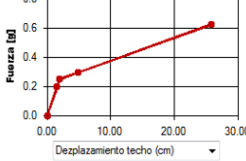
De los resultados obtenidos que surgen de la comparación de todos los modelos (tres) y casos (once) empleados, se desprenden los análisis siguientes:


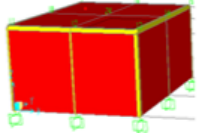
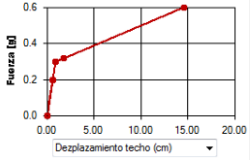

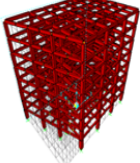
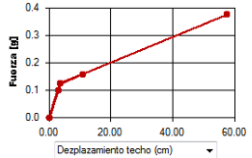

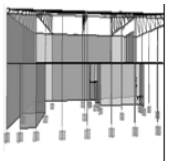
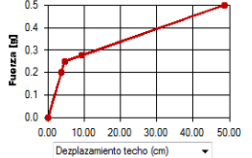

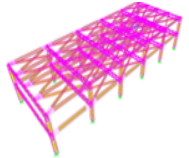
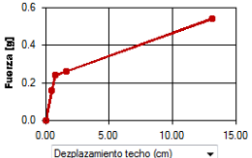

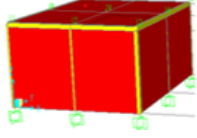
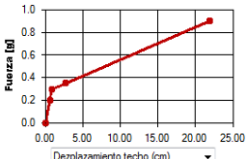
- Los modelos analizados con MEF de muros con huecos tenderán a tomar menos fuerza cortante que el esperado con el método de referencia (columna ancha, CA). Esta tendencia es más marcada a medida que se refina la discretización. Los valores de cortante que pueden predecirse con los modelos de CA son consistentes, no así con todos los modelos de MEF con Shells y MEF con Membrane.
- Es conveniente usar una modelación uniforme si se segmentan los muros se debe hacerlo siguiendo el mismo criterio en toda la estructura (mismos elementos y dimensiones), o bien modelar con una sola barra los muros y las propiedades transformadas de los castillos (columna ancha). Esto hace que las rigideces relativas sean más consistentes y con ellos los resultados.
- El MEF empleado para modelar los muros y estructuras en el estudio de irregularidad de este proyecto solo pretende encontrar el desplazamiento máximo en nudos de control, por lo que podemos afirmar que los modelos con los que se desarrolló son adecuados y se usó en particular el MEF con Membrane y Frames.

A continuación se diseñan los modelos en SAP2000 buscando encontrar las propiedades siguientes: Masa “ M ”, Rigidez “ K ”, Máximo desplazamiento de azotea “ U_{roof} ” y Máxima distorsión en columnas “ y_m ”. En la Tabla 36 se muestran de manera esquemática los modelos para los 13 sistemas constructivos encontrados y la Curva

Fuerza-Desplazamiento, la cual caracteriza la capacidad a cortante del sistema constructivo.

Tabla 36. Modelado en SAP de los sistemas constructivos locales.

Número	Fotografía	Nombre	Modelo en SAP2000	Curva Fuerza-Desplazamiento
1		Mampostería sin refuerzo		
2		Mampostería reforzada o confinada con diafragma rígido		
3		Mampostería reforzada o confinada con diafragma flexible		
4		Construcción informal (mampostería mal confinada o reforzada)		
5		Adobe o bajareque		
6		Marcos de concreto resistentes a momento		
7		Marcos de concreto arriostrados con muros de concreto		
8		Marcos de concreto arriostrados con muros de mampostería		

9		Estructura de concreto celular		
10		Marcos de acero resistentes a momento		
11		Marcos de acero arriostrados con diagonales o muros		
12		Estructura de perfiles livianos (naves industriales)		
13		Estructura de madera		

5.1.6.2. Ejemplo de la obtención de la vulnerabilidad con SORIS

La metodología para determinar la vulnerabilidad sísmica está descrita en el apartado 5.1.6.1. Adicionalmente, se puede apreciar con mayor detalle en el algoritmo del software SORIS del Anexo 4. Para describir las características y resultados obtenidos mediante la aplicación de esta, se aplicó la metodología en una escuela de educación básica de 18 años de antigüedad ubicada en el centro de Tuxtla Gutiérrez como un ejemplo. Esta escuela fue diseñada de acuerdo con los esquemas federales de diseño y normativa establecidos tras los sismos de septiembre de 1985. Estos diseños y normas se aplicaban en cualquier construcción a nivel nacional.

Para la comprensión del ejemplo se listan la serie de pasos desarrollados y se elaboró un esquema en la Figura 141. De la misma manera en que esta metodología se aplicó a la escuela antes mencionada, se emplea para analizar la base de datos construida para toda la ciudad.

Pasos para determinar la vulnerabilidad de la escuela de educación básica en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas:

1. Se empleó el sismo de diseño obtenido en el capítulo 4 con las funciones de Green empíricas, posteriormente se determinó la PGA y se ingresó al software.

- Adicionalmente se empleó la base de datos de isoperiodos y zonificación geotécnica de Tuxtla Gutiérrez. Con esta información mediante el programa SORIS se construyeron los mapas geotécnico y de isoperiodos. Los valores resultantes de los mapas se asocian a cada estructura de la base de datos de construcciones de la ciudad que se van a analizar.
2. Se determinaron las características físicas de las distintas construcciones a analizar mediante la aplicación de una encuesta (Anexo 3).
 3. Se construyó una base de datos a partir de la encuesta del Anexo 3. Se desarrollaron y aplicaron 6,000 encuestas (una de las encuestas es la de la escuela que se presenta en el ejemplo). Las encuestas se capturaron en una base de datos en Excel, que es compatible con el software SORIS aquí propuesto.
 4. Se elaboró el modelo elástico de múltiples grados de libertad (SMGL) con el software SAP2000 de cada uno de los sistemas constructivos evaluados.
 5. Del modelo elástico SMGL se obtienen los resultados: Masa M , Rigidez K , Máximo desplazamiento de azotea U_{roof} , Máxima distorsión en columnas ψ_m .
 6. Se elaboró el modelo inelástico de un grado de libertad (S1GL) con el software NONLIN.
 7. Del modelo elástico S1GL se obtienen los resultados: Desplazamiento máximo S_d , Desplazamiento máximo elástico Δ_e , Desplazamiento máximo inelástico Δ_i , Máxima distorsión en columnas, ψ_{im} .
 8. Con los datos de los programas SAP2000 y NONLIN se construyó el algoritmo del programa SORIS, al obtener las betas y hacer las ecuaciones de cada una de estas para los distintos sistemas constructivos.
 9. Se determinó el factor β_1 el cual es la correlación entre el desplazamiento elástico de azotea de un SMGD versus S1GL.
 10. Se determinó el factor β_2 el cual es la correlación entre la distorsión máxima elástica de un SMGD vs S1GL.
 11. Se determinó el factor β_3 el cual es la correlación entre el máximo desplazamiento lateral del modelo de comportamiento inelástico versus el del modelo elástico lineal.
 12. Se determinó el factor β_4 el cual es la correlación entre el número de pisos de la construcción y la demanda de ductilidad del sistema, la cual asocia indirectamente la sobrerresistencia, la redundancia y la ductilidad misma.
 13. Se determinó el factor β_5 el cual es un factor de amplificación de los otros betas. Este factor incluye: La irregularidad en planta, en elevación, piso blando y golpeteo con construcciones vecinas. La variable β_5 comprende un rango entre 1 y 2.5, en caso de ser mayor se toma 2.5, ya que de acuerdo a los modelos desarrollados se consideró que la deformación de una estructura regular, versus una irregular se incrementa como máximo en un rango de 2.5 veces (González y Gómez, 2008; González *et al.*, 2009a).
 14. Posteriormente se obtuvieron los resultados del SORIS: Desplazamiento máximo de la estructura, γ_i y Pérdida estimada, $E(\beta/\gamma_i)$.
 15. Se identificó en la curva fuerza desplazamiento del sistema considerado, el estatus de comportamiento del sistema estructural (nivel de daño alcanzado).
 16. Finalmente se calculó el costo del daño, el cual es resultado de la multiplicación de los factores asociados al número de m^2 de construcción por el valor presente

del costo por m^2 de ese sistema constructivo de acuerdo con sus acabados, por el factor de reducción costo por edad y/o mantenimiento y el factor de ubicación.

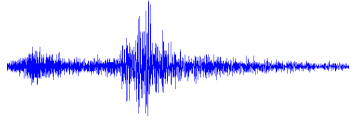



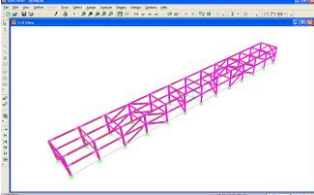

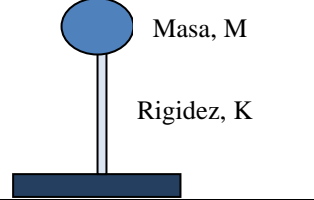

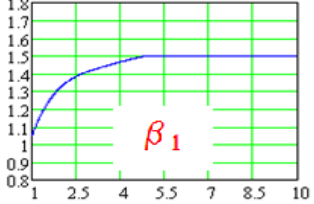

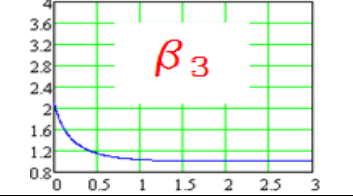
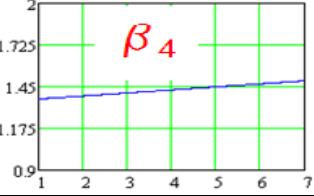
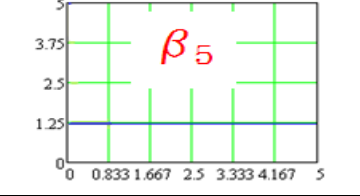
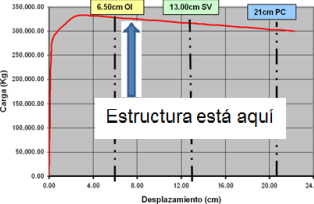
		
<p>Paso 1</p>	<p>Paso 2</p>	<p>Paso 3</p>
		<p>Masa, M Rigidez, K Máximo desplazamiento de azotea, U_{roof} Máxima distorsión en columnas, ψ_m</p>
<p>Paso 4</p>		<p>Paso 5</p>
	 <p>Masa, M Rigidez, K</p>	<p>Desplazamiento máximo, S_d Desplazamiento máximo elástico, Δ_e Desplazamiento máximo inelástico, Δ_i Máxima distorsión en columnas, ψ_{im}</p>
<p>Paso 6</p>		<p>Paso 7</p>
	 <p>β_1</p>	 <p>β_2</p>
<p>Paso 8</p>	<p>Paso 9</p>	<p>Paso 10</p>
 <p>β_3</p>	 <p>β_4</p>	 <p>β_5</p>
<p>Paso 11</p>	<p>Paso 12</p>	<p>Paso 13</p>
<p>Resultados de SORIS</p> <p>Desplazamiento máximo de la estructura, γ_i</p> <p>Pérdida estimada, $E(\beta/\gamma_i)$</p>	 <p>Estructura está aquí</p>	<p>Determinación de costos</p> <p>Costo del daño = Número de m^2 * Costo por m^2 * Reducción costo por edad y mantenimiento * Factor de ubicación</p>
<p>Paso 14</p>	<p>Paso 15</p>	<p>Paso 16</p>

Figura 140. Pasos de SORIS para determinar la vulnerabilidad y pérdida económica de la estructura estudiada en el ejemplo.

5.1.6.3. Comparación de los resultados con las tres metodologías empleadas

En la Figura 142 se muestra una comparación de los resultados de vulnerabilidad estructural de las construcciones de la ciudad a través de tres metodologías empleadas en esta tesis para el análisis de la misma: a) CENAPRED (2006b), b) UAM (González *et al.*, 2010) y c) SORIS.

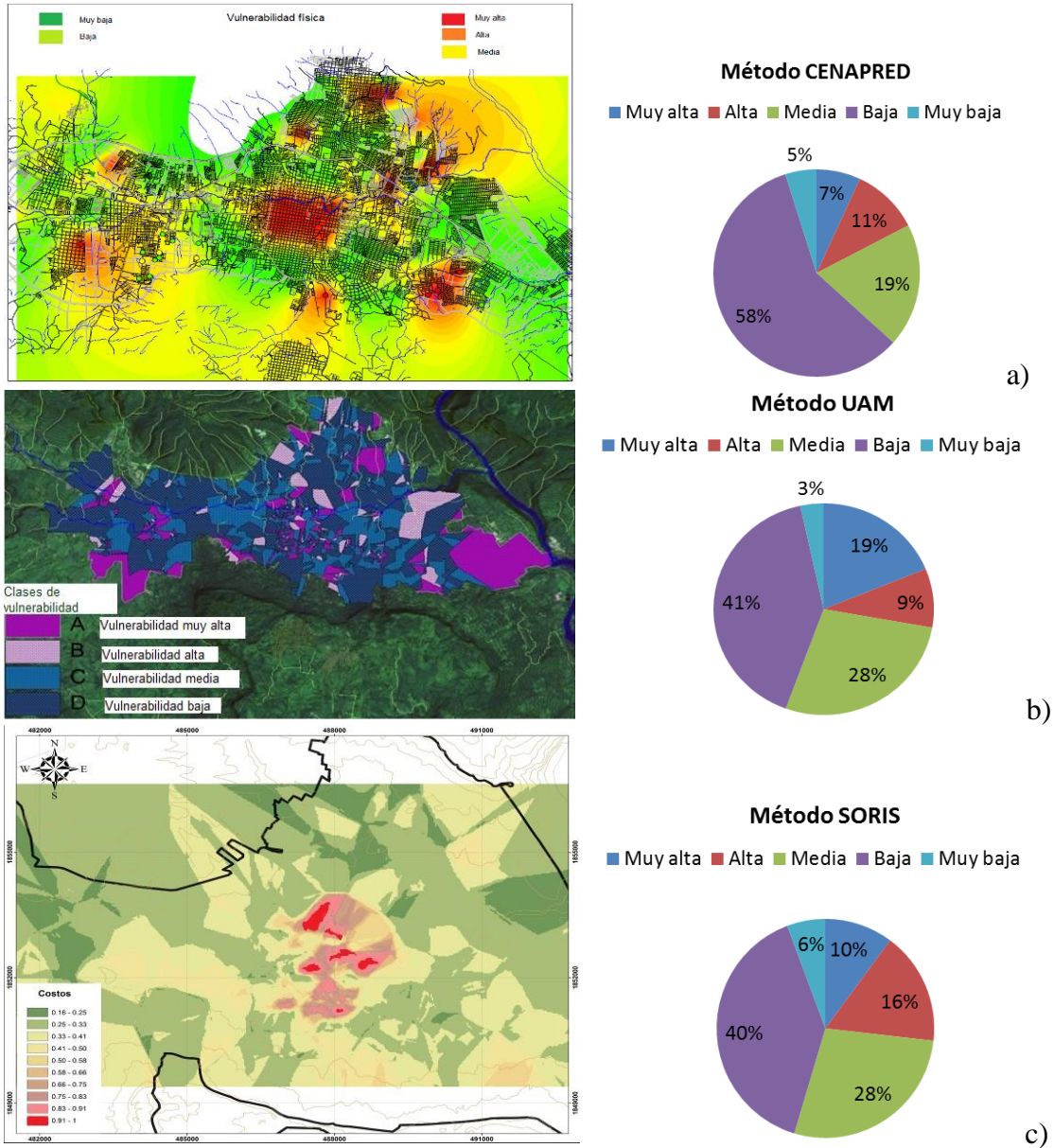


Figura 141. (a) Vulnerabilidad física de acuerdo con el método de CENAPRED (2006b), incluyendo gráfica de pastel con índices de vulnerabilidad; (b) Vulnerabilidad física de acuerdo con el método de UAM (González *et al.*, 2010), incluyendo gráfica de pastel con índices de vulnerabilidad; (c) Vulnerabilidad física de acuerdo con el método SORIS, incluyendo gráfica de pastel con índices de vulnerabilidad.

Del análisis de los tres métodos empleados para determinar la vulnerabilidad (Figuras 142 y 143) se puede señalar de manera general lo siguiente:

El método del CENAPRED (2006b) se encuentra determinado por los sistemas constructivos encontrados (1 a 10), identifica las construcciones que han sido dañadas y la zona sísmica donde se ubica la ciudad de estudio (refiriéndose al peligro). Esta última variable termina siendo constante, no obstante está explícita en el método. Los resultados indican que la máxima vulnerabilidad está en el centro de la ciudad y en regiones de la ladera sur poniente y oriente, así como en la ladera norte oriente, ya que son estas zonas las que presentan mayor número de construcciones de adobe, bajareque, mampostería mal reforzada, estructuras elaboradas con materiales considerados como no adecuados y construcciones con daños previos. También se observa que es la metodología que presenta el menor índice de vulnerabilidad del inventario constructivo, ya que el 60% es baja o muy baja y solo el 18% de las construcciones presentan vulnerabilidades altas o muy altas. Este nivel de vulnerabilidad es resultado de las consideraciones del método debido a que en este las construcciones de mampostería confinadas y/o reforzadas interiormente se contemplan como poco vulnerables, siendo este sistema constructivo el que ocupa casi tres cuartas partes de las construcciones de la ciudad. Además, esta metodología es para viviendas y dentro de los sistemas que se emplean para vivienda la mampostería confinada es la menos vulnerable, mientras que las otras dos metodologías (CENAPRED y SORIS) contemplan otros sistemas estructurales como las estructuras de acero.

El método UAM (González et al., 2010) está determinado por los sistemas constructivos encontrados a los que se les asigna una clase de vulnerabilidad (A a F) e identifica las construcciones que han sido dañadas (grado de daño de 0 a 5), para contemplar el peligro sísmico de la zona implica la IMM alcanzada por el sismo a evaluar, a dicha intensidad se asocia un porcentaje de estructuras dañadas por clase de vulnerabilidad. Este valor se encuentra implícito de la determinación de la vulnerabilidad. Los resultados del método demuestran que la máxima vulnerabilidad está en el centro de la ciudad y en la perifería, ya que son estas zonas las que presentan mayor número de construcciones de adobe, bajareque, mampostería mal reforzada, construcciones elaboradas con materiales considerados como no adecuados y/o construcciones con daños previos, lo que las clasifica como grado A ó B. También se observa que es la metodología que presenta mayor índice de vulnerabilidad del inventario constructivo, ya que el 44% es baja o muy baja y el 28% de las construcciones presentan vulnerabilidades altas o muy altas. Este nivel de vulnerabilidad no es detallado en el método y es subjetivo dependiendo del criterio de la persona que realiza la encuesta, ya que una misma construcción (estructura de mampostería) puede ser ubicada como clase de vulnerabilidad desde A hasta D y la diferencia de la evaluación correcta lo determina el criterio del encuestador. Los resultados están determinados por la presencia de estructuras de mampostería siendo este sistema constructivo el que ocupa casi tres cuartas partes de las construcciones de la ciudad.

El método SORIS, está determinado por los sistemas constructivos encontrados durante las encuestas, a los que se les asigna un grupo estructural (1 al 13). Se identifican las

construcciones que han sido dañadas, las que tienen mal mantenimiento, así como las que son irregulares (en planta, elevación, piso blando, sin juntas de separación suficientes, etc.). Para considerar el peligro sísmico de la zona se introduce un valor de PGA explícito y determinante de las deformaciones que las construcciones alcancen y del daño que puede producirse. El método determina que la máxima vulnerabilidad está en el centro y ladera sur de la ciudad, ya que son estas zonas las que presentan mayor número de construcciones de adobe, bajareque, mampostería mal reforzada, construcciones elaboradas con materiales considerados como no adecuados y/o construcciones con daños previos. También se observa que es la metodología que contempla un índice de vulnerabilidad del inventario constructivo intermedio, pero cercano al de la UAM, ya que el 46% es baja o muy baja y el 26% de las construcciones presentan vulnerabilidades altas o muy altas. Este nivel de vulnerabilidad es detallado y es más objetivo a partir de los distintos parámetros empleados para obtenerlo. No obstante, es dependiente de la calidad de la base de datos y del criterio de la persona que realiza la encuesta, ya que una misma construcción puede ser clasificada en diferentes sistemas constructivos y de esto depende primordialmente la vulnerabilidad asignada y la estimación del comportamiento que tendría este sistema frente a los sismos.

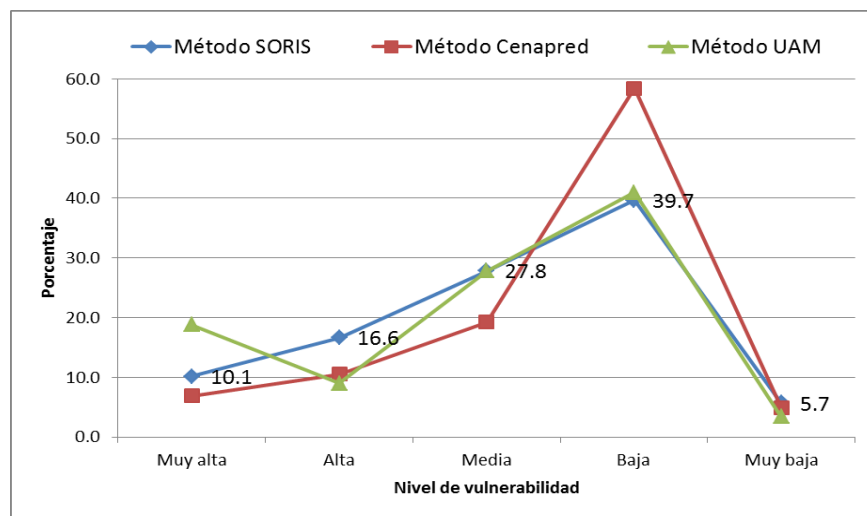


Figura 142. Comparación entre tres metodologías empleadas para evaluar la vulnerabilidad de las construcciones: SORIS, UAM, CENAPRED.

En la Figura 143 se observa lo cercano que está el resultado de la metodología UAM y la de SORIS. Sin embargo, debido al tamaño de la muestra, ya que al ser representativa y distribuida espacialmente respecto a la densidad de población de las distintas regiones, se espera que los errores de criterio (al no ser generalizados en toda la muestra) se compensen. Es decir, en unos casos es a favor y otros en contra (Guillén, 2005). Debido a los resultados anteriores se entiende el porque el método de la UAM basado en la EME-98 ha sido utilizado con éxito en diversos estudios. Sin embargo, de aumentar la intensidad del sismo sus resultados no son tan estables, lo cual ha sido documentado en otros estudios no solo en México sino incluso en países que tienen bases de datos de daños previos como Italia y España (Pujades y Barbat, 2004).

Después de evaluar la vulnerabilidad estructural con tres métodos distintos (UAM, CENAPRED y SORIS), en esta investigación se encontró que el método SORIS, que es propuesto en esta tesis, es el más eficiente. Este método permite determinar el comportamiento de las estructuras de manera cuantitativa identificando en qué nivel de daño se encontrará la estructura ante sismos de cualquier intensidad. Otra ventaja es que posibilita determinar diferencias de comportamiento estructural ante sismos en construcciones que tienen el mismo sistema estructural, pero que incluyen diferentes irregularidades constructivas.

5.1.7. Discusión

Uno de los elementos que incentiva la vulnerabilidad estructural es el desconocimiento de la importancia de cómo construir seguro (construcción sismo resistente). No obstante, este desconocimiento no siempre es debido a la falta de recursos económicos para cubrir los costos de una estructura sismoresistente, sino a la reproducción de patrones o paradigmas aprendidos de cómo se construía en las regiones de donde eran originarios las personas que han migrado a Tuxtla Gutiérrez. Gran parte de estos nuevos habitantes procedían de zonas con menor actividad sísmica, o de áreas rurales donde los sistemas constructivos carecen de una asesoría ingenieril sismoresistente. Más de la mitad de las construcciones en la ciudad han sido parte de procesos de autoconstrucción (SEDESOL, 2011) esto determina la reproducción de malas prácticas. Ramírez de Alba *et al.* (2011) señalan que incluso algunas de las viviendas desarrolladas por empresas privadas carecen de diseño sismoresistente.

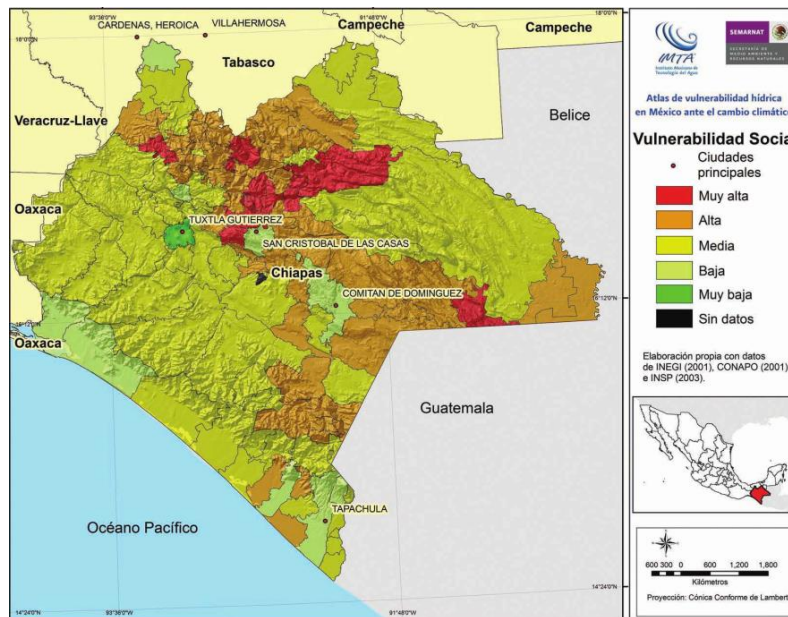


Figura 143. Mapa de vulnerabilidad social del estado de Chiapas, elaborado por el IMTA y SEMARNAT (2011).

En la Figura 144 se muestra un mapa de la vulnerabilidad social del estado de Chiapas elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la SEMARNAT

(2011). Se observa que Tuxtla Gutiérrez aparece con un nivel de vulnerabilidad muy bajo, lo cual no es necesariamente cierto, ya que si solo se compara con indicadores generales de vivienda, salud, educación, trabajo, etc., podría decirse que a nivel estado su vulnerabilidad comparativa es muy baja, no obstante la vulnerabilidad es un atributo personal, por lo cual en cada municipio existen todos los niveles de vulnerabilidad, Tuxtla Gutiérrez no es la excepción.

Para poder actuar sobre la vulnerabilidad estructural es preciso entender que la mayor parte del proceso de urbanización y construcción en nuestro país se da a través de las acciones que realiza la gente misma al margen de cualquier norma. A la vez, una proporción creciente de las actividades productivas y económicas se realiza en el llamado “*sector informal*”. Por consiguiente, la clave para reducir la vulnerabilidad no está tanto en acciones a nivel de gobierno o de instituciones profesionales o del sector formal sino más bien a nivel de la población misma y sus organizaciones (invasiones, autoconstrucción). Dado que la vulnerabilidad se produce a este nivel su mitigación también tiene que realizarse por parte de la gente misma, ¿cómo lograr esto?, trabajar en la construcción de capacidades con visión de respeto y ciudadanía; ya que de nada sirven los reglamentos de construcción modernos y actualizados si no se emplean para construir.

Las oportunidades de controlar la naturaleza son remotas, por lo tanto, la alternativa más viable reducir las posibilidades de ocurrencia de desastres es actuar sobre la vulnerabilidad. En este trabajo se han hecho evidentes los niveles de vulnerabilidad física en la ciudad. Sin embargo, no es suficiente actuar solamente sobre los rasgos exteriores físicos de la vulnerabilidad, sino sobre todo el sistema: la pobreza, el modelo de crecimiento y apropiación del territorio, la falta de capacidades cognitivas y de acción frente al tema de los fenómenos naturales y la construcción social del riesgo en todas sus dimensiones. De no hacerlo así, no existen las capacidades para enfrentar los retos que se generan en la ciudad en un sismo importante. Comerio y Blecher (2010) encontraron que después de los sismos de Loma Prieta en 1989 y de Northridge en 1994, a las regiones más ricas de California les tomó entre 1 y 3.5 años recuperarse, ¿cuánto le llevaría a Tuxtla Gutiérrez recuperarse de un sismo intenso?.

CAPÍTULO

6

6. ESCENARIO DE RIESGO SÍSMICO Y SU IMPACTO ECONÓMICO EN LAS ESTRUCTURAS EN TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

6.1. Estudios de riesgo sísmico

El riesgo sísmico se ha definido como las pérdidas esperadas en un elemento vulnerable y expuesto durante un periodo de tiempo especificado. El elemento en riesgo puede ser un edificio, un grupo de viviendas, una zona urbana, una ciudad o las personas que viven en estos; puede ser la actividad económica de la zona, los servicios públicos o las vías de comunicación. Por este motivo el riesgo puede medirse en términos de pérdidas de vidas humanas o heridos resultantes, de pérdidas económicas o de daño físico resultante en las estructuras, del tiempo de inoperancia de un edificio, etc.

La principal causa de las grandes pérdidas humanas y económicas que se producen en el mundo debido a los terremotos es por el comportamiento sísmico inadecuado de las estructuras. En concreto, la causa del mayor número de víctimas durante los sismos se debe al colapso de las construcciones, que generalmente son antiguas, poco dúctiles, sin diseño sismoresistente o con diseño rebasada por el peligro actualizado en la zona, etc.

Haciendo referencia solamente al comportamiento de las estructuras, el riesgo sísmico puede definirse como el grado de pérdidas en resistencia, rigidez y capacidad de deformación que sufren las estructuras durante el lapso de tiempo que permanecen expuestas a la acción sísmica, el cual se denomina “*periodo de exposición*” o “*periodo de vida de las estructuras*” (Arellano *et al.*, 2003).

De acuerdo con Ordaz (2011), para estimar el riesgo sísmico que enfrenta una estructura en un sitio se requiere saber: 1) donde ocurren los temblores potencialmente dañinos; 2)

qué tan frecuentemente ocurren; 3) cuál es la distribución de tamaños de estos temblores; 4) qué intensidades se producen en el sitio en cuestión, si ocurre un temblor con magnitud y posición conocidas; 5) qué daños producirá en distintas estructuras y esos daños que costos representan.

Barbat (1998) señala que el riesgo resulta de combinar la probabilidad de que se presente un peligro por un fenómeno natural con la probabilidad de falla del sistema de interés o con la distribución de probabilidades de los costos humanos, económicos o sociales y de sus posibles consecuencias, tomando en cuenta todos los posibles niveles de intensidad del fenómeno natural:

1. Probabilidad de falla del sistema o estructura en cierto intervalo de tiempo.
2. Costo esperado de daños por unidad de tiempo.

Ordaz (2011) señala que para disminuir el riesgo sísmico podemos seguir las siguientes tres opciones:

1. Disminuir el nivel de peligro, para lo cual deberíamos desplazar nuestra construcción a una zona de menor amenaza. Se debe considerar la evaluación del efecto de sitio, las fallas activas, la reducción de la densidad de construcción, así como las regulaciones para construir en las laderas, todo esto en la planeación urbana (solo posible para nuevas construcciones).
2. Disminuir la vulnerabilidad, mejorando los modelos de análisis, los reglamentos y normas de diseño, la construcción y supervisión, las técnicas de rehabilitación, entre otras (es posible de alcanzar, aunque costoso cuando se considera el inventario de construcciones existentes).
3. Disminuir los costos de la inversión construida en ciudades cercanas a fuentes sismogénicas. Lo anterior para disminuir el nivel del daño esperado en caso de un evento (lo anterior es poco probable y solo posible para construcciones nuevas).

Es importante recalcar que no es posible que el riesgo sea cero, ya que para lo cual la amenaza, la vulnerabilidad o ambas deberían ser cero, sólo es posible definir un nivel de riesgo aceptable que sea lo suficientemente bajo para que se reduzcan las consecuencias negativas tanto humanas como económicas.

Ordaz (2011) propuso el cálculo del riesgo sísmico como lo establece la expresión 37.

$$\beta = \int_0^{\infty} \frac{dv(S_a)}{dS_a} E(\beta/S_a) dS_a \quad (37)$$

donde: S_a es la intensidad sísmica, $v(S_a)$ es la tasa de excedencia de esta intensidad, $E()$ denota el valor esperado. En este modelo, la pérdida que ocurre al presentarse un sismo con intensidad conocida es una variable aleatoria cuyo valor no puede anticiparse, y sobre la cual sólo puede fijarse una distribución de probabilidad. El término (β/S_a) es

usualmente designado vulnerabilidad estructural, y es el valor esperado de pérdida que tendría si ocurriera un sismo con intensidad S_a que afectara el sitio de interés.

6.1.1. Metodologías para los estudios de riesgo sísmico en el mundo

Para aplicar metodologías que trabajan el concepto de riesgo sísmico en la actualidad se camina en dos tendencias básicas, las que denominaremos metodologías de dos y de tres pasos (Figura 145; Miranda, 2007).

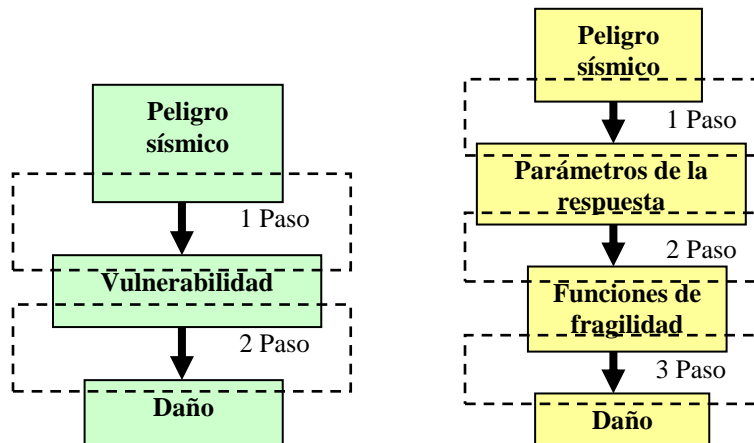


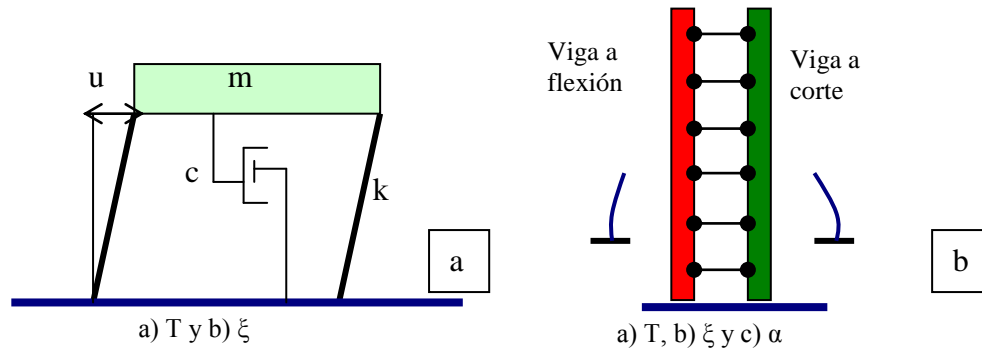
Figura 144. Esquemas para determinación de daño sísmico (Miranda, 2007).

Las metodologías de dos pasos consideran la vulnerabilidad a través de procesos estructurales simplificados, con lo cual se determina la clase o índice de vulnerabilidad asociada a cada sistema constructivo. Esta clase o índice puede ser obtenido de manera directa como se hace en los dos métodos que se presentan en este trabajo del CENAPRED (2006b) y el de CICESE RADIUS (Mendoza, 1999) u observada o inferida como corresponde al trabajo de tesis de Guillén (2005) o la metodología del ATC-13 (1985).

Las metodologías de tres pasos (Figura 146) corresponden a aquellos estudios donde se hace un análisis paramétrico más profundo de las características dinámicas estructurales como lo hace la metodología desarrollada para HAZUS (1999). La metodología HAZUS desarrolla un análisis basado en un sistema de un grado de libertad en el que se relaciona el periodo T y amortiguamiento del sistema ζ (Figura 146a). Otras metodologías más complejas como las desarrolladas por el Centro de Investigaciones de Ingeniería Sísmica del Pacífico (Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER), que desarrolla un modelo de acoplamiento de dos vigas una a flexión y una a corte compatibilizando las deformaciones con los parámetros de periodo T , amortiguamiento ζ y α , que es la relación del trabajo de corte y flexión de la estructura (Figura 146b; Miranda, 2007).

El grado de participación de las deformaciones laterales de corte y de flexión en el sistema es función del parámetro “ α ” que depende del sistema estructural. Por ejemplo, en un edificio flexible construido a base de marcos de concreto (sin arriostramiento) dominan las deformaciones laterales de corte, mientras que en una construcción

estructurada con muros de concreto reforzado las deformaciones de flexión son las predominantes (Miranda, 1997).



Figuras 145. (a) S1GL empleado por la metodología HAZUS; (b) SMGL empleado en la metodología PEER que puede ser no lineal (Miranda, 2007).

El proyecto HAZUS (1999) es la principal herramienta del Federal Emergency Management Agency (FEMA) para la estimación de daños debido a fenómenos naturales entre estos los sismos. El HAZUS es un software que permite estimar escenarios del peligro con base en los datos almacenados históricamente (probabilista) y emplear modelos de un grado de libertad para el estudio paramétrico que permite considerar la vulnerabilidad y así estimar el riesgo de la región específica de los Estados Unidos. En la Figura 146a se observa un modelo de S1GL (sistema de un grado de libertad) empleado en la metodología. El estudio para desarrollar la metodología HAZUS se explica detalladamente en Whitman *et al.* (1997). Aguiar (2006) presenta una adecuación de la metodología HAZUS para las tipologías constructivas de América Latina. Un trabajo que retoma una variante de HAZUS es el desarrollado por Ugurhan *et al.* (2011) para tres ciudades de Turquía.

Los países integrantes de la Comunidad Económica Europea han desarrollado dos metodologías, el proyecto SERGISAI (1998), el cual estima pérdidas por sismo empleando SIG (Sistemas de información Geográfica). En la Figura 147 se presenta un diagrama de los elementos contemplados para obtener el riesgo sísmico con esta metodología.

La otra metodología europea es la desarrollada con el proyecto RISK-UE (2001), el cual evalúa el riesgo en monumentos históricos, centros urbanos, líneas vitales, interrupción de servicio, etc., pérdidas directas e indirectas. Saradán *et al.* (2009), emplearon esta metodología para evaluar el riesgo sísmico en la ciudad de Valencia, España. Papa y Zuccaro (2005) propusieron una metodología basada en la EME-98 y los mecanismos de colapso de las construcciones de Italia y lo desarrollaron en un multimedia denominado MEDEA, este programa tiene un fin didáctico ya que sus desarrolladores están vinculados con protección civil.

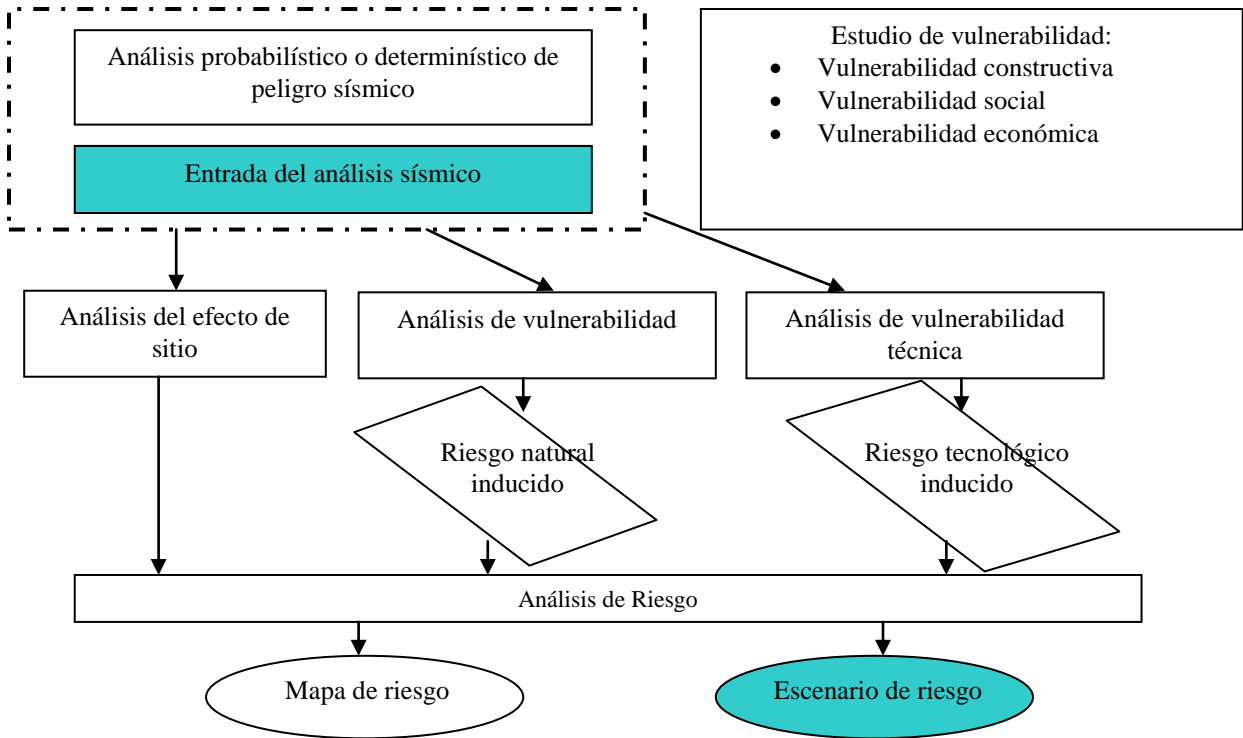


Figura 146. Esquema de flujo de la metodología europea (SERGISAI, 1998).

Modelo RADIUS CICESE

En el año de 1996, la Secretaría del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (DIRDN) lanzó la iniciativa Instrumentos de Evaluación y Diagnóstico de los Riesgos de Desastre Sísmico en las Zonas Urbanas (RADIUS). La misión del programa de tres años era promover actividades a escala mundial para la reducción de la devastación provocada por los terremotos en los países en desarrollo. En México se desarrolló en 1998 para la ciudad de Tijuana, B.C., por un grupo multidisciplinario e interinstitucional y con fondos internacionales. El proyecto partió de las siguientes consideraciones:

1. Se obtuvieron datos actualizados otorgados por varias instituciones:
 - a. Distribución del sistema de Agua Potable y Alcantarillado de la ciudad.
 - b. Aeropuertos, ferrocarriles y sistema de carreteras del Estado.
 - c. Localización y condición de los puentes vehiculares y peatonales.
 - d. Censo de edificios importantes: hospitales, oficinas de bomberos y policía, escuelas, industrias, etc. Considerando su población por hora, por día y las condición de la estructura.
 - e. Información de población y uso de la tierra (INEGI)
 - f. Localización de las colonias de la ciudad incluyendo subestaciones de electricidad, líneas de gas y tanque de agua que sirven estas áreas.
 - g. Estaciones de gasolina, su capacidad y localización.

2. Se obtuvieron datos de peligro sísmico:

- a. Información de respuesta espectral y aceleración horizontal máxima.
 - b. Susceptibilidad de peligros colaterales debidos al sismo.
 - c. Distribución de intensidad superpuesta sobre un mapa de la ciudad.
 - d. Localización de las fallas y su extensión de ruptura.
 - e. Períodos dominantes de vibración del suelo de la ciudad.
 - f. Historia sísmica de la región.
 - g. Instrumentación sísmica en la zona urbana.
3. Se obtuvieron datos de vulnerabilidad basados en las matrices de probabilidad de daño del ATC-13 (1985) y para establecer las funciones de vulnerabilidad desarrollada para Quito, Ecuador. El procedimiento seguido es el siguiente:
- a. Se obtuvieron funciones de vulnerabilidad para la ciudad.
 - b. Se desarrollaron las matrices de daño de las construcciones y líneas vitales e infraestructura.
 - c. Se estudiaron las condiciones más desfavorables para la ocurrencia de un sismo, día, hora, fecha, clima, etc.
 - d. Elaboración de mapas con SIG de los sismos probables que generen daños con intensidades VI a IX.
 - e. Determinación de costos para cada escenario.

La iniciativa RADIUS se completó en 1999. La Secretaría de la Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres (EIRD), el organismo sucesor de la Secretaría del DIRDN, publicó el informe final y los instrumentos desarrollados en los nueve estudios [Addis Abeba (Etiopía), Antofagasta, Arica y Copiapo (Chile), Bandung (Indonesia), Guayaquil y Quito (Ecuador), Izmir (Turquía), Skopje (Ex república yugoslava de Macedonia), Tashkent (Uzbekistán), Tijuana (México) y Zigong (China)].

Aguilar *et al.* (2008) desarrollaron el software denominado SEISRISK-B el cual a partir de un enfoque probabilista determina el riesgo sísmico en términos de daños con curvas de tasas de excedencia, este software tiene fines didácticos, ya que es de código abierto y un protocolo gráfico.

6.1.2. Metodologías para los estudios de riesgo sísmico en México

Los estudios presentes corresponden en su mayoría a centros de investigación y cada uno de ellos tiene simplificaciones para determinados parámetros, por lo cual deben entenderse como perfectibles y específicos para determinados efectos, que en muchos de los casos dependieron de las fuentes de financiamiento o los datos con los que se contaba. En esta sección comentaremos los parámetros que emplearon y sus limitantes.

Modelo CENAPRED 1

El modelo desarrollado por el CENAPRED (Sánchez, 2005) basado en la información estadística del INEGI, establece índices ISD (Índices de Susceptibilidad de Daño por Sismo), que están en función de tres factores (ecuación 38):

$$ISD = f(K_1, K_2, K_3), \quad ISD = 0.34K_1 + 0.34K_2 + 0.32(1 - K_3) \quad (38)$$

donde: K_1 es el nivel de peligro sísmico de la región, K_2 es el porcentaje de viviendas con material precario según lo obtenido por el INEGI (carrizo, bambú, palma, embarro, bajareque, madera, lámina de asbesto, metal o cartón, adobe o material de desecho) y K_3 es la calificación del reglamento local.

En la Figura 148 se presentan los resultados del estudio del Índice de Susceptibilidad de Daño por Sismo para el país considerando los datos del censo del 2000. Se observa que el estado de Chiapas presenta el índice de susceptibilidad de daño por sismo en viviendas más alto del país.

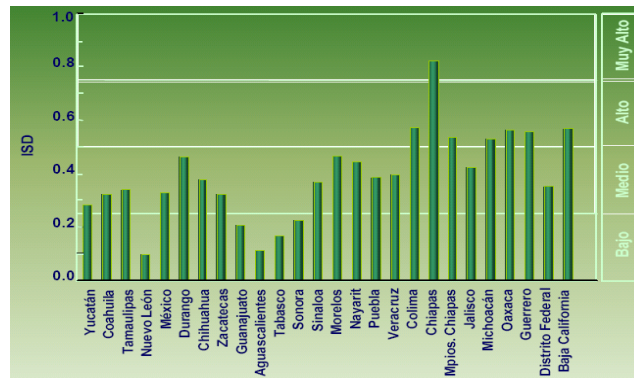


Figura 147. Índice de Susceptibilidad de Daño por sismo en vivienda con el método del CENAPRED (Sánchez, 2005).

Modelo CENAPRED 2

El modelo CENAPRED 2 (2006b) está basado en índices de desempeño que consideran la tipología de vivienda y la determinación de susceptibilidad de daño ante sismo y viento, con lo cual se le asigna un índice propuesto en una matriz de vulnerabilidad como se observa en la Figura 149.



Figura 148. Índices de desempeño para sismo y viento propuestos por el CENAPRED para las cinco tipologías de viviendas rurales más empleadas en México (CENAPRED, 2006b).

El índice de riesgo o desempeño por sismo y viento usado por el CENAPRED (2006b) tiene dos componentes, las cuales son:

Un índice de riesgo es un coeficiente entre cero y uno la cual se le denomina Índice de Susceptibilidad de Daño (ISD), en el cual hay una parte física (ecuación 32 y las Tablas 28 y 29), y otra social denominado Índice de marginación. Respecto al índice de vulnerabilidad social, el método considera que los aspectos económicos se manifiestan en los materiales de las viviendas los cuales representan un 20%. La vulnerabilidad social podrá tomar valores entre 1 y 5 (Tabla 37), correspondiendo uno a la vulnerabilidad social más baja y cinco a la más alta. De acuerdo con la expresión siguiente, el componente social podrá tener una influencia de hasta el 20% en el cálculo del índice de riesgo, I_{RF} , ecuación 39 y Tabla 40.

$$I_{RF} = I_{VF} \left(0.80 + \frac{I_M}{25} \right) \quad (39)$$

donde: I_{RF} ; es el índice de riesgo físico e I_M ; índice de marginación, asociado a la vulnerabilidad social ante desastres.

Tabla 37. Valores del grado de vulnerabilidad social ante desastres.

I_M	Grado de marginación (vulnerabilidad social ante sismos)
1	Muy bajo
2	Bajo
3	Medio
4	Alto
5	Muy alto

Tabla 38. Niveles de riesgo por sismo.

Valores de I_{RF} , I_A , I_{Mun}	Grado de riesgo por sismo
$0.0 < I_{RF}, I_A, I_{Mun} < 0.2$	Muy bajo
$0.2 < I_{RF}, I_A, I_{Mun} < 0.4$	Bajo
$0.4 < I_{RF}, I_A, I_{Mun} < 0.5$	Medio
$0.6 < I_{RF}, I_A, I_{Mun} < 0.8$	Alto
$0.8 < I_{RF}, I_A, I_{Mun} < 1.0$	Muy alto

Modelo de la UNAM

Los estudios de riesgo sísmico desarrollados en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) han sido producto de varios investigadores del Instituto de Ingeniería y de Geofísica de la UNAM, producto de estos estudios han surgido herramientas como el programa RSMex® desarrollado en el año 2000, el cual permitió estudios en la delegación Cuauhtémoc (Quiroga y Reynoso, 2004; 2005).

La metodología consiste en el cálculo del riesgo como porcentaje de las pérdidas estimadas para cada sistema estructural identificado mediante encuestas, datos del INEGI

y georeferenciadas mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), ya sea para un sismo específico o para distintos períodos de retorno por la probabilidad de ocurrencia de todos ellos.

Los parámetros empleados para evaluar la vulnerabilidad son: Número de pisos (relacionado con el período), uso, sistema estructural, año de construcción (reglamento de diseño empleado), irregularidad en planta y elevación, daño previo, posibilidad de golpeteo, etc. La vulnerabilidad se evalúa con el modelo simplificado de Miranda (2007). Con el modelo de la UNAM también se han estimado pérdidas en la delegación Cuauhtémoc tanto económicas como de vidas, considerando el uso y la población por hora y día de la semana (Martínez, 2006).

Modelo desarrollado por la Universidad de Colima

A partir de distintos estudios en Colima se han desarrollado propuestas para el análisis del riesgo sísmico (Zobin *et al.*, 2009). Con esta metodología las viviendas son agrupadas en tres clases de vulnerabilidad (A, B y C). Los parámetros para construir los índices de vulnerabilidad se realizan a través de encuestas a viviendas dañadas. En los parámetros de estudio encontramos: materiales, tipo de suelo, tipo de daño y distancia a la fuente. El peligro sísmico se consideró a partir de intensidades de los sismos de 1995 y 2003. Este método es una variación de la EME-98, calibrado con resultados de sismos locales.

6.1.3. Sistemas de información geográfica para el estudio del riesgo sísmico

En la antigüedad la gran cantidad de información que se requiere manipular para desarrollar un estudio de riesgo, representaba una de las principales complicaciones para tener estudios confiables. Este problema ha sido solucionado mediante el uso de las computadoras y con software del tipo bases de datos, hojas de cálculo y principalmente con los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Estas técnicas de reciente empleo, se basan en programas computacionales como el ArcView, ArcInfo, etc., mediante los cuales se pueden manipular imágenes satelitales, pudiendo empalmar varias capas de información para georeferenciar la ubicación de zonas afectadas, permitiéndonos, manejar la información de manera estructurada. De igual manera, se pueden establecer planes de mitigación y de protección civil, donde se requieren rutas de evacuación, áreas de atención prioritaria y zonas que demandan más detalle.

Este modelo desarrollado a principios del año 2000 ha sido empleado en nuestro país en la gestión de riesgos (Sánchez, 2005). En el modelo se utilizan sistemas de información geográfica (GIS), tecnología satelital y sistemas de posicionamiento global (GPS). En la Figura 150 se muestra un esquema gráfico de cómo funciona el SIG para el manejo del riesgo y cómo se subdivide entre los elementos peligro y vulnerabilidad para un sitio donde se cuente con información y fotografías aéreas a determinada escala. En México, Quiroga y Reinoso (2004; 2005); Reinoso (2007); Orozco y Reinoso (2007) presentan la evaluación del riesgo sísmico para el Distrito Federal empleando SIG.

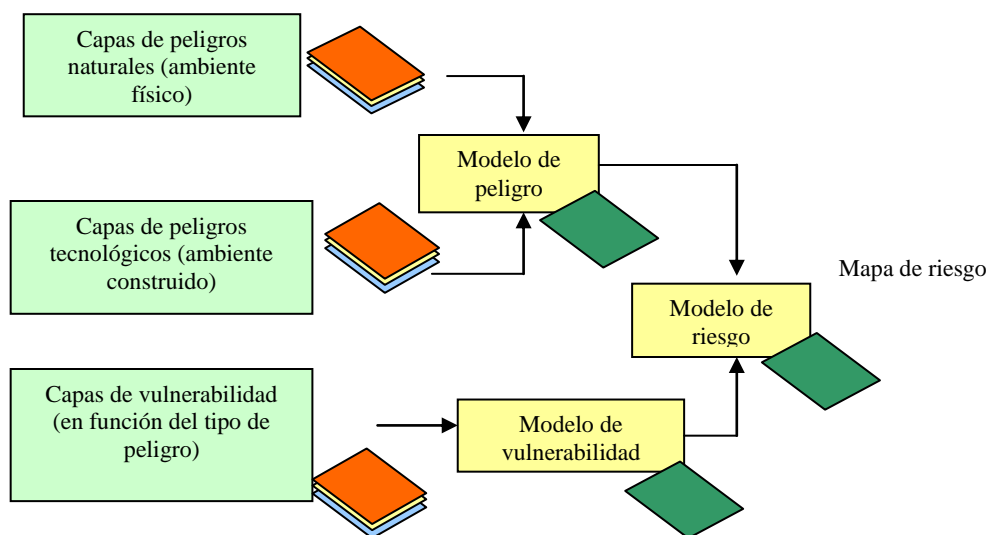


Figura 149. Modelo de operación de sistemas de información geográfica (Sánchez, 2005).

En Perú se empleó el SIG para evaluar el Riesgo sísmico de la ciudad de Moquegua (Moreno y Aguilar, 2003). En Colombia, Gallego *et al.* (2004) en colaboración con la UNAM, presentan una propuesta para diversas ciudades de Colombia. Existen trabajos muy importantes de SIG y modelos matemáticos como el presentado por Goda y Hong (2008) para Canadá.

6.1.4. Información satelital para el estudio del riesgo sísmico

Esta tecnología denominada por sus siglas en inglés VIEWS (Visualizing Impacts of Earthquakes with Satellites), que se basa como su nombre lo indica en una visualización en tiempo real mediante satélites artificiales de los efectos de un sismo para determinar las condiciones macro y micro regionales, tales como fallas, efecto de sitio, periodo dominante, entre otras.

Esta técnica es reciente y fue empleada por el EERI en distintos informes recientes como el de los sismos de Argelia (Boumerdes, 2003), Irán (Bam, 2003), Japón (Niigata, 2004) y el tsunami de Asia. En estos trabajos se observa que esta técnica permitirá hacer un inventario de condiciones que detonan los daños y monitorear los efectos de futuros fenómenos sísmicos en la misma región o en otras con condiciones similares.

La ventaja que presenta el sistema VIEWS respecto a los sistemas de GIS se basa en el tiempo de respuesta y en la calidad de imágenes obtenidas. Este sistema permite la captura satelital detallada de hasta 2,500 edificios por día (EERI, 2005).

Otra herramienta empleada por el EERI en sus reconocimientos post-sismo es la denominada LiDAR (Light Detection and Ranging). Esta técnica fue empleada en el sismo de Japón (Niigata, 2004) y permite la obtención de imágenes tridimensionales de la deformación del suelo, la estructura e infraestructura. Esta técnica permite la obtención

de información importante de sitios peligrosos para la inspección visual. Adicionalmente, se debe considerar que se obtienen imágenes planas y/o tridimensionales georeferenciadas que pueden ser empleadas para técnicas SIG¹¹.

6.2. Estudios de costos del riesgo sísmico

La evaluación económica de los daños ocasionados por un sismo en un edificio, o en un conjunto de estructuras, ha sido identificada más como una habilidad individual que como una ciencia por los ingenieros de la práctica, y aun por los de la academia (Vasudevan, 1992). Estos métodos involucran experiencia y criterio y nos obligan a agrupar a las estructuras en aquellas que tendrán un nivel similar de comportamiento.

La tarea de hacer un estudio del costo del riesgo para una ciudad se vuelve compleja y demanda el uso de las bases de datos con la información de la población, la cual se encuentra en los censos, así como los estudios que se hayan hecho para regiones similares. Los estudios de costo encontrados en la literatura contemplan por lo general los siguientes costos de elementos y clasificaciones:

- Estructura, acabados y contenidos
- Demolición
- Daños a terceros
- Hospitalización y recuperación
- Vidas
- Tiempo de reparación y pérdidas por no operación

Estos estudios se resumen en tres de acuerdo con la metodología de PEER (Pacific Earthquake Engineering Research), que son llamadas en inglés las tres D (Dollars, Death, Downtime) y en México se denominan: pérdidas económicas, de operación y de vidas. La mayoría de los estudios recientes en la materia se basa en la relación entre la distorsión (rotación en los nudos) y el daño que sufre la estructura en un sismo, así como también entre el daño que alcanza la construcción y el costo de la reparación y reconstrucción.

Estudiar solo las rotaciones como lo hace el ATC-13 (1985) es una sobre simplificación del problema y demanda un criterio de especialista, ya que nunca aclara el documento que el nivel de distorsión de un elemento en particular de la estructura no pone en peligro a la edificación en general, sino que deberían presentarse un grado de rotaciones importante en un conjunto de elementos para considerar una postura de demolición. Además que la rotación, como medida de daño, aplica en estructuras de concreto, y no en mampostería.

Otro parámetro difícil de considerar es la cantidad de energía que ha disipado una estructura en el pasado. Es decir, la vulnerabilidad de una edificación se modifica con el

¹¹ El EERI tiene desplegada una base de datos de imágenes y mapas obtenidos con estas técnicas que pueden ser consultados en www.accela.com.

tiempo de no ser rehabilitada, por lo que es importante que en los métodos de vulnerabilidad se considere la deformación plástica acumulada.

Estas consideraciones nos llevan a evaluar en los métodos de vulnerabilidad, parámetros que relacionen la rigidez, resistencia y capacidad de deformación del sistema con las demandas que la construcción ha acumulado. Sin embargo, solamente con un análisis exacto podríamos tener resultados más acertados y aun así, el estimar los costos de la reparación y/o reconstrucción serían difíciles de estimar, ya que en la mayoría de los casos la mayor parte de las pérdidas se dan en los elementos no estructurales y además, la reparación hasta cierto grado es más económica que la reconstrucción, pero solo hasta cierto nivel de daños y comportamiento de la construcción.

Tenemos que considerar que las pérdidas económicas van más allá de la estructura y en ciertos casos se podrían considerar incluso el número de decesos, el tiempo en que no puede ser empleada la construcción, etc. La predicción de pérdidas en costo suele ser cuantitativa en cuanto a cantidades, pero la predicción de estas cantidades debe partir de un análisis cualitativo de la información de la construcción antes, durante y posterior al evento. Adicionalmente, este análisis cualitativo permite desarrollar estrategias para la protección civil y la planeación urbana, así como saber en qué áreas debe hacerse una intervención para mejorar las condiciones de las construcciones y así disminuir el riesgo.

Los costos directos e indirectos de los daños en un evento sísmico, deben considerar las siguientes categorías de daños y sus condiciones (Mendoza, 1999; CEPAL, 2003):

a) Daños a líneas vitales

- Daños en la red de agua y drenaje.
- Daños en la red de electricidad y telefonía.
- Daños en carreteras y puentes.
- Falta de combustible.
- Falta de servicios públicos (imposibilidad de acceso, falta de combustible, etc.).
- Falta de dinero (por cierre de bancos e instituciones financieras).
- Falta de mano de obra para las reparaciones.

b) Daños al sector salud

- Daño a hospitales, por lo que el acceso será complicado o imposible.
- Insuficiencia de camas disponibles.
- Falta de transporte para acarreo de víctimas y heridos.
- Falta de médicos y personal de apoyo.
- Insuficiencia de sangre y medicinas.
- Daño en equipo e instrumental médico.

c) Daños a sitios que funcionan como albergues

- Los albergues en la mayoría de los casos no son revisados en su diseño y tampoco tienen el mantenimiento adecuado, por lo que son vulnerables.
- Las zonas donde se ubican pueden no ser adecuadas para la operación en un caso de emergencia.

- Deben ubicarse nuevos albergues mediante estudios de riesgo paralelos.

d) Costo y tiempo de la respuesta a la emergencia

- Pérdida de tiempo por cierre de vías.
- Errores en la emergencia por falta de información.
- Falta de coordinación entre las instituciones.
- Insuficiencia de equipo y personal para responder.

e) Tiempo de recuperación de la ciudad (según estadísticas de los desastres en Chiapas)

- Agua potable: 9 semanas.
- Electricidad: 3 semanas.
- Drenaje: 7 semanas.
- Vivienda: 104 semanas.
- Limpieza de escombros: 26 semanas.
- Falta de recursos para la reconstrucción.
- Retardo del pago de seguros para las estructuras que cuentan con estos.

f) Aspectos reglamentarios que generan problemas para identificar costos y responsables:

- No existen reglamentos actualizados, lo que genera falta de responsabilidad.
- No se supervisa lo nuevo, ni se tiene supervisión adecuada sobre lo existente.
- No se capacita a los colonos, ni hay líderes encargados de la evacuación y de la reparación. Antecedentes de estudios en la región.

Las metodologías para estimar los costos de los daños después de un desastre son muy recientes en la literatura y se puede decir que surgen de manera constante en la literatura tras el sismo de San Fernando California en 1971. En nuestros días buscamos conocer tanto los costos directos (elementos estructurales, no estructurales y contenidos) como los indirectos (operación, sociales y líneas vitales) que son muchas veces más complicados de determinar.

El conocer los costos de un desastre o las zonas más vulnerables y donde se esperan mayores pérdidas de una ciudad, ha sido de mucha utilidad para distintos especialistas e instituciones, entre las cuales podemos señalar:

- Las aseguradoras, reaseguradoras, e instituciones financieras.
- Planeadores urbanos.
- Entidades de protección civil, salud, etc.
- Obras públicas.
- Inversionistas y particulares, entre otros.

Dentro de las metodologías más reconocidas para evaluar y predecir daño y los consecuentes costos en edificios está la desarrollada por la Agencia Federal para Manejo de Emergencias (FEMA), la cual fue elaborada a través del Instituto Nacional de Ciencias de la Edificación (NIBS.). Esta metodología inicia con un inventario general de edificios esenciales y con alto potencial de pérdida de equipo, edificios gubernamentales y

sistemas de transporte. El siguiente paso es desarrollar un escenario con el sismo previsto, la señal de entrada debe contemplar las funciones de atenuación y la información geológica local.

Los daños son considerados en términos de la probabilidad de ocurrencia en determinados estados, así como las consecuencias de estos daños en elementos no estructurales, mobiliario y equipo. Finalmente, el método predice las pérdidas directas, incluyendo el costo de reparación, el de remplazar la estructura, o los decesos, todo en funciones de pérdidas de cada una de las categorías (Whitman *et al.*, 1997).

Porter *et al.* (2001), desarrollaron una técnica de estimación de las pérdidas en edificación, la cual considera los costos de reparación para cada estado, para cada componente y la suma del daño en los elementos individuales en el total del costo por el desastre. Para iniciar el método, se requiere conocer la localización y detalles generales del diseño. Posteriormente, se aplica una señal de aceleración adecuada, para después realizar un análisis estructural que determine la capacidad de respuesta del sistema. Para cada edificio se determinan las funciones de fragilidad, para obtener la probabilidad de daño, y en caso necesario el costo de la reparación. Se define una función de densidad de probabilidad (PDF) para cada unidad y otra para el tiempo de reparación. A partir de la suma de los costos del daño en cada elemento se determina el costo de la reparación.

El Consejo para la Tecnología Aplicada de los Estados Unidos, ATC-21 (2002), provee otro método para predecir el porcentaje del costo de la reparación o el remplazo de edificios. En un principio se debe identificar el tipo de edificio y la zona donde se ubica (respecto al mapa del NEHRP) para obtener la aceleración máxima a la que estará sometida la edificación durante su vida útil. Estos factores indicarán los valores básicos de vulnerabilidad, cuyo rango está entre 1.0 y 8.5. El siguiente paso a considerar son los factores de modificación por comportamiento, que están en el rango de -2.5 a +2.0. El puntaje estructural es la suma de estos dos puntajes. Este resultado puede ser graficado contra niveles de daño propuestos, lo que nos permite identificar los costos razonables de reparación (McCormack, 1997).

Ghobarah (2004) realizó un estudio del costo de la reparación de las estructuras considerando su vulnerabilidad mediante una metodología basada en el diseño por desempeño, donde clasifica a las estructuras en cuanto al nivel de distorsión de entrepiso y la susceptibilidad de ser reparadas a costos razonables. Su trabajo lo resume en la Figura 151 y retoma algunas propuestas de visión 2000 y los costos propuestos para distintas técnicas de reparación del FEMA 156 y 157. Miranda (2007) presenta un espectro de distorsión de entrepiso versus periodo de la estructura. Los resultados mostrados son relativos y no necesariamente corresponden a estructuras típicas de México, ya que fueron elaborados basados en edificios de cinco niveles con peligro sísmico probabilístico específico del medio oeste norteamericano, ya que el nivel de daño y el costo de su reparación depende en gran medida del costo de la mano de obra y las técnicas empleadas en la reparación. Adicionalmente, la concepción de daño abarca modificaciones importantes en parámetros como desplazamiento, resistencia y rigidez, que no se comportan igual para cada sistema estructural y la dispersión o concentración

del mismo. Además, la tipología de las estructuras consideradas difiere de las que se usan en nuestro país.

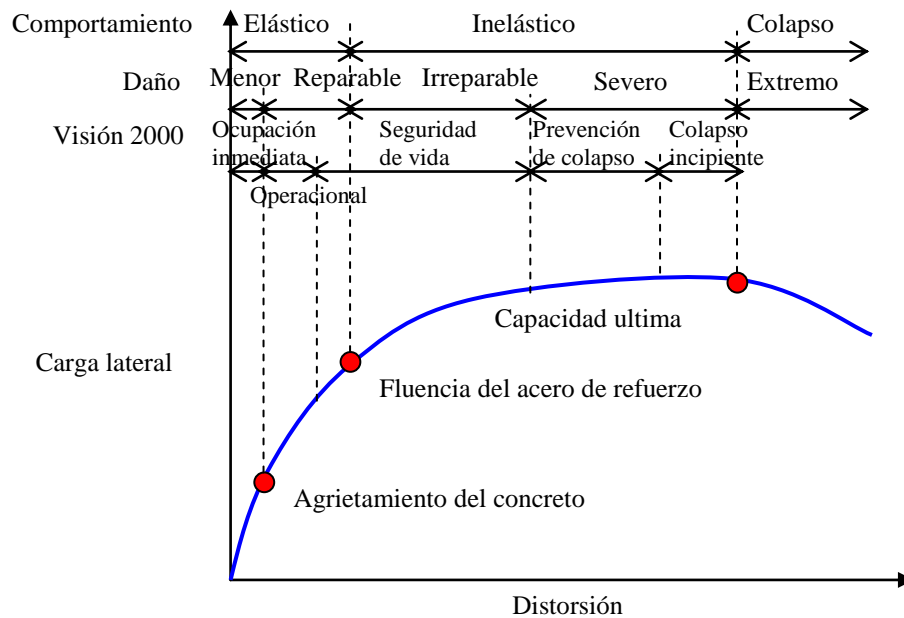


Figura 150. Comportamiento típico de las estructuras de concreto y mampostería con sus niveles de daño, comportamiento y filosofía Visión 2000, (traducido de Ghoborah, 2004).

Una aportación importante del trabajo de Foltz (2004) es considerar que no solo las distorsiones de entrepiso determinan los daños, ya que existen elementos que son afectados por la distorsión como los elementos no estructurales tales como ventanas, puertas y muros divisorios y otros susceptibles a la aceleración como equipo mecánico, pretilas, plafones, etc.

Respecto a las metodologías del riesgo, más que diferencias en la forma en que se evalúa, se encuentran diferencias en cómo se plasma, pero cada vez es más recurrente en todos los estudios que se plasma mediante un índice de daño y curvas de fragilidad para distintos niveles de daño y desempeño. En fechas recientes el riesgo se empieza a representar en mapas aéreos digitalizados y procesados con técnicas SIG, que sirven como representación general de las áreas de concentración de daño, ya que para ser específicas se requiere de una base de datos confiable y representativa (Quiroga y Reynoso, 2004; Quiroga y Reynoso, 2005; Martínez, 2006).

Esteva (2007) propuso la ecuación 40, para determinar el costo de reparación considerado como valor intangible:

$$C_P = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (40)$$

siendo, C_P el costo de reparación, C_1 el costo de contenidos y acabados, C_2 la actividad interrumpida (no show), C_3 los daños a terceros, C_4 el número de vidas perdidas, C_5 , prestigio de empresa, diseñador, constructor.

Miranda (2008) señala que deben considerarse en los estudios económicos lo que denomina las pérdidas inducidas por deformaciones residuales, ya que los estudios sólo consideraban el daño en aquellas que son reparables y el de colapso y ahora se introducen aquellas que aunque técnicamente son reparables, pero económicamente no y deben demolerse tras el daño residual tras un evento o una serie de estos.

En relación a los costos, Ordaz (2011), se refiere a ellos como el presupuesto necesario para reparar lo dañado o perdido: estructura, contenidos y elementos no estructurales. En la Figura 152 se muestra un conjunto de curvas que representan el costo inicial versus la reparación sísmoresistente de la construcción, entre mejor sea desarrollada ésta en la construcción original, mejor será su desempeño frente a un evento sísmico.

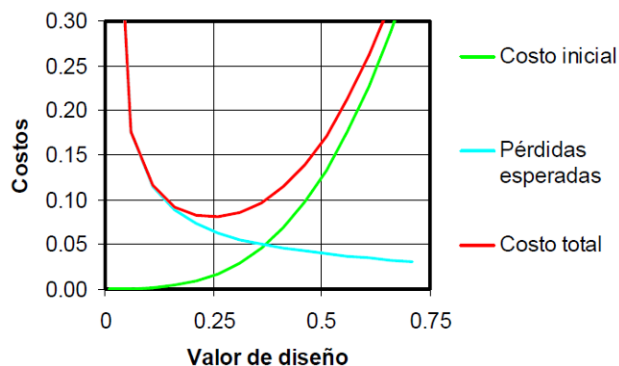


Figura 151. El dilema del costo en el diseño sísmico Ordaz (2011).

Los estudios de daños pueden ser extensos y analizar diversos factores:

Uso de la construcción dañada: Viviendas, hospitales, centros educativos, mercados, centros comerciales, etc.

Personas heridas o fallecidas: hombres, mujeres, niños, bebés o adultos mayores.

Elementos afectados o líneas vitales interrumpidas: Equipos, mobiliario, maquinaria, sistema de transporte, sistema de telecomunicaciones, infraestructura de electricidad, sanitaria, de agua potable, de gas, etc.

Pérdidas de bienes y servicios: los cuales se dejan de producir o de prestar después del período de acaecido el desastre (pérdida de cosechas futuras, pérdidas de producción industrial, mayores costos de transporte, menores ingresos en empresas de servicio por la interrupción o reducción de éstos).

Efectos inducidos: Aparecen tiempo después de ocurrido el desastre y pueden ser: epidemias, escasez de alimentos, Inflación, agudización de la pobreza, pérdidas PIB, baja en la producción, se contraen las ventas e ingresos de las personas, encarecimiento de productos de primera necesidad, incremento de los gastos del gobierno, disminución de productos exportables, incremento de las importaciones, etc.

6.2.1. Evaluación de costos de contenidos y elementos no estructurales

En los casos en que una construcción es dañada, debido a su nivel de vulnerabilidad, por un sismo u otro evento perturbador, dejando descartado el que se hayan presentado víctimas, y para analizar los daños de una manera más cercana a la realidad, estos daños se cuantifican en tres partes: a) los costos de los elementos estructurales; b) los costos de los acabados arquitectónicos y elementos no estructurales; y c) los costos del mobiliario y contenidos.

La necesidad de hacer esta división en el estudio de los costos ha sido motivada por varias razones, entre ellas:

- Resaltar el peso porcentual de la estructura respecto al total de la inversión en una construcción y tener elementos para defender el proyecto estructural.
- Por razones similares a la anterior podemos decir, que el conocer el peso del proyecto estructural respecto a la inversión para ciertos proyectos hace viable la aplicación y surgimiento de sistemas de control pasivo, híbrido y/o activo.
- También ha permitido a investigadores y profesionales aprender que, no obstante debido al cambio de reglamentos, la investigación y los daños en ciertos eventos ha logrado mayor seguridad estructural ante eventos extremos (en ciertas ciudades). Sin embargo, no se ha avanzado lo mismo para entender de manera importante el comportamiento de los elementos no estructurales y contenidos, y tras fenómenos naturales ocurridos en los últimos años observamos que la mayoría de los daños se concentran en ellos.

No obstante la importancia de estos estudios, son bastante recientes en la literatura y comienzan a generalizarse después de la ocurrencia de eventos sísmicos que han tenido un gran impacto económico como Northridge y Kobe, es decir, a partir de mediados de los años noventa. En la literatura encontramos estudios de costos directos por daños en las construcciones, los cuales son, por lo general, para edificios públicos o privados que guardan contenidos muy importantes en valor, y no necesariamente los mobiliarios y contenidos típicos que se albergan en una vivienda. Adicionalmente, son estudios en estructuras ubicadas en la costa oeste de los Estados Unidos y Japón. Ejemplos de algunos de los más importantes trabajos que hablan sobre la discretización de costos en una construcción se muestran en la Tabla 39.

Tabla 39. Estudios de discretización de costos en: estructura, elementos no estructurales y contenidos, de acuerdo con diversos usos de la construcción (González y Gómez, 2007).

Categoría	Estructura madera	Estructura concreto	Estructura concreto	Hospital	Hotel	Oficina
Estructura	10	25	40	8	13	18
Elementos no estructurales	25	33	40	48	70	62
Contenidos	65	42	20	44	17	20
Autor	Mayes (1995)	Mayes (1995)	Kanda (1998)	Miranda (2002)	Miranda (2002)	Miranda (2002)

González y Gómez (2007) desarrollaron una metodología para determinar la importancia que guardan los contenidos y los elementos estructurales en el monto total de la construcción. En este estudio se analizaron cómo se comportan estos costos para las viviendas típicas de la ciudad y las condiciones de vida y mobiliario con el que está equipada una casa habitación y departamento en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. La estimación de los costos se realizó considerando una muestra de 2,597 viviendas correspondientes a 20 fraccionamientos de interés social a interés medio, y 349 departamentos de ocho fraccionamientos para edificios de tres a cuatro niveles de mampostería.

Para el estudio del mobiliario se obtuvieron los catálogos de las empresas Famsa, Elektra, SAM's Club, Home DEPOT, Salinas y Rocha y Liverpool. Todas ellas se encuentran en Tuxtla Gutiérrez, siendo las mueblerías y tiendas departamentales más empleadas de la ciudad. Se utilizaron los valores medios del costo de los productos y se combinaron con los porcentajes de los muebles que reportaron poseer los ocupantes de las viviendas en el Censo de población y vivienda 2005 del INEGI. Los resultados se presentan en la Tabla 40, en donde se presentan los estudios previos que contemplan uso de vivienda con los obtenidos en este proyecto.

Tabla 40. Estudios de discretización de costos en: estructura, elementos no estructurales y contenidos para vivienda.

Categoría	Estructura madera	Estructura concreto	Estructura concreto	Casa habitación mampostería	Departamento edificio de 3 y 4 niveles de mampostería
Estructura	10	25	40	33	34
Elementos no estructurales	25	33	40	48	49
Contenidos	65	42	20	19	17
Autor	Mayes (1995)	Mayes (1995)	Kanda (1998)	González (2007)	González (2007)

6.3. Aplicación de SORIS para estimar los costos en distintos escenarios


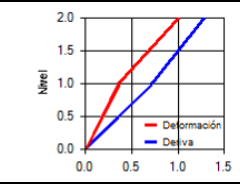
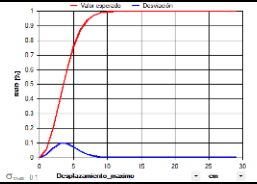

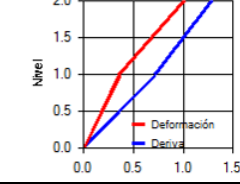
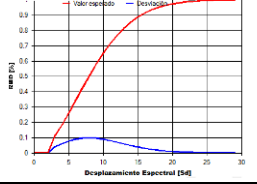

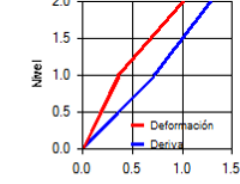
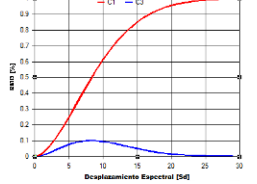

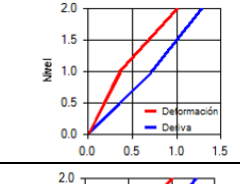
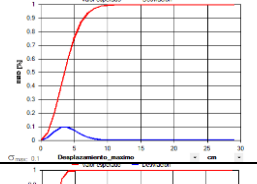

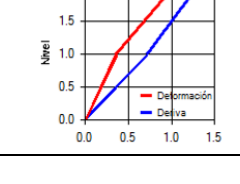
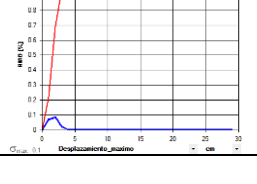
El valor esperado del daño de la estructura se obtiene a partir de un valor de distorsión máxima de entrepiso con el programa SORIS, el cual se calcula con la ecuación 36.

El valor del daño que presenta el programa SORIS es un porcentaje correspondiente al costo directo, el cual puede ser complementado por los siguientes pasos (Figura 153):

1. Identificar los sistemas constructivos locales (trabajo de campo descrito anteriormente donde se ubicaron y referenciaron los 13 sistemas y se colocaron espacialmente en un mapa).
2. Mediante trabajo de campo encuestar los sistemas constructivos considerando áreas, materiales, nivel socio económico, uso, etc.
3. Desarrollar el análisis de daños por sismo con el software SORIS, denominado pérdida esperada (Tabla 41 y ecuación 36).

4. Determinar porcentajes de costo por daño asociado al comportamiento sísmico de la construcción: Sin Daño (SD), Ocupación Inmediata (OI), Seguridad de Vida (SV), Prevención de Colapso (PC) o Colapso (C) (Tabla 42).
5. Evaluar las características económicas de los sistemas constructivos, obteniendo el costo comercial para la estructura, el uso, la antigüedad, los acabados, etc., empleando manuales tales como: BIMSA, CMIC y CICCH.
6. Identificar el porcentaje de costo directo por daño en la estructura (paso 3) y señalar los porcentajes adicionales que corresponderían por contenidos y elementos no estructurales (González y Gómez, 2007).
7. Elaborar el mapa en SIG considerando el nivel de daños con el escenario sísmico contemplado y el sistema estructural correspondiente. Desafortunadamente no se cuenta con estimación de los daños por sismos históricos que permitiera hacer una correlación con los resultados obtenidos con el SORIS.

Tabla 41. Determinación de la pérdida esperada de los sistemas constructivos de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas en función de desplazamiento máximo de entrepiso.

Número	Fotografía	Nombre	Desplazamiento máximo de entrepiso	Pérdida esperada
1		Mampostería sin refuerzo		
2		Mampostería reforzada o confinada con diafragma rígido		
3		Mampostería reforzada o confinada con diafragma flexible		
4		Construcción informal (mampostería mal confinada o reforzada)		
5		Adobe o bajareque		


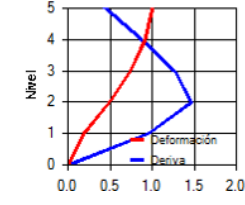
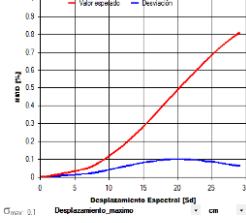

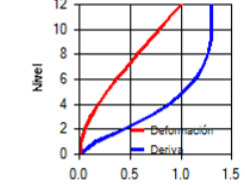
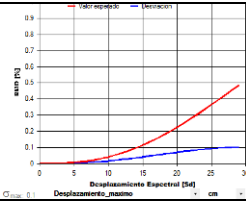

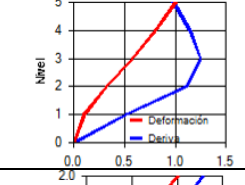
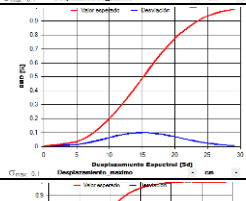

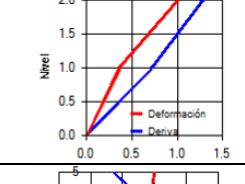
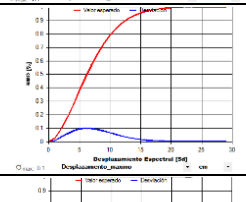

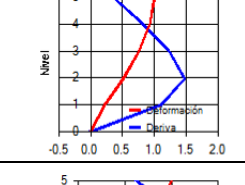
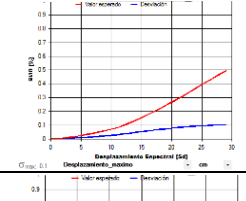

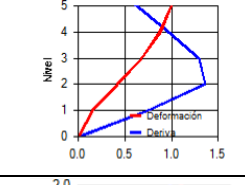
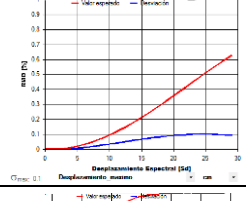

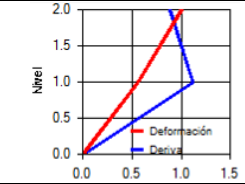
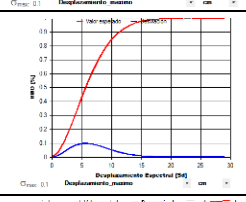

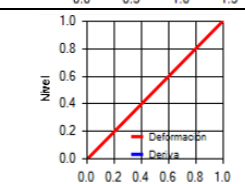
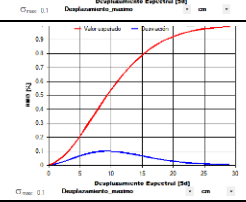
6		Marcos de concreto resistentes a momento		
7		Marcos de concreto arriostrados con muros de concreto		
8		Marcos de concreto arriostrados con muros de mampostería		
9		Estructura de concreto celular		
10		Marcos de acero resistentes a momento		
11		Marcos de acero arriostrados con diagonales o muros		
12		Estructura de perfiles livianos (naves industriales)		
13		Estructura de madera		

Tabla 42. Discretización de daños y su equivalencia en costos en: estructura, elementos no estructurales y contenidos, de acuerdo con diversos usos de la construcción.

Clasificación de daño	Daño estructural	Daño en acabados	Costo de reparación / Valor original
Sin daño	Ninguno	Ninguno	0.00
Daño ligero (Ocupación inmediata)	Grietas inclinadas en muros entre 0.1 a 1 mm sin daño en castillos	Ligero en acabado de muros	0.10
Daño medio (Seguridad de vida)	Grietas inclinadas en muros entre 0.1 a 3 mm y de 0.1 a 2 mm daño en castillos	Medio en acabado de muros y plafones	0.35
Daño severo (Prevención de colapso)	Grietas inclinadas en muros entre 3 a 10 mm y de 2 mm o más daño en castillos	Severo en acabados de muros, rotura de vidrios y distorsión de puertas y ventanas	0.55
Daño total (Colapso)	Falla de la construcción	Daño total	0.80

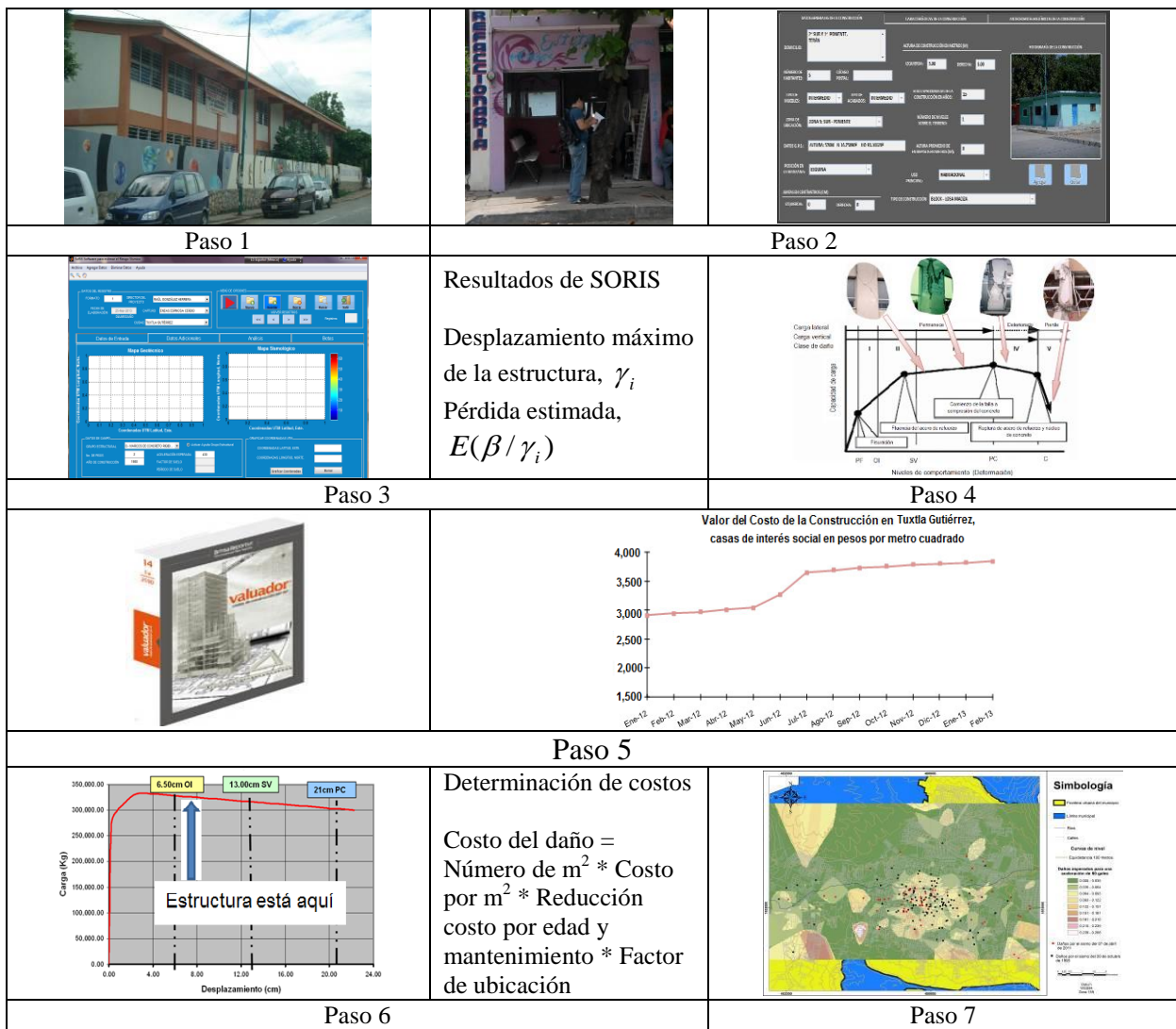


Figura 152. Pasos del software SORIS para determinar las pérdidas económicas.

Los costos obtenidos con el software SORIS representan solo los valores de los costos directos del daño sufrido por una estructura ubicándola de acuerdo a su nivel de desempeño (Sin daño, Ocupación inmediata, Seguridad de vida, Prevención de colapso y Colapso). El valor de los costos indirectos y otros costos, no han sido contemplados en esta versión del software, reconociéndose que es el módulo del software que podría desarrollarse para obtener valores más cercanos a la la pérdida real. No obstante los valores alcanzados con la metodología actual son un indicador grueso del valor de las pérdidas directas esperadas de la estructura durante un sismo en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. El software opera una base de datos de 6,000 registros cuyos promedios se extrapolan para representar el comportamiento de la ciudad durante distintos escenarios, los cuales representan las condiciones probables de respuesta de las estructuras de la ciudad ante un sismo con determinadas características.

6.3.1. Escenarios construidos con SORIS para determinación de pérdidas económicas en las estructuras en Tuxtla Gutiérrez

Primeramente se evaluó el software considerando las características de dos sismos recientes e importantes para la ciudad para calibrar el modelo de pérdidas, encontrándose que el software tuvo una correlación espacial entre daños reales y las pérdidas calculadas del 88% para el sismo del 21 de octubre de 1995 (Figura 154) y una correlación del 76% para el sismo del 7 de abril de 2011 (Figura 155). Las correlaciones comprenden una comparación de cuales de los daños reales caen en áreas que tienen daños calculados de al menos el 50%. Estas correlaciones se consideran aceptables, sin embargo indican que podrían mejorarse ampliando la base de datos en zonas donde no se obtuvieron suficientes encuestas por lo riesgoso de las mismas o por ser muy heterogéneas en sus sistemas constructivos.



Figura 153. Comparación entre los daños del sismo del 21 de octubre de 1995 con respecto al escenario de SORIS para ese sismo. Los colores indican el índice de daño que va desde 0 (color verde), donde no hay daño, hasta 1 o pérdida total (color rojo).

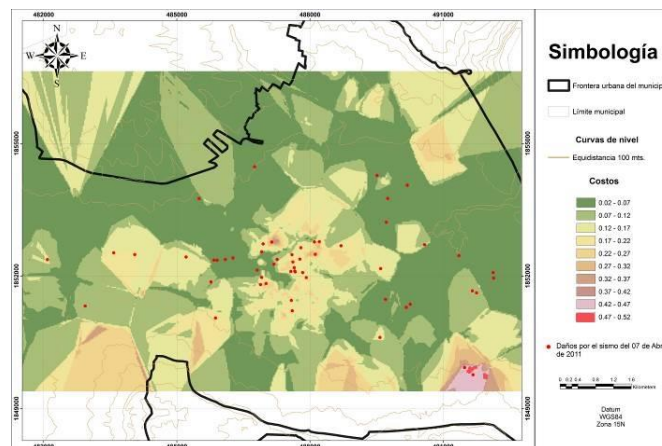


Figura 154. Comparación entre los daños del sismo del 7 de abril de 2011 con respecto al escenario de SORIS para ese sismo. Los colores indican el índice de daño que va desde 0 (color verde), donde no hay daño, hasta 0.5 o seguridad de vida (color rojo).

De acuerdo a los resultados de las funciones de Green empíricas (Capítulo 4), los escenarios propuestos para a) 50, b) 100, c) 150 y d) 475 años, representan aceleraciones máximas en suelo blando (incluyendo efecto de sitio) de 148, 263, 417 y 589 gales, respectivamente. Estos periodos cubren el rango de seguridad e importancia de las estructuras existentes en la ciudad¹², los resultados se presentan en la Figura 156, donde se muestra el índice de las pérdidas económicas en las estructuras de la mancha urbana (1.0 equivale a 100%). Los valores representados en los colores blanco y rosa corresponden con las regiones de la mancha urbana que presentan las mayores pérdidas. Mientras que los colores verdes oscuro y claro coinciden con los de menores pérdidas.

Adicionalmente, la Figura 156 y Tabla 43 indican el índice de daño que alcanzaron las estructuras de la ciudad. Este índice de daño se asocia con los distintos estados de comportamiento de las estructuras (Sin daño (SD), 0-0.099¹³, Ocupación inmediata (OI), 0.100-0.349, Seguridad de vida (SV) 0.350-0.549, Prevención de colapso (PC) 0.550-0.799 y Colapso (C) 0.800-1.000). Los índices de comportamiento señalados en la investigación, corresponden con el nivel de daño que se asocia a un cambio de desempeño de la estructura, así como a un costo de reparación cuando esta proceda. Los rangos empleados para darles valor a los índices son producto de los distintos análisis estructurales del tipo empujón realizados sobre los modelos desarrollados para cada uno

¹² El periodo de retorno de 50 años corresponde al sismo que tiene una probabilidad del 2% de ser excedido y es el periodo empleado para el diseño de viviendas y construcciones convencionales. Así el periodo de 100 años tiene probabilidad de 1% de ser excedido y se emplea para edificaciones que albergan a un mayor número de personas, el periodo de 150 años tiene 0.67% de probabilidad de ser excedido y se emplea en el diseño de hospitales, escuelas, auditorios, centros comerciales, mercados y finalmente el periodo de 475 años tiene una probabilidad de excedencia de 0.2%, se emplea en el diseño de puentes, albergues, centrales de comunicaciones y de logística, museos, entre otros.

¹³ Los porcentajes corresponden al rango de deformación de la estructura al que se asocia este comportamiento o desempeño estructural.

de los sistemas constructivos encontrados en la ciudad y que fueron usados para definir las curvas de comportamiento de los betas del SORIS.

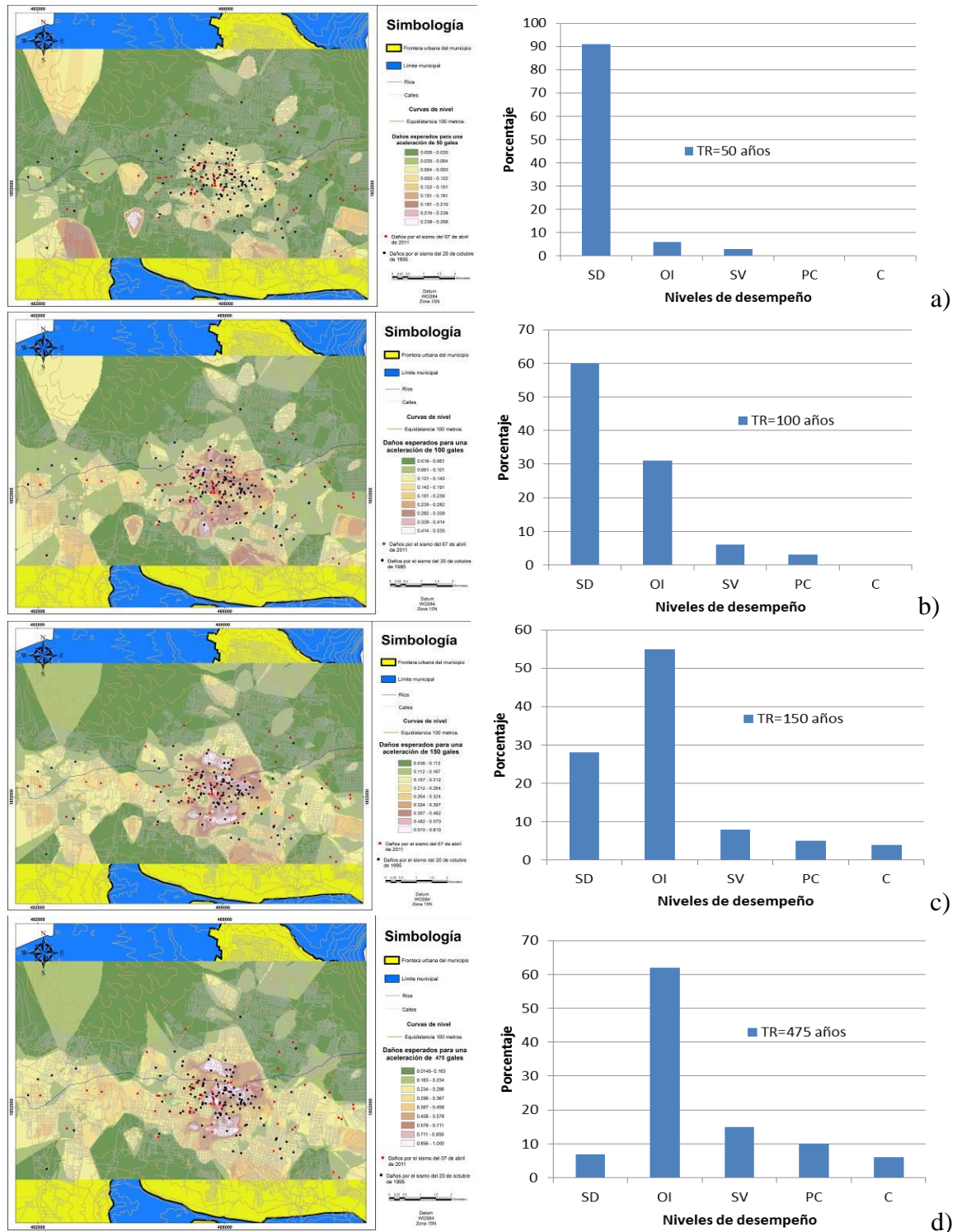


Figura 155. Escenarios de daño a) $T_R=50$ años, b) $T_R=100$ años, c) $T_R=150$ años y $T_R=475$ años.

Tabla 43. Porcentajes de daños en cuatro escenarios para los niveles de desempeño de las construcciones.

Nivel de desempeño estructural	T _R =50 años	T _R =100 años	T _R =150 años	T _R =475 años
Sin daño (SD)	90.82	59.75	28.09	7.42
Ocupación inmediata (OI)	6.36	31.44	54.69	61.52
Seguridad de vida (SV)	2.82	5.91	8.44	14.89
Prevención de colapso (PC)	0.00	2.90	4.84	9.73
Colapso (C)	0.00	0.00	3.94	6.44
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

La Tabla 44 demuestra que para el sismo de 475 años de periodo de retorno (escenario más crítico) se tendrían 9,329 construcciones colapsadas (daños entre el 100 y 80%), 14,089 construcciones en estado de prevención de colapso con daños entre el 55 y el 79.9% del costo de reparación de su estructura; 21,605 construcciones en seguridad de vida con daños entre 35 y 54.9%, 89,199 construcciones en estado de ocupación inmediata y con daños entre 10 y 34.9% y solamente 10,754 construcciones sin ningún daño o daños leves entre 0 y 9.9% de daños.

Tabla 44. Porcentajes de daños para escenario más crítico (T_R=475 años).

Sistema constructivo	Número	Nivel de desempeño estructural				
		SD	OI	SV	PC	C
Mampostería sin refuerzo	338	0	10	15	84	229
Mampostería reforzada o confinada con diafragma rígido	4,180	337	2,815	752	269	7
Mampostería reforzada o confinada con diafragma flexible	988	80	796	69	38	5
Construcción informal (mampostería mal confinada o reforzada)	245	0	20	35	127	63
Adobe o bajareque	136	0	0	5	52	79
Marcos de concreto resistentes a momento	9	4	2	1	2	0
Marcos de concreto arriostrados con muros de concreto	1	0	1	0	0	0
Marcos de concreto arriostrados con muros de mampostería	2	1	1	0	0	0
Estructura de concreto celular	62	17	35	9	1	0
Marcos de acero resistentes a momento	2	2	0	0	0	0
Marcos de acero arriostrados con diagonales o muros	2	2	0	0	0	0
Estructura de perfiles livianos (naves industriales)	4	1	2	1	0	0
Estructura de madera	30	1	9	7	10	3
Total	5,999	445	3,691	894	583	386
Porcentaje	100	7.42	61.52	14.89	9.73	6.44
Escalado al inventario total de construcciones (INEGI, 2010)	144,976	10,754	89,199	21,605	14,089	9,329

De acuerdo a los resultados anteriores, el 31.06% del inventario de las construcciones en su estado actual tendrían daños importantes y serían en muchos de los casos pérdida total. Estas pérdidas se concentran en construcciones ubicadas en el centro de la ciudad, los

afluentes del río Sabinal y construcciones en la ladera sur. Es importante señalar que estos escenarios podrían representar una fotografía actual, sabiendo que en cuanto pasa más el tiempo, las construcciones serán más antiguas y presentaran mayor fragilidad y posibilidad de ser dañadas, a menos que sean rehabilitadas con técnicas que les permita mantener su rigidez, resistencia y capacidad de deformación.

Respecto a los sistemas constructivos se puede señalar que los grupos 1, 4, 5 y 13, son los que presentan mayor número de daños (Tabla 44), lo cual indica que el comportamiento del sistema estructural es definitivo en el desempeño sísmico de la estructura. No obstante lo determinante del sistema estructural, las condiciones de irregularidad de la construcción, antigüedad de la estructura que se relaciona con el reglamento con el que se diseñó y con el desgaste de los materiales, así como la importancia de un mantenimiento permanente, fueron variables que determinaron diferencias en el nivel de daño en sistemas como la mampostería estructural confinada con diafragma rígido o flexible o en las mismas estructuras de acero y concreto (Tabla 44). En el Anexo 5 se presentan las tablas correspondientes a los tres escenarios restantes, siendo el de 475 años de periodo de retorno donde más daños se presentan en las estructuras para los niveles de comportamiento establecidos (SD, OI, SV, PC y C). En la Tabla 45 se presenta una síntesis de los resultados donde se ratifica lo señalado.

Tabla 45. Porcentajes de daños para los cuatro escenario ($T_R=50$ años, $T_R=100$ años, $T_R=150$ años y $T_R=475$ años).

Periodo de retorno (T_R)	Aceleración (cm/s^2)	Número construcciones	Nivel de desempeño estructural				
			SD	OI	SV	PC	C
50	148	5,999	4392	1266	293	43	5
100	263	5,999	3550	1866	492	72	19
150	417	5,999	2149	2771	831	186	62
475	589	5,999	445	3,691	894	583	386
50	148	144,976	106,140	30,595	7,081	1,039	121
100	263	144,976	85,792	45,095	11,890	1,740	459
150	417	144,976	51,934	66,966	20,083	4,495	1,498
475	589	144,976	10,754	89,199	21,605	14,089	9,329

CAPÍTULO

7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Las principales conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- En las construcciones en Tuxtla Gutiérrez existen las condiciones físicas y materiales para sufrir afectaciones y daños por la manifestación de distintos fenómenos naturales, principalmente por un sismo. Durante el desarrollo histórico de la ciudad se tomaron decisiones que propiciaron esta condición, tal es el caso de la elección del sitio donde se desplantaría la ciudad. Estos elementos han conducido a una construcción social del riesgo, la cual se argumentó en el capítulo 3, mediante el empleo de variables históricas, económicas y sociales. Algunos de los elementos que sustentan esta conclusión son: la ciudad creció sin planeación, ni normas técnicas de construcción, con falta de personal técnico que diseñara, construyera y supervisara las obras, entre otras.
- Sí bien el peligro sísmico resultante fue dispar entre las distintas metodologías CRISIS (135 gales), PRODISIS (258 gales), con las funciones de Green empíricas se obtuvieron las mayores aceleraciones (589 gales) y por ende mayor peligro. Se puede afirmar del peligro sísmico y pese a las incertidumbres que se discutieron en la investigación, la probabilidad de que en el estado se presente un sismo de magnitud igual a 8.0 para un periodo de retorno de aproximadamente 475 años y un sismo de 7.5 para un periodo de retorno de 100 años. En ambos casos la ciudad de Tuxtla Gutiérrez tendría daños importantes.
- Un aspecto importante que permitió las diferencias de aceleraciones entre las metodologías empleadas fue el que CRISIS y PRODISIS determinan aceleraciones en roca. Si esas aceleraciones son trasladadas a sedimentos considerando el factor amplificación asociado al efecto de sitio, dichas aceleraciones aumentarían considerablemente y tenderían a ser más homogéneos los resultados para periodos de

retorno de 50, 100 y 150 años. Durante el sismo del 7 de abril de 2011, se encontraron diferencias entre las dos estaciones acelerográficas fijas con las que se contaba de hasta tres veces, siendo mayores en el centro de la ciudad.

- Una de las aportaciones de la investigación fue la identificación del efecto de sitio como determinante para la generación de daños históricos en la ciudad, lo cual se demostró tras analizar los daños de los sismos del 23 de septiembre de 1902, 21 de octubre de 1995 y 7 de abril de 2011. Adicionalmente se identificó la estructura de velocidades de la ciudad, apoyado de técnicas experimentales aplicadas por primera vez como son las Calicatas-SPAC.
- En la ciudad de Tuxtla Gutiérrez existen 21 combinaciones de sistemas de muros y losas (sistemas constructivos), los que se clasificaron de acuerdo a su comportamiento estructural en 13 sistemas. El 69.24% de las construcciones están elaboradas con los sistemas ladrillo-losa maciza y block-losa maciza. Ambos sistemas ocupan tres cuartas partes de la mancha urbana y la mampostería en cualquier modalidad representa más del 95% del inventario constructivo.
- Se desarrolló una metodología para el análisis de la vulnerabilidad de las construcciones que incluye el efecto de las irregularidades para determinar el nivel de comportamiento de las construcciones. Los factores incrementales por irregularidades (β_5) empleados fueron: irregularidades en planta, en elevación, golpeteo, daños previos, columnas cortas y piso blando.
- Los resultados de la vulnerabilidad de las estructuras utilizando las metodologías SORIS, la de la UAM y del CENAPRED fueron similares. La máxima vulnerabilidad se identificó en el centro de la ciudad y en la ladera sur oriente y poniente, ya que son estas zonas las que presentan mayor número de construcciones de adobe, bajareque, mampostería mal reforzada, construcciones con daños previos por estar desplantadas sobre suelos blandos. El 46% de las construcciones presenta una vulnerabilidad baja o muy baja y el 26% de las construcciones presentan vulnerabilidades altas o muy altas.
- Después de evaluar la vulnerabilidad estructural con tres métodos distintos (UAM, CENAPRED y SORIS), en esta investigación se encontró que el método SORIS, que es propuesto en esta tesis, es el más eficiente. Este método permite determinar el comportamiento de las estructuras de manera cuantitativa identificando en qué nivel de daño se encontrará la estructura ante sismos de cualquier intensidad. Otra ventaja es que posibilita determinar diferencias de comportamiento estructural ante sismos en construcciones que tienen el mismo sistema estructural, pero que incluyen diferentes irregularidades constructivas.
- La calibración de la metodología SORIS permitió determinar que el software tuvo una correlación espacial entre daños reales y las pérdidas calculadas del 88% para el sismo del 21 de octubre de 1995 y una correlación del 76% para el sismo del 7 de abril de 2011. Estas correlaciones se consideran aceptables, sin embargo indican que podrían mejorarse ampliando la base de datos en zonas donde no se obtuvieron suficientes

encuestas por lo riesgoso de las mismas o por ser muy heterogéneas en sus sistemas constructivos.

- Con el programa SORIS se determinaron los siguientes escenarios y consecuencias en los sistemas constructivos:
 - Escenario 1 (Período de retorno de 50 años; 0.15g): 106,140 construcciones (73.21%) sin daño; 30,595 (21.10%) ocupación inmediata; 7,081 (4.88%) seguridad de vida; 1,039 (0.72%) prevención de colapso; y 121 (0.08%) colapso.
 - Escenario 2 (Período de retorno de 100 años; 0.27g): 85,792 construcciones (59.18%) sin daño; 45,095 (31.10%) ocupación inmediata; 11,890 (8.20%) seguridad de vida; 1,740 (1.20%) prevención de colapso; y 459 (0.32%) colapso.
 - Escenario 3 (Período de retorno de 150 años; 0.43g): 51,934 construcciones (35.82%) sin daño; 66,966 (46.19%) ocupación inmediata; 20,083 (13.85%) seguridad de vida; 4,495 (3.10%) prevención de colapso; y 1,498 (1.03%) colapso.
 - Escenario 4 (Período de retorno de 475 años; 0.60g): 10,754 construcciones (7.42%) sin daño; 89,194 (61.52%) ocupación inmediata; 21,605 (14.90%) seguridad de vida; 14,089 (9.72%) prevención de colapso; y 9,329 (6.43%) colapso.
- Respecto a los sistemas constructivos se puede señalar que los grupos 1 (mampostería sin refuerzo), 4 (mampostería mal confinada o mal reforzada), 5 (adobe o bajareque) y 13 (madera), son los que presentan mayor número de daños en cualquier escenario.
- En este trabajo se han hecho evidentes los niveles de vulnerabilidad física en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Sin embargo, no es suficiente actuar solamente sobre los rasgos físicos de la vulnerabilidad, sino sobre todo el sistema: la pobreza, el modelo de crecimiento y apropiación del territorio, la falta de capacidades cognitivas y de acción frente al tema de los fenómenos naturales y la construcción social del riesgo en todas sus dimensiones.

7.2. Recomendaciones

7.2.1. Propuestas para mitigar riesgo sísmico

A continuación se enlistan un conjunto de propuestas para mitigar la vulnerabilidad e identificar el peligro con mayor precisión y con ello disminuir el riesgo por sismo, la mayoría de ellas, han sido implementadas en otras ciudades o incluso por el mismo Instituto de Protección Civil para el Manejo de Riesgos del estado de Chiapas, por lo que por sí mismas no son innovadoras, aunque sí son funcionales. Estas recomendaciones deben ser implementadas de manera integral y contemplando un plan a largo plazo con el propósito de fortalecer las capacidades de respuesta ante sismos de las instituciones, así como para mejorar la previsión y resiliencia de la población que reside en la zona conurbada de Tuxtla Gutiérrez y en otras áreas del estado de Chiapas.

Se elaboraron 5 propuestas concretas para identificar el peligro sísmico, 9 propuestas para identificar y mitigar la vulnerabilidad en construcciones presentes y futuras y 4

propuestas para aumentar la capacidad de respuesta de los servicios de emergencia de la ciudad ante un sismo, en caso de aplicarse se aumentarían notablemente las capacidades de la ciudad para enfrentar un sismo intenso.

Propuestas para identificar el peligro:

- I. *Instalar una Red Acelerográfica permanente en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, que interactúe con la Red Interuniversitaria de Ingeniería Sísmica (RIIS), la Red del Servicio Sismológico Nacional de la UNAM (SSN) y la Red del Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM). En los trabajos de Niño *et al.* (2007) y González *et al.* (2012) se presentan propuestas para la constitución de esta red acelerográfica (Figura 157).*

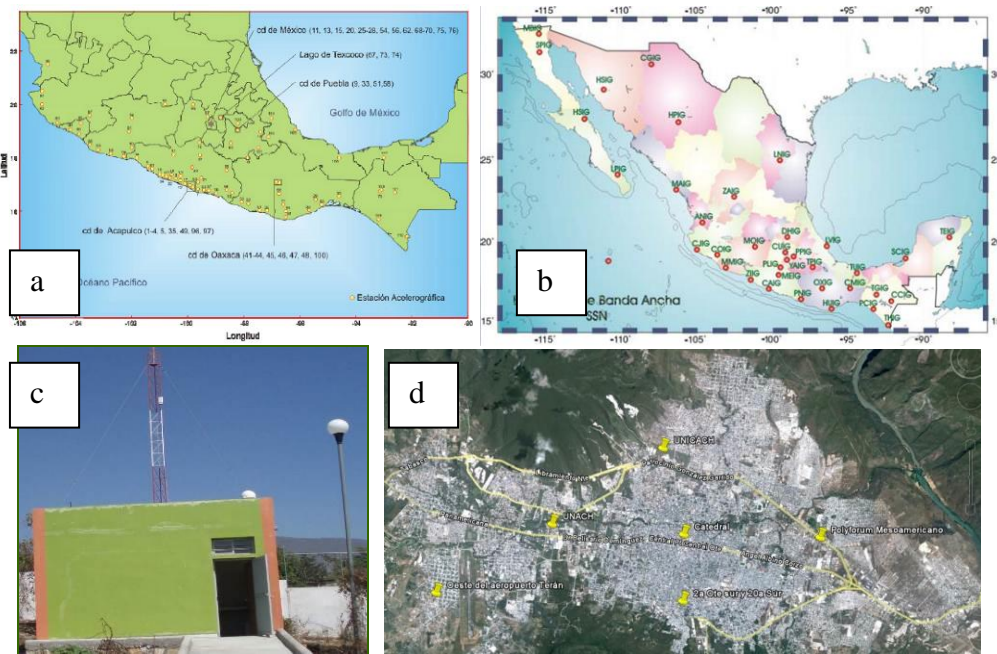


Figura 156. (a) Estaciones de la red del IIUNAM; (b) Estaciones de la red del SSN; (c) Estación del SSN en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas en la UNICACH; (d) Propuesta de red acelerográfica permanente para Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (González *et al.*, 2012).

Al contar con una Red Acelerográfica se puede evaluar con mayor precisión el peligro sísmico, así como los efectos de sitio (a través de los factores de transferencia), factores de amplificación, leyes de atenuación, identificación de fallamiento cortical activo, definir espectros más específicos para diversas regiones, planear el crecimiento de las ciudad, elaborar shake maps en tiempo real, entre otros. Además de temas de actualidad, tales como evaluar el riesgo complejo: sismo + remoción de masas, sismo, ubicar regiones de atención inmediata ante la posibilidad de daños, etc.

- II. *Actualización de la microzonificación sísmica considerando el crecimiento de la mancha urbana de la ciudad, así como las condiciones topográficas, geotécnicas,*

daños previos por sismo y las fallas geológicas activas identificadas. En la ciudad se han desarrollado tres proyectos de microzonificación:

- a. Alonso *et al.* (1995 y 1999) con un equipo de trabajo de la UAM y la UNACH desarrollaron un primer proyecto en el año 1995 que contaba con 75 puntos y una zona de terreno firme.
- b. Narcía *et al.* (2006) desarrollaron una actualización de la primera microzonificación con 96 puntos y también una zona.
- c. González *et al.* (2012) desarrollaron una microzonificación que incluía más de 350 puntos y ubicaba dos zonas una con terreno firme y una zona de transición. Para obtener mayor información de este estudio consultar el capítulo 4 de esta tesis.
- d. Desafortunadamente, ninguna de las microzonificaciones realizadas han sido incluidas en el reglamento de construcción de la ciudad.

Con la microzonificación propuesta por González *et al.* (2012) se plantean espectros de diseño más adecuados para la ciudad y permitieron proponer una norma técnica de diseño por sismo y la actualización del Reglamento de Construcción de la ciudad. No obstante es importante considerar que se debe solicitar que en estructuras nuevas que sean de uso masivo como: hospitales, escuelas, centros comerciales, etc., se demande la realización de un estudio de efecto de sitio, el cual ayudará a seguir actualizando y validando la microzonificación sísmica y desarrollar estructuras más seguras.

- III. *Establecer un sistema masivo de alerta de peligro sísmico a través de una red de Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de alta presión* similar a la empleada en Japón. El GPS identifica la posición inicial de un punto en tres componentes latitud, longitud y altura y cualquier modificación en esta, representa desplazamientos debidos a procesos geológicos como un sismo o una remoción de masa o antropogénicos como explosiones importantes. Es difícil considerar un sistema de alarma sísmica similar al Distrito Federal, por las distancias de las distintas fuentes sismogénicas a las ciudades de mayor concentración de habitantes. Sin embargo, el Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de Desastres del estado de Chiapas y el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C. (CIRES), tienen la propuesta de colocar 18 estaciones en el estado de Chiapas, las cuales se muestran en la Figura 158. Esta propuesta, de llevarse a cabo, podría ser útil para continuar los estudios del peligro y en mediano plazo como sistema de alerta temprana, ya que devienen retos importantes para el administrador del sistema: comunicar para la preparación de la población de una manera que la comunidad lo entienda y para ello se requiere de la capacitación efectiva que permita una acción asertiva (Hall, 2006).

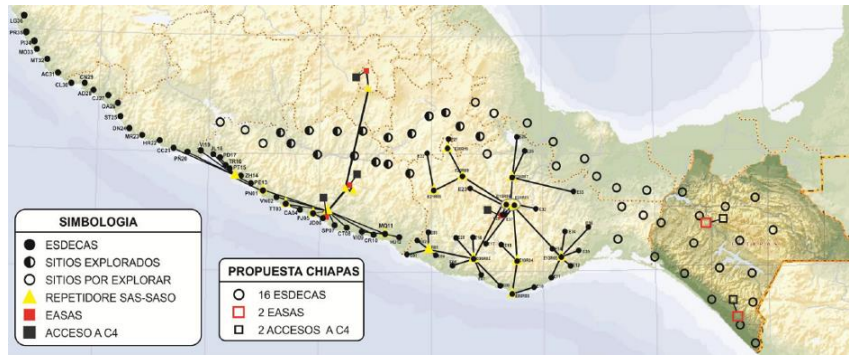


Figura 157. Propuesta de Sistema de Alerta Sísmica para Chiapas de 18 estaciones (CIRES, 2012).

- IV. *Atlas de peligros y riesgos municipales para identificar, prevenir y mitigar el riesgo.* Estos mapas pueden también evaluar el daño histórico a través de las sucesivas actualizaciones. Hernández et al. (2011), proponen capacitación a protección civil y a la sociedad en su conjunto, mediante reproducción comunitaria de la información en talleres, en una estructura de capacitación comunitaria de manera constante, ya que son los propios habitantes de una región los que finalmente monitorean los niveles de peligro de manera diaria.
- V. *Plan de desarrollo urbano territorial y regional basado en los estudios de riesgo por fenómenos naturales,* el cual es una de las herramientas más eficaces a largo plazo para la gestión del riesgo. Actualmente en los planes de desarrollo territorial se consideran aspectos ambientales, económicos y de modelo de desarrollo (Figura 159). La propuesta de planeación basada en integrar los riesgos por fenómenos naturales a los aspectos antes considerados, requiere del desarrollo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que emplee el Atlas municipal de peligros y riesgos, así como el resto de las variables antes usadas mediante capas de la mancha Urbana en sus distintos ámbitos, además de evaluar la vulnerabilidad, de lo cual se hablará más en los siguientes puntos.

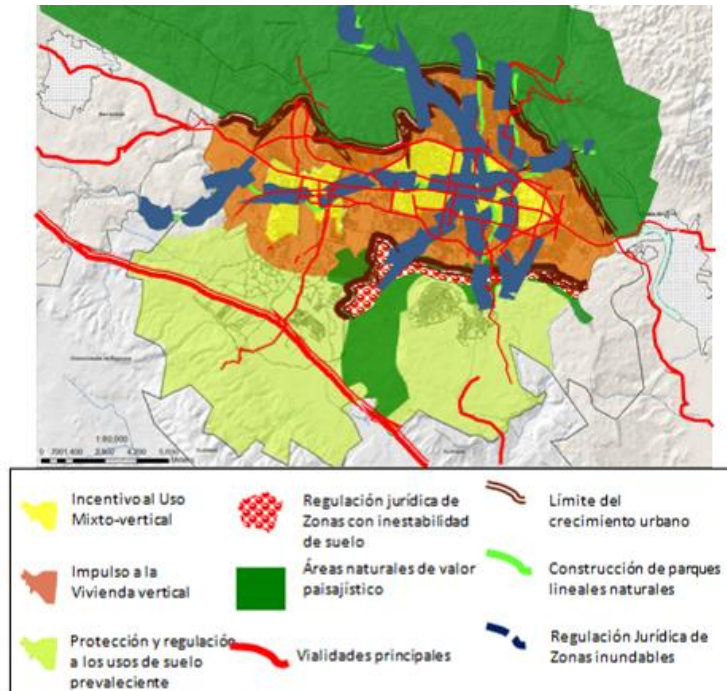


Figura 158. Propuesta del desarrollo de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas para el periodo 2012-2015 donde se retoman los aspectos del Atlas de Riesgos (basado en Hernández *et al.*, 2011).

Propuestas para identificar y mitigar la vulnerabilidad:

- VI. *Elaboración de proyectos tipo de sistemas constructivos*, estos sistemas serían desarrollados en despachos especializados que optimicen el costo, así como el sistema constructivo y minimicen los riesgos debidos a los errores que pudieran presentarse por falta de entendimiento del constructor, ya que estos proyectos serían básicamente de autoconstrucción. La idea central es un catálogo de proyectos donde se mecanizan todos los procesos técnicos, administrativos, licencias, etcétera, lo cual permite que las autoridades apoyen a familias de escasos recursos y supervisen el proceso. Adicionalmente, los proyectos podrían desarrollarse como viviendas progresivas tal y como se hacen en los sistemas de autoconstrucción, pero con un criterio técnico integral en cada una de sus etapas (proyecto, ejecución, supervisión y mantenimiento). La perspectiva es cambiar la idea del Instituto de Vivienda y la Secretaría de Obras de entes prescriptivos a institutos de apoyo y soluciones para mitigar la vulnerabilidad de las construcciones.
- VII. *Institución Interventora de la seguridad estructural*, esta figura permite la actualización y capacitación de los diseñadores estructurales y en general del personal de proyecto técnico de la región. La estructura de interventora consiste en una supervisión externa que a través de su experiencia apoye a los nuevos diseñadores partiendo de sus recomendaciones al evaluar y supervisar los proyectos propuestos para las nuevas construcciones y por otro lado se fortalezca a los interventores cuando evalúan proyectos de diseñadores experimentados, lo cual genera un círculo virtuoso. La diferencia de lo que existe en la actualidad, es la

profesionalización de la práctica de la supervisión y las responsabilidades que se asumen con esta, mediante contratos de corresponsabilidad en caso de fallas.

- VIII. *Inventario de construcciones municipales.* Este inventario a diferencia del de Catastro tiene elementos específicos para identificar al menos cualitativamente la vulnerabilidad de las construcciones ante el peligro sísmico, el cual debe considerar: el año de construcción, mantenimientos realizados, daños, uso y reglamento empleado para los distintos sistemas estructurales, lo cual puede estar relacionado con el pago catastral que se reduce en la medida del mantenimiento y disminución de la vulnerabilidad de la construcción. Estas consideraciones podrían priorizar las viviendas urbanas y rurales que requieren mayor mantenimiento y cuales son insalvables económicamente. El presupuesto para el reforzamiento y restauración puede estar asignado año con año, a través de programas municipales de mejoramiento de la vivienda y/o con créditos blandos y apoyo por las instituciones técnicas del municipio.
- IX. *Establecer tasas de seguro adecuado* en función del nivel de vulnerabilidad, lo cual produce la oportunidad de estímulos fiscales en la medida que las empresas y particulares inviertan en el mantenimiento de sus construcciones y proyectos estructurales más seguros. Este sistema ha funcionado en los Estados Unidos de América y puede ser un buen estímulo para diversos sectores, además incentiva el empleo de seguros y con ello la transferencia del riesgo.
- X. *Reglamentos constructivos actualizados* que cuenten con normas técnicas resultado de investigación regional, que contemplen el nivel de riesgo aceptado por la ciudad. La evolución del reglamento de construcción debe mantenerse constante a través de comités técnicos de normas, que funcionen permanentemente y que integren investigadores de universidades, centros de investigación, colegios y gente de la práctica. La ciudad no cuenta con normas técnicas para diseño de estructuras. Este elemento clave ha sido señalado en artículos, conferencias y comités (Aguilar et al., 2004). Actualmente, como resultado del proyecto denominado: Laboratorio para la identificación y análisis de peligros por fenómenos naturales, apoyado por FOMIX CHIAPAS 2010 C11, se propusieron las primeras normas técnicas para el diseño por sismo de la ciudad, las que están siendo analizadas por los colegios de ingenieros de la ciudad.
- XI. *Laboratorios que certifiquen la calidad de los materiales de construcción* que tienen procesos artesanales, tales como: blocks, tabiques, adoquines, etc., debido a que estos materiales deben cumplir con resistencias mínimas para su aplicación segura en zonas sísmicas. Este laboratorio debe apoyar a los pequeños productores para poder expedir una garantía de propiedades mecánicas mínimas. Tal es el caso de los programas locales de apoyo a productores, los cuales pueden ser beneficiados con la compra de su producto para obras públicas a cambio de que obtengan y mantengan la certificación del producto. En este laboratorio adicionalmente se desarrollarían investigaciones de sistemas constructivos locales escalados o de ser posible a escala natural y ayudaría a dotar de elementos a distintos investigadores para fortalecer las

Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción. Por su carácter interinstitucional se propone que se establezca en la Escuela de Protección Civil campus Chiapas, pero que se coordine a través del comité de normas con representantes de cada uno de los sectores participantes.

- XII. *Evaluar la vulnerabilidad de las estructuras indispensables de la ciudad* por la concentración de personal tales como: escuelas, hospitales, guarderías, estadios, centros comerciales, albergues, etc. Tras la evaluación preliminar de todas ellas, clasificarlas por nivel de vulnerabilidad encontrado, realizar un análisis más detallado de los casos especiales y priorizar su atención por parte de los propietarios y no solamente clausurarla.
- XIII. *Mantener actualizada la base de datos del programa SORIS*, lo cual permitirá al Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgo de Desastres identificar las áreas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez con mayor vulnerabilidad y tomar acciones para reducirla a través de algunas de las propuestas de esta sección.
- XIV. *Establecer una cultura de conciencia del riesgo por fenómenos naturales*. Esta cultura emplea foros, congresos, seminarios, diplomados, medios de difusión escritos y con el empleo de la prensa, con videos documentales que contemplen acciones para prevenir los desastres. La transmisión será en los canales estatales. La actualización y capacitación debe buscar permear en los siguientes sectores:
- a) Sociedad civil en general.
 - b) Autoridades y funcionarios gubernamentales.
 - c) Arquitectos, urbanistas, ingenieros, constructores, contratistas, sector de la construcción.
 - d) Protección civil y colegios de profesionistas.
 - e) Sector académico.
 - f) Organizaciones no gubernamentales.

Propuestas para aumentar la capacidad de respuesta de los servicios de emergencia ante un sismo:

- XV. *Mapas de vulnerabilidad*. Emplear los mapas para ubicar zonas de concentración de viviendas con materiales poco resistentes ante sismos (adobe, bambú, bajareque, mampostería sin refuerzo, etc.), zona centro, Terán, áreas de asentamientos irregulares, ladera sur, zona del estadio Víctor Manuel Reyna, para trazar rutas de acceso en caso de evacuación para salvaguardar vidas. Existen algunas propuestas de mapas de vulnerabilidad por sismo en: Guillén, 2005; González, 2010; González et al., 2010; Hernández et al., 2011, así como análisis del empleo de SIG para hacer inventario de estructuras esenciales y usarlos para la gestión en Jiménez et al., 2007; Prasad et al., 2009.
- XVI. *Albergues*. Emplear los albergues destinados a atender los desastres como centros de capacitación permanente durante los fines de semana, para que la gente que vive

cerca de estos lugares pueda sentirse más identificada con ellos y mejore sus capacidades a través de los distintos cursos que pudieran desarrollarse mediante prestadores de servicio y profesionales de diversas instituciones.

- XVII. *Preparar equipos de reconocimiento temprano posterior a un desastre.* Equipos capacitados y adscritos a comités de seguridad y riesgo estructural y sísmico, los cuales determinaran el estado de las construcciones después de un evento o como mejorar las construcciones para que tengan un buen comportamiento antes del mismo (evaluaciones presísmica y postsísmica), para tomar decisiones de desalojo, permanecer en el lugar o demolición y antes del evento, necesidad de implementar medidas para la mejora estructural.
- XVIII. *Preparar equipos para salvamento.* Estos equipos deben contar con perros para búsqueda de heridos, cuerpos, etc. Para ello pueden contactarse a grupos como Protección Civil del Distrito Federal, Protección Civil del estado de Jalisco y al denominado Topos, los cuales por su reconocimiento y experiencia en eventos trascendentes para el país tienen más experiencia en sismos que los del estado de Chiapas. Debemos recordar la importancia de las acciones tempranas después de un sismo, ya que las primeras 72 horas determinan en alto grado, las posibilidades de supervivencia o no de los siniestrados. Por lo cual, es de urgente necesidad para el estado contar con equipos con este nivel de especialidad ubicados en Chiapas. Sin embargo además de personal humano hay que contar con maquinaria y equipo ligero de salvamento, para lo cual la capacitación e implementación en la Escuela de Protección Civil campus Chiapas de estos equipos es clave.

7.2.2. Recomendaciones generales

Las medidas de prevención contra los efectos de los desastres deben considerarse como parte fundamental de los procesos de desarrollo integral a nivel regional y urbano, con el fin de reducir el nivel de riesgo existente. Dado que eventos de estas características pueden causar grave impacto en el desarrollo de las comunidades expuestas, es necesario desarrollar medidas preventivas versus la recuperación posterior a los desastres, e incorporar el análisis de riesgo a los aspectos sociales y económicos de cada región o país.

El diseño sísmico actual es una medida racional que pretende que las estructuras enfrenten las demandas que les inducen los sismos de una manera segura y confiable, considerando también se mantengan los costos de la construcción a niveles aceptables. Asumiendo lo anterior como la realidad del diseño, los estudios de riesgo deben incorporar adecuadamente los elementos correspondientes a la señal de entrada (peligro), ya que los niveles de demanda sísmica son los de mayor incertidumbre en los modelos de riesgo.

Es importante considerar que debido a las complejidades topográficas, geológicas y geofísicas del estado de Chiapas, así como la falta de estudios y de instrumentación, y al no ser el objetivo principal de la investigación, se determinó que el peligro sísmico para

nuestro trabajo sea determinado mediante la comparativa de distintos modelos probabilísticos. Los resultados son diversos, pero complementarios en cierta medida. Para el futuro se requieren estudios del peligro sísmico de cada una de las ciudades chiapanecas de manera particular, para lo cual se requiere de la instrumentación con equipos fijos, adicional a los provisionales que se empleen mediante las investigaciones específicas, mejorar o desarrollar los estudios geológicos, geofísicos y de mecánica de suelos de las regiones donde aún no se cuenta con información o no sea la adecuada.

Los costos de los elementos no estructurales, acabados, mobiliario y contenidos de las viviendas típicas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, corresponden a las dos terceras partes del costo total del proyecto, por lo cual debemos considerar parámetros que los representen en los estudios de riesgo. En los últimos años se ha insistido en la importancia del manejo de los elementos no estructurales, desde la concepción estructural y seguida durante el proceso constructivo, ya que de no hacerlo correctamente, los costos del daño a los mismos pudieran ser superiores que el costo de la reparación de la estructura misma.

Dentro de los elementos que se identificaron que podrían mejorarse para la obtención del peligro por sismo, son los siguientes:

- Obtención de leyes de atenuación para Tuxtla Gutiérrez para las distintas fuentes sismogénicas.
- Valorar el peligro de fallas corticales a partir de una instrumentación puntual de las mismas.
- Trabajar en una zonificación geológica y geotécnica más detallada para delimitar los efectos de sitio más puntualmente y apoyar a las normas técnicas y planes de desarrollo urbano.

Dentro de los elementos que se identificaron que podrían mejorarse para la obtención de la vulnerabilidad por sismo, son los siguientes:

- Contar con una base de datos más amplia y que se incluya a todas las estructuras esenciales de la ciudad (escuelas, hospitales, albergues, centros de emergencias, de comunicaciones, entre otras).
- Considerar análisis de la vulnerabilidad social que contemple mayor énfasis en el papel de las autoridades al municipalizar las distintas colonias de invasión en Tuxtla Gutiérrez.

Dentro de los elementos que se identificaron que podrían mejorarse para la obtención de los costos por sismo, son los siguientes:

- Análisis de los costos considerando elementos estructurales, no estructurales y contenidos, así como costos directos e indirectos.
- Consideración de los daños en la ciudad evaluando las líneas vitales.

REFERENCIAS

Referencias documentales

- ACECH, Asociación de Cronistas del Estado de Chiapas, A.C. (2010). *Tuxtla y sus barrios. Historia, crónica y vida cotidiana*. Tercera edición. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Aguilar, R. (2006). *Evaluación rápida de la deriva máxima de piso para calcular la vulnerabilidad sísmica de estructuras*. Monografía de Ingeniería Sísmica, CEINCI-ESPE, Quito, Ecuador.
- Aguilar, R. (2006). *Determinación de características dinámicas en estructuras críticas de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ingeniería, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Aguilar, H. R., Pérez-Rocha, L. E. y Jaramillo, A. (2009). *Respuesta sísmica del terreno para Hospital bicentenario*. Informe técnico Ingenieros Especialistas en Cimentaciones, S.C., México, D.F., 38 pp.
- Aguilar, A., Barbat, A., Pujades, L., Pérez, A. y Aguilar, H. (2008). *Software didáctico para estimar vulnerabilidad y riesgo sísmico en edificios*. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz, México.
- Aguilar, H. R., Pérez-Rocha, L. E. y Jaramillo, A. (2006). *Respuesta sísmica del terreno para Home Depot*. Informe Sísmica de Suelos, S.A. de C.V., México, 46 pp.
- Aguilar, J., Cruz, R., González, R., Narcía, C., Figueroa, J. A., San Sebastián, H. (2004). *Normas mínimas de seguridad estructural para el estado de Chiapas*. Memoria en extenso del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero, 29 de octubre al 1 de noviembre, México.
- Aguirre, J., Mora, J.C., González, R., Reyes, M., Robles, A., Piña, J., Mijares, H. y Gutiérrez, C. (2011). *Catálogo de Registros Sísmicos Red temporal de Tapachula* (Junio 15 a Julio 29), Instituto de Ingeniería y de Geofísica de la UNAM, México.
- Aguirre, J., Rodríguez, M. y Vázquez, R. (2006). *Sísmica de dispersión de ondas superficiales usando ruido sísmico. Siete mediciones en el Estado de Colima, México*, Congreso Nacional de Mecánica de Suelos, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 22-25 Noviembre, pp. 495-504.
- Aguirre, J., Irikura, K. y Kudo, K. (1994). *Estimation of strong ground motion on hard rock and soft sediments sites in the Ashigara Valley using the empirical Green's function method*, Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 44-1, No 379, pp. 45-64, Japón.
- Aki, K. (1957). *Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors*, Bulletin Earthquake Research Institute, Tokyo University, 35, pp. 415-457.
- Alarcón, P. (2005). *Comportamiento sísmico de estructuras de mamposterías*. Memorias del curso corto regional sobre edificaciones de mampostería. Morelia, México.
- Aldama, A., Gómez, C. y Guillén, B. (2008). *Elaboración de una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica*. Revista de matemática: Teoría y Aplicaciones, 15-1, 41-48.
- Alegría, J. (2011). *Temblores de 1975 en la ciudad de Chiapa de Corzo, Chiapas*, 268 p. México.
- Alonso, F., Castellanos, J., Grajales, J. y Ortiz, J. (2012). *Evaluación del estado de condición físico de estructuras en zonas de riesgo en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México*. Revista electrónica I+D, UNACH. Consultada digitalmente en: http://www.espacioimasd.unach.mx/semestre/octubre-2012/articulo/articulo3/Evaluacion_del_estado_de_condicion_fisico.php.
- Alonso, G., Cruz, R., Cruz, F., Ramírez, M., Ruiz, M. e Iglesias, J. (1999). *Resultados de la zonificación sísmica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez*, XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, México.

- Alonso, G., Cruz, R., Cruz, F., Ramírez, M., Ruiz, M. e Iglesias, J. (1995). *Zonificación sísmica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez*, Universidad Autónoma de Chiapas, Universidad Metropolitana, México.
- Arellano E., Juárez, H., Gómez, A., Lara, J. y Sánchez, E. (2003). *Caracterización y clases de vulnerabilidad de edificaciones de la colonia Roma, Ciudad de México*. Memorias XIV CNIS, León, Guanajuato, México.
- Arellano E., Juárez, H. y Gómez, A. (2002). *Vulnerabilidad sísmica de la ciudad de Chilpancingo Guerrero*. Memorias XIII CNIE, Puebla.
- Applied Technology Council (ATC) 21. (2002). *Rapid Visual Screening of building for potential seismic hazard: Volume 1, Handbook. Volume 2, Support documentation* Applied Technology Council, Redwood City, California, USA.
- Applied Technology Council (ATC) 20-3. (1997). *Case Studies in Rapid Post earthquake Safety Evaluation of Buildings*, Applied Technology Council and R.P. Gallagher, and Associates, Inc. Available through the ATC office, USA.
- Applied Technology Council (ATC) 25. (1991). *Seismic vulnerability and impact of disruption of lifelines in the conterminous United States* Federal Emergency Management Agency, Redwood City, California, USA.
- Applied Technology Council (ATC) 13. (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California* Applied Technology Council, Redwood City, California, USA.
- Audefroy, J. (2007). *Desastres y cultura: Una aproximación teórica*. Revista INVI 60-22, Agosto, pp. 119-132.
- Barbat, A. (1998). *El riesgo sísmico en el diseño de edificios*, Cuadernos técnicos 3, calidad siderúrgica, S.R.L., Barcelona, España.
- Bard, P. Y. (1999). *Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?*, The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Kudo, Okada & Sasatani editors, Balkema, 3-1, pp. 1251-1279.
- Barrientos, L., Fernández, J. J. y Rivero, F. J. (2007). *Análisis geográfico y estadístico de la sismicidad en la costa mexicana del Pacífico*. Boletín de los Sistemas Nacionales Estadístico y de Información geográfica, México. 3-1, enero-abril, pp. 3-26.
- Barrier, E., Velasquillo, L., Chávez, M. y Gaulon, R. (1998). *Neotectonic evolution of Isthmus of Tehuantepec (Southern Mexico)*. Elsevier Science Tectonophysics. 287, 77-96.
- Bai, V. (2008). *Emergency Management in China, FEMA, USA*. Consultado en línea en: training.fema.gov.
- Bazán, E. y Meli, R. (2003). *Diseño sísmico de edificios*. Editorial Limusa, México.
- Benito, B., Molina, E. y Laín, L. (2001). *Metodología para estudio de amenaza sísmica en Guatemala, aplicación al diseño sismoresistente*, Reporte de investigación, Guatemala.
- Bertero, V. V., Anderson, J. C., Krawinkler, H. y Miranda, E. (1991). *Design guidelines for ductility and drift limits: Review of the state of the practice and state of the art in ductility and drift based earthquake resistant design buildings*. Report UCB/EERC-91/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, USA.
- Bilham, R. (2009). *The seismic future of cities*. Bulletin Earthquake Engineering. 7:839-887. Springer.
- Bitrán, D. (2001). *Característica el impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980 a 1999*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México.
- Bitrán, D., Jiménez, M., Eslava, H., Acosta, L., Salas, M., Vázquez, M., Matías, L., Camacho, C. y Acosta, L. (2001). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2000*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México.

- Bitrán, D., Acosta, L., Eslava, H., Gutiérrez, C., Salas, M. y Vázquez, M. (2002). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2001*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México.
- Bitrán, D., Domínguez, L., Duran, R., Fuentes, O., García, N., Jiménez, M., López, O., Matías, L., Reyes, C., Salas, M. y Zepeda, O. (2003). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2002*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México.
- Bitrán, D., Domínguez, L., Duran, R., Fuentes, O., García, N., Jiménez, M., López, O., Matías, L., Reyes, C., Salas, M. y Zepeda, O. (2004). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2003*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México.
- Bitrán, D., Domínguez, L., Duran, R., Fuentes, O., García, N., Jiménez, M., López, O., Matías, L., Reyes, C., Salas, M. y Zepeda, O. (2005). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2004*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México.
- Bitrán, D., Domínguez, L., Duran, R., Fuentes, O., García, N., Jiménez, M., López, O., Matías, L., Reyes, C., Salas, M. y Zepeda, O. (2006). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2005*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México.
- Briones, F. (2005). *La complejidad del riesgo: breve análisis transversal*, Revista de la Universidad Cristóbal Colón edición temática Construcción social del riesgo: desastres, vulnerabilidad y género, Enero-Junio, 20, 9-19 pp. Consultado en línea en: <http://www.eumed.net/rev/rucc/20/>.
- Bruneau, M., Whittaker, A. y Reinhorn, A. (2002). *Engineering and organizational issues related to the World trade center terrorist attack. Volume 1: Overview of damage to buildings near ground zero*, MCEER Special Report Series, March, Buffalo, USA.
- Caicedo, C., Barbat, A. y Canas, J. (1994). *Vulnerabilidad sísmica de edificios*. Centro internacional de métodos numéricos en ingeniería. Monografía IS-6, CIMNE, Barcelona, España.
- Campillo, M. (2006). *Phase and correlation in random seismic fields and the reconstruction of the Green function*. Pageoph, 163, 475-501.
- Campos-Costa, A. y Duarte, R. T. (1992). *Idealizacao de accoes sísmicas por un modelo estocatico nao estacionario*. Proc Encontro sobre sismología e Engenharia Sísmica, 95-103 pp. Lisboa, Portugal.
- Cardona, O. D. (2001). *La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo*, ponencia presentada en International Work conference on Vulnerability in Dissaster Theory and Practice, Wageningen, Holanda.
- Cardona, O. (1993). *Mitigación de desastres en las instalaciones de la salud*. Volumen 4: Aspectos de ingeniería (Pan American Health Organization (PAHO) / Organización Panamericana de la Salud (OPS)), 87 pp.
- Castro, J. L. (2012). *El antiguo centro Histórico de Tuxtla Gutiérrez*. En el Heraldo de Chiapas, 20 de marzo, consultado en línea: <http://www.oem.com.mx/elheraldodechiapas/notas/n2473067.htm>.
- Castro, A. (2001). *Cronología histórica sobre los desastres naturales y sociales en Tuxtla Gutiérrez*. Páginas históricas de Chiapas, 48, México, pp. 1-2.
- Castro-Mora J., Almazán, S., Morales, R., Bustamante, M. A., Flores, E., Gómez, J. A., Mora-Rivera, C., Martínez, P., Arango, G., Velázquez, F.G., Chavarín, O., López, R. S., Ortiz, L. E., Praga, J. J., Sánchez, D., Sabanero, H., Mérida, A. y González, A. (1999). *Monografía Geológico-Minera del estado de Chiapas*. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Coordinación General de Minería. Consejo de Recursos Minerales Centro Minero, 178 pp.

- Castro, E., Valencia, A., Ojeda, J., Muñoz, F. y Fonseca, S. (2001). *Evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa*. Guía metodológica. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
- Cedillo, R. y López, T. (1995). *Chiapas*, Monografía Estatal, Secretaría de Educación Pública, México.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2006a). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: fenómenos geológicos*. Sistema Nacional de Protección Civil, México.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2006b). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: evaluación de la vulnerabilidad física y social*. Sistema Nacional de Protección Civil, México.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2001). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*. Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana, Sistema Nacional de Protección Civil, México.
- Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C. (CIRES). (2012). *Propuesta ejecutiva para definir y construir un sistema capaz de advertir sobre el inicio de los temblores fuertes que ocurren en las regiones sismogénicas del estado de Chiapas, para prevenir a la población y a las autoridades del estado*. 20 pp. México.
- Chávez-García, F.J., Rodríguez, M. y Stephenson, W.R. (2006). *Subsoil Structure Using SPAC Measurements along a Line*. Bulletin of the Seismological Society of America, 96, 729-736.
- Chávez-García, F.J., Rodríguez, M. y Stephenson, W.R. (2005). *An alternative approach to the SPAC analysis of microtremors: exploiting the stationary of noise*. Bulletin of the Seismological Society of America, 95-1, 277-293.
- Comerio, M. C. y Blecher, H. E. (2010). *Estimating downtime from data on residential buildings after the Northridge and Loma Prieta Earthquakes*. Earthquake Spectra, 26-4, pp. 951-965, November, Earthquake Engineering Research Institute, USA.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2003). *Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los desastres*. Nueva York, Estados Unidos.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE) (2008). *Manual de obras civiles diseño por sismo*. Instituto de Investigaciones Eléctricas, CFE, Cuernavaca, Morelos, México.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE) (1993). *Manual de obras civiles*. Estructuras, C.1.3. Diseño por sismo. Instituto de Investigaciones Eléctricas, CFE, Cuernavaca, Morelos, México.
- Corsanego, A. y Petrini, V. (1990). *Seismic vulnerability of buildings*. Proceeding of the SEISMED 3, Trieste, Italia.
- CRISIS. (2007). *Software de Peligro Sísmico Mundial*, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.
- Cruz, J.L. y Almazán, P.E. (2008). *Los zoques de Tuxtla y la disputa por las virgencitas de Copoya, en el valle central de Chiapas*. Revista Ra Ximhai 4-2, mayo – agosto, pp. 21-47.
- De la Rosa, J. (1989). *Geología del Estado de Chiapas*. Comisión Federal de Electricidad INDE-Guatemala, C.A; pp. 192. Gobierno del Estado de Chiapas. México.
- Díaz, V., Alonso G., Ordóñez, J. y Nangüelú, F. (2006). *Propuesta de zonificación geotécnica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez*. XXIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, México.
- Dolce, M. (1994). *Report of the EAEE Working Group 3: Vulnerability and risk analysis*. Proceedings of the 10th ECEE, Viena, Austria.

- Earthquake Engineering Research Institute (EERI). (2005). *Learning from earthquakes. Learning from Earthquakes Program: A Brief Synopsis of Major Contributions*, 31 pp. USA.
- Escobar, H. (1997). *La Urbanización periférica de Tuxtla Gutiérrez*. En Aspectos Urbanos y Arquitectónicos de Tuxtla Gutiérrez. Cuadernos de Arquitectura y Urbanismo 3. Facultad de Arquitectura, UNACH, México.
- Espinosa, L. (1976). *Propuesta de zonificación geotécnica de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.
- Esteva, L. (2007). *Análisis de riesgos para instalaciones estratégicas ante eventos extremos*. IX Simposio de Ingeniería Sísmica, Ixtapan de la Sal, Estado de México.
- Esteva, L. y Ordaz, M. (1988). *Riesgo sísmico y espectros de diseño en la República Mexicana*. III Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica, pp. 420-458, Guadalajara.
- Esteva, L., Díaz, O., Terán, A. y García, J. (1988). *Costos probables de daños causados en temblores en construcciones*. Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.
- Esteva, L. (1970). *Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería*, Serie azul del Instituto de Ingeniería de la UNAM, pp. 246, México.
- Esteva, L. y Rosenbleuth, E. (1964). *Espectro de temblores a distancias moderadas y grandes*. Sociedad Mexicana de Ingeniería sísmica, Boletín, 2. pp. 1-18.
- Esteva, L. (1963). *Estimaciones de daños probables producidos por temblores en edificios*. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería, México.
- Farreras, S., Domínguez, R. y Gutiérrez, C. (2005) *Serie Fascículos: Tsunamis. Centro Nacional de Prevención de Desastres Naturales*, Segunda impresión, 44 p. México.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) 154. (2005). *Rapid Visual Screening Training -Student Manual*, Washington, D.C., USA.
- Feller, W. (1991). *Introducción a la teoría de probabilidades y sus aplicaciones*, editorial Limusa, México.
- Feilden, B. (1987). *Between Two Earthquakes: Cultural Property in Seismic Zones*. California, USA, 111 p. Consultado en línea: <http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=M4Cdhtv45T8C&oi=fnd&pg=PA7&dq=%22earthquake+Antigua%22++&ots=J7ZS1FeelR&sig=hWK-1aeB4qfQtnF5nfDLqBufVEw#v=onepage&q=%22earthquake%20Antigua%22&f=false>
- Fernández, E. y Piero, R. (1999). *Introducción a la Geología kárstica*. Federación Española de Espeleología, España.
- Figueroa, J. (1986). *Isosistas de grandes temblores ocurridos en la República Mexicana*, Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM, 57 pp. México.
- Figueroa, J., Lomnitz, C., Dawson, A., Meli, R. y Prince, J. (1975). *Los sismos de julio a octubre de 1975*, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.
- Figueroa, J. (1973). *Sismicidad en Chiapas*. Reporte técnico del Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.
- Flores, L., López, O., Pacheco, M., Reyes, C., Rivera, D., García, N., Marín, R. y Méndez, K. (2006). *Evaluación de la vulnerabilidad física y social*. Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos, CENAPRED, México.
- Flores, H. (2004). *Método SPAC: Una alternativa para la estimación de modelos de velocidades en el Valle de México*. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Tesis de Maestría, 122 pp.
- Foltz, R. (2004). *Estimating seismic damage and repair costs*. Reporte de investigación de Texas A&M. USA.
- Gallego, M., Yamín, L. y Trisancho, J. (2004). *Sistema probabilística de información geográfica de amenaza sísmica de Colombia*. Revista de la facultad de ingeniería de la Universidad de los Andes, pp. 12-26, Bogotá Colombia.

- Gama, A., Gómez, A. y Aguirre, J. (2010). *Estimación del peligro sísmico en sitios cercanos a la fuente sísmica*, GEOS 30-2, CICESE, México.
- Gama, A. (2010). *Estudio de peligro sísmico para la ciudad de Chilpancingo, Guerrero*. Tesis de doctorado en Ingeniería Estructural, UAM Unidad Azcapotzalco, México.
- GAR. (2009). *Informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres 2009. Riesgo y pobreza en un clima cambiante Invertir hoy para un mañana más seguro*. Naciones Unidas. Anexo 7. Manifestaciones del riesgo intensivo y extensivo 1980-2006, México, Septiembre de 2008, Estrategia internacional para la reducción de desastres, Naciones Unidas, Nueva York, Estados Unidos.
- García, N., Marín, R., Méndez, K. y Trocoso, N. (2012). *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2010*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México.
- García, N., Marín, R. y Méndez, K. (2010). *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2009*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México.
- García, N., Marín, R. y Méndez, K. (2009a). *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2008*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México.
- García, N., Marín, R. y Méndez, K. (2009b). *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2007*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México.
- García, N., Marín, R. y Méndez, K. (2007). *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2006*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México.
- García, V. y Suárez, G. (1996). *Los sismos en la historia de México*. Edición Científica Universitaria, Fondo de Cultura Económica, UNAM, CIESAS, México, 718 pp.
- Garduño, V.H., Chávez, J., Aguirre, J., Vázquez, R., Mijares, H., Israde, I., Hernández, V.M., Rodríguez, M.A. y Pérez, R. (2009). *Zonificación de los periodos naturales de oscilación superficial en la ciudad de Pátzcuaro, Michoacán, México, con base en microtremores y estudios de paleosismología*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 26-3, 623-637, México.
- Ghobarah, A. (2004). *On Drift Limits Associated with Different Damage Levels. International Workshop on Performance-Based Seismic Design*, Department of Civil Engineering, McMaster University, June 28-July 1.
- Giddens, A. (1993). *Consecuencia de la Modernidad*, editorial Alianza, Madrid, España.
- Goda, K. y Hong, H. P. (2008). *Estimation of Seismic Loss for Spatially Distributed Buildings*. Earthquake Spectra, 24-4, pp. 889-910, USA.
- Gómez, A., Juárez, H. y Arellano, E. (2006). *A review of seismic vulnerability assessment in Mexico City from large subduction earthquakes*. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3-8 September.
- González, R., Mora, J. C., Aguirre, J. y Novelo, D. A. (2013). *La estructura de velocidades y su relación con el peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, UNAM, 30-1, ISSN 2007-2902. Juriquilla, Querétaro, México.
- González, R., Mora, J. C. y Aguirre, J. (2012). *Microzonificación sísmica de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Instituto de Protección Civil para el manejo de riesgos de Desastres del estado de Chiapas, 165 p. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- González, R., Aguilar, J. A., Mora, J. C., Palacios, R. J. y Figueroa, J. A. (2011a). *Análisis estadístico del peligro e inferencia del riesgo sísmico en el norte del estado de Chiapas*. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 16-1, pp. 51-57, México.
- González, R., Tena, A., Mora, J. C., Borraz, M. A., Aguilar, J. A., Cruz, R., Figueroa, J. A., Chan, J. A., Ramírez, M. S., Vera, R. y Narcía, C. (2011b). *El sismo de Villaflores, Chiapas, su*

- realidad y consecuencias*. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Colección Jaguar, 400 pp. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- González, A. (2010). *Análisis de la peligrosidad sísmica en el sureste de México con base en el catálogo del Servicio Sismológico Nacional de 1974 a 2009*. Tesis de licenciatura de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, México.
- González, R. (2010). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica del centro de Tuxtla Gutiérrez*. Congreso Internacional de AcademiaJournals.com, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 8 a 10 de septiembre, México.
- González, R., Borraz, M. A., Sánchez, P. A., De la Cruz, Y., Aguilar, J. y Ruiz, A. (2010a). *Construcción histórica de la vulnerabilidad sísmica en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Memoria en extenso del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León, Guanajuato, 3 al 6 de noviembre, México.
- González, R., Alegría, J. N., Borraz, M. A., Aguilar Carboney, J. A., Ruiz, J. A., Vera, P. y García, C. M. (2010b). *Empleo de blocks elaborados con residuos de construcción en Chiapas*. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León, Guanajuato, 3 al 6 de noviembre.
- González, R., Borraz, M. A., Aguilar, J. A., Narcía, C. y Ruiz, J. A. (2009a). *Efectos cuantitativos del piso blando en estructuras bajas de mampostería en Chiapas*. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, 11 al 14 de noviembre.
- González, R., Borraz, M. A., Aguilar, J. A., Narcía, C. y Ruiz, J. A. (2009b). *Caracterización mecánica del adobe de Tuxtla Gutiérrez y su relación con la vulnerabilidad*. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, 11 al 14 de noviembre.
- González, L. y Vidaud, L. (2009). *Factores para evaluar la viabilidad de proyectos de conservación de edificaciones esenciales, no productivas, en zonas sísmicas*. Ingeniería, Revista Académica de la FI de la UADY, 13-1 pp. 25-39.
- González, R., Aguilar, J. A. y Gómez, M. C. (2008). *Nuevas tecnologías constructivas de vivienda en Chiapas*. Lacandonia revista de ciencias, UNICACH, México, pp. 62-74.
- González, R. y Gómez, M. C. (2008). *Efectos de la irregularidad en planta por forma arquitectónica*. Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz, México, 6 al 8 de noviembre.
- González, R. y Gómez, M. C. (2007). *Metodología para evaluar el porcentaje de participación de los contenidos, elementos estructurales y no estructurales en el costo de las viviendas típicas de Tuxtla Gutiérrez*. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa Zihuatanejo, Guerrero, 31 de octubre al 3 de noviembre.
- González, R. y Aguilar, J. (2004). *Patología estructural en viviendas de interés social de mampostería debida a paradigmas constructivos en el estado de Chiapas*. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero, México.
- González, G. (1998). *Simulación de un escenario sísmico en función de la intensidad y del tipo de construcción*. Tesis de licenciatura, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Gossen, G. H. (1989). *El tiempo cíclico en San Juan Chamula: ¿mistificación o mitología viva?*. Revista Mesoamericana, diciembre, pp. 441-459. Consultado en línea en: dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3735207.pdf.
- Grunthal, G. (1998). *Escala macrosísmica europea 1998*. Monografía, segunda edición. Centro de investigación y mitigación de desastres naturales, Guatemala.
- Guillén, L. (2005). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones por muestreo estadístico*. Tesis para obtener el grado de maestría en ingeniería estructural de la Universidad Autónoma Metropolitana, Octubre, México.
- Gutiérrez, C., Miller, S., Montoya, C. y Tapia, R. (1991). *Diagnóstico de peligro sísmico para la República Mexicana y evaluación de intensidades para sismos históricos*. CENAPRED, México.

- Guzmán, M. (2013). El sismo de Guatemala de 1816 ($M \approx 7.5$). *Evidencia de que la falla Polochic continúa en la falla Angostura en el sureste de México*. Geos, Vol. 33, No. 1, Octubre.
- Guzmán, M. y Meneses, J. J. (2000). *The North America–Caribbean plate boundary west of the Motagua–Polochic fault system: a fault jog in Southeastern Mexico*, Journal of South American Earth Sciences, 13-4, pp. 459-468.
- Guzmán, M. (1980). *Generación de registros sísmicos sintéticos para Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Tesis de licenciatura en Ingeniería Geofísica, UNAM, México.
- Hall, P. H. (2006). *Early Warning Systems: Reframing the Discussion*. Faerber Hall.
- H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez. (1988). *Monografía del municipio de Tuxtla Gutiérrez*. Chiapas, México.
- HAZUS. (1999). *Earthquake loss estimation methodology, HAZUS*, Federal Emergency Management Agency FEMA. Washington, D.C., USA. En línea en: <http://www.fema.gov/hazus/>.
- Hernández, L. P., González, R., Mora, J. C., Morales, H., Montalvo, A., Olvera, B., Urbieta, M. L., Díaz, D., Grajales, O., Carpio, S., López, Z. M., Hernández, R. A. y Sida, V. M. (2011). *Atlas de Riesgo del Municipio de Tuxtla Gutiérrez*, SEDESOL, Tuxtla Gutiérrez. Diciembre, 30 mapas temáticos y 275 pp. México.
- Hernández, R. (2005). *Estudio de vulnerabilidad sísmica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ingeniería, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de Desastres del Estado de Chiapas (IPCMIRD). (2012). *La protección civil en Chiapas, Sistema estatal de Protección Civil*, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2010). *Anuario estadístico Chiapas tomo I y II*. Censo de Población y vivienda 2010, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2005). *Anuario estadístico Chiapas*. Censo de Población y vivienda 2005, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2005). Carta geológico-Minera, E15-11, México.
- Instituto de Tecnología del Agua (IMTA) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2011). Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático, México. Consultado electrónicamente en: http://www.imta.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=647.
- Irikura, K. (1986). *Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function*, 7° Simposio de Ingeniería Sísmica de Japón, pp. 151-156, Japón.
- Jiménez, C., Bravo, G., García, R. y Moreno, S. (2007). *Sistema de información para la generación de soluciones técnicas personalizadas para la construcción de vivienda de interés social*, Revista de ingeniería 25, Universidad de los Andes, Bogotá Colombia.
- Juárez, H., Gómez, A., Arellano, E. y Sordo, E. (2004). *Seismic vulnerability assessment for Colonia Roma in Mexico City*. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- Kanai, K. y Tanaka, T. (1961). *On microtremors*. VIII, Bulletin Earthquake Res. Inst. Tokyo University, 39, pp. 97-114.
- Kanamori, H. (1977). *The energy release in great earthquakes*, Journal Geophysical Research, Vol. 82, pp. 2981-2987.

- Kiremidjian, A., Moore, J., Fan, Y., Hortacsu, A., Burnell, K. y LeGrue, J. (2001). *Earthquake Risk Assessment for Transportation Systems: Analysis of Pre-Retrofitted System*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 4-1, USA.
- Kostoglodov, V. y Pacheco, J. F. (1999). *Cien años de sismicidad en México*. Instituto de Geofísica de la UNAM y Servicio Sismológico Nacional, México, D. F. Consulta en línea en: <http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html>.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, United States of America.
- Lay, T. y Wallace, T. C. (1995). *Modern global seismology*. Academic Press, 9-12 pp, United States of America.
- Lermo, J. y Chávez-García F. J. (1994). *Are microtremors useful in site response evaluation?*, Bulletin Seism. Soc. Am., 83, pp. 1350-1364.
- Lomnitz, C. (1974). *Global tectonics earthquakes risk*. Developments in geotectonics 5. Elsevier scientific Pub. Co. pp. 24-27.
- López, C. (2003). *Antier cuando eras menos, el centro de Tuxtla Gutiérrez en 1925*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez, 9 pp.
- Lugo, J. (1988). *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos Cartográficos)*. Instituto de Geografía, UNAM, 128 p. México.
- Maffei, J., Bazurro, P., Marrow, J. y Goretti, A. (2006). *Recent Italian earthquakes: examination of structural vulnerability, damage and post-earthquake practices. Cases studies and comparisons to US practice*. A beyond reconnaissance project from the EERI Learning from earthquakes program. EERI, USA.
- Maldonado, E., Chio, G. y Gómez, I. (2007). *Índice de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mampostería basado en la opinión de expertos*. Ingeniería y Universidad, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 11-2, 149-168, julio-diciembre.
- Malo, C. (1997). *La Dinámica de crecimiento demográfico de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez*. En Aspectos Urbanos y Arquitectónicos de Tuxtla Gutiérrez, Cuadernos de Arquitectura y Urbanismo 3, Facultad de Arquitectura, UNACH, México.
- Martínez, J. (2006). *Escenarios de riesgo sísmico en la ciudad de México utilizando sistemas de información geográfica*. XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Mayes, R. (1995). *Interstory Drift Design and Damage Control Issues*. The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 4, pp. 15-25.
- McCormack, T. y Rad, F. (1997). *An Earthquake Loss Estimation Methodology for Buildings Based on ATC-13 and ATC-21*. Earthquake Spectra, 13-4, November, pp. 605-621, USA.
- McGuire, R. K. (2004). *Seismic Hazard and Risk Analysis*, Second Monograph Series MNO-10. EERI. Oakland, California, United States of America.
- Mansilla, E. (2000). *Riesgo y ciudad*. Facultad de Arquitectura, UNAM. Tesis de doctorado, 181 p. México.
- Membrillo, H. (2006). *Aportaciones a la geología de Tuxtla y Copoya*. Reporte de recorrido geológico 2005-2006. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Mendoza, L. (1999). *Informe final del proyecto RADIUS*, Tijuana, B.C. CICESE, Ensenada, B. C., México.
- Mérida, A. (2000). *Cien años de evolución urbana en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Universidad Autónoma de Chiapas y H. Ayuntamiento Constitucional de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Miranda, E. (2008). *Diseño sísmico de edificios basado en desempeño*. XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Santiago de Chile, Chile.

- Miranda, E. (2007). *Estimación del comportamiento sísmico de edificios estratégicos*. 9no Simposio Nacional de la SMIS Construcciones estratégicas y amenazas naturales, Ixtapan de la Sal, Estado de México.
- Miranda, E. (1997). *Estimation of maximum interstory drift demands in displacement based design*. Seismic design methodologies for the next generation of codes, H. Krawinkler and P. Fajfar editor, Balkema.
- Miranda, E., Ordaz, M., Alonso, J. y Montoya, C. (1996). *Evaluación simplificada del riesgo sísmico de edificios en la ciudad de México*. Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Moehle, J. P. (1996). *Displacement based seismic design criteria*. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.
- Moehle, J. P. (1992). *Displacement based design of reinforced concrete structures*. Earthquake Spectra, 8-2, pp. 403-428.
- Montiel, G. (1975). *Las viejas calles de la antigua Tuxtla*. Tuxtla Gutiérrez, México.
- Morales, J. M. (1980). *Pequeña monografía del municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Rincones de Chiapas, Colección Chiapas, Centro de Investigaciones Ecológicas del Sureste, CIESAS.
- Moreno, R. A. y Aguilar, Z. (2003). *Análisis del riesgo sísmico de la ciudad de Moquegua usando sistemas de información geográfica*. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Iquitos, Perú.
- Mullerried, F. (1957). *Geología de Chiapas*. Editorial Cultural, 179 p. México.
- Narcía, C. (2009). *Importancia del estudio de los sismos en Chiapas en: Estudios ambientales y Riesgos Naturales, aportaciones al sureste de México*, Rodolfo Palacios Silva (Coordinador), capítulo 1, pp 43-67. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Colección Jaguar, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Narcía C., Aguilar, J., Ramírez, M., Cruz, R. y González, R. (2006). *El periodo natural de vibración del suelo en la ciudad de Tuxtla, Gutiérrez, Chiapas*. Quehacer científico en Chiapas. 1-1, pp. 22-38, UNACH. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Narcía, C. (2002). *Espesor de la corteza en Chiapas mediante ondas directas y convertidas*. Tesis de Maestría, División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología, CICESE. 91 pp. Ensenada, Baja California, México.
- Nakamura, Y. (1989). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*. QR of RTRI 30-1, February, pp. 25-33.
- Newmark, N. y Rosenbleuth, E. (1976). *Fundamentos de ingeniería sísmica*. Diana, México.
- Nishenko, S. P. y Singh S. K. (1987). *Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone*. Bulletin of the Seismological Society of America, 77-6, pp. 2095-2114.
- Niño, W., Aguilar, J., Narcía, C. y González, R. (2007). *Diseño de una red local acelerométrica para el registro de temblores fuertes en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica en Ixtapa Zihuatanejo, Guerrero, 31 de octubre al 3 de noviembre.
- Noguez, C. (1997). *Cambios territoriales y transformaciones socioculturales en Tuxtla Gutiérrez: 1940-1995*. En Aspectos Urbanos y Arquitectónicos de Tuxtla Gutiérrez, Cuadernos de Arquitectura y Urbanismo 3, Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Chiapas, México.
- NMX-C-404-ONNCCE. (1997). *Normas Mexicanas y el Organismo Nacional de Normalización de Materiales Componentes y Sistemas Estructurales*, México.
- NTC-DM-RCDF. (2004). *Normas Técnicas Complementarias de Mampostería del Reglamento de Construcción del Distrito Federal*, México.
- NTC-DS-RCDF. (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcción del Distrito Federal*, México.

- Núñez, F. J., Ortiz, M., Sánchez, J. J. y Suárez, C. (2008). *El terremoto de San Sixto y el gran tsunami de 1787 en la costa sur de México*, Memorias de la Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, GEOS, 28-2, Octubre, pp. 204-205.
- Nur, A. y Burgess, D. (2008). *Did earthquakes trigger the collapse of ancient civilizations?* En: *Shaking the foundations of archaeology*, coordinador: Andrew Robinson, Princeton University Press.
- Ordaz, M. (2011). *Sismicidad y Riesgo sísmico*, en: Curso de seguridad sísmica de las construcciones, editores: Fernández, E. J. y Sánchez, T. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (SMIS), pp. 5-29, México.
- Ordaz, M. y Montoya, C. (1995). *Sistema de evaluación de pérdidas por sismo en el Distrito Federal*. Bases teóricas, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.
- Ordaz, M., Meli, R., Montoya, C., Sánchez, L. y Pérez-Rocha, L. E. (1992). *Data base for risk assessment in Mexico City*. Simposio Internacional de Prevención de Desastres sísmicos, México, mayo 18-21 pp.
- Ordaz, M., Jara, M. y Singh, K. (1989). *Riesgo sísmico y espectros de diseño en el estado de Guerrero*. Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Ordoñez, J. (2008). *Zonificación geotécnica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*, Universidad Autónoma de Chiapas, México.
- Ordoñez, J. (1994). *Estabilización de arcillas expansivas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez con caliche y arena*. Tesis de maestría. UNAM, México.
- Orozco, V. y Reinoso, E. (2007). *Revisión a 50 años de los daños ocasionados en la ciudad de México por el sismo del 28 de julio de 1957 con ayuda de investigaciones recientes y sistemas de información geográfica*. Revista de Ingeniería Sísmica 76, 61-87 pp. México.
- Ortega, F., Mitre, L. M., Alaniz, S., Roldán, J., Aranda, J. J., Nieto, Á. F. y Morán, D. J. (1991). *Geologic provinces of Mexico a new proposal and bases for their definition*: UNAM, Instituto de Geología; Universidad Autónoma de Hidalgo. Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra; Sociedad Mexicana de Mineralogía y Secretaría de Educación Pública. Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica, Convención sobre la evolución geológica de México y I Congreso Mexicano de Mineralogía, Pachuca, Hidalgo, México.
- Panza, G. F., Kouteva, M., Vaccari, F., Peresan, A., Cioflan, C. O., Romanelli, F., Paskaleva, I., Radulian, M., Gribovszki, K., Herak, M., Zaichenco, A., Marmureanu, G., Varga, P. y Zivcic, M. (2008). *Recent achievements of the neo-deterministic seismic hazard assessment in the CEI region*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization and International Atomic Energy Agency.
- Papa, F. y Zuccaro, G. (2005). *MEDEA: A multimedia and didactic handbook for seismic damage evaluation*. Protection Civil, Roma, Italia.
- Pardo, M. y Suárez, G. (1995). *Shape of the subduce Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implication*: Journal of Geophysical Research, 100, 12357-12373.
- Paula, F. (2008). *Transformación del centro histórico de Tuxtla Gutiérrez*, Tuxtla Gutiérrez: Rodríguez Núñez editor, México.
- Pavía, F. (2006). *Transformación del centro histórico de Tuxtla*. Consultado en línea en: http://cronistasdechiapas.org/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=26.
- Paz, J. A. (2012a). *Tuxtla Gutiérrez: 120 años como capital de Chiapas*. Conferencia magistral en INEGI, 11 de agosto, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

- Paz, J. A. (2012b). *La inestabilidad de laderas y la construcción social del riesgo; tres casos en el sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Tesis de Maestría en Desarrollo Sustentable, UNICACH, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Paz, J. A., González, R. y Aguilar, A. (2011). *Caracterización de las Laderas Habitadas en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*, Revista Pakbal de la Facultad de Ingeniería de la UNACH, 10-22, 1-9 pp., abril, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Pérez-Rocha, L. E., Avilés, J. y Ordaz, M. (2007). *Regionalización sísmica de la República Mexicana*, V Simposio Nacional de Ingeniería Estructural de la Vivienda, Querétaro, México.
- Peligro Sísmico en México (PSM). (2004). *Mapas de peligro sísmico en México*. Programa elaborado por el Instituto de Ingeniería, UNAM; CENAPRED, CFE y el Instituto de Investigaciones Eléctricas, México.
- Piña, J. (2012). *Distribución espacial de periodos dominantes en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de licenciatura, 107 pp. México.
- Poland, C. (2012). *Creating disaster resilient cities*. In Sustainable cities: Building cities for the future, Publisher: Adam Nethersole. UNEP, ICLEI, World Green Building Council, C40 Cities, UITP, RÍO+20. Green Media Ltd, London, UK. www.sustainablecities2012.com.
- Ponce, L., Gaulon, R., Suarez, G. y Lomas, E. (1992). *Geometry and state of stress of the down going Cocos plate in the Isthmus of Tehuantepec*, Mexico, Geophysical Research Letters, 19-8, pp. 773-776.
- Porter, K., Kiremidjian, A. y LeGrue, J. (2001). *Assembly-Based Vulnerability of Buildings and Its Use in Performance Evaluation*. Earthquake Spectra, 17-2, May, pp. 291-312, USA.
- Prasad, J. S., Singh, Y., Kaynia, A. M. y Lindholm, C. (2009). *Socioeconomic clustering in seismic risk assessment of urban housing stock*. Earthquake Spectra, 25-3, pp. 619-641, August, Earthquake Engineering Research Institute, USA.
- Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M. y Garrido, A. (2008). *Fundamentos para la generación semi-automatizada de Unidades de Paisaje. Fundamentos y Método*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM, pp. 73-79. México.
- Priestley, M. J. (1997). *Displacement based seismic assessment of reinforced concrete buildings*. Journal of Earthquake Engineering, 1-1, pp. 157-192.
- Proaño, R. y Zavala, C. (2003). *Estimación de la respuesta sísmica con base a SIGL para el cálculo de vulnerabilidad sísmica*. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Iquitos, Perú.
- PRODISIS. (2008). *Software Peligro Sísmico*, Instituto de Investigaciones Eléctricas de CFE, Cuernavaca, Morelos, México.
- Protección Civil del Estado de Chiapas (PCECH). (2003). *Atlas de riesgo del estado de Chiapas*, Protección civil y Gobierno del Estado, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Puente, S. (2009). *Construcción social del riesgo*. Simposio “La Gestión Integral del Riesgo y sus Instrumentos de Financiamiento” SEGOB – PNUD, Octubre, México.
- Pujades, L. G. y Barbat, A. H. (2004). *Metodología de estimación de la vulnerabilidad sísmica de las construcciones clasificadas de “importancia especial” en la NCSE-02*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Informe Técnico 438, Noviembre, Barcelona, España.
- Quaas, R., Medina, S., Alcántara, L., Javier, C., Espinosa, M., Mena, E., Otero, J., Contreras, O. y Munguía, L. (1995). *Base mexicana de sismos fuertes*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México.

- Quiroga, C. y Reinoso, E. (2004). *Evaluación de los daños del sismo del 19 de septiembre de 1985 a la luz de nuevos datos y estudios, con ayuda de sistemas de información geográfica*. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero, México.
- Quiroga, C. y Reinoso, E. (2005). *Daño estructural en la ciudad de México por el sismo del 19 de septiembre de 1985: Correlación con la intensidad sísmica y la utilización de sistemas de información geográfica*. XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, México.
- Ramírez de Alba, H., De León, D. y Valdez, M. E. A. (2011). *Estudio del Comportamiento Estructural de Losas Macizas de Concreto Reforzado para Vivienda*. Concreto y Cemento, Investigación y Desarrollo, Revista del IMCYC, 3(1), Jul-Dic. Consultado en línea en: <http://www.imcyc.com/ccid/pdf/JUL-DIC-ART-1.pdf>.
- Ramírez de Alba, H., Pichardo, B. y Arzate, S. P. (2007). *Estimación de la vulnerabilidad sísmica de viviendas en zonas urbanas*. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 11-1, pp.13-23.
- Rebollar, C., Quintanar, L., Yamamoto, J. y Uribe, A. (1999). *Source process of the Chiapas, Mexico, Intermediate-Depth Earthquake of 21 October 1995*, Bulletin of the Seismological Society of America, 89-2, pp. 348-358, April.
- Reinoso, E., Jaimes, M. A., Ordaz, M. y Niño, M. A. (2010). *Pérdidas en la infraestructura en México ante sismos y huracanes*. Revista digital universitaria, 11-1, 14 pp., UNAM, México.
- Reinoso, E. (2007). *Riesgo sísmico de la ciudad de México*. Informe Academia Mexicana de Ingeniería, México.
- Reglamento de Construcción para Tuxtla Gutiérrez, (RCTGZ). (2004). Periódico oficial. Gobierno del Estado de Chiapas.
- Reglamento de Construcciones y Servicios Urbanos de los Municipios de Tuxtla Gutiérrez, Tapachula, San Cristóbal de las Casas, Comitán, Tonalá, Huixtla, Arriaga y Villaflores (RCTGZ) (1995). Periódico oficial. Gobierno del Estado de Chiapas.
- Richter, C. F. (1958). *Elementary seismology*. Freeman. San Francisco, California, 768 p.
- RISK-UE. (2001). *An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European Towns*. European Commission. CEC Contract Number: EVK4-2000-00513. Consultado en línea en: <http://www.chez.com/riskue>.
- Rodríguez, F. J. (2008). *De Tuxtla a Tuxtla Gutiérrez*. Obra en DVD Historia y Herencia Mexicana de Chiapas, duración 1.00 hora.
- Rodríguez, Q. (2007). *Estructura tridimensional de velocidades para el sureste de México, mediante el análisis de trazado de rayos sísmicos de sismos regionales*. Tesis de Maestría posgrado de Ciencias de la Tierra, Sismología y Física del Interior de la Tierra. Instituto de Geofísica, UNAM, 83 pp. México.
- Rodríguez, J. (2005). *Bases y desarrollo de sistemas de control sísmico para el ferrocarril: Aplicación a la Alta Velocidad Española (AVE)*. Tesis Doctoral. Facultad de C.C. Físicas (U.C.M.) Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I (Geofísica y Meteorología).
- Rodríguez, M., Nava, E., Domínguez, T. y Havskov, J. (1985). *Informe de los sismos ocasionados durante la construcción de la presa Manuel Moreno Torres (Chicoasén)*. Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.
- Romero, M. (2010). *Pompeya. Vida, muerte y resurrección de la ciudad sepultada por el Vesubio*, Madrid, La Esfera de los Libros, 455 pp. ISBN: 978-84-9734-964-2.
- Romero, G. y Maskrey, A. (1993). *Como entender los desastres naturales*. Documento de Estudio No. 1, PREDES, Julio, Lima, Perú.
- Ruíz, A. y Aguilar, J. (2006). *Caracterización geométrica y mecánica de piezas de ladrillo de barro rojo recocido de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

- Safina, M. (2003). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo sísmico*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Salgado, A. (2005). *Daños por sismo esperados en las viviendas tradicionales de ciertos centros históricos del sureste mexicano*. XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, México.
- Sánchez, D. 2007. *Envejecimiento demográfico urbano y sus repercusiones socioespaciales en México*. Retos de la planeación gerontológica. Revista de geografía Norte Grande 38: 45-61, PUCC, Santiago de Chile.
- Sánchez, T. (2005). *Vulnerabilidad y riesgo de la vivienda en México*, Seminario Edificaciones de mampostería, abril, Morelia Michoacán, México.
- Saradán, R., Pujades, L. G., Canas, J. A. y García, F. (2009). *Estimación de la vulnerabilidad sísmica de edificios. Aplicación a zonas urbanas*. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, México.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (2011). *Atlas de Riesgo del Municipio de Tuxtla Gutiérrez*, Secretaría de Desarrollo Social, Municipio de Tuxtla Gutiérrez. Diciembre, 275 pp. y 30 mapas.
- SERGISAI. (1998). *Seismic Risk evaluation through integrated use of Geographical Information Systems and Artificial Intelligence techniques: Final Report of the SERGISAI Project*, European Commission Directorate General XII for Science, Research and Development. Environment and Climate 1994-1998- Climatology and Natural Hazard. Contract number ENV4-CT96-0276, March, 1996 – February. En línea en: <http://ade.irrs.mi.cnr.it/SERGISAI/sergisai.html>.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2005a). *Atlas de peligros del estado de Chiapas*. Secretaría de Seguridad Pública del Estado de Chiapas, 134 pp.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2005b). *Carta geológica-minera Tuxtla Gutiérrez E15-11 Chiapas y Oaxaca*. Servicio Geológico Mexicano, INEGI, SE.
- Servicio Sismológico Nacional (SSN). (2002). *Reporte del sismo de Chiapas del 16 de enero de 2002 (Magnitud 6.7)*, Instituto de Geofísica de la UNAM, México.
- Solomon T. y Murat, S. (2008). *Risk-Based seismic evaluation of reinforced concrete buildings*. Earthquake Spectra, 24-3 pp 795-821, USA.
- Somerville, P. G., Sato, T., Ishii, T., Collings, N. F., Dan, K. y Fujiwara, H. (2002). *Characterizing heterogeneous slip models for large subduction earthquakes for strong ground motion prediction*, XI Simposio de Ingeniería Sísmica de Japón, pp. 163-166, Japón.
- Sozen, M. A. (1997). *Drift-driven design for earthquake resistance of reinforced concrete*. EERC-CURE e Symposium in Honor of Vitelmo V. Bertero, Berkeley, California, USA.
- Suárez, G., García Acosta, V. y Altez, R. (2010). *Un desastre más allá del terremoto*. Letras libres edición México No. 135, marzo. Consultado en línea en: <http://www.letraslibres.com/revista/convivio/un-desastre-mas-alla-del-terremoto?page=0,1>.
- Suárez, G. y Singh, K. (1986). *Tectonic interpretation of the Trans Mexican Volcanic Belt Discussion: Tectonophys*, 127, 155-160.
- Terán, A. y Zúñiga, O. (2007). *Evaluación estructural basada en desplazamientos para edificaciones de mampostería confinada, el desarrollo mexicano*. V Simposio Nacional de Ingeniería Estructural en la Vivienda Querétaro, México.
- Tovar, M. E. (2003). *Tuxtla y su feria de San Marcos*. Serie nuestras raíces, H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez, México.
- Trigos, J. (1988). *Riesgo sísmico, construcciones y reglamentos en México*. Memorias del III Simposio Nacional sobre Ingeniería Sísmica, pp. 323-345, Guadalajara, Jalisco.

- Tupak, O. (2009). *Microzonificación sísmica*. Universidad Internacional de Andalucía. UNÍA Huelva, España.
- Ugurhan, B., Askan, A. y Erberik, M. A. (2011). *A methodology for seismic loss estimation in urban regions based on ground motion simulations*. Bulletin of the Seismological Society of America. 101-2 pp. 710-725, abril.
- UNISDR. (2009). *Terminología sobre reducción de riesgos de desastres*, versión en español, Organización de las Naciones Unidas, Ginebra, Suiza, mayo.
- Valverde, C. y Levi de López, S. (1990). *Renovación Urbana, Respuesta del Estado Mexicano a la Movilización Ciudadana*. La Ciudad de México y los Sismos de 1985. Consultado en línea en: <http://observatoriageograficoamericalatina.org.mx/egal3/Geografiasocioeconomica/Geografiaurbana/14.pdf>.
- Vasudevan, R., Kiremidjian, A. y Howard, C. (1992). *An integrated inventory methodology for seismic damage assessment*. Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, California, USA.
- Velázquez, A. y Rosales, C. (1999). *Escudriñando en los desastres a todas las escalas*. OSSO, ITDG y LA RED. www.lared.org.
- Vidal, F. (2012). *Resultados del análisis de la Red acelerográfica temporal en Tapachula, Chiapas*. Granada, España.
- Villavicencio, J., Esquivel, M. T. y Durán, A. M. (2006). *Conjuntos y Unidades habitacionales*, Red Nacional de Investigación Urbana, UAM-A. 203 pp. México.
- Whitman, R., Anagnos, T., Kircher, C., Lagorio, H., Lawson, R. y Schneider, P. (1997). *Development of a National Earthquake Loss Estimation Methodology*. Earthquake Spectra, 13-4, november, pp. 643-661, USA.
- Wilches-Chaux, G. (2006). *Introducción al concepto de seguridad territorial*, en ¿Qu-ENOS pasa?, sobre gestión de riesgos ligados al fenómeno ENOS (El Niño Oscilación Sur). LA RED (Red de Estudios Sociales sobre Desastres) e IAI (Inter American Institution), Bogotá, Colombia.
- Wilches-Chaux, G. (2005). *La prevención de desastres es parte del derecho a la vida y la gente debe estar dispuesta a reconocerla y a pelearla como tal*. Publicado en línea por la agencia venezolana de noticias, en: www.gobiernoenlinea.gob.ve, http://portal.gobiernoenlinea.ve/noticias/viewNewsUser01.jsp?id_noticia=30474 y http://www.rds.org.hn/docs/listas/ambiente/Documentos/derecho_personas.html.
- Yokoi, T. y Margaryan, S. (2008). *Interpretation of Spatial Autocorrelation Method based on the Theory of Seismic Interferometry*, in The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 12-17, 8 pp.
- Zapata, N. (2008). *Gestión de Riesgos y Cambio Climático. Un enfoque conceptual*. Alianza para la Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Gestión del Riesgo en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile, julio.
- Zobin, V., Ventura, F., Cruz, A. y Arellano, E. (2009). *Microzonificación de riesgo sísmico para las ciudades pequeñas del estado de Colima de acuerdo con el nivel de vulnerabilidad de la vivienda*. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, México.
- Zuccaro, G. (1998). *Seismic vulnerability of Vesuvian villages: structural distributions and a possible scenario*, Reducing Earthquake Risk to Structures and Monuments in the EU, Conference Proceedings.

- Zúñiga, R. Y Wyss, M. (2001). *Most and Least Likely Locations of Large to Great Earthquakes Along the Pacific Coast of Mexico, Estimated from Local Recurrence Times Based on b-values*. Bulletin of the Seismological Society of America.
- Zúñiga, R. y Tapia, R. (1991). *Regionalización tectónica de la República Mexicana para fines de construcción de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad*. Informe del Instituto de Geofísica de la CFE, Cuernavaca, Morelos, México.

Referencias digitales

1. http://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/georisks/natcatservice/great_natural_catastrophes.aspx. Tomado de NatCatSERVICE, MunichRE.
2. <http://www.unisdr.org/2005/wcdr/intergover/official-doc/L-docs/Yokohama-Strategy-Spanish.pdf>. Tomado de página de Naciones Unidas.
3. <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>. Tomado de Catálogo Centroid Moment Tensor (CMT: Harvard).

ANEXOS

Anexo A.1. Sismos ocurridos en el estado de Chiapas con magnitud superior a 6.5

Tabla 46. Sismos ocurridos en el estado de Chiapas con magnitud superior a 6.5 (Figueroa, 1973 ^(a); García y Suarez, 1996 ^(b); Alegría, 2011 ^(c); González *et al.*, 2011b ^(d); SSN ^(e))

Año	Mes	Día	Tiempo	Latitud	Longitud	Prof.	Magnitud	Zona
1816	07	22					7.5 ^(b)	Chiapas-Guatemala
1858	05	02					7.0 ^(b)	Chiapas-Oaxaca
1870	05	11					7.0 ^(a, b)	Chiapas
1897	06	05					7.0 ^(a, b)	Chiapas
1902	04	18					7.0 ^(a, b)	Tapachula
1902	09	23	20:18:00	16.583	-92.583	25	7.7 ^(a, b)	Tuxtla Gutiérrez
1903	01	14	01:47:36	15.000	-93.000	33	7.6 ^(b)	Costa de Chiapas
1908	03	26					7.5 ^(a, b)	Costa de Chiapas
1912	12	09	08:32:24	15.500	-93.000	0	7.0 ^(b)	Costa de Chiapas
1914	03	30	04:41:18	16.767	-92.150	150	7.2 ^(a)	Tabasco-Chiapas
1919	04	17	11:23:30	14.533	-92.317	100	7.0 ^(a)	Tapachula
1921	12	10		15.500	-92.500		7.0 ^(a)	Chiapas
1925	12	10	14:14:42	15.500	-92.500	0	7.0 ^(a)	Costa de Chiapas
1926	03	24	10:57:14	15.633	-92.100	100	6.5 ^(a)	Chiapas
1927	05	09	20:07:44	16.667	-93.517	100	7.0 ^(a)	Tuxtla Gutiérrez
1928	03	22					7.5 ^(a)	Oeste de Chiapas
1928	04	17					7.7 ^(a)	Oeste de Chiapas
1929	03	21	02:39:33	14.000	-92.467	100	6.5 ^(a)	Costa de Chiapas
1931	09	26	19:52:28	15.000	-92.000		6.5 ^(a)	Costa de Chiapas
1934	12	24	14:37:50	16.033	-92.467		6.5 ^(a)	Chiapas
1935	12	14	22:07:18	14.717	-93.083		7.3 ^(a)	Tuxtla Gutiérrez
1937	05	28	15:37:21	16.717	-93.083		6.5 ^(a)	Chiapas
1941	02	11		15.200	-94.400		7.0 ^(a)	Costa de Chiapas
1942	11	20	04:05:47	16.467	-94.433	100	7.2 ^(a)	Chiapas
1943	06	15		14.600	93.000		7.0 ^(a)	Costa de Chiapas
1943	09	23	15:02:46	15.500	92.183	100	6.7 ^(a)	Costa de Chiapas
1944	06	28	07:58:54	15.000	-92.500		7.1 ^(a)	Costa de Tapachula
1945	10	27	11:24:49	14.150	-93.383	100	6.7 ^(a)	Costa de Chiapas
1946	06	26	07:53:49	14.717	-91.300	200	7.2 ^(a)	Costa de Chiapas
1946	07	11	04:46:46	17.235	-94.617	70	7.1 ^(a)	Chiapas, Oaxaca y Veracruz
1948	07	16	07:19:37	14.633	-91.177		6.8 ^(a)	Costa de Chiapas
1949	12	22	09:30:49	15.900	-93.000	100	6.5 ^(a)	Cerca de Tuxtla Gutiérrez
1950	10	23	16:13:24	13.800	-91.783	100	7.0 ^(a)	Costa de Chiapas
1950	10	23	17:47:59	13.800	-91.783	100	6.5 ^(a)	Costa de Chiapas
1952	12	31	20:16:27	15.417	-93.800		6.7 ^(a)	Chiapas
1953	08	24	13:21:14	14.533	-92.317	100	6.5 ^(a)	Costa de Chiapas
1954	02	05	15:18:01	17.333	-92.117	100	6.7 ^(a)	Chiapas
1955	09	25	08:28:32	15.833	-92.833	200	7.0 ^(a)	Cerca de Pijijiapan
1957	07	08	13:30:50	15.217	-92.000	100	6.5 ^(a)	Chiapas
1959	04	28	11:09:44	15.833	-92.833		6.6 ^(a)	Chiapas
1960	07	13	16:23:50	17.433	-94.450	60	6.9 ^(a)	Chiapas

Año	Mes	Día	Tiempo	Latitud	Longitud	Prof.	Magnitud	Zona
1970	04	29	14:01:34	14.463	-92.683	44	7.1 ^(a)	Costa de Chiapas
1976	04	02		15.260	89.190	13	7.5 ^(e)	Costa de Chiapas y Guatemala
1983	12	02		14.030	91.950	35	7.0 ^(e)	Costa de Chiapas y Guatemala
1986	09	10		14.800	92.680	34	7.2 ^(e)	Costa de Chiapas
1993	09	10	19:12:57	14.800	-92.687	34	7.2 ^(e)	Costa de Chiapas
1994	03	14	20:51:26	15.984	-92.432	160	6.8 ^(e)	Chiapas
1995	10	20	02:38:58	16.794	-93.648	165	6.5 ^(d)	Chiapas
2001	11	28					6.5 ^(e)	Costa de Chiapas
2002	01	16	17:09:56	15.430	-93.550	76	6.7 ^(e)	Costa de Chiapas
2007	06	13	14:29:48	13.260	-91.430	20	6.6 ^(e)	Ciudad Hidalgo
2008	04	14	22:03:06	13.270	-91.040	40	6.5 ^(e)	Ciudad Hidalgo
2008	10	16	14:41:22	13.870	-92.500	23	6.6 ^(e)	Ciudad Hidalgo
2011	04	07	08:11:22	17.200	-94.340	167	6.7 ^(e)	83 km al suroeste de Las Choapas
2012	11	07	10:35:51	14.080	-92.320	16	7.3 ^(e)	68 km al suroeste de Ciudad Hidalgo

- El tiempo empleado corresponde a GMT (Greenwich Mean Time). Tiempo universal, 6 horas más respecto al tiempo local de México (5 horas en horario de verano).
- Las magnitudes son diferentes y dependen de la metodología, del equipo o red que la reporta.

En la Tabla 46 se muestran los sismos con magnitud superior a 6.5, cuyo epicentro se localizó en el estado de Chiapas o sus costas durante el siglo XX y el inicio del siglo XXI, según las bases de datos del SSN (Servicio Sismológico Nacional) y complementada con información de artículos y reportes de sismos de diversas fuentes que se encuentran en las referencias de Figueroa (1973). Los datos de sismos históricos son referencias cuyos parámetros son aproximados y, en muchas ocasiones, están limitadas por el estado del conocimiento en el momento en que fueron publicados.

El catálogo de sismos que aquí se presenta no es uniforme en el sentido de que las magnitudes reportadas son una mezcla de varias medidas de magnitud. Se incluyen magnitudes obtenidas de las ondas de cuerpo a un segundo de período (m_b), magnitudes de ondas de cuerpo medidas a períodos mayores de un segundo (m_B), magnitudes medidas con las ondas superficiales (M_s), magnitud de momento sísmico (M_w) y magnitudes de energía (M_E).

Aun así, en el catálogo se reporta la magnitud existente que mejor representa el tamaño del temblor. Aunque este catálogo no está completo, ni es uniforme a magnitud 6.5, no hay otro catálogo de temblores que mejor describa el peligro sísmico en Chiapas. Otra aclaración es que la mayoría de los sismos aquí mostrados fueron registrados por instrumentos mecánicos y localizados de forma aproximada, por lo que muchas de las localizaciones hipocentrales que aquí se presentan no son exactas.

Anexo A.2. Sismos históricos ocurridos en el estado de Chiapas, reportados por distintas fuentes con intensidad igual o mayor que VI

A continuación se presenta en la Tabla 47 una relación de los sismos históricos más importantes del estado de Chiapas, los resultados de los mismos han sido obtenidos de diversas fuentes, también se incluyen diversas épocas y por lo tanto se encuentran involucrados diversos criterios, como el relativo a la época prehistórica y colonial, donde los sismos eran considerados como actos que venían de Dios para castigo. Para el año de 1823 comienza una nueva era para la sismología mediante el inicio de la interpretación científica, la cual se consolida pasando el año de 1850 a una sismología cualitativa y a partir de 1900 a una sismología instrumental.

Tabla 47. Sismos históricos ocurridos en el estado de Chiapas, intensidad igual o mayor que VI (Figueroa, 1973 ^(a); García y Suarez, 1996 ^(b); Alegría, 2011 ^(c); González *et al.*, 2011b ^(d); SSN ^(e))

Año	Mes	Día	Magnitud	Intensidad	Zonas afectadas
1545	12	25		VI ^(b)	Pérdidas moderadas y zozobra, coincide con el ingreso de Fray Bartolomé a Ciudad Real (San Cristóbal)
1565	8			VIII ^(b)	Daños importantes en San Cristóbal de Las Casas, Zinacantán y Chiapa de Corzo, donde se daña la fuente. En Zinacantán una peste a partir de los muertos del sismo provocó la pérdida de la mitad de los pobladores.
1591	3	14		VIII ^(b)	Importantes daños en Chiapas y hasta San Miguel, El Salvador. En San Cristóbal de las Casas se cayó la torre de la iglesia y se dañaron construcciones
1607				VIII ^(b)	Importante sismo en Chiapas
1623	4	4		VII ^(b)	Fuerte sismo desde Puebla hasta Chiapas
1652				VIII ^(b)	Colapso de campanario de Catedral de San Cristóbal, graves daños de Tabasco a Guatemala
1662	5	2		VI ^(b)	Daño en Chiapa de Corzo
1679				VI ^(b)	Importante sismo en Chiapas
1681				VI ^(b)	Importante sismo en Chiapas
1683				VI ^(b)	Importante sismo en Chiapas
1684				VI ^(b)	Importante sismo en Chiapas
1689				VI ^(b)	Importante sismo en Chiapas
1714				VI ^(b)	Importante sismo en Chiapas
1726				VI ^(b)	Importante sismo en Chiapas
1729				VIII ^(a, b)	Abarcó el estado de Chiapas y se extendió a Guatemala
1743				VI ^(b)	Importante sismo en Chiapas
1744	5	30		VII ^(b)	Terremoto daña iglesias y convento de San Cristóbal de las Casas
1765				VI ^(b)	Importante sismo en Chiapas
1785				VI ^(b)	Importante sismo en Chiapas
1791				VI ^(b)	Importante sismo en Chiapas
1798				VI ^(b)	Importante sismo en Chiapas
1804				VII ^(b)	Daños en la Catedral de San Cristóbal de las Casas entre otras estructuras
1816	7	22		VIII ^(b)	Abarcó todo el estado de Chiapas y Guatemala. En San Cristóbal dañó la Catedral
1828	3	5		VI ^(b)	San Andrés, María Magdalena, Santa Martha, dañó la iglesia
1855	1	12		VI ^(b)	Chiapas y Guatemala, actividad del volcán Santa María

Año	Mes	Día	Magnitud	Intensidad	Zonas afectadas
1858	5	2		VI ^(a, b)	Fuerte sismo en Chiapas y Oaxaca
1864				VI ^(b)	Fuerte sismo en Chiapas
1869	7			VI ^(b)	Fuerte sismo sentido en Chiapa de Corzo
1870	6	18		VII ^(b)	Daños importantes en Chiapas y menores en Oaxaca
1871	2	6		VI ^(b)	Sismo sentido con más intensidad en Chiapa de Corzo, Cunduacán y San Cristóbal de las Casas.
1872	1			VI ^(b)	Fuerte sismo en Chiapas
1872	8	30		VI ^(b)	Sismo sentido en San Cristóbal de las Casas
1875				VI ^(b)	Fuerte sismo en Chiapas
1875	3	25		VII ^(b)	Terrible sismo fuertemente sentido en San Cristóbal
1875	5	25		VI ^(b)	Sismo sentido en San Cristóbal de las Casas
1878	1	2		VI ^(b)	Tres sismos en un día sentidos en Tuxtla Gutiérrez
1879	9	9		VI ^(b)	Fuerte sismo sentido en Tuxtla Gutiérrez
1880	1	23		VI ^(b)	Fuerte sismo sentido en San Cristóbal
1880	5	2		VI ^(b)	Fuerte sismo sentido en San Cristóbal
1881	5	31		VI ^(b)	Fuerte sismo sentido en San Cristóbal
1881	8	17		VI ^(b)	Fuerte sismo sentido en San Cristóbal
1887	8	1		VII ^(a, b)	Tonalá, Cintalapa, Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal
1892	2	5		VII ^(b)	Temblor destructor San Cristóbal de las Casas
1892	7	12		VI ^(b)	Fuerte sismo en Tapachula
1896	11	15		VI ^(b)	Fuerte sismo sentido en Tuxtla Gutiérrez
1897	5	29		VI ^(b)	Fuerte sismo sentido en Tonalá
1897	7	5		VI ^(a, b)	Fuerte sismo sentido en Chiapas
1899	3	25		VII ^(b)	Fuerte sismo en Tuxtla dañó el palacio de gobierno, en Zinacantán hundió parcialmente la iglesia principal y daños importantes en Huixtán
1902	4	18	7.0	VII ^(a, b)	Daños en Tapachula. Destructor en Guatemala
1902	9	23	7.8	X ^(a, b)	El sismo más importante originado en Chiapas. Destructor de Venustiano Carranza y graves daños en San Cristóbal, Chiapa de Corzo y Tuxtla Gutiérrez. Según Isosistas grados VI a X.
1903	5	6		VI ^(a, b)	En la región costera de Chiapas, limítrofe con Oaxaca
1904	12	1		VI ^(b)	Fuerte sismo en Tapachula
1906	6	21		VI ^(b)	Fuerte sismo en Tapachula
1906	8	21		VI ^(b)	Fuerte sismo en Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal
1907	6	23		VI ^(b)	Fuerte sismo en Chiapa de Corzo y Tuxtla Gutiérrez
1907	7	21		VI ^(b)	Fuerte sismo en Tuxtla Gutiérrez
1907	8	18		VI ^(b)	Fuerte sismo Motozintla
1908	3	26		VI ^(a, b)	Fuerte sismo en Tapachula
1908	7	19		VI ^(a, b)	Motozintla y Tapachula
1908	11	6		VI ^(a, b)	Tapachula
1909	2	26		VI ^(a, b)	Fuerte sismo en Chiapas
1909	11	16		VI ^(a, b)	Chicharras Chiapas con fuertes ruidos subterráneos
1909	12	15	5.6	VI ^(a, b)	Cintalapa, Providencia, Tuxtla Gutiérrez y Tonalá
1914	3	30	7.5	IX ^(a)	Daños considerables en Altamirano, Ocosingo y Huixtán. Grado VI en San Cristóbal y Tuxtla Gutiérrez
1919	4	17	7.0	VIII ^(a)	El Soconusco
1920	7	3	6.0	VII ^(a)	Daños en Cintalapa
1920	10	9	6.0	VII ^(a)	En la región costera de Chiapas
1924	6	4	6.0	VII ^(a)	Tonalá y Arriaga
1925	3	25	4.0	VI ^(a)	Ciudad Hidalgo
1925	11	28	5.5	VI ^(a)	Gran alarma en Altamirano y Ocosingo
1925	12	16	6.0	VI ^(a)	La providencia y Cintalapa

Año	Mes	Día	Magnitud	Intensidad	Zonas afectadas
1926	3	24	6.5	VII ^(a)	Comalapa y Chicomuselo
1927	5	9	7.0	VII ^(a)	Muy fuerte en Tuxtla Gutiérrez. También sentido en Jiquipilas, Cintalapa y La Providencia
1931	2	12	6.0	VII ^(a)	Teopisca, Totolapa, Venustiano Carranza. Muy fuerte en San Cristóbal de las Casas
1931	2	15	5.5	VI ^(a)	Jiquipilas, Cintalapa y Ocozocuahtla
1931	9	26	6.5	VI ^(a)	Talismán, Tuxtla Chico, Tapachula y Huixtla
1933	8	12	6.0	VI ^(a)	La Concordia, Trinitaria, Jaltenango y Socoltenango
1934	5	19	6.2	VI ^(a)	Trinitaria, Socoltenango, La Concordia y Venustiano Carranza
1934	7	27	6.2	VII ^(a)	Motozintla, Niquivil, Mazapa de Madero
1934	12	24	6.5	VI ^(a)	Chicomuselo y Trinitaria
1935	12	14	7.3	VIII ^(a)	Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo y San Cristóbal. Muy fuerte en Chicoasén
1936	9	3	6.0	VI ^(a)	Rivera de Cangui y Chiapilla
1937	1	11	6.0	VI ^(a)	Chicoasén, Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo, San Cristóbal de las Casas y otras poblaciones
1937	5	28	6.5	VII ^(a)	Tuxtla Gutiérrez y en municipios cercanos
1937	6	8	6.2	VI ^(a)	Tapalapa, Pichucalco y Ocoatepec
1939	9	28	6.2	VI ^(a)	Ciudad Hidalgo, Puerto Madero y Tapachula
1939	12	5	6.2	VI ^(a)	Escuintla, Acapetahua y Pueblo nuevo
1941	6	27	6.2	VI ^(a)	Tonalá y lugares próximos
1942	11	20	6.7	VI ^(a)	Chiapas en la región sur limítrofe con Oaxaca
1943	9	23	6.7	VII ^(a)	Amatenango de la Frontera, Mazapa y Motozintla
1944	8	24	6.0	VI ^(a)	Arriaga y Tonalá
1945	1	12	5.7	VI ^(a)	Arriaga, Tonalá, Villaflores y Villacorzo
1945	10	27	6.7	VI ^(a)	El Soconusco
1947	5	26	6.0	VI ^(a)	Ángel Albino Corzo y Jaltenango
1947	5	26	5.8	VI ^(a)	Ángel Albino Corzo y Jaltenango
1949	12	22	6.5	VI ^(a)	Villaflores, Rivera de Cangui, Tuxtla Gutiérrez, Villacorzo, Chiapa de Corzo y San Cristóbal
1950	10	28	6.0	VI ^(a)	Motozintla y Mazapa
1950	10	31	5.8	VI ^(a)	Puerto Madero y Ciudad Hidalgo
1950	11	5	6.0	VI ^(a)	Ciudad Hidalgo y Puerto Madero
1951	1	29	5.8	VI ^(a)	Motozintla
1951	2	13	6.0	VI ^(a)	Motozintla y Mazapa de Madero
1952	2	4	5.7	VI ^(a)	Escuintla, Pueblo Nuevo y Acapetahua
1952	6	2	5.0	VI ^(a)	Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo, San Cristóbal de las Casas y Suchiapa
1952	8	20	5.7	VI ^(a)	Trinitaria y las Margaritas
1953	8	24	6.5	VII ^(a)	Ciudad Hidalgo y Puerto Madero
1954	2	5	6.7	VI ^(a)	Graves daños en Tila, Yajalón, Petalcingo y Chilón. Tuvo 13 repeticiones
1954	4	1	6.0	VI ^(a)	Tapalapa, Ixtacomitán y Pichucalco
1955	1	10	6.0	VI ^(a)	Motozintla
1955	5	5	5.7	VI ^(a)	Motozintla y Mazapa de Madero
1955	9	26	7.0	VII ^(a)	Jaltenango, Pijijiapan y Ángel Albino Corzo
1956	1	9	5.8	VI ^(a)	Altamirano
1956	1	10	5.6	VI ^(a)	Cintalapa y la Providencia
1956	12	4	6.0	VI ^(a)	San Cristóbal de las Casas, Motozintla y Mazapa de Madero
1957	6	22	6.4	VI ^(a)	Arriaga, Tonalá y Villaflores
1958	9	2	6.0	VI ^(a)	Puerto Madero y Ciudad Hidalgo

Año	Mes	Día	Magnitud	Intensidad	Zonas afectadas
1958	9	3	6.2	VI ^(a)	Puerto Madero, Ciudad Hidalgo y Mazatán
1959	2	20	6.4	VI ^(a)	Independencia y Tenosique
1959	4	28	6.6	VI ^(a)	Ángel Albino Corzo, Jaltenango y La Concordia
1959	4	29	5.8	VI ^(a)	Ciudad Hidalgo y Puerto Madero
1959	5	12	5.8	VI ^(a)	Ciudad Hidalgo y Puerto Madero
1960	1	15	5.6	VI ^(a)	Ciudad Hidalgo
1960	4	13	5.6	VI ^(a)	Motozintla y Mazapa de Madero
1960	6	5	5.8	VI ^(a)	Ciudad Hidalgo y Puerto Madero
1961	11	22	5.8	VI ^(a)	Motozintla
1961	12	20	5.9	VI ^(a)	Ciudad Hidalgo y Puerto Madero
1964	9	14	6.1	VI ^(a)	Ángel Albino Corzo y Jaltenango
1965	3	1	6.4	VI ^(a)	Rivera de Cangui, Villaflores y Villa Corzo
1968	1	21	6.2	VI ^(a)	Mapastepec, Pijijiapan y Sesecapa
1968	5	9	5.5	VI ^(a)	Providencia
1968	9	25	6.0	VIII ^(a)	Soconusco (48 muertos, daños en Acapetahua por 7 500 000, interrupción en comunicaciones), 333 casas destruidas y 608 dañadas
1968	11	11	5.5	VI ^(a)	Puerto Madero y Ciudad Hidalgo
1969	9	16	5.0	VI ^(a)	Pijijiapan y Mapastepec
1970	4	29	7.3	VII ^(a)	Suchiapa, Mazapa de Madero, Motozintla, Tapachula, Huixtla y Ciudad Hidalgo (Siete repeticiones el mismo día y 32 en total)
1970	5	23	4.9	VI ^(a)	Tapachula
1970	6	11	4.9	VI ^(a)	Mapastepec y Sesecapa
1970	12	23	5.3	VI ^(a)	Puerto Arista
1975	6	30		VII ^(c)	El Amatal, Chiapa de Corzo, Chicoasén, Comitán y Tehuantepec
1975	10	15		VI ^(c)	El Amatal, Chiapa de Corzo y Cupía
1995	10	21	7.2	VII ^(d)	Villaflores, Villacorzo y Tuxtla Gutiérrez
2002	01	16	6.7	VII ^(e)	Arriaga, San Cristóbal de las Casas, Tapachula y Tuxtla Gutiérrez
2011	04	07	6.7	VI ^(e)	Tuxtla Gutiérrez
2012	11	07	7.3	VI ^(e)	Zonas de frontera del Soconusco con Guatemala

Anexo A.3. Encuesta aplicada para obtener datos de campo de vulnerabilidad

Tabla 48. Encuesta aplicada en Tuxtla Gutiérrez Chiapas.

DIRECTOR DE PROYECTO:	
ELABORÓ:	
FECHA DE ELABORACION:	
CRITERIOS PROPUESTOS DE EVALUACION	
REPORTE FOTOGRAFICO	CROQUIS
DATOS GENERALES DE LA VIVIENDA	
DIRECCIÓN	
NÚMERO DE HABITANTES	
TIPO DE MUEBLES	
TIPO ACABADOS	
ZONA Y COORDENADAS GPS	
DESCRIPCION GENERAL DE LA VIVIENDA	
POSICIÓN EN LA MANZANA	
COLINDANCIAS	JUNTA IZQ. (CM)
	JUNTA DER. (CM)
	ALTURA DE CONST. IZQ. (M)
	ALTURA DE CONST. DER. (M)
EDAD APROXIMADA DE LA CONSTRUCCIÓN (AÑOS)	
NÚMERO DE NIVELES SOBRE EL TERRENO	
ALTURA DE ENTREPIOS (M)	
TIPO DE TERRENO	
USO PRINCIPAL	
CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES MUROS	
ESPESOR DE MUROS (CM)	
TIENE REPELLO	
TIENE COLUMNAS O CASTILLOS AISLADOS	
MATERIAL MUROS	
TIPO DE ESTRUCTURA	
CALIDAD DEL REFUERZO	
CARACTERISTICAS DE LA CIMENTACION	
INCLINACIÓN DEL DESPLANTE DE LA CONSTRUCCIÓN	
TIPO DE CIMENTACIÓN	
TIENE SÓTANO (ALTURA)	
TIENE PLATAFORMA Y MUROS PARA PLATAFORMAS (ALTURA)	
SISTEMA PISO - TECHO	
ESPESOR DE LOSA DE TECHO	
DESCRIPCIÓN PISO	
DESCRIPCIÓN TECHO	
INCLINACIÓN CUBIERTA	
GEOMETRIA DE LA EDIFICACION	
DIMENSIONES POR PLANTA	LARGO (M)
	ANCHO (M)
	ALTO (M)
ÁREA APROXIMADA DE CONSTRUCCIÓN POR PLANTA (M ²)	
CANTIDAD DE MUROS	
REGULARIDAD EN PLANTA	
REGULARIDAD EN ELEVACIÓN	
ANTECEDENTES HISTORICOS DE LA EDIFICACION	
DANOS PREVIOS POR SISMO, VIENTO, DESLAVE O INUNDACION	
REPARACIONES ANTERIORES	
REMODELACIONES	
MANTENIMIENTO	

Tabla 49. Elementos complementarios de la encuesta aplicada en Tuxtla Gutiérrez Chiapas.

TIPO DE ESTRUCTURA		ZONA
TIPO A	LADRILLO - TEJA	ZONA 1 SUR - ORIENTE
TIPO B	LADRILLO - LÁMINA	ZONA 2 SUR - PONIENTE
TIPO C	LADRILLO - LOSA MACIZA	ZONA 3 NORTE - ORIENTE
TIPO D	BLOCK - LOSA MACIZA	ZONA 4 NORTE - PONIENTE
TIPO E	LADRILLO - MADERA	
TIPO F	LADRILLO - ASBESTO	
TIPO G	MADERA - TEJA	
TIPO H	ADOBE Y TEJA	
TIPO I	ADOBE Y LÁMINA	
TIPO J	BAJAREQUE Y LÁMINA	
TIPO K	BAJAREQUE Y TEJA	
TIPO L	CONCRETO	
TIPO M	ACERO	

TIPO DE ACABADOS	LUJO, INTERMEDIO, BAJO
TIPO DE MUEBLES	LUJO, INTERMEDIO, BAJO
POSICIÓN EN LA MANZANA	ESQUINA, INTERMEDIO O LIBRE
TIPO DE TERRENO	BALNDO (A), MEDIO (B), SÓLIDO ©
USO PRINCIPAL	HABITACIONAL, COMERCIAL, INDUSTRIAL, EDUCACIONAL, OTRO
INCLINACIÓN DEL DESPLANTE	PLANO, INCLINADO ¿CUÁNTO EN GRADOS?
CALIDAD DEL REFUERZO	NULA, MÍNIMO, ADECUADO
MATERIAL MURO	MADERA, LÁMINA, ADOBE, TABIQUE, BLOCK, PIEDRA, CONCRETO, OTRO
TIPO DE CIMENTACIÓN	PIEDRA, ZAPATAS CORRIDAS, ZAPATAS LIGADAS, LOSA DE CIMENTACIÓN
DESCRPCIÓN DE PISO	CONCRETO, TIERRA, PISO CERÁMICO
DESCRIPCIÓN DE TECHO	LOSA MACIZA, LOSA ALIGERADA, MADERA, TEJA, LÁMINA, OTRO
INCLINACIÓN DE CUBIERTA	PLANO, UN AGUA, DOS AGUAS, MUCHAS AGUAS
CANTIDAD DE MUROS	ALTA, SOLO EN EL PERÍMETRO, POCA
REGULARIDAD EN PLANTA	ALTA, MEDIA, BAJA
REGULARIDAD EN ELEVACIÓN	ALTA, MEDIA, BAJA
MANTENIMIENTO	BUENO, MALO, REGULAR

Anexo A.4. Algoritmo de software SORIS

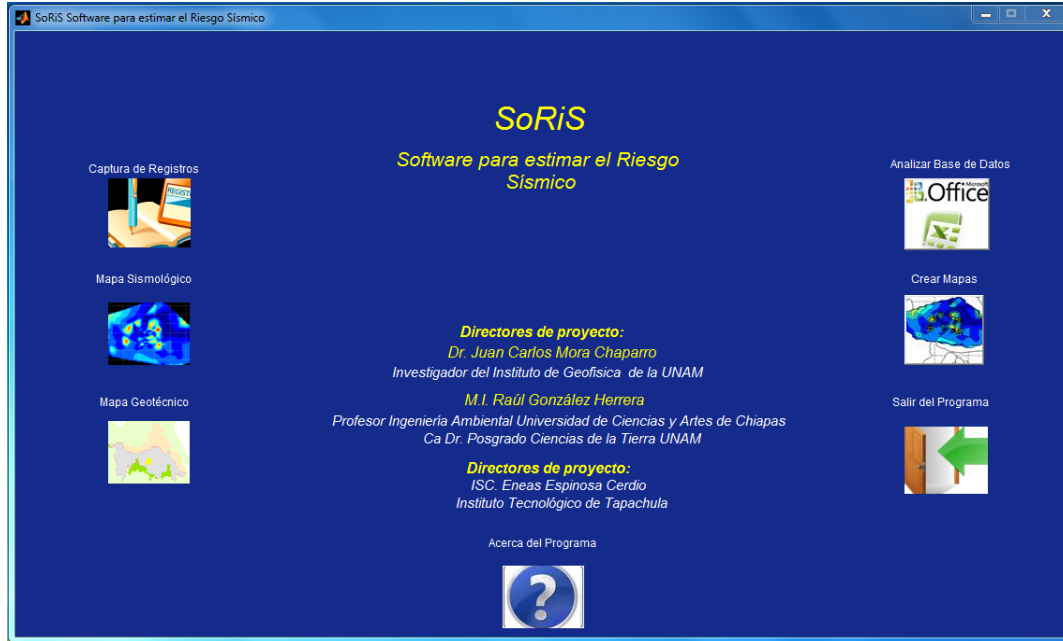


Figura 159. Portada del software SORIS, contemplando los créditos.

Algoritmo en MATLAB del programa SORIS

Importa Base de Datos del Software BDEVS

```
[Nombre,Dir]=uigetfile('*.xls','Ingresar Base de Datos');  
if isequal(Nombre,0);    msgbox('Cancelando','Archivo','help');           end  
Reg=strcat(Dir,Nombre);    Dato=importdata(Reg);  
LD=size(Dato.textdata,1);    y=Dato.data;           y1=Dato.textdata(2:LD,:);
```

Variables

```
al=3/4;    g=9.81;    sec=1;    U=1.0;    m=1;    z=iso/100;    k=clock;  
clo_ano=k(1)    calendario=calendar;    dia=k(3);    Dias=find(calendario==dia);    hora=k(4);
```

Inicia ejecución del programa

```
tam_tot=length(y);    % Indica el número total de registros  
for indec=1:tam_tot;    % indec es el indice
```

ID de la tabla de la base de datos

```
Id=y(indec,1)
```

Nombre del director del proyecto

```
Diretor=y1(indec,3)
```

Nombre quien realizó

```
Capturo=y1(indec,4)
```

Fecha

```
Fecha=y1(indec,5)
```

El número del formato que se le asigna a la encuesta

```
Format=y(indec,2)
```

Ciudad

Ciudad=y1(indec,6)

Datos GPS

gps_N1=y(indec,13); % Coordenadas en X

gps_N2=y(indec,14); % Coordenadas en Y

Tipo de estructura

tipo_const=char(y1(indec,7));

```
if strcmp(tipo_const,'Losa aligerada') || strcmp(tipo_const,'Mampostería sin refuerzo'); %1 Ge=1;
elseif strcmp(tipo_const,'Block – Losa maciza') || strcmp(tipo_const,'Block – Losa maciza') ||
strcmp(tipo_const,'Ladrillo - Losa maciza'); Ge=2;
elseif strcmp(tipo_const,'Ladrillo – Losa maciza') || strcmp(tipo_const,'Ladrillo') ||
strcmp(tipo_const,'Mampostería armada o confinada con diafragmas rígidos. '); %2 Ge=2;
elseif strcmp(tipo_const,'Block – Lámina de acero') || strcmp(tipo_const,'Ladrillo - Teja') ||
strcmp(tipo_const,'Concreto - Teja'); Ge=3;
elseif strcmp(tipo_const,'Mampostería armada o confinada con diafragma flexible') ||
strcmp(tipo_const,'Ladrillo – Lámina de acero'); Ge=3;
elseif strcmp(tipo_const,'Ladrillo – Lámina de acero') || strcmp(tipo_const,'Ladrillo - Teja') ||
strcmp(tipo_const,'Ladrillo – Lámina de asbesto'); Ge=3;
elseif strcmp(tipo_const,'Block – Lámina de asbesto') || strcmp(tipo_const,'Block - Teja') ||
strcmp(tipo_const,'Diversa'); Ge=3;
elseif strcmp(tipo_const,'Piedra – Lámina de acero') || strcmp(tipo_const,'Concreto – Lámina de asbesto');
Ge=3; elseif strcmp(tipo_const,'Construcción informal'); %4 Ge=4;
elseif strcmp(tipo_const,'Bajareque – Losa maciza') || strcmp(tipo_const,'Bajareque - Teja') ||
strcmp(tipo_const,'Adobe - Teja'); Ge=5;
elseif strcmp(tipo_const,'Adobe – Losa maciza') || strcmp(tipo_const,'Adobe o Bajareque'); Ge=5;
elseif strcmp(tipo_const,'Bajareque – Losa maciza') || strcmp(tipo_const,'Bajareque – Lámina de acero') ||
strcmp(tipo_const,'Adobe – Lámina de acero'); Ge=5;
elseif strcmp(tipo_const,'Bajareque – Lámina de asbesto') || strcmp(tipo_const,'Adobe – Lámina de
asbesto'); Ge=5; elseif strcmp(tipo_const,'Marcos de concreto sin rigidizar'); %6 Ge=6;
elseif strcmp(tipo_const,'Estructura de concreto armado con muros de concreto'); %7 Ge=7;
elseif strcmp(tipo_const,'Marcos de concreto rigidizados con muros de mampostería'); %8 Ge=8;
elseif strcmp(tipo_const,'Concreto - Losa maciza') || strcmp(tipo_const,'Panel de poliestireno - Losa
maciza') || strcmp(tipo_const,'Concreto – Losa maciza'); Ge=9;
elseif strcmp(tipo_const,'Concreto – Lámina de acero') || strcmp(tipo_const,'Concreto celular'); %9 Ge=9;
elseif strcmp(tipo_const,'Marcos de acero resistentes a momento'); %10 Ge=10;
elseif strcmp(tipo_const,'Marcos de acero arriostrados con diagonales'); %11 Ge=11;
elseif strcmp(tipo_const,'Estructura de perfiles livianos'); %12 Ge=12;
elseif strcmp(tipo_const,'Madera – Lámina de acero') || strcmp(tipo_const,'Madera - Teja') ||
strcmp(tipo_const,'Madera – Losa maciza'); Ge=13;
elseif strcmp(tipo_const,'Estructura de madera'); %13 Ge=13;
else error('El Grupo estructural no coincide','Error','modal') return end
```

Cálculo del número de pisos (Niveles)

npiso=y(indec,8);

Cálculo del año de la construcción

```
An=y(indec,9) ano_anum=num2str(An) ano_double=double(ano_anum)
can_ano=length(ano_double) if An > clo_ano error('El año es mayor que el año
actual','Error','modal') return
elseif can_ano > 3 An_cons=An else An_cons=clo_ano-An end
```

Función cálculo del factor de suelo

punt_x=y(indec,13); punt_y=y(indec,14);

S=factor_suelo(punt_x,punt_y); % Mandamos a llamar la funcion factor de suelo

Función mapa de isoperiodo

Tp=factor_iso_periodo(punt_x,punt_y); % Mandamos a llamar el factor isoperiodo

Cálculo para conocer el número de pisos

```
n=npiso; l=luz; switch Ge
case{1,2,3,4,9,13} h=3*n; case{5,6,7,8,10,11} h=4*n;
case{12} h=5*n; end altura=num2str(h); switch Ge
case{1,2,3,4,8} T=0.07*n*sec*(1+al*(z/g)); case{7,9} T=0.08*n*sec*(1+al*(z/g));
case{5} T=0.09*n*sec*(1+al*(z/g)); case{6,10,11,12,13} T=0.1*n*sec*(1+al*(z/g));
else T=0.009*1*(1/m)+0.3263; end end
```

Cálculo del desplazamiento espectral

```
if (2.5*(Tp/T))<=2.5 C=2.5*(Tp/T); else C=2.5; end
s=((z*U*S*C)*.075)/(((2*3.1416)/T)^2); sd=s*10;
```

Cálculo Beta 1

```
switch Ge case{1,2,3,4,5,9,13} if n<=5 beta1=(-.005*(n^4)+0.070*(n^3)-0.400*(n^2)+1.055*n+0.330);
else beta1=1.500; end
case{6,10,12} if n<=6 beta1=(-.0001*(n^4)+0.004*(n^3)-0.047*(n^2)+0.259*n+0.805);
else beta1=1.300; end
case{7,8,11} if n<=6 beta1=(-.0001*(n^4)+0.004*(n^3)-0.054*(n^2)+0.295*n+.778);
else beta1=1.350; end end
```

Cálculo Beta 2

```
switch Ge case{1,2,3,4,5,9,13} if n<=5 beta2=(-0.004*(n^4)+0.053*(n^3)-0.275*(n^2)+0.665*n+0.560);
else beta2=1.250; end
case{6,10,12} if n<=6 beta2=(-0.001*(n^4)+0.002*(n^3)-0.029*(n^2)+0.222*n+0.772);
else beta2=1.400; end
case{7,8,11} if n<=6 beta2=(-0.001*(n^4)+0.002*(n^3)-0.031*(n^2)+0.215*n+0.785);
else beta2=1.300; end end
```

Cálculo de ductilidad

Zdiseno=z; % Zdiseno: aceleración espectral de diseño

Factor de reducción para el diseño (R)

```
switch Ge case{1,2,3,4} R=1.5;
case{5} R=1; case{6} R=4;
case{7,9,11,12} R=3; case{8} R=2;
case{10} R=4; case{13} R=3; end
```

Factor de sobre resistencia de diseño

```
switch Ge case{1,2,3} fs=2.5;
case{5} fs=1.5; case{4,7,8} fs=2.5;
case{6,10,12} fs=3; case{13} fs=2;
case{9,11} fs=2.5; end fsa=fs; mi=(Zdiseno/R)*fsa; Ru=z/((Zdiseno/R)*fsa);
```

Demanda de ductilidad

```
%to:=1 (to=0.1 seg, Suelo firme)..to=1; %periodo de suelo firme if Ru>1
if T<=1 mm=1+((Ru-1)*to/T); else mm=Ru; end
if (Ru<=1) mm=1; end end
```

Cálculo Beta 3

```
e=2.718; b3=T*(mm)^-0.4; b33=-3.700*b3;
beta3=(1+((1/mm)-1)*(e^b33))^*-1; %cambie ms por 6.300
```

Cálculo Beta 4

```
if mm>1      beta4=(1+(mm/6)+(n/50)); % aqui se cambio a manula el mil   else      beta4=1;   end
```

Cálculo de desplazamientos y distorsiones máximas

```
Ae=beta1*sd;      % Desplazamiento elástico último piso
Ai=beta1*sd*beta3; % Desplazamiento inelástico último piso
we=((beta1*sd)/h)*beta2; % Distorsión elástica máxima
wmax=((beta1*sd*beta3)/h)*((beta2*beta4)); % Distorsión inelástica máxima
```

Cálculo Beta 5: Irregularidades

```
% Mantenimiento      mantt1=char(y1(indec,29)); % mant=mantt1;   De=0;
if De==1      mentenimiento=1.1;  elseif strcmp(mantt1,'Adecuado')
              mentenimiento=1.0;  elseif strcmp(mantt1,'Incompleto')
              mentenimiento=1.05; elseif strcmp(mantt1,'Nulo')
              mentenimiento=1.1;  else      mentenimiento=1;      end
Reg_ver=char(y1(indec,24));  Irreg_vert=Reg_ver;   Iv=0;
if Iv==1      Irreg_vertial=1.2;  elseif strcmp(Irreg_vert,'Buena')
              Irreg_vertial=1.0;  elseif strcmp(Irreg_vert,'Intermedia')
              Irreg_vertial=1.1;  elseif strcmp(Irreg_vert,'Baja')
              Irreg_vertial=1.2;  else      Irreg_vertial=1;      end
Dens_muro=char(y1(indec,27)); % Densidad de muros
Col_aislad=char(y1(indec,31)); % Columna a aislada
%union de Densidad de muros y columna ahislada      % Celda de piso blando
A=Col_aislad;   A1=Dens_muro;      Pb=1;      if(Pb==1)&(T<=0.25)
Piso_blando=1.5; elseif(Pb==1)&(T>0.25)
Piso_blando=1.3; elseif(strcmp(A,'SI'))&&(strcmp(A1,'Baja'))
Piso_blando=1.4; elseif(strcmp(A,'SI'))||(strcmp(A1,'Baja'))
Piso_blando=1.2;      else      Piso_blando=1;      end
Reg_planta=char(y1(indec,23));  Reg_vert=char(y1(indec,24));
A2=Reg_planta;      A3=Reg_vert;      Tor=0;  if Tor==1      Torsion=1.5;
elseif (strcmp(A,'SI'))&&(strcmp(A2,'Baja'))&&(strcmp(A3,'Baja'))
Torsion=1.4;  elseif (strcmp(A,'SI'))&&(strcmp(A2,'Baja'))||(strcmp(A3,'Baja'))
Torsion=1.3;  elseif (strcmp(A,'SI'))||(strcmp(A2,'Baja'))||(strcmp(A3,'Baja'))
Torsion=1.2;      else      Torsion=1;      end
Ip=0;  if Ip=1      IrP=1+((8.154-7.0779)*1/100);  else      IrP=1;      end
Junta_der=y(indec,26);  Junta_izq=y(indec,25);
i=2;  Golp=n*i;  if Golp >= Junta_der || Golp >= Junta_izq      Golpeteo=1.2;
else      Golpeteo=1;      end
Uso_const=char(y1(indec,30));  if (strcmp(Uso_const,'Plaza
comercial'))||(strcmp(Uso_const,'Industrial'))||(strcmp(Uso_const,'Bodega'))  Uso_comercial=1.15; elseif
(strcmp(Uso_const,'Salud'))||(strcmp(Uso_const,'Clínica'))||(strcmp(Uso_const,'Hospital'))||(strcmp(Uso_co
nst,'Consultorio'))  Uso_comercial=1.05;
elseif (strcmp(Uso_const,'Lavado de autos'))||(strcmp(Uso_const,'Terminal de
autobuses'))||(strcmp(Uso_const,'Salón de fiestas'))  Uso_comercial=1.15; elseif
(strcmp(Uso_const,'Religioso'))||(strcmp(Uso_const,'Educativa'))||(strcmp(Uso_const,'Escuela'))
Uso_comercial=1.05; elseif
(strcmp(Uso_const,'Oficina'))||(strcmp(Uso_const,'Habitacional'))||(strcmp(Uso_const,'Casa habitación'))
Uso_comercial=1.1;  elseif
(strcmp(Uso_const,'Banco'))||(strcmp(Uso_const,'Gobierno'))||(strcmp(Uso_const,'Oficina'))
Uso_comercial=1.1;  elseif
(strcmp(Uso_const,'Abandonado'))||(strcmp(Uso_const,'Panteón'))||(strcmp(Uso_const,'Parque'))
Uso_comercial=1;  elseif
(strcmp(Uso_const,'Comercial'))||(strcmp(Uso_const,'Hotel'))||(strcmp(Uso_const,'Negocio'))
Uso_comercial=1.05;  elseif (strcmp(Uso_const,'Habitacional-Comercial'))  Uso_comercial=1.2;
else  error('No coincide cambio de uso','Error','modal')
```

```
return end cc=0; if(cc==1) CC=1.5; else CC=1; end
```

Reglamento de construcción (año de construcción)

```
if An_cons>=2006 if(Ge==1)||(Ge==4)||(Ge==5) PC=0.95; else PC=1.1; end
elseif An_cons>=1997
if(Ge==1)||(Ge==4)||(Ge==5) PC=0.90; elseif (Ge==6)||(Ge==7)||(Ge==8)||(Ge==9)||(Ge==14) PC=1.0;
else PC=1.1; end elseif An_cons<=1997 PC=1; end
```

El factor de corrección por las irregularidades

```
dgg=mentenimiento*Irreg_vertial*Piso_blando*Torsion*IrP*Golpeteo*Uso_comercial*CC*PC;
if(dgg<=2.5) Amp=dgg; else Amp=2.5; end
```

Distorsión máxima final

```
Ymax=Amp*wmax; Yi=[ ]; % Limpiamos los datos.
switch Ge case {1,2,3,4,5,9,13} for i=1:n if n==1 Yi(i)=Ymax;
else Yi(i)=Ymax*(1-((n-i-0.5)/(n-0.5))^2); end end
case {6,10,12} for i=1:n if (n<=2) Yi(i)=Ymax;
else Yi(i)=Ymax*(1-((i-2)/(n-1))^2); end end
case {7,8,11} for i=1:n if (n==1) Yi(i)=Ymax;
else Yi(i)=Ymax*(1-((n-i-0.5)/(n-0.5))^2); end end
end Y=num2str(Yi);
```

Cálculo de los costos de reparación

```
switch Ge case{1} E=1.90;
case{2,3} E=1.60; case{4} E=1.50;
case{5} E=1.50; case{6,7} E=1.80;
case{8} E=1.60; case{9} E=2.00;
case{10,11,12} E=2.00; case{13} E=1.20; end
switch Ge case{1} Yo=0.004;
case{2,3} Yo=0.008; case{4} Yo=0.006;
case{5} Yo=0.003; case{6,7} Yo=0.019;
case{8} Yo=0.013; case{9} Yo=0.015;
case{10,11,12} Yo=0.019; case{13} Yo=0.001; end
EW=[ ]; % Limpiamos los datos for i=1:n EW(i)=1-(e^(log(0.5)*(Yi(i)/Yo)^E)) end
EWW=num2str(EW) Cr=sum(EW)/n; if Cr<=0.70; Costo=Cr; else Costo=1; end
```

Datos de habitantes por casa

```
%[year month day hour minute seconds] % [2012 8 5 10 19 21.43]
if Dias<=6 && horaa>=6 && horaa<14 % si Domingo = matutino %S_D='Domingo matutino'
habitantes=y(indec,20) Prob_humana=1
elseif Dias<=6 && horaa>=14 && horaa<22 % si Domingo == Vespertino
%S_D='Domingo Vespertino' habitantes=y(indec,21) Prob_humana=2
elseif Dias<=6 && horaa>=22 && horaa<=24 || horaa==0 % si Domingo == Nocturno
%S_D='Domingo Nocturno 1' habitantes=y(indec,22) Prob_humana=3
elseif Dias<=6 && horaa>=1 && horaa<6 % si Domingo == Nocturno
%S_D='Domingo Nocturno 2' habitantes=y(indec,22) Prob_humana=3
elseif Dias>=7 && Dias<=36 && horaa>=6 && horaa<14 % si Lunes = matutino
%L_V='Lunes a Viernes matutino' habitantes=y(indec,17) Prob_humana=1
elseif Dias>=7 && Dias<=36 && horaa>=14 && horaa<22 % si Lunes = Vespertino
%L_V='Lunes a Viernes Vespertino' habitantes=y(indec,18) Prob_humana=2
elseif Dias>=7 && Dias<=36 && horaa>=22 && horaa<=24 || horaa==0 % si Lunes = Nocturno
%L_V='Lunes a Nocturno 1' habitantes=y(indec,19) Prob_humana=3
elseif Dias>=7 && Dias<=36 && horaa>=1 && horaa<6 % si Lunes = Nocturno
%L_V='Lunes a Viernes Nocturno 2' habitantes=y(indec,19) Prob_humana=3
elseif Dias>=37 && Dias<=42 && horaa>=6 && horaa<14 % si Sabado = matutino
%S_D='Sabado matutino' habitantes=y(indec,20) Prob_humana=1
```



```

elseif Dias>=37 && Dias<=42 && horaa>=14 && horaa<22 % si Sabado = Vespertino
%S_D='Sabado Vespertino' habitantes=y(indec,21) Prob_humana=2
elseif Dias>=37 && Dias<=42 && horaa>=22 && horaa<=24 || horaa==0 % si Sábado = Nocturno
%S_D='Sabado a Nocturno 1' habitantes=y(indec,22) Prob_humana=3
elseif Dias>=37 && Dias<=42 && horaa>=1 && horaa<6 % si Sábado = Nocturno
%S_D='Sabado Nocturno 2' habitantes=y(indec,22) Prob_humana=3
end
dato=cell2mat(handles. hoja_excel(:,50))
dato2=cell2mat(handles. hoja_excel(:,51)) if Prob_humana== 1 s='Día'
elseif Prob_humana== 2 s='Tarde'
elseif Prob_humana== 3 s='Noche' end
T_costo=find(dato<= 0.49) % busca en la matriz todos los numeros que sean mañores 0.49
habitantes=[dato2(T_costo)]
suma=sum(habitantes) cuantos=suma*0.1 Día=cuantos*0.1
T_costo2=find(dato >= 0.5 & dato <= 0.75) habitantes1=[dato2(T_costo2)]
suma1=sum(habitantes1) cuantos1=suma1*0.4 tarde=cuantos1*0.4
T_costo3=find(dato >= 0.76) habitantes3=[dato2(T_costo3)]
suma3=sum(habitantes3) cuantos3=suma3*0.7 noche=cuantos3*0.7
sum_T=suma+suma1+suma3
set(handles.edit11,'String',iso)
set(handles.turno,'String',s)
set(handles.T_de_personas,'String',sum_T)
set(handles.habitantes_baja,'String',suma)
set(handles.habitantes_media,'String',suma1)
set(handles.habitantes_alta,'String',suma3)
set(handles.perd_humana_baja,'String',Dia)
set(handles.perd_humana_media,'String',tarde)
set(handles.perd_humana_alta,'String',noche) guidata(hObject, handles);

```

Variables

```

ecel(indec,:)= [Id,Format,Director,capturo,Ciudad,fecha,gps_N1,gps_N2,Ge,npiso,An_cons,S,Tp,h,T,C,sd,be
ta1,beta2,R,fs,mi,Ru,mm,beta3,beta4,Ae,Ai,we,wmax,mentenimiento,Irreg_vertial,Piso_blando,Torsi3n,IrP
,Golpeteo,Uso_comercial,CC,PC,AI,dgg,Amp,Ymax,Y,E,Yo,EWW,Cr,costo,habitantes];

```

Texto de cabecera en la Hoja de Excel

```

headers = {'Id','Formato','Nombre del Director','Nombre del
capturador','Ciudad','Fecha','GPS_N1','GPS_N2','Grupo estructural','Número de pisos','Año de
construcción','Factor de suelo','Isoperiodo','altura','T','C','SD','beta1','beta2','R','fs','Factor de
reducción','Factor_de_sobrerresistencia','mm','beta3','beta4','Ae','Ai','we','wmax','mentenimiento','Irreg_verti
al','Piso_blando','Torsi3n','IrP','Golpeteo','Uso_comercial','CC','PC','AI','Airreg','Amp','Ymax','Distorsi3n','E
','Yo','EW','Cr','Costo','Habitantes'}; indec=indec+1; % Incremento de numero de celdas end
handles. hoja_excel=[ecel Almacenamos los datos en una variable para ser usados % en la visualización
de la tabla tipoarchivos=supportedImageTypes [f,p]=uiputfile(tipoarchivos) if f==0
return end nombre=fullfile(p,f)
xlswrite(nombre,[headers;ecel]) % guardamos los datos en una hoja de cálculo Excel
set(handles.data_table,'visible','on','Data',ecel) % aqui se visualiza los datos de la hoja de excel
set(handles.uipanel2,'visible','on') % activamos en visible la tabla
%cerramos la funcion guidata(hObject, handles); function tipoarchivos=supportedImageTypes
tipoarchivos={'*.xls','*.*'} % La hoja de excel solo atmite este formato. % Fin del algoritmo.

```

Cierre del programa

```

function cerrar_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear,clc,cla,close all munu_principal

```

Anexo A.5. Porcentaje de daños para distintos escenarios

Tabla 50. Porcentajes de daños para escenario $T_R=50$ años.

Sistema constructivo	Número	Nivel de desempeño				
		SD	OI	SV	PC	C
Mampostería sin refuerzo	338	118	129	73	16	2
Mampostería reforzada o confinada con diafragma rígido	4,180	3419	621	133	7	0
Mampostería reforzada o confinada con diafragma flexible	988	673	288	19	8	0
Construcción informal (mampostería mal confinada o reforzada)	245	62	153	22	7	1
Adobe o bajareque	136	17	68	44	5	2
Marcos de concreto resistentes a momento	9	8	1	0	0	0
Marcos de concreto arriostrados con muros de concreto	1	1	0	0	0	0
Marcos de concreto arriostrados con muros de mampostería	2	2	0	0	0	0
Estructura de concreto celular	62	56	4	2	0	0
Marcos de acero resistentes a momento	2	2	0	0	0	0
Marcos de acero arriostrados con diagonales o muros	2	2	0	0	0	0
Estructura de perfiles livianos (naves industriales)	4	4	0	0	0	0
Estructura de madera	30	28	2	0	0	0
Total	5,999	4392	1266	293	43	5
Porcentaje	100	73.21	21.10	4.88	0.72	0.08
Escalado al inventario total de construcciones (INEGI, 2010)	144,976	106,140	30,595	7,081	1,039	121

Tabla 51. Porcentajes de daños para escenario $T_R=100$ años.

Sistema constructivo	Número	Nivel de desempeño				
		SD	OI	SV	PC	C
Mampostería sin refuerzo	338	28	154	122	26	8
Mampostería reforzada o confinada con diafragma rígido	4,180	2820	1,137	211	12	0
Mampostería reforzada o confinada con diafragma flexible	988	576	355	47	9	1
Construcción informal (mampostería mal confinada o reforzada)	245	38	149	37	16	5
Adobe o bajareque	136	2	48	72	9	5
Marcos de concreto resistentes a momento	9	6	3	0	0	0
Marcos de concreto arriostrados con muros de concreto	1	1	0	0	0	0
Marcos de concreto arriostrados con muros de mampostería	2	2	0	0	0	0
Estructura de concreto celular	62	46	14	2	0	0
Marcos de acero resistentes a momento	2	2	0	0	0	0
Marcos de acero arriostrados con	2	2	0	0	0	0

diagonales o muros						
Estructura de perfiles livianos (naves industriales)	4	3	1	0	0	0
Estructura de madera	30	24	5	1	0	0
Total	5,999	3550	1866	492	72	19
Porcentaje	100	59.18	31.11	8.20	1.20	0.32
Escalado al inventario total de construcciones (INEGI, 2010)	144,976	85,792	45,095	11,890	1,740	459

Tabla 52. Porcentajes de daños para escenario $T_R=150$ años.

Sistema constructivo	Número	Nivel de desempeño				
		SD	OI	SV	PC	C
Mampostería sin refuerzo	338	2	58	206	49	23
Mampostería reforzada o confinada con diafragma rígido	4,180	1763	1,959	424	32	2
Mampostería reforzada o confinada con diafragma flexible	988	334	579	58	14	3
Construcción informal (mampostería mal confinada o reforzada)	245	0	102	89	39	15
Adobe o bajareque	136	0	25	42	50	19
Marcos de concreto resistentes a momento	9	5	3	1	0	0
Marcos de concreto arriostrados con muros de concreto	1	0	1	0	0	0
Marcos de concreto arriostrados con muros de mampostería	2	2	0	0	0	0
Estructura de concreto celular	62	17	35	9	1	0
Marcos de acero resistentes a momento	2	2	0	0	0	0
Marcos de acero arriostrados con diagonales o muros	2	2	0	0	0	0
Estructura de perfiles livianos (naves industriales)	4	3	1	0	0	0
Estructura de madera	30	19	8	2	1	0
Total	5,999	2149	2771	831	186	62
Porcentaje	100	35.82	46.19	13.85	3.10	1.03
Escalado al inventario total de construcciones (INEGI, 2010)	144,976	51,934	66,966	20,083	4,495	1,498