

IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE MAYOR AMPLIFICACIÓN SÍSMICA EN LA MANCHA URBANA DE CHIAPA DE CORZO, CHIAPAS COMO HERRAMIENTA PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD FÍSICA POR EXPOSICIÓN

Roberto Moreno Ceballo^{*1}, Raúl González Herrera², Jorge Antonio Paz Tenorio², Jorge Alfredo Aguilar Carboney³ y Carlos Uriel del Carpio Penagos²

Recibido: 30 de abril, 2019, aceptado: 5 de febrero, 2020; publicación en línea: 1 de julio, 2020

RESUMEN

La ciudad de Chiapa de Corzo ubicada en el centro del estado de Chiapas se encuentra en una de las regiones sísmicas más activas de México. Las condiciones locales del suelo han determinado la amplificación sísmica del lugar creando patrones en los daños observados tras la ocurrencia de sismos importantes, como el sucedido el 06 de octubre de 1975 que provocó cambios radicales en los habitantes de la ciudad, y el más reciente del 07 de septiembre de 2017, de magnitud 8.2 Mw. En este trabajo se presenta una propuesta de zonificación sísmica para regiones donde no existen estudios de vibración ambiental a través de una metodología simplificada, la cual constituye una herramienta para evaluar la vulnerabilidad física por exposición de las construcciones en ciudades con sistemas constructivos homogéneos en materiales, edades y patologías. La metodología propuesta emplea parámetros geológicos, edafológicos y la inclusión de dos variables cruciales como son las zonas inundables y los daños históricos por sismo. De acuerdo con los resultados del álgebra de mapas se obtuvieron dos zonas, una de mayor amplificación en donde se registraron el 85% de los daños para ambos sismos. Los insumos principales fueron cartografía digital, recorridos en campo para identificar las características constructivas de las estructuras que presentaban daños y procesamiento a través de software tipo SIG. Finalmente se determinó la vulnerabilidad por exposición a la amplificación sísmica en cada manzana en la zona urbana de Chiapa de Corzo, utilizando las regiones de amplificación como una variable determinante para denominar las construcciones vulnerables por exposición. Para gestión de riesgo esta técnica permite seleccionar las viviendas que deben ser reforzadas, reparadas o construidas con estándares de seguridad más altos.

Palabras clave: Micro zonificación sísmica, amplificación sísmica, vulnerabilidad sísmica

**Roberto Moreno Ceballo
geo9006@gmail.com*

*¹ Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, México,
Maestría en Ciencias en Desarrollo Sustentable y
Gestión de Riesgos*

*² Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas,
México Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias
de la Tierra, UNAM, México*

³ Universidad Autónoma de Chiapas, México

ABSTRACT

The city of Chiapa de Corzo located in the center of the state of Chiapas, is located in one of the most active seismic regions of Mexico. Local soil conditions have determined the seismic amplification of the site creating patterns in the damage observed after the occurrence of major earthquakes, such as the one that occurred on October 6th of 1975 that provoked radical changes in the habitants of the city, and the most recent of September 7 of 2017 of Mw 8.2. This paper presents a proposed seismic zoning for regions without studies of environmental vibration through a simplified methodology, which constitutes a variable to evaluate the physical vulnerability by exposure of constructions in cities with homogeneous constructive systems in materials, ages and pathologies. The proposed methodology uses geological parameters, soil and the inclusion of two crucial variables such as flood zones and historical damage by earthquake. According to the results of the algebra of maps were obtained two zones, a higher amplification where 85% of the damage were recorded for both earthquakes. The main inputs were digital cartography, field trips to identify the constructive pathologies of the structures that presented damage and processing through GIS-type software. Finally, the vulnerability was determined by exposure to seismic amplification in each block in the urban area of Chiapa de Corzo, using the amplification regions as a determinant variable to describe vulnerable constructions by exposure. For risk management this technique allows select the houses that must be reinforced, repaired or built with higher safety standards.

Key words: Seismic microzonation, Seismic amplification, Seismic vulnerability Nitrates, groundwater contamination, fertilizer, agriculture, isotopic signature

INTRODUCCIÓN

El estado de Chiapas es una de las regiones con mayor actividad sísmica en la República Mexicana, debido a una condición especial, la interacción de tres placas tectónicas principales: la Placa de Cocos, la Placa de Norte América y la Placa del Caribe. Como consecuencia de los movimientos tectónicos originados en la zona, se han desarrollado varios sistemas de falla en los cuales se acumula y libera energía potencial con recurrencia variable.

Los sismos que han afectado el estado de Chiapas han tenido cinco fuentes sismogénicas (González-Herrera, 2014), donde destaca principalmente la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa de Norteamérica (figura 1), que ha dado origen a sismos de gran magnitud ($M > 7.0$) ocurridos en toda la República Mexicana (Suárez y Singh, 1986; Pardo y Suárez, 1995).

La segunda fuente corresponde a la deformación interna de la placa subducida, que produce sismos intermedios y profundos (desde 80 hasta 300 km) del tipo intraplaca como el ocurrido el 7 de septiembre de 2017 (Kostoglodov y Pacheco, 1999).

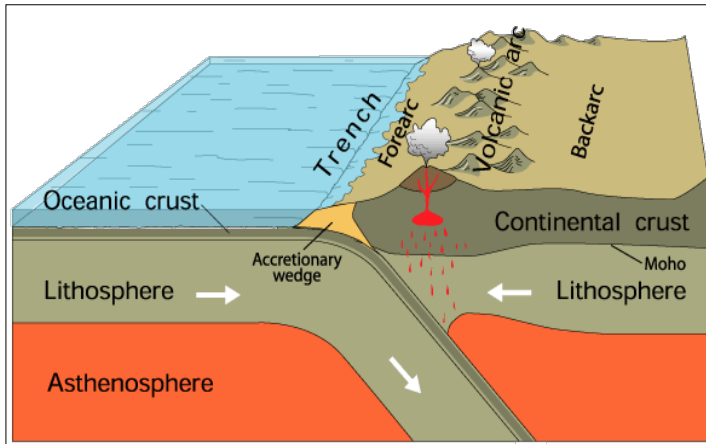


Figura 1. Proceso de subducción entre placa de Cocos y Norteamericana (IPCMIRD, 2010).

La tercera fuente está constituida por la deformación cortical debida a sistemas de fallas superficiales, las cuales originan temblores de poca profundidad y de una magnitud moderada que producen daños locales (González *et al.*, 2015), un claro ejemplo de esta fuente son los sismos de tipo *swarm* (enjambre) que tuvieron lugar en Chiapa de Corzo entre julio y octubre de 1975. La presencia de los volcanes activos en Chiapas: el Tacaná y el Chichonal o el Chichón corresponden a la cuarta fuente sismo-genética. Finalmente el fallamiento lateral izquierdo entre la placa de Norte América y la del Caribe (movimiento transcurrente); ésta última fuente ha producido importantes sismos como el ocurrido el 18 de abril de 1902 que destruyó monumentos históricos en la ciudad de Antigua Guatemala y que alcanzó intensidades de VIII en la zona del Soconusco en Chiapas (Benito *et al.*, 2001).

Con la ocurrencia de los sismos que han afectado al estado de Chiapas, ha quedado de manifiesto que las condiciones locales del suelo tienen un papel fundamental en la respuesta estructural (González *et al.*, 2013; Vidal *et al.*, 2016; Moreno-Ceballo *et al.*, 2019). Para tener una primera aproximación del comportamiento dinámico del suelo ante la ocurrencia de un sismo, realizar una microzonificación es una alternativa sólida para apoyar los programas de ordenamiento y manejo territorial, así como tener elementos para el cálculo del peligro en los reglamentos de construcción. Los planes de desarrollo de las poblaciones deben contemplar la respuesta sísmica local del subsuelo, con el fin de definir los parámetros específicos de diseño estructural sismo resistente, de acuerdo con el historial sísmico de la región asociado a tiempo, espacio y magnitud (IPCMIRD, 2010).

SISMICIDAD HISTÓRICA EN CHIAPA DE CORZO

Un aspecto fundamental para determinar las zonas de amplificación y a su vez hacer estudios de peligro sísmico en una zona específica es el análisis de los daños históricos por sismo, en la Tabla 1 se muestran algunos de los sismos más significativos que han afectado a la ciudad de Chiapa de Corzo (Nandayapa, 2011).

Tabla 1. Sismos que han afectado a Chiapa de Corzo.

Fecha	Latitud	Longitud	Magnitud
05/06/1897	16.30	-95.40	7.4
19/04/1902	14.90	-91.50	7.5
23/09/1902	16.60	-92.60	7.7
14/01/1903	15.00	-93.00	7.6
09/12/1912	15.50	-93.00	7.0
30/03/1914	17.00	-92.00	7.2
10/12/1925	15.50	-92.50	7.0
28/06/1944	15.00	-92.50	7.1
26/09/1955	15.50	-92.50	6.9
09/11/1956	17.45	-94.08	6.3
29/04/1970	14.52	-92.60	7.3
05/10/1975	16.74	-92.92	4.8
10/09/1993	14.20	-92.80	7.2
14/03/1994	15.98	-92.43	6.8
21/10/1995	16.81	-93.47	7.1
18/11/2001	15.45	-93.60	6.3
16/01/2002	15.58	-93.60	6.3
07/09/2017	15.76	-93.70	8.2

Para este trabajo se consideraron dos eventos sísmicos en particular, los cuales se seleccionaron por el hecho de contar en ambos con suficiente información:

- El lunes 6 de octubre de 1975, a las 0:55 horas, se presentó un sismo de magnitud 4.8, que produjo daños importantes pese a su magnitud. El epicentro se localizó en las riberas de Cupía, Amatal y América Libre; localidades rurales ubicadas aproximadamente a 4 km al sureste de Chiapa de Corzo, sismo producido por el fallamiento cortical, inducido por el llenado del embalse de la presa "La Angostura" (Nandayapa, 2011; Figueroa *et al.*, 1975) (Figura 2).
- El 7 de septiembre del 2017 ocurrió un sismo con magnitud 8.2 localizado en el Golfo de Tehuantepec, a 133 km al suroeste de Pijijiapan, Chiapas, provocando fuertes daños en la zona metropolitana del estado de Chiapas (SSN, 2017) (Figuras 3 y 4).

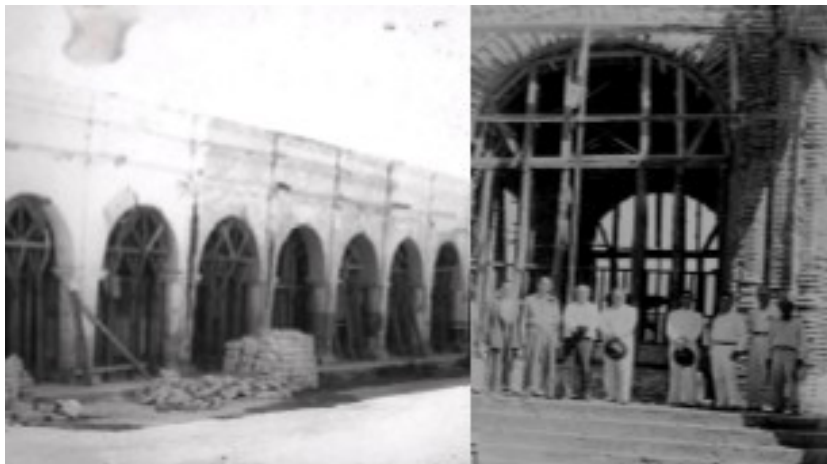


Figura 2. Daños en los portales y caída de uno de los remates de los arcos botareles de la fuente colonial de Chiapa de Corzo, Chiapas por el sismo de 1975.



Figura 3. Daños en la cúpula de la Iglesia del Calvario.



Figura 4. Daños considerables en el interior del Templo de Santo Domingo.

Los factores que generalmente influyen en la distribución de los daños en las construcciones se asocian al sistema constructivo, las propiedades del suelo y los materiales empleados, además de las características topográficas del lugar, que pueden ser una fuente de efectos de sitio ya que tienen una influencia considerable sobre la frecuencia y las características de amplitud de los

movimientos de tierra del terremoto y por lo tanto en la extensión del daño estructural local (Meslem *et al.*, 2012).

Con respecto al ordenamiento urbano, la amenaza sísmica no rige ni condiciona el uso del suelo, sólo condiciona las estructuras sometidas a dicha amenaza (Cardona, 2008), tampoco condiciona el uso de las urbanizaciones o construcciones, así como tampoco lo hace en el caso del uso del suelo en el ordenamiento urbano. Dicha amenaza sólo condiciona las características de las estructuras donde residen tales usos (Padrón *et al.*, 2011).

METODOLOGÍA

DEFINIR LAS VARIABLES PARA LA MICROZONIFICACIÓN

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, etcétera.
- 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.

La microzonificación sísmica de una zona urbana propuesta en esta investigación engloba el manejo de gran cantidad de información, como lo son: las características geológicas, la clasificación de los suelos a nivel local (edafología), el análisis y la determinación de las zonas de inundación o la delimitación de las llanuras inundables y por último una recopilación de daños históricos por sismo referenciados geográficamente.

La existencia de edificaciones con alto valor patrimonial, la presencia de zonas con alto grado de marginación en la ciudad de Chiapa de Corzo y su dependencia de construcciones con materiales frágiles como el adobe asociadas con la necesidad de conservar su imagen urbana por cuestiones turísticas son factores que hacen necesaria la determinación de las zonas de mayor amplificación sísmica en el lugar. Tras definir las variables, se realizó el álgebra de mapas correspondiente, con el objetivo de obtener una zonificación a partir de las regiones de coincidencia y la ponderación de las variables atendiendo a las características de cada uno de los elementos:

$$\text{Geología} + \text{Edafología} + \text{Zonas inundables} + \text{Daños históricos} = \text{Microzonificación Sísmica.}$$

Cabe mencionar que cada elemento se analizó de manera individual para determinar sus características y su posible comportamiento ante un evento telúrico dadas sus propiedades, ya que se ha comprobado que, ante un sismo, el tipo de suelo resulta determinante en la amplificación de las ondas (Moreno-Ceballo *et al.*, 2019).

ENTREVISTAS

Se realizaron entrevistas semiestructuradas con cronistas, historiadores y personas que tuvieran información sobre el sismo ocurrido el 6 de octubre de 1975 en la ciudad de Chiapa de Corzo, para obtener información acerca de este hecho, posterior a ello y una vez identificados los daños ocasionados por el sismo, se realizó una base de datos en Excel, capturando fotografías históricas de las construcciones dañadas de antes, después del sismo y el estado actual de las edificaciones por medio del sistema SICED (Sistema Ciudadano de Evaluación de Daños), el cual emplea la Escala Macrosísmica Europea para clasificar las clases de vulnerabilidad y niveles de daño.

ASIGNACIÓN DEL GRADO DE NIVELES Y ESTIMACIÓN DE LA CLASE DE VULNERABILIDAD

Los estudios de vulnerabilidad, generalmente se centran en la posibilidad que presentan las edificaciones de sufrir daños, éstos están ubicados en diferentes escalas de medición, las cuales pueden ser cuantitativas y cualitativas y su función primordial es describir el estado global de la estructura y su posible comportamiento ante un sismo. Para la evaluación de edificaciones que se han visto sujetas a la acción de un sismo existen muchos métodos, para esta investigación se consideró el método de la Escala Macrosísmica Europea (EMS-1998 por sus siglas en inglés).

La Escala Macrosísmica Europea EMS-1998 (Grunthal, 1998) considera una descripción y esquema gráfico, además define en forma cualitativa cada uno de los cinco grados de daño de que consta sin que se tenga una clara diferencia entre dos grados de daño consecutivos (Silva, 2006), por estos factores para esta investigación se consideró este método, específicamente la variante desarrollada por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), la cual se probó en la colonia Roma del Distrito Federal (Arellano *et al.*, 2003).

En las Tablas 2 y 3 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) y la asignación del daño observado.

La observación de la clase de vulnerabilidad y de grado de daño se realizó con el empleo de estudiantes de ingeniería civil coordinados por especialistas

Tabla 2. Clasificación del daño en estructuras de mampostería.






	Grado 1: Daños de despreciables a ligeros (<i>ningún daño estructural, daños no estructurales ligeros</i>). Grietas superficiales en muy pocos muros. Caída solo 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 3. Clases de Vulnerabilidad de la escala (EMS-1998)

Tipo de Estructura	Clase de Vulnerabilidad					
	A	B	C	D	E	F
MAMPOSTERÍA	Cantos rodados, rocas	○				
	Adobe (ladrillo de tierra)	○—				
	Roca simple	—○				
	Roca masiva	—○—				
	Sin refuerzo, con unidades de rocas manufacturadas	—○—				
	Sin refuerzo, con pisos de concreto reforzado	—○—				
	Reforzada o confinada	—○—				
CONCRETO REFORZADO	Marco sin diseño sismorresistente (DSR)	—○—				
	Marco con nivel moderato de DSR	—○—				
	Marco con alto nivel de DSR	—○—				
	Muros sin DSR	—○—				
	Muros con moderato nivel de DSR	—○—				
	Muros con alto nivel de DSR	—○—				
ACERO	Estructuras de acero	—○—				
MADERA	Estructuras de madera	—○—				

○ Clase más típica de vulnerabilidad; — Rango probable;
 Rango de casos menos probables, casos excepcionales

RESULTADOS

ZONAS DE AMPLIFICACIÓN

1.1. GEOLOGÍA

La superficie de la región Metropolitana presenta siete tipos de roca, donde predominan tres tipos, caliza (34.46%), limonita-arenisca (29.01%), y lutita-arenisca (16.55%). También depósitos cretácicos: Limolita (7.35%) y Aluvial (7.22%). Otras composiciones variadas conforman el 5.40% restante de la superficie de la región (Secretaría de Hacienda, 2017).

El municipio de Chiapa de Corzo muestra características geológicas determinadas por rocas, donde predomina la caliza en un 40.84%, Lutita – Arenisca (27.06%), Limolita – Arenisca (13.22%), Caliza – Lutita (10.56%), Conglomerado (7.44%), Ígnea Intrusiva Básica (0.74%) y Arenisca – Conglomerado (0.12%) (INEGI, 2008).

Las lutitas son rocas de grano fino que se parten en láminas laminadas más o menos paralelas a la estratificación. Las partículas de estas rocas son tan pequeñas que es muy difícil determinar la composición mineral precisa las mismas. Es importante destacar que contienen minerales arcillosos, además de partículas de limo, cuarzo, feldespato, calcita y dolomita (Don Leet & Judson, 1980).

1.2. EDAFOLOGÍA

El mapa edafológico de Chiapa de Corzo nos muestra que la porción Este de la población está conformada por un Regosol calcárico, en esta zona existen algunos lomeríos bajos. El lado Oeste y una pequeña porción al Sur se encuentran en un Vertisol pélico; así mismo, otra zona al Suroeste del poblado está constituida por un Fluvisol éutrico. Al Sur y Suroeste se encuentra el cuerpo de agua que constituye el río Grande de Chiapa o río Grijalva. La mayor parte del centro histórico de Chiapa de Corzo es sensiblemente plana (Salgado *et al.*, 2004).

Los Vertisoles son suelos arcillosos propiamente dichos, presentando grietas en alguna estación del año o caras de deslizamiento dentro del metro superficial del perfil. Son suelos muy compactos en la estación seca (muy duros) y muy plásticos en la húmeda, por lo que el manejo de estos suelos es bastante complicado. En este sentido son suelos en los que la instalación de tuberías o cualquier dispositivo no plástico y ajeno al suelo puede dar lugar a roturas (dependiendo de su elasticidad) debido a las tensiones que el crecimiento y cierre de las grietas puede producir (Blanquer *et al.*, 2011).

1.3. ZONAS INUNDABLES

Las zonas inundables o adyacentes a los cauces fluviales son muy atractivas para los desarrollos urbanísticos. La utilización de dichas zonas, sin considerar los límites naturales necesarios para evacuar las crecientes, ha contribuido a amplificar el efecto negativo de las inundaciones, que en algunos casos dejan consecuencias trágicas (Arbeláez *et al.*, 2002), Chiapa de Corzo no es la excepción; la ciudad yace a las márgenes del río Grijalva, en ocasiones ha sufrido inundaciones, como las provocadas por el huracán Arthur en el 2008 (Hernández Unzón, 2009) y huracán Matthew en el 2010 (López, 2010) por mencionar algunos ejemplos.

La amplificación del movimiento del suelo es la responsable del daño extenso en áreas constituidas por depósitos de gran potencia de sedimentos blandos y poco compactados. Geomorfológicamente, la llanura de inundación es una forma de terreno compuesto primariamente de material depositado no consolidado, derivado de sedimentos transportados por el río en cuestión (Schmudde, 1968).

De manera general, los daños causados por la sacudida del terremoto comúnmente se relacionan con variaciones de los materiales geológicos cercanos a la superficie y, de manera particular, estas grandes amplificaciones del movimiento del terreno se asocian con depósitos sedimentarios recientes y poco consolidados (Tinsley y Fumal, 1985).

Incluyendo datos históricos de inundación y tomando como parámetro fundamental en este caso a las características topográficas del lugar, se realizó un mapa del Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME) (Figura 5).

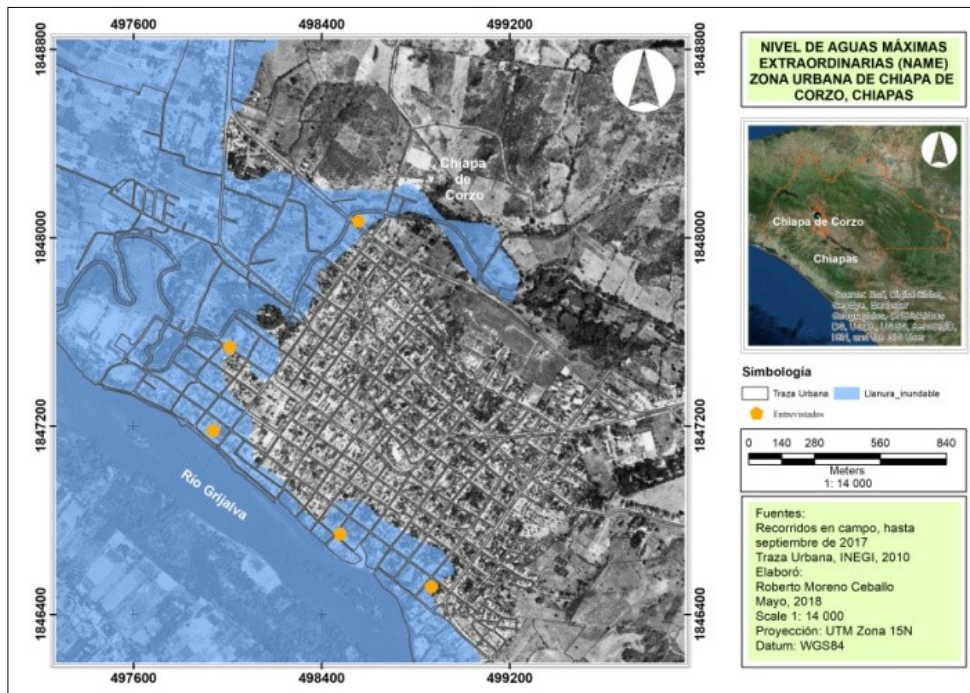


Figura 5. Mapa de la zona inundable en la cabecera municipal de Chiapa de Corzo.

1.4. DAÑOS HISTÓRICOS

El último paso para obtener la microzonificación sísmica fue elaborar una base de datos en Excel, con una recopilación de los daños presentados con la ocurrencia de dos sismos principalmente: los sismos del 06 de octubre de 1975, y cuáles de ellos persisten hasta la actualidad, definiendo el uso que se le daba al inmueble en esa época y el que recibe actualmente y el sismo del 07 de septiembre de 2017 de 8.2 Mw. Se tomaron puntos que corresponden a las edificaciones que presentaron daños por los fenómenos antes mencionados, los cuales fueron referenciados geográficamente y con ellos se generó la información vectorial catalogada como daños históricos a partir de la EMS-1998. Los daños se sintetizan y son presentados en la Figura 6.

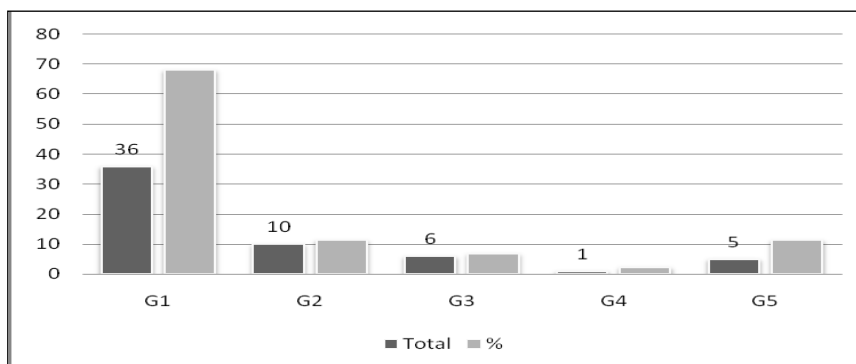


Figura 6. Daños presentados en edificaciones con los sismos de 1975 y 2017.

1.5. MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

Empleando la metodología presentada en esta investigación se elaboró una micro zonificación que dividía a la cabecera municipal de Chiapa de Corzo en dos zonas (Figura 7). Las zonas tienen las siguientes características:

Zona 1: Corresponde al área que se encuentra por debajo de la cota 400, en términos generales es la zona más baja de la cabecera municipal. Suelos arcillosos, constituidos por sedimentos transportados por el río Grijalva. Se localizan el 85% de los daños reportados por sismo, con varias edificaciones colapsadas (Grado 5 de la EMS-1998).

Zona 2: Conformada básicamente por Regosoles, suelos que desarrollan sobre un manto de materiales sueltos, poco consolidados, pero de menores espesores (Moreno-Ceballos *et al.*, 2019). Los daños registrados por sismo van del Grado 1 al Grado 3 de la EMS-1998 y equivalen al 15% del total de viviendas censadas. Es una zona sensiblemente plana, la topografía del lugar es poco accidentada, lo cual ayuda a facilitar el proceso de compactación durante la construcción de la cimentación.

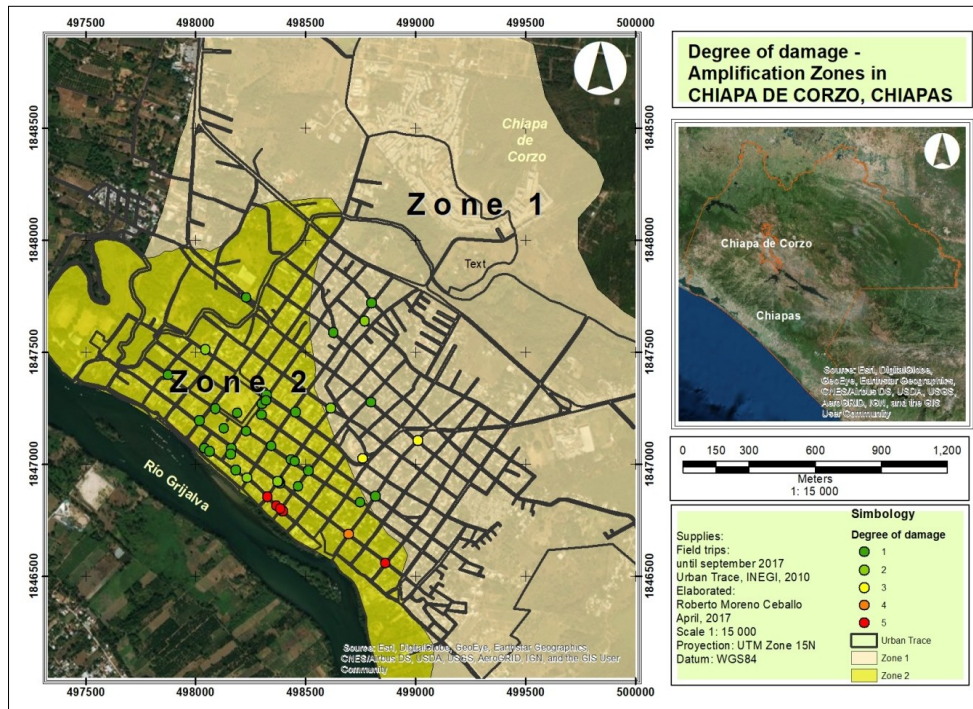


Figura 7. Microzonificación sísmica de Chiapa de Corzo, Chiapas y superposición de los daños históricos

En la Figura 8 se observa una correlación entre las zonas obtenidas y el grado de daño presentado en cada una de ellas. La amplificación del terreno local puede deberse a la naturaleza, composición y morfología de las capas superficiales del suelo. Este fenómeno local de comportamiento de terreno es conocido como "efecto local", "respuesta local" o "efecto de sitio" (Salgado *et al.*, 2004; Rodríguez, 2005; González-Herrera *et al.*, 2013; Vidal *et al.*, 2016; Moreno-Ceballos *et al.*, 2019).

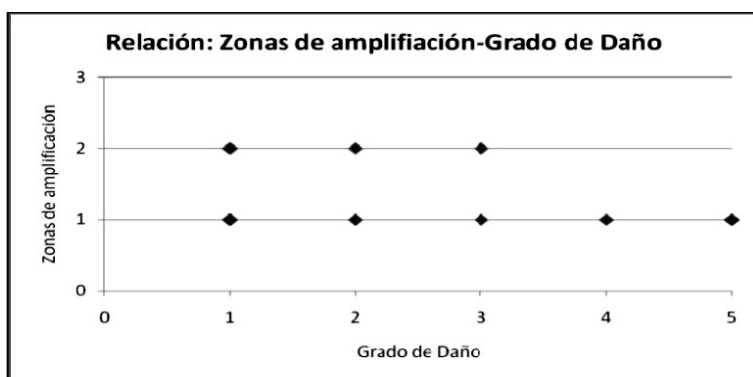


Figura 8. Correlación entre zonas de ampliación y grado de daño

DEFINICIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

La determinación de la vulnerabilidad sísmica en las edificaciones es un problema de gran complejidad que ha de ser abordado de diferentes formas en función de la escala de trabajo. Son multitud las variables que influyen en la vulnerabilidad de un edificio; cimentación, estructura, antigüedad, altura, geometría en planta y en altura, respuesta del terreno (ubicación geográfica), distribución de masas, relación con otros edificios, etc. el conocimiento de todos estos factores implica un ingente trabajo de campo (Asenjo *et al.*, 2007).

Un análisis de vulnerabilidad es un estudio de la capacidad de un sistema de resistir o absorber el impacto de un suceso que caracteriza una amenaza y, por lo tanto, se diferencia del análisis de riesgo, que es la estimación de pérdidas de acuerdo con el grado de amenaza considerado y con el nivel de vulnerabilidad existente en el sistema expuesto (Barbat & Pujades, 2004).

2.1. DEFINICIÓN DE LA CALIDAD EN LA EDIFICACIÓN Y EL GRADO DE DAÑO

Para el cálculo de la vulnerabilidad se tomaron en cuenta factores determinantes como: la calidad de los materiales empleados en la edificación y los sistemas constructivos que presentaron daños históricos observados con los sismos de octubre de 1975 y el sismo del 07 de septiembre de 2017, los cuales se ubicaron a través de una investigación documental y trabajo de campo acompañado de encuestas.

Con estos elementos se construyó una base de datos en donde se definió el uso del inmueble en el lapso de tiempo en el cual ocurrieron los eventos mencionados, la misma consta de 200 puntos georreferenciados (Figura 9), con los cuales se realizó una interpolación agrupando los valores semejantes en cuanto al grado de daño, la cual arrojó que el 74.74% de las viviendas censadas presentaron Grado 1, con esta información se elaboró el mapa de grado de daño en la edificación a nivel manzana (Figura 10).

La selección de estos eventos corresponde a la cantidad de daños que provocaron y al hecho de contar con información suficiente para la localización de cada uno de ellos y su posterior análisis.

La Figura 11 muestra los materiales empleados en la zona de estudio, la mayoría utiliza ladrillo reforzado, seguido por el adobe que ha sido tradicionalmente el material más empleado para los muros de las viviendas en la zona, debido a la economía, facilidad de fabricación, construcción y a sus bondades térmicas.

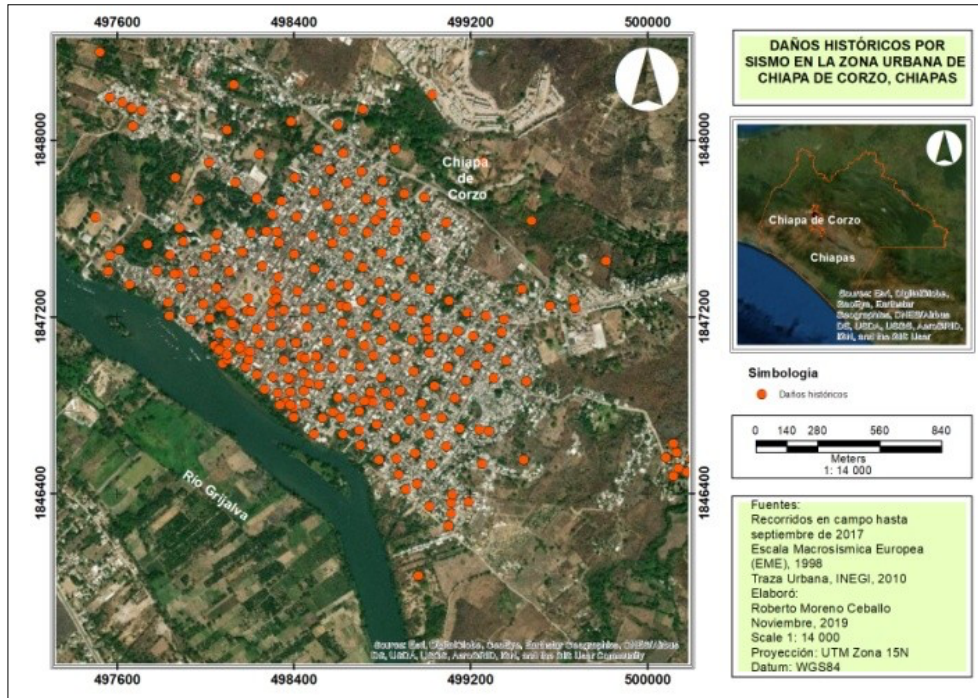


Figura 9. Daños históricos por sismo en la zona urbana de la cabecera municipal de Chiapa de Corzo.

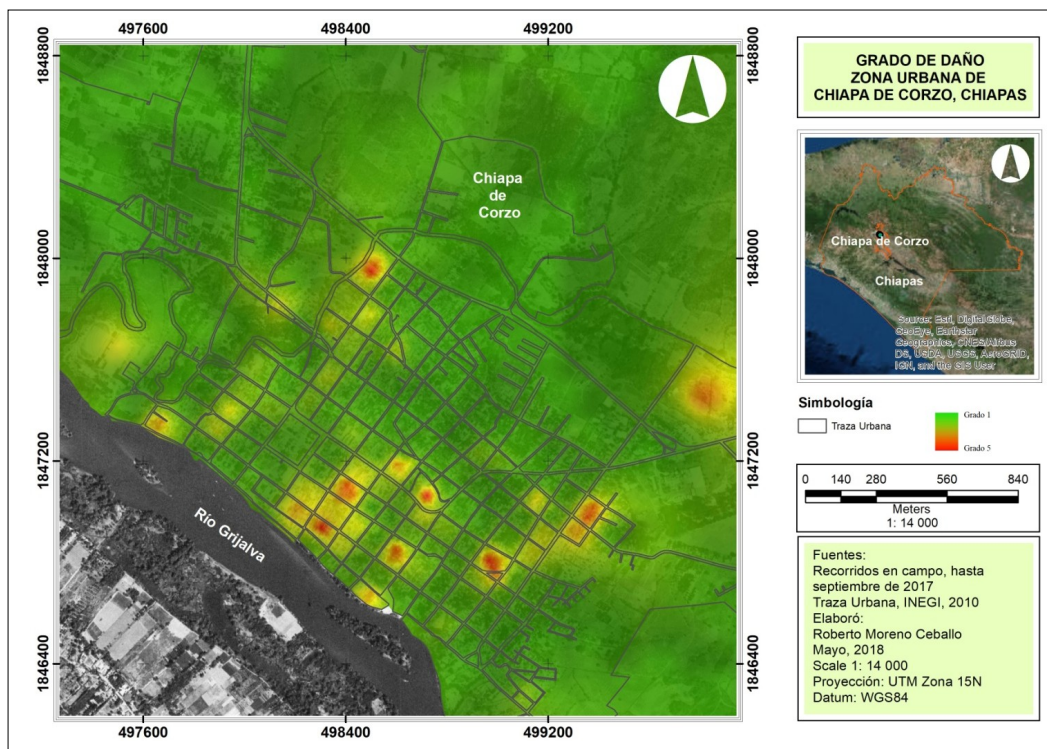


Figura 10. Mapa del grado de daño en las edificaciones por manzana en la cabecera municipal de Chiapa de Corzo, Chiapas

La calidad de estos materiales es casi siempre bastante pobre, ya que son artesanales y de autoconstrucción. Los morteros con que se unen las piezas son también en general de baja calidad y con frecuencia son de cal y arena únicamente. En las regiones de mayor riesgo "sísmico o en sitios donde el suelo sea muy deformable es frecuente que se coloquen elementos de refuerzo (castillos y dalas) en los muros (Hernández et al., 1979). De esta forma, teniendo en cuenta la resistencia de cada uno de los materiales, se construyó un mapa de calidad en la edificación (Figura 12), para correlacionar los resultados obtenidos con las zonas de mayor amplificación, el grado de daño y las zonas más vulnerables.

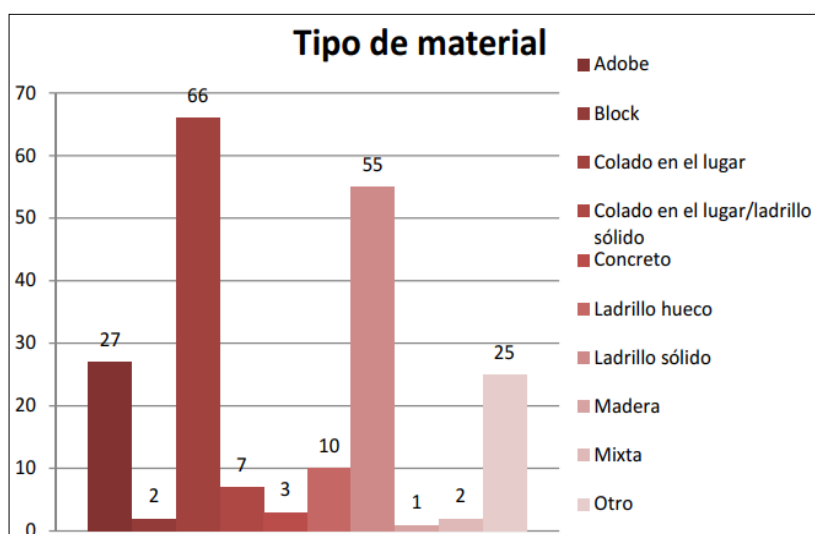


Figura 11. Materiales empleados en las edificaciones evaluadas.

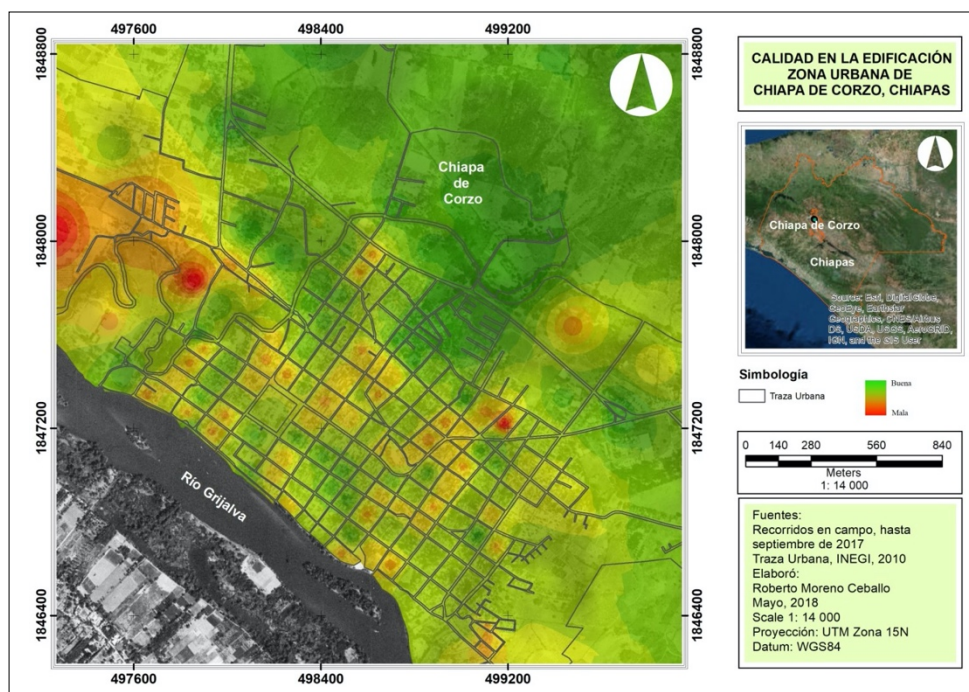


Figura 12. Mapa de calidad en la edificación por manzana en la cabecera municipal de Chiapa de Corzo, Chiapas.

2.2. VULNERABILIDAD SÍSMICA

Con la información física de las edificaciones y la inclusión de las variables: cantidad de habitantes, grado de daño y tipo de material con el que están construidas, se usó el software ArcMap para la determinación de la vulnerabilidad (Figura 13) por manzana dentro de la zona de estudio, a través de la siguiente fórmula:

$$V = G_D \times C_{Hab} \times C_{Edif}$$

Dónde: V - Vulnerabilidad, G_D - Grado de Daño, C_{Hab} Cantidad de habitantes, C_{Edif} - Calidad de la edificación

Debido a que por múltiples razones puede no ser muy conveniente presentar la información con un grado de detalle a nivel predial (edificio por edificio), los resultados de la evaluación por predios son globalizados a nivel de manzana, mediante el uso de la ponderación de acuerdo con el número de metros construidos (Saldaña *et al.*, 2005).

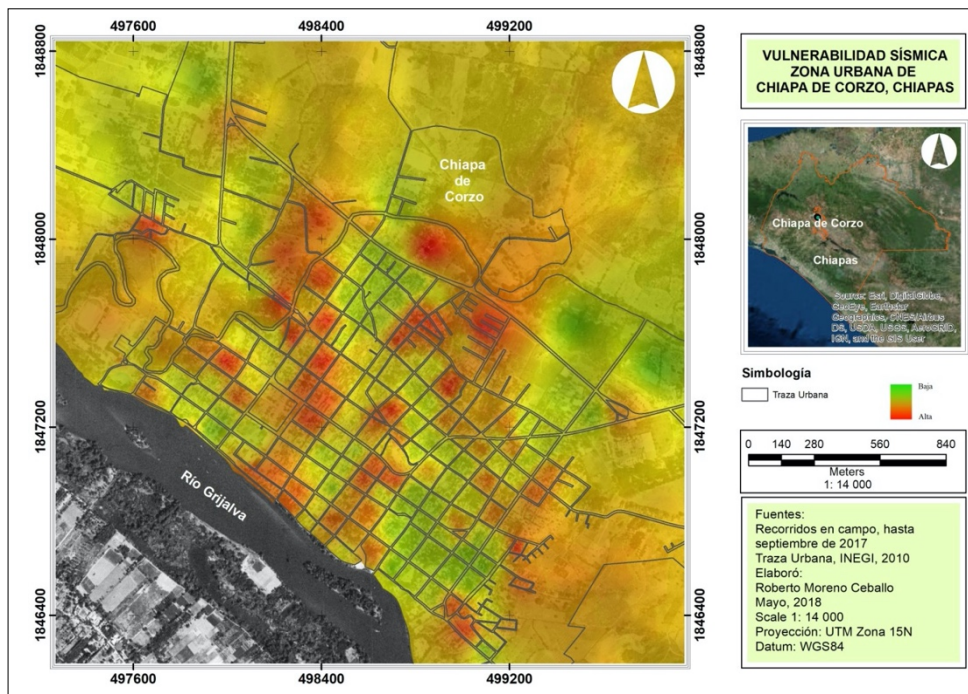


Figura 13. Mapa de vulnerabilidad sísmica por manzana en la cabecera municipal de Chiapa de Corzo, Chiapas

La autoconstrucción es un factor determinante en las afectaciones provocadas por los sismos así como los sistemas constructivos y los materiales empleados en la zona de estudio, trascendiendo en los grupos con mayor grado de marginación de la población, que, por desconocimiento y carencia de recursos, recurren a la autoconstrucción con materiales de baja calidad y pobre comportamiento estructural.

En la Figura 9 se observa que los daños se concentran en la región 1 de la micro zonificación (región limítrofe con el río Grijalva y zona de mayor amplificación sísmica), no obstante que la calidad de los materiales y sistemas constructivos permiten edificar construcciones frágiles en

toda la mancha urbana (Figura 11) y se corrobora con el análisis de vulnerabilidad a partir del EMS (1998) en la Figura 13.

De lo anterior se puede inferir que en una región donde los sistemas constructivos, materiales y edades son homogéneos, el daño principalmente está definido por la amplificación sísmica, por lo cual la vulnerabilidad estaría influenciada en estas regiones por la exposición.

Para constatar la información obtenida a través del álgebra de mapas, se procedió a validar los mismos con los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman, ya que éstos miden la fuerza o grado de asociación de dos variables. La Figura 14 muestra el mapa de correlación espacial resultante entre las zonas de mayor amplificación y los daños históricos, se obtuvo una correlación positiva con un valor máximo de 0.45.

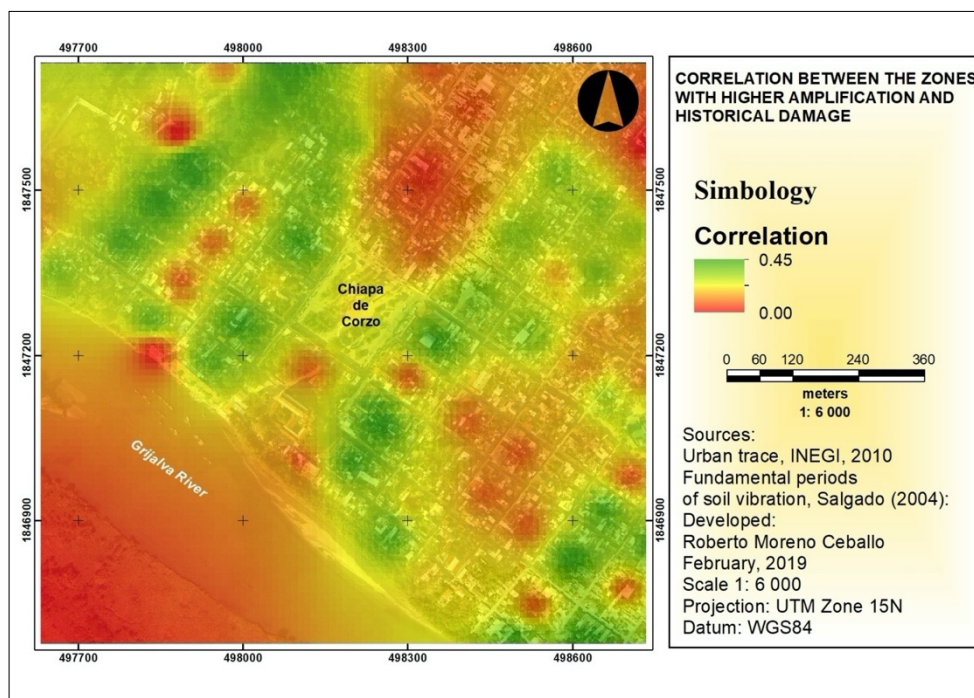


Figura 14. Correlación espacial entre las zonas de mayor amplificación y los daños históricos en la zona urbana de la cabecera municipal de Chiapa de Corzo.

La significancia estadística de un coeficiente debe tenerse en cuenta conjuntamente con el fenómeno estudiado, valores entre 0.5 y 0.7, indican una relación moderada-fuerte (Martínez *et al.*, 2009). Además el error medio cuadrático (RMSE por sus siglas en Inglés) resultante fue de 0.27, importante resaltar que mientras más cercano sea este valor a 0, más confiable el resultado.

CONCLUSIONES

Durante la investigación se generó una metodología que permite evaluar o estimar las zonas de amplificación sísmica en casos donde se carece de instrumentos para realizar mediciones dinámicas del suelo.

La metodología generó una microzonificación que se divide en dos zonas:

Zona 1: Corresponde al área que se encuentra por debajo de la cota 400, en términos generales es la zona más baja de la cabecera municipal. Suelos arcillosos, constituidos por sedimentos transportados por el río Grijalva. Se localizan el 85% de los daños reportados por sismo, con varias edificaciones colapsadas (Grado 5 de la EMS-1998).

Zona 2: Conformada básicamente por Regosoles, suelos que desarrollan sobre un manto de materiales sueltos, poco consolidados, pero de menores espesores. Los daños registrados por sismo van del Grado 1 al Grado 3 de la EMS-1998 y equivalen al 15% del total de viviendas censadas.

Se presenta una propuesta donde la vulnerabilidad por exposición es importante en zonas donde el sistema constructivo, materiales y edades son homogéneos, pero que hay concentración de daños en solo alguna de las regiones como es el caso de Chiapa de Corzo en su región 1, con el 85% de los daños calibrados con los dos sismos más importantes de la región en tiempos recientes: septiembre de 2017 y octubre de 1975.

Las zonas donde existe mayor vulnerabilidad sísmica se localizan en la zona centro debido a que ahí se encuentran las construcciones más antiguas, así como también en las zonas cercanas al río Grijalva, debido a que geomorfológicamente, las márgenes de los ríos son una forma de terreno compuesto primariamente de material depositado no consolidado, derivado de sedimentos transportados por el río en cuestión.

BIBLIOGRAFÍA

- Arbeláez, A. C., Posada, L., & Vélez, M. V., (2002). "Usos de suelo en la zona inundable del río San Carlos, Colombia". XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología.
- Arellano, E., Juárez, H., Gómez, A., Lara, J. & Sánchez, E. (2003). Caracterización y clases de vulnerabilidad de edificaciones de la colonia Roma, Ciudad de México. Memorias XIV CNIS, León, Guanajuato, México.
- Asenjo, S. I., Irigaray Fernández, C., & Montero, J. C., (2007). Análisis del riesgo sísmico en zonas urbanas mediante Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la ciudad de Granada. BIBLID, enero, 147-166.
- Barbat, A., & Pujades, L., (2004). Evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a Barcelona. 230-252.
- Benito, B., Molina, E. & Laín, L. (2001). Metodología para estudio de amenaza sísmica en Guatemala, aplicación al diseño sismorresistente. Reporte de investigación. Guatemala.
- Blanquer, J. M., Ibáñez, S., & Moreno, H., (2011). Vertisoles. Universidad Politécnica de Valencia.
- Cardona, O., (2008). (Transcripción de entrevista personal). En Padrón, C. (Comp), Lineamientos para la consideración de riesgo sísmico en la planificación urbana del municipio Chacao, estado Miranda (pp. 254-271). Informe de pasantía (véase Padrón, 2009), Universidad Simón Bolívar, Caracas.
- Don Leet, L., & Judson, S., (1980). Fundamentos de Geología Física. México, D.F. Limusa.
- Gómez-Arredondo, C., Montalvo-Arrieta, J. C., Iglesias-Mendoza, A., & Espíndola-Castro, V. H., (2016). Relocation and seismotectonic interpretation of the seismic swarm of August - December of 2012 in Linares area, northeastern Mexico. *Geofísica Internacional*, 55 (2), 95-106.
- González Herrera, R., Aguilar Carboney, J. A., Mora Chaparro, J. C., & Aguirre González, J., (2015). "El sismo del 7 de julio de 2014, análisis de consecuencias y su repercusión en las estrategias de reducción de riesgo sísmico en Tapachula, Chiapas". Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.

- González-Herrera, R., (2014). Estimación de las pérdidas económicas en las estructuras asociadas a peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Págs. 267. ISBN 978-607-02-5366-9. Universidad Nacional Autónoma de México, Colección Ciencia Nueva, México. Consulta digital en: <http://www.ciencianueva.unam.mx/repositorio/handle/123456789/83>.
- González-Herrera, R., Mora-Chaparro, J.C., Aguirre-González, J. & Novelo-Casanova, D.A., (2013). La estructura de velocidades y su relación con el peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30-1, pp. 121-134. ISSN 2007-2902.
- Grünthal, G. (1998). European Macroseismic Scale 1998, Cahiers de Centre Europeen de Géodynamique et de Séismologie, volumen 15, Luxemburgo.
- Hernández, O., Meli, R., & Padilla, M. (1979). Refuerzo de vivienda rural en zonas sísmicas. Estudios experimentales, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández Unzón, A. (2009). Informe de México sobre la temporada de Huracanes 2008 e Inundaciones asociadas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Servicio Meteorológico Nacional. Nassau: XXXI. Reunión del Comité de Huracanes de la AR-IV de la OMM/INEGI, (2008). "Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos".
- IPCMIRD. (2010). "Sistema Estatal de Protección Civil del Estado de Chiapas. Plan Operativo de Protección Civil por Riesgo Sísmico", Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Kostoglodov, V. & 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%20Fioshtml>.
- López, R. (2010, Septiembre 28). Van siete muertos por Matthew en Chiapas; daños en más de mil casas. *La Jornada*, p. 29.
- Meslem, A., Yamazaki, F., Maruyama, Y., Benouar, D., Kibboua, A., & Mehani, Y., (2012) "The Effects of Building Characteristics and Site Conditions on the Damage Distribution in Boumerde's after the 2003 Algeria Earthquake". *Earthquake Spectra*, 28 (1), 185-216.
- Moreno Ceballo, R., González-Herrera, R., Paz-Tenorio, J.A., Aguilar-Carboney, J.A. & Del Carpio-Penagos, C.U., (2019). Effects of Sediment Thickness upon Seismic Amplification in the Urban Area of Chiapa de Corzo, Chiapas, Mexico. *Earth Sciences Research Journal*, Vol 23, No. 2, pp. 1-9.
- Nandayapa, A. (2011). Temblores de 1975 en la ciudad de Chiapa de Corzo. Tuxtla Gutiérrez.
- Nath, S., & Thingbaijam, K. K. (2009). Seismic hazard assessment – a holistic microzonation approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1445-1459.
- Ocampo-García, M.I., Escamirosa, F. & Salgado, A. (2005). La pérdida del patrimonio habitacional en el centro histórico de Chiapa de Corzo, Chiapas. *Ciencia y Tecnología en la Frontera Sur, COCYTECH*, No. 2 Vol. 11.
- Padrón, C., Mendes, K. C., Schmitz, M., & Hernández, J.J., (2011) "La Microzonificación Sísmica en el Proceso de Planificación Urbana. Caso de Estudio: Municipio Chacao". *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V*, 26(2), 89-101.
- 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.
- 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).
- Saldaña, L., Jaramillo, H., & Calvo, J. A., (2005). Metodología para la evaluación del riesgo sísmico de pequeñas y medianas ciudades. Estudio de caso: Zona centro de la ciudad de Armenia-Colombia. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*.
- Salgado, A., Escamirosa, F., & Calvo, A., (2004). "Zonificación sísmica de tres centros históricos del sureste mexicano". *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, 11-15.
- Schmudde, T.H. "Floodplain" in R.W. Fairbridge, *The Encyclopedia of Geomorphology* (New York: Reinhold, 1968), pp. 359-362.
- Secretaría de Hacienda. (2017). Secretaría de Hacienda. Recuperado el 15 de mayo de 2017, de <http://www.haciendachiapas.gob.mx/planeacion/Informacion/Desarrollo-Regional/prog-regionales/METROPOLITANA.pdf>

- Silva, M. A. (2006). Comportamiento Estructural por Hundimientos de Edificaciones Ubicadas en Distintas Zonas en la Ciudad de Pachuca. México, D.F., México: Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
- SSN. (2017). "Reporte especial: Sismo de Tehuantepec (2017-09-07, 23:49 M8.2)".
- Suárez, G. & Singh, K. (1986). Tectonic interpretation of the trans mexican volcanic belt discussion: *Tectonophysics*, 127, 155-160.
- Tupak, O. (2009): "Microzonificación sísmica, Universidad Internacional de Andalucía". UNÍA Huelva, España.
- Vicente, R., Ferreira, T., & Maio, R. (2014). Seismic Risk at the Urban Scale: Assessment, *Mapping and Planning. Procedia Economics and Finance*, 71-80.
- Vidal, F., Alguacil, G., Navarro, M., González-Herrera, R., Aguirre-González, J. & Ruiz-Sibaja, A., (2016). Characteristics of the earthquake ground motion in Tapachula (Mexico) from acceleration and ambient noise data. 11th International Workshop on Seismic Microzoning and Risk Reduction. 3 a 5 de October de 2016, 231-238 pp. ISBN: 978-84-16929-72-6.