

VULNERABILIDAD SÍSMICA DE VIVIENDAS DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA EN EL PUEBLO DE TLAJOMULCO, JALISCO

Adolfo Preciado⁽¹⁾, Osmar Rodríguez⁽²⁾, Juan Luis Caro⁽¹⁾, Ramiro Lujan⁽¹⁾

1 Profesor Investigador. Facultad de Ing. Civil. Universidad Politécnica de la Zona Metropolitana de Guadalajara

Carretera Santa Fe #595, Tlajomulco, Jalisco, México, C.P. 45640, www.upzmg.edu.mx

adolfo.preciado@upzmg.edu.mx, juan.caro@upzmg.edu.mx, ramiro.lujan@upzmg.edu.mx

2 Alumno Graduado de Licenciatura. Facultad de Ing. Civil. Universidad Politécnica de la Zona Metropolitana de Guadalajara

osmar.ubc@gmail.com

RESUMEN

Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco es un municipio y pueblo típico en el Oeste de México y forma parte de la Zona Metropolitana de Guadalajara. La mayoría de las viviendas son de mampostería no reforzada tal y como tabique y adobe, siendo extremadamente vulnerables debido a la sismicidad de la región. Tlajomulco se encuentra en la zona sísmica C, clasificada con una alta sismicidad. La vulnerabilidad sísmica del conjunto de vivienda es evaluada por medio del método de inspección y puntaje a través de una evaluación del sistema sismo-resistente. Los resultados obtenidos permitirán correlacionar la vulnerabilidad con diferentes intensidades sísmicas.

ABSTRACT

Tlajomulco of Zúñiga, Jalisco is a municipality and typical town at west Mexico and it is part of the Metropolitan Zone of Guadalajara. Most of houses are made of unreinforced masonry such as fired clay brick and adobe, being extremely vulnerable due to the seismicity of the region. Tlajomulco is located in a seismic zone C, classified for being of high seismicity. The seismic vulnerability of the housing content is evaluated by means of the index method through an evaluation by points of the earthquake-resistant system. The obtained results will allow to correlate the vulnerability with different seismic intensities.

EL PUEBLO DE TLAJOMULCO Y SU VULNERABILIDAD SÍSMICA

Tlajomulco de Zúñiga es un pueblo típico y municipio del Estado de Jalisco que forma parte del área conurbada de Guadalajara (capital del Estado), también conocida como Zona Metropolitana (ZMG). Tlajomulco se encuentra localizado aproximadamente a 34 km de distancia al Suroeste de Guadalajara (20° 28' latitud norte y 103° 27' longitud oeste) y a una altura de 1,575 metros sobre el nivel del mar. El municipio de Tlajomulco cuenta con una extensión territorial de 636.93 km² y una ocupación poblacional de 416,626 habitantes (ver tabla 1) según el último censo realizado en el 2010 por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010). Limita al norte con los municipios de Zapopan y Tlaquepaque; al sur con Jocotepec y Chapala; al este con el Salto, Juanacatlán e Ixtlahuacán de los Membrillos y al oeste con Acatlán de Juárez y Tala. Las principales localidades del municipio en términos de población pueden apreciarse en la tabla 1 y corresponden con la Hacienda Santa Fe, San Sebastián el Grande, San Agustín, Santa Cruz del Valle, Tlajomulco (cabecera municipal), Lomas de San Agustín, Santa Cruz de las Flores y La Tijera. El municipio de Tlajomulco es considerado de gran importancia para la ZMG ya que es base de la industria y comercio, albergando también el Aeropuerto Internacional de Guadalajara (ver figura 1). Además aquí se encuentra la llamada Ruta Franciscana, la cual es considerada tesoro de la época Colonial y es reconocida como zona arqueológica y patrimonio de la nación por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). Esta ruta de Templos antiguos (ver figura 2) fue construida por los Franciscanos en la época de la Conquista que se extendía desde California, México y Guatemala. Afortunadamente aún se conservan algunos de esos edificios históricos en la Ruta Franciscana de Tlajomulco de Zúñiga. Está integrada por 9 templos de mampostería no

reforzada de entre 200 y 400 años de antigüedad construidos en los tiempos de la Colonia entre los siglos XVII Y XVIII ubicados en distintas localidades del municipio. Dos de los edificios más antiguos de la Ruta Franciscana en Tlajomulco se pueden observar en la figura 2.

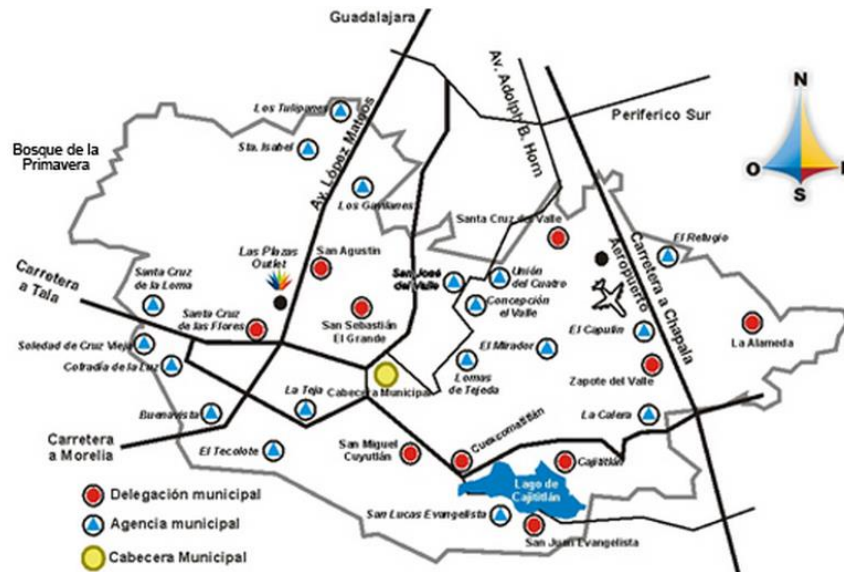


Figura 1 El municipio de Tlajomulco de Zúñiga y sus localidades (ATZJ, 2013)



(a)



(b)

Figura 2 Edificios históricos más antiguos de la Ruta Franciscana. (a) Templo de San Juan Evangelista (1617) y (b) Basílica de los Santos Reyes (1634)

En el contexto nacional (ver figura 3), Tlajomulco forma parte de la Región Centro Occidente del País y de la ZMG, siendo ésta una de las dos metrópolis con mayores niveles de infraestructura y servicios del país. Ambas metrópolis se encuentran interconectadas a través del corredor CANAMEX (Vancouver - Cd. de México) y el llamado corredor del tratado de libre comercio (TLC) (Manzanillo - Toronto). Este es un eje de flujo comercial entre México, Estados

Unidos y Canadá dentro del marco del TLC. El formar parte de ésta dinámica regional ha provocado que se considere a sus corredores que la integran como a su territorio como un espacio de oportunidades tanto para avanzar en procesos de competitividad como de establecer un gran mercado para empresas inmobiliarias (ATZJ, 2010). La ciudad de Guadalajara es la segunda más importante de México en cuanto a demografía se refiere, siendo considerada una región urbana compleja. Debido al progreso demográfico de la ciudad de Guadalajara, se ha registrado un aumento de población en el municipio de Tlajomulco del año 2000 al 2010 de cerca del 340% en un periodo de 10 años.

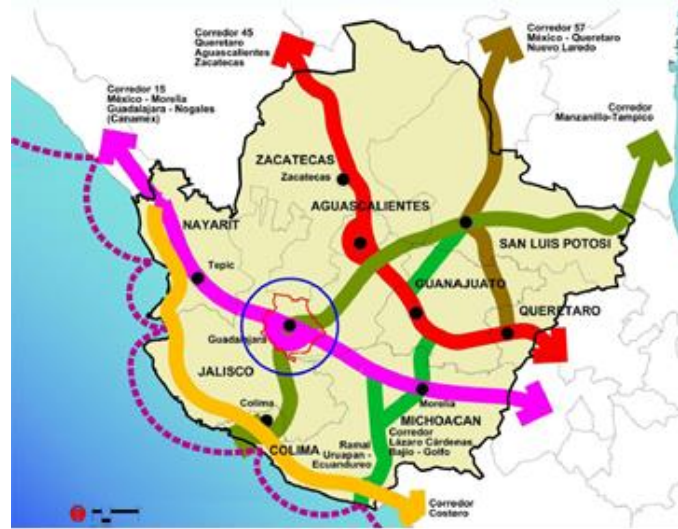


Figura 3 Contexto regional y estatal de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco (ATZJ, 2008)

Tabla 1 Censo de Población del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco (INEGI, 2010)

| Nombre | Población total 2000 | Población total 2010 |
|--|----------------------|----------------------|
| Hacienda Santa Fe | ----- | 86,935 |
| San Agustín | 14,355 | 30,424 |
| Tlajomulco de Zúñiga | 16,177 | 30,273 |
| San Sebastián el Grande | 14,695 | 28,138 |
| Santa Cruz del Valle | 13,908 | 26,866 |
| Municipio de Tlajomulco de Zúñiga | 123,619 | 416,626 |

En la tabla 1 pueden observarse las 5 localidades (incluyendo la cabecera municipal llamada también Tlajomulco) del municipio con mayor número de habitantes. El crecimiento del municipio en términos de población y vivienda es evidentemente mayor en la actualidad (año 2015) y los datos precisos aún son desconocidos hasta que se realice un nuevo censo. En el conteo realizado en el 2010 por el INEGI se especifica que para ese año el municipio contaba con una totalidad de 101,811 viviendas con todos los servicios. El material predominante de los muros resistentes de carga es de mampostería de adobe, block cemento-arena y tabique de barro rojo recocido con y sin refuerzo, el tipo de cubierta es de teja, losa de concreto reforzado y bóveda de tabique (llamada también de cuña). El refuerzo principal usado en muros de vivienda de mampostería es por medio de elementos de concreto reforzado (dalas y castillos), conocido también como confinamiento o mampostería confinada.

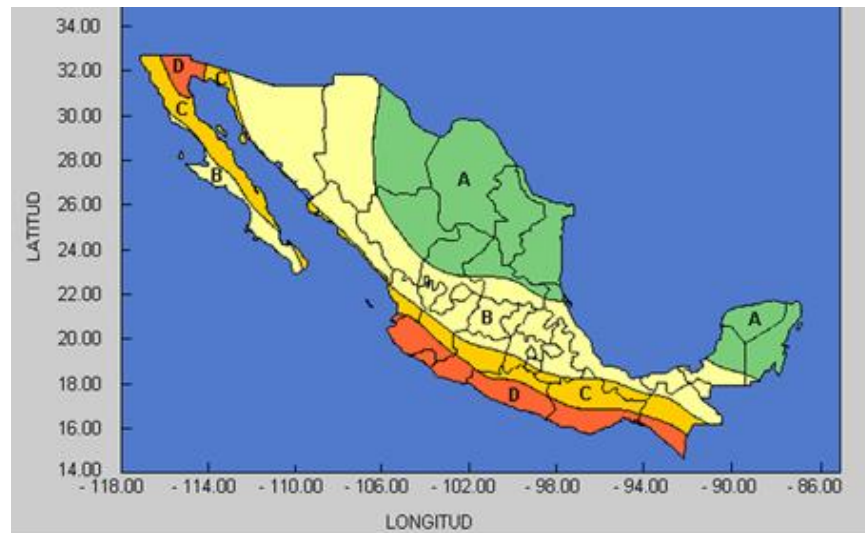


Figura 4 Regionalización sísmica de la República Mexicana (MDS-CFE, 1993)

A nivel nacional, la amenaza sísmica del País está dividida en cuatro zonas principales que van de la A a la D, dónde A representa baja sismicidad y D una amenaza sísmica muy alta. En el contexto sísmológico, el Estado de Jalisco incluyendo Tlajomulco se encuentra en la zona C, clasificada como una amenaza sísmica alta (ver figura 4) y una gran porción correspondiente a la zona D, en la parte vecina al estado de Colima, con amenaza sísmica muy alta. La amenaza es generada principalmente en el llamado bloque de Jalisco localizado entre las Placas tectónicas de Rivera y la Norteamericana. Además, por la zona de convergencia entre las Placas de Cocos y la Norteamericana y la de Rivera y la Norteamericana en la zona costera. México se localiza en el llamado cinturón de fuego, caracterizado por la presencia de volcanes muy activos y una alta sismicidad. En la frontera entre las Placas mencionadas (ver tabla 2) han ocurrido la mayoría de los sismos más destructivos ocurridos en el País (con Magnitudes mayores a 7 en la escala de Richter e Intensidades de VIII en la escala de Mercalli Modificada), causando fuertes daños en las ciudades de Colima (zona sísmica D) y Guadalajara (zona sísmica C) y en los Estados de Michoacán y México (ver figura 5).

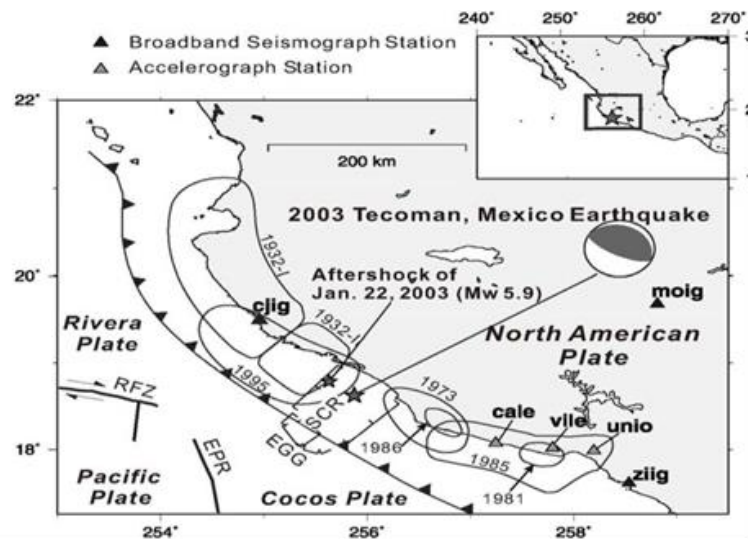


Figura 5 Localización y área de ruptura de los principales sismos en Colima, Jalisco y Michoacán (Yagi et al., 2004)

Tabla 2 Información de los principales sismos ocurridos en la región de Colima-Jalisco (UCOL et al., 1997, Zobin, 2004, Rodríguez-Lozoya et al., 2007 y Preciado, 2011)

| No. | Fecha | Latitud N | Longitud W | Magnitud M_w | Intensidad MMI Colima | Comentario |
|-----|------------|-----------|------------|----------------|-----------------------|--------------|
| 1 | 03.06.1932 | 19.80° | 104.00° | 8.0 | VIII | R and NA |
| 2 | 18.06.1932 | 18.95° | 104.42° | 7.8 | IX | Replica of 1 |
| 3 | 15.04.1941 | 18.85° | 102.94° | 7.6 | X | C and NA |
| 4 | 30.01.1973 | 18.39° | 103.21° | 7.6 | VIII | C and NA |
| 5 | 09.10.1995 | 18.79° | 104.47° | 8.0 | VII | R and NA |
| 6 | 21.01.2003 | 18.63° | 104.13° | 7.5 | VIII | C and NA |

Placas que generaron el sismo: R= Rivera; NA= Norteamericana; C= Cocos

En el mapa tectónico mostrado en la figura 6 las flechas negras representan la dirección de convergencia de las Placas de Rivera y Cocos con referencia a la Placa Norteamericana. Además, puede observarse el otro triple punto de contacto entre la Placas del Pacifico, Cocos y Rivera, considerado por los expertos como zona de sismicidad compleja debido a la falta de información sobre los movimientos relativos de las tres Placas en relación con el bloque de Jalisco y la zona de interacción de Colima.

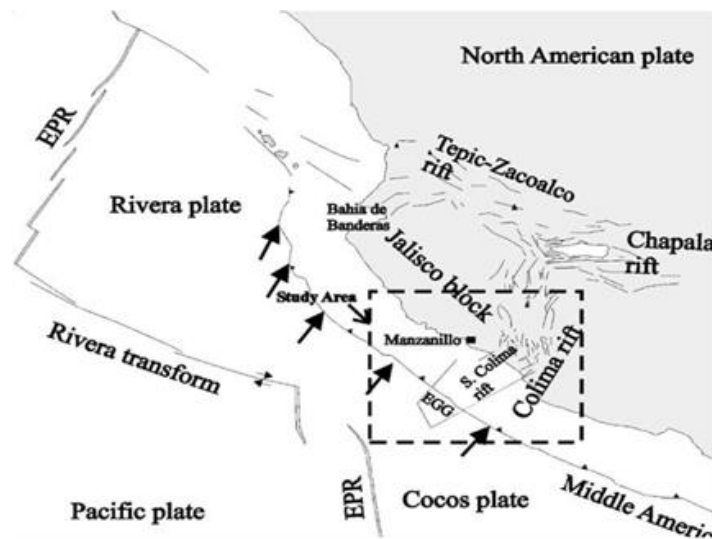


Figura 6 Mapa tectónico del Occidente de México (Bandy et al., 1995)

La protección sísmica de edificios de mampostería no reforzada y antigua es un tema de suma importancia e intensa investigación en años recientes a nivel mundial. Las principales dificultades provienen de la heterogeneidad de la mampostería y su comportamiento sísmico gobernado por su baja resistencia a la tensión. Todos esos factores combinados con la fuente sísmica, contenido de frecuencias del sismo y efectos de sitio hacen que la evaluación sísmica de este tipo de edificios sea una tarea muy compleja. En el marco del manejo de riesgo sísmico en edificios hay dos principales etapas, las cuales se encuentran integradas por la evaluación de la vulnerabilidad sísmica y las medidas necesarias para lograr la reducción de la vulnerabilidad. La susceptibilidad de una cierta estructura a sufrir daño ante un sismo es determinada por el conjunto de la amenaza sísmica y la vulnerabilidad propia de la estructura. En otras palabras, las estructuras que se encuentran bajo la acción de un sismo están sujetas a un ciclo de acción y efecto, donde la acción es el sismo y el efecto es el daño en la estructura. El daño generado en la estructura depende de su proximidad a la fuente sísmica, contenido de frecuencias y efectos de sitio; esto es en lo que se refiere al sismo, y en cuanto a la estructura en sí, depende de la calidad del sistema resistente, distribución, altura, tipo de cubierta, antigüedad y nivel de diseño sísmico.

Hoy en día existe una enorme variedad de métodos para evaluar el riesgo sísmico en edificios (Carreño et al. 2012). El objetivo principal es el evaluar el riesgo sísmico de un cierto edificio o grupo de edificios de forma satisfactoria y estudiar las medidas correctivas para reducir dicho riesgo. En sí, el riesgo sísmico de una estructura de mampostería o cualquier otro material localizada en zona sísmica es determinado por el conjunto de la amenaza sísmica (o peligrosidad sísmica) y su vulnerabilidad estructural. Estudios recientes en ingeniería estructural y sismos están orientados al desarrollo, validación y aplicación de nuevas técnicas para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificios existentes (Carreño, et al., 2007; Barbat, et al., 2008; Lantada, et al., 2009, Pujades, 2012, Preciado et al., 2015a y 2015b).



Figura 7 Viviendas típicas de adobe tradicional. (a) adobe aparente con doble altura y (b) adobe con aplanado y pintura

Tomando en cuenta la susceptibilidad de los edificios de mampostería no reforzada a sufrir gran daño o colapso frágil ante la ocurrencia de un sismo, resulta evidente la necesidad de evaluar la vulnerabilidad sísmica del conjunto de vivienda de mampostería no reforzada del pueblo típico de Tlajomulco, ya que se encuentran en una zona con alta peligrosidad sísmica inminente. Para realizar la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios es necesario un método simplificado de análisis tal y como el de inspección y puntaje de las características sismo resistentes de las estructuras, así como los efectos de sitio, y con esta información generar escenarios de daño para diferentes intensidades de sismos fuertes. Estos resultados serán de gran ayuda para proponer las medidas de refuerzo en las viviendas tomando en cuenta las diferentes tipologías de construcción, principalmente mampostería no reforzada de adobe, block cemento-arena, tabique de barro rojo recocido y combinaciones.



Figura 8 Viviendas típicas de adobe combinado con tabique de barro rojo recocido. (a) Con cubierta ligera y (b) con cubierta abovedada de mampostería de tabique de barro y perfil de acero

El objetivo principal del presente proyecto de investigación consiste con la evaluación de la vulnerabilidad sísmica y escenarios de daño en el conjunto de vivienda de mampostería no reforzada de Tlajomulco por medio de métodos de

inspección y puntaje del sistema sismo-resistente. Los resultados que se muestran en este artículo corresponden con la evaluación de la vulnerabilidad sísmica a escala territorial, tomando en cuenta diferentes viviendas tipo de mampostería no reforzada (ver figuras 7, 8 y 9). La metodología se desarrolló a través de una muestra representativa de alrededor de 180 casas habitación y negocios de mampostería no reforzada y reforzada con diferente configuración de cubierta, sistema resistente vertical, estado de conservación y número de niveles.



Figura 9 Viviendas típicas de tabique de barro rojo con confinamiento ineficiente o sin diseño sísmico

Las viviendas típicas de mampostería no reforzada estudiada en este proyecto de investigación corresponden con tres grupos principales: viviendas de adobe tradicional con muros aparentes o con aplanado, así como diferentes tipos de cubierta liviana y pesada (figuras 7 y 8); viviendas de tabique de barro rojo recocido con confinamiento deficiente (figura 9) y sin confinamiento (figura 10). Las viviendas de mampostería no reforzada del primer grupo son de adobe tradicional aparente (figura 7a) y aplanado con mortero de cemento y arena con superficie de diferentes colores como se muestra en la figura 7b. Dentro de este primer grupo también podemos distinguir viviendas con sistema resistente vertical de adobe con cubierta ligera y pesada. La cubierta ligera es de teja de barro rojo recocido y viguetas de madera (figuras 7a, 7b y 8a) y en algunos casos también de lámina de cartón en sustitución de la teja. La cubierta pesada es en forma de bóveda, hecha de tabique de barro rojo recocido y viguetas de acero estructural de sección IR con una separación aproximada de 1m entre viguetas. Este sistema de cubierta y entrepiso es conocido también por su forma con el nombre de cuña, y es típico del estado de Jalisco, principalmente del municipio y pueblo llamado también Tlajomulco de Zúñiga (ver figuras 8b y 10).



Figura 10 Viviendas típicas de tabique de barro rojo recocido sin confinamiento

Las viviendas seleccionadas del segundo grupo consisten con sistema vertical resistente de mampostería de tabique de barro rojo recocido con confinamiento ineficiente o sin diseño sísmico (ver figura 9). Como podemos observar en la figura 9, las ventanas y puertas no están confinadas con dadas y castillos, el segmento de dala sobre las ventanas no está conectado con ningún castillo y no tienen continuidad, además la separación entre castillos excede lo establecido en los reglamentos usados en México para estructuras de mampostería. En la figura 9 a la derecha resulta aún más

obvia la separación excesiva entre castillos y tampoco cuenta con dadas y castillos en algunas esquinas como la que se observa en el balcón. Este tipo de vivienda es clasificado también como mampostería no reforzada debido a que no cuenta con un correcto diseño sísmico. El tercer grupo representativo de viviendas de mampostería no reforzada en Tlajomulco son las que se muestran en la figura 10, con un sistema vertical resistente a base de tabique de barro rojo recocido sin ningún tipo de refuerzo o confinamiento.

Debido al margen de tiempo para desarrollar el proyecto de investigación, el cual es de un año, es necesario contar con un método de evaluación de la vulnerabilidad sísmica muy eficiente, rápida, confiable y validada con anterioridad. Se propone el método calibrado por el primer Autor de este artículo en sus estudios de Maestría y publicado en Preciado (2007) aplicado en la ciudad de Colima, México en la evaluación de 15 edificios históricos y modificado nuevamente en Preciado y Orduña (2014). En sus estudios Postdoctorales, el primer Autor de este artículo modificó nuevamente el método y lo mejoró para ser aplicado de forma más rápida y eficiente a escala territorial en la ciudad de Auckland, Nueva Zelanda en la evaluación sísmica de 250 edificios de mampostería no reforzada. El proyecto de investigación fue patrocinado por el Gobierno de la ciudad de Auckland (Departamento de la Propiedad) y la Universidad de Auckland y aplicado en todos los edificios pertenecientes al Gobierno. El objetivo principal fue el de conocer la vulnerabilidad sísmica y deficiencias sismo-resistentes de todos los edificios pertenecientes al Gobierno (bibliotecas, guarderías, centros recreativos, oficinas, etc.). En etapas subsecuentes de este proyecto de investigación en Tlajomulco, Jalisco se analizaron diferentes propuestas de refuerzo sísmico para las viviendas que obtuvieron una vulnerabilidad sísmica media, alta y muy alta, así como el impacto de los diferentes escenarios de daño sísmico en el desarrollo sustentable de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Estos resultados servirán de base a las autoridades municipales, estatales y el INAH para conocer la magnitud del daño y las pérdidas económicas y sociales que se pueden presentar debido a la ocurrencia de un sismo de intensidad considerable y tomar las medidas correctivas y de preparación ante la presencia de cada uno de los escenarios.

METODOLOGÍA

Para evaluar la vulnerabilidad sísmica del conjunto de vivienda y negocios de mampostería no reforzada de Tlajomulco de Zúñiga se empleará el método de inspección y puntaje, también conocido como índice de vulnerabilidad. Este método de inspección y puntaje es usado para identificar y caracterizar las deficiencias sísmicas potenciales de un edificio o grupo de edificios por medio de una calificación por puntos de cada componente significativa de la estructura. Esto permite al usuario la determinación del índice de vulnerabilidad sísmica. Uno de los métodos más famosos usualmente encontrados en la literatura relevante consiste con el desarrollado por Benedetti y Petrini (1984) y modificado por el GNDT (1990). Éste Método ha sido ampliamente usado en Italia en las últimas décadas y se ha ido actualizando como resultado de experimentación continua (e.g. Aguiar et al. 1994, Preciado, 2007 y Preciado y Orduña, 2014). Parte de la actualización del método consiste con el daño observado en cierto tipo de estructuras (principalmente edificios de mampostería no reforzada) después de terremotos de diferentes intensidades, resultando en una base de datos extensiva sobre daño y vulnerabilidad.

Tabla 3 Parámetros necesarios para el uso del método de inspección y puntaje

| <i>i</i> | Parámetro | <i>Ki A</i> | <i>Ki B</i> | <i>Ki C</i> | <i>Ki D</i> | <i>Wi</i> |
|----------|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| 1 | Organización del Sistema resistente | 0 | 5 | 20 | 45 | 1.0 |
| 2 | Calidad del Sistema resistente | 0 | 5 | 25 | 45 | 0.25 |
| 3 | Posición y cimentación | 0 | 5 | 25 | 45 | 0.75 |
| 4 | Diafragmas horizontales | 0 | 5 | 15 | 45 | 1.0 |
| 5 | Configuración en planta | 0 | 5 | 25 | 45 | 0.5 |
| 6 | Configuración en elevación | 0 | 5 | 25 | 45 | 1.0 |
| 7 | Tipo de cubierta | 0 | 15 | 25 | 45 | 1.0 |
| 8 | Elementos no-estructurales | 0 | 0 | 25 | 45 | 0.25 |
| 9 | Estado de conservación | 0 | 5 | 25 | 45 | 1.0 |

El método propuesto de inspección y puntaje validado anteriormente en Nueva Zelanda y aplicado en este proyecto de investigación se encuentra integrado por 9 parámetros que se muestran en la tabla 3. Estos parámetros han sido compilados en un cuestionario para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica por medio de inspecciones visuales en campo y complementados con trabajo de escritorio. El primer método descrito en Preciado (2007) está integrado por 11 parámetros, de los cuales dos no pueden ser evaluados de forma directa debido a que se necesitan los planos de la edificación, lo cual es considerado como no práctico para evaluar edificios a escala territorial debido a la duración de la evaluación. Como resultado de su continuo uso por muchos investigadores alrededor del mundo, el cuestionario original desarrollado en los 80's por el GNDT ha sufrido algunos cambios principalmente tomando como base experiencias pasadas, también ha sido adaptado a estructuras de ciertas características localizadas en lugares diferentes a Italia. Un ejemplo de ello es el cuestionario desarrollado por Aguiar et al. (1994) usado para evaluar la vulnerabilidad sísmica de algunos edificios de mampostería no reforzada en España.

El uso de la tabla 3 no es una tarea muy complicada, durante las inspecciones de campo se selecciona para cada uno de los 9 parámetros una clase de vulnerabilidad A, B, C o D (A: baja vulnerabilidad, D: alta vulnerabilidad). Dependiendo del parámetro y la clase seleccionada, el método asigna un valor numérico (K_i) que va de 0 a 45 y es afectado por un coeficiente de importancia (W_i) entre 0.25 y 1.0. Este coeficiente fue propuesto por el GNDT tomando en cuenta la opinión de expertos y experiencias pasadas. Este refleja la importancia de cada parámetro en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de la estructura. Como una etapa final, el índice de vulnerabilidad sísmico (I_v) del edificio puede ser obtenido con el uso de la ecuación 1. Al analizar la ecuación 1 y la tabla 3 se puede observar que el índice de vulnerabilidad define una escala de valores que van desde 0 hasta el máximo alcanzable de 303.75 (100%), permitiendo obtener un rango del orden de $0 < I_v < 100$. Este rango de índice de vulnerabilidad puede ser utilizado para establecer una conclusión sobre la clase de vulnerabilidad sísmica del edificio (e.g. baja $I_v < 15$, media $15 \leq I_v < 35$ o alta $I_v \geq 35$). Preciado (2007) y Preciado y Orduña (2014) analizaron exitosamente la vulnerabilidad sísmica de 15 edificios históricos localizados en Colima, México por medio del método desarrollado por el GNDT.

En este estudio, el cuestionario base desarrollado por Aguiar et al. (1994) fue modificado para evaluar construcciones de mampostería antigua (principalmente iglesias y Catedrales) localizadas en una zona altamente sísmica de México. El cuestionario modificado fue aplicado en los 15 edificios por medio de inspecciones visuales para identificar y caracterizar las deficiencias estructurales potenciales, principalmente del sistema sismo-resistente correspondiente a los 11 parámetros del método original. El índice de vulnerabilidad y su correlación con la clase de vulnerabilidad fue obtenido por medio de trabajo de campo complementado con trabajo de escritorio para analizar los planos de las edificaciones y evaluar los 2 parámetros que requieren información relacionada con esta representación gráfica. La evaluación de los 15 edificios tomó aproximadamente 6 meses, incluyendo el análisis histórico inicial, información gráfica (planos) proporcionados por el INAH y visitas técnicas para identificar materiales y conectividad de los diferentes elementos estructurales. Posteriormente, el método fue calibrado nuevamente por el primer Autor de este artículo en orden de contar con dos versiones: una cuando se tiene información detallada tal y como planos y una versión sin planos. Esta última versión puede ser de gran ayuda para evaluar edificios a escala territorial sin contar con información gráfica detallada. La versión sin planos integrada por nueve parámetros fue aplicada exitosamente en la ciudad de Auckland, Nueva Zelanda para evaluar 250 estructuras de mampostería no reforzada en los estudios postdoctorales del primer Autor de este artículo.

$$I_v = \sum_{i=1}^9 K_i W_i \quad (1)$$

La aplicación de la metodología previamente validada y descrita en este trabajo de investigación permitirá obtener la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de mampostería no reforzada a escala territorial del pueblo típico de Tlajomulco de Zúñiga. Estos resultados serán la base para las autoridades municipales, el estado de Jalisco y el INAH para conocer la magnitud del daño y las pérdidas económicas y sociales que se pueden presentar en un futuro debido a la ocurrencia de un sismo de intensidad considerable.

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA A ESCALA TERRITORIAL

Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de esta investigación consiste con la evaluación de la vulnerabilidad sísmica y escenarios de daño en el conjunto de vivienda de mampostería no reforzada de Tlajomulco por medio de métodos de inspección y puntaje del sistema sismo-resistente. En este apartado se muestran los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica a escala territorial tomando en cuenta diferentes viviendas tipo de mampostería no reforzada (ver figuras 7, 8, 9 y 10). La metodología se desarrolló a través de una muestra representativa de alrededor de 180 casas habitación y negocios con diferente configuración en cubierta, sistema resistente vertical, número de niveles (una o dos plantas) y estado de conservación. Las 180 estructuras se seleccionaron tomando en cuenta cuatro manzanas representativas del pueblo típico de Tlajomulco, partiendo desde el centro hasta donde inician los límites, esto con la finalidad de tomar en cuenta el factor socio-económico, ya que conforme se alejan las viviendas o negocios del centro histórico están en peor estado de conservación o no han sido remodeladas y reforzadas como algunos negocios y viviendas del corazón del pueblo. Las cuatro manzanas tipo que se muestran en la figura 11 fueron seleccionadas con el objetivo de que contuvieran viviendas y negocios de mampostería no reforzada de adobe, tabique de barro rojo recocido sin ningún confinamiento y con confinamiento deficiente. Estos tipos de estructuras son las que predominan en todo el pueblo de Tlajomulco de Zúñiga.



Figura 11 Viviendas y negocios de mampostería no reforzada en las cuatro manzanas bajo estudio

En las cuatro manzanas seleccionadas se incluyeron casas habitación y negocios de mampostería típicas de mampostería no reforzada que corresponden con tres grupos principales: viviendas de adobe tradicional con muros aparentes o con aplanado, así como diferentes tipos de cubierta liviana y pesada (figuras 7 y 8); viviendas de tabique de barro rojo recocido con confinamiento deficiente (figura 9) y sin confinamiento (figura 10). También se incluye una iglesia de mampostería no reforzada con configuración estructural completamente diferente a una casa habitación o negocio, esta tiene una mayor antigüedad, diferentes materiales, elementos estructurales y geometría compleja. Al seleccionar las cuatro manzanas se cuenta con diferentes viviendas de mampostería con sistemas de cubierta que incluyen en su mayoría el tipo de cubierta llamada de cuña, que es una estructura abovedada de tabique de barro rojo recocido típica del Estado de Jalisco, con secciones IR de acero a cada metro para rigidizar el sistema. Esta forma estructural de arcos combinada con el perfil de acero permite el confinamiento necesario para que las bóvedas trabajen principalmente a compresión y evitar así los esfuerzos de tensión que generan agrietamiento o la falla de las estructuras de mampostería.

La vulnerabilidad sísmica se evaluó en cada una de las cuatro manzanas seleccionadas tomando en cuenta la vulnerabilidad individual de cada una de las 180 edificaciones (viviendas y negocios) de mampostería no reforzada. La figura 12 y tabla 4 muestran el resumen global de resultados de las cuatro manzanas, clasificando el número de edificaciones en contra de su clase de vulnerabilidad sísmica. Analizando los resultados es posible apreciar en la figura 12 y tabla 4 una clase de vulnerabilidad alta en la mayoría de las edificaciones evaluadas, en 108 de las 180

bajo estudio. Esto se debe a la presencia de un conjunto de vivienda y negocios gobernado por estructuras de mampostería no reforzada de tabique de barro rojo recocido, con un mal estado de conservación o mantenimiento y principalmente, sin ningún confinamiento (ver figura 10). También obtuvieron una vulnerabilidad alta las edificaciones que mostraban un pobre confinamiento (sin diseño sísmico), como las mostradas en la figura 9. Además, las estructuras que obtuvieron una vulnerabilidad alta fue debido a que son de dos niveles y con cubierta de mampostería de cuña, la cual no es considerada como un diafragma rígido como el correspondiente con losas y entrepisos de concreto reforzado.

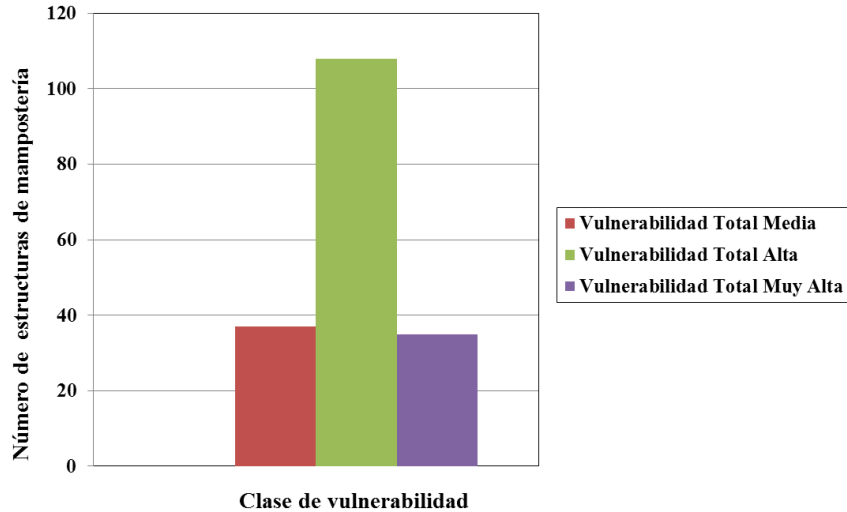


Figura 12 Clases de vulnerabilidad sísmica de las 180 edificaciones de mampostería no reforzada

Tabla 4 Resumen de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las 180 edificaciones de mampostería no reforzada

| Vulnerabilidad | No. de viviendas |
|---------------------------|------------------|
| Baja | 0 |
| Media | 37 |
| Alta | 108 |
| Muy Alta | 35 |
| Total de viviendas | 180 |

Las estructuras de mampostería no reforzada que alcanzaron una clase de vulnerabilidad sísmica intermedia (un total de 37 edificaciones de 180) fueron también aquellas de tabique de barro rojo recocido pero con un sistema de cubierta con diafragma rígido de concreto reforzado y principalmente de un solo nivel o de dos niveles pero con un buen estado de conservación. Las edificaciones que obtuvieron una vulnerabilidad muy alta (35 edificaciones) son las de adobe tradicional en sus diferentes tipologías (ver figuras 7 y 8), ya sea aparente, con aplanado, con cubierta de madera y teja de barro y en casos muy raros como la que se muestra en la figura 8b, con cubierta pesada de mampostería de cuña. En general, ninguna de las edificaciones obtuvo una clase de vulnerabilidad baja, esto se debe a que ninguna de ellas presentaba un buen diseño sísmico o una estructuración adecuada.

Las cuatro manzanas seleccionadas son representativas del conjunto de vivienda de Tlajomulco de Zúñiga a nivel territorial. En cada manzana de las restantes que conforman el total de edificaciones en el pueblo, podemos encontrar los tres grupos representativos. La distribución de manzanas de todo el pueblo puede ser clasificada tomando como referencia el centro del pueblo, ya que conforme se alejan las edificaciones del centro hacia los extremos aumenta la vulnerabilidad sísmica, están en peor estado de conservación o no han sido remodeladas y reforzadas como algunos

negocios y viviendas del corazón del pueblo. Esta tendencia puede representarse en una etapa subsecuente de este proyecto de investigación a nivel territorial por medio de un sistema de información geográfica (SIG) que represente el flujo de clases de vulnerabilidad en todo el pueblo. Al correlacionar las intensidades sísmicas con las clases de vulnerabilidad es posible determinar diferentes escenarios de daño dependiendo de la intensidad del sismo. Estos resultados de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica son la base para las autoridades municipales, el estado de Jalisco y el INAH para conocer la magnitud del daño y las pérdidas económicas y sociales que se pueden presentar en un futuro debido a la ocurrencia de un sismo de intensidad considerable.

CONCLUSIONES

Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco es de gran importancia para la ZMG ya que es base de la industria y comercio, albergando el Aeropuerto Internacional de Guadalajara y la Ruta Franciscana, la cual es considerada tesoro de la época Colonial y patrimonio de la nación. Sísmicamente, el Estado de Jalisco incluyendo Tlajomulco se encuentra en una zona con amenaza sísmica alta, lo cual pone en una situación de susceptibilidad a los edificios de mampostería no reforzada a sufrir gran daño o colapso frágil ante la ocurrencia de un sismo. De aquí la necesidad de evaluar la vulnerabilidad sísmica del conjunto de vivienda y negocios de mampostería no reforzada del pueblo de Tlajomulco. Para realizar la evaluación de la vulnerabilidad sísmica fue necesario un método simplificado de análisis tal y como el de inspección y puntaje. Este método ha sido validado, calibrado y mejorado con anterioridad por el primer Autor de este artículo de investigación en la evaluación de 15 edificios históricos localizados en la zona altamente sísmica de Colima, México y modificado nuevamente en sus estudios Postdoctorales para ser aplicado de forma más rápida y eficiente a escala territorial en Nueva Zelanda en 250 edificios de mampostería no reforzada. El objetivo principal del presente artículo consistió con la evaluación de la vulnerabilidad sísmica del conjunto de vivienda de mampostería no reforzada de Tlajomulco por medio de métodos de inspección y puntaje. Los resultados que se muestran corresponden con la evaluación de la vulnerabilidad sísmica a escala territorial, tomando en cuenta diferentes viviendas tipo de mampostería no reforzada. La metodología se desarrolló a través de una muestra representativa de alrededor de 180 estructuras de mampostería no reforzada. Las viviendas típicas de mampostería no reforzada estudiadas en este proyecto de investigación corresponden con tres grupos principales: adobe tradicional con muros aparentes o con aplanado, así como diferentes tipos de cubierta liviana y pesada; viviendas de tabique de barro rojo recocido con confinamiento deficiente y sin confinamiento.

Las 180 estructuras se seleccionaron tomando en cuenta cuatro manzanas representativas, partiendo desde el centro hasta donde inician los límites, para tomar en cuenta el factor socio-económico, ya que conforme se alejan las viviendas o negocios del centro, están en peor estado de conservación o no han sido remodeladas y reforzadas. La mayoría de las edificaciones obtuvo una clase de vulnerabilidad alta (108 de 180), esto se debe a la presencia de un conjunto de vivienda y negocios gobernado por estructuras de mampostería no reforzada de tabique de barro con un mal estado de conservación o mantenimiento y principalmente, sin ningún confinamiento. También obtuvieron una vulnerabilidad alta las edificaciones que mostraban un pobre confinamiento. Además, las estructuras que obtuvieron una vulnerabilidad alta fue debido a que son de dos niveles y con cubierta de mampostería de cuña, la cual no es considerada como un diafragma rígido. Las estructuras que alcanzaron una clase de vulnerabilidad sísmica intermedia (37 de las 180 evaluadas) fueron también aquellas de tabique de barro pero con diafragma rígido de concreto reforzado y principalmente de un solo nivel. Las edificaciones que obtuvieron una vulnerabilidad muy alta (35) fueron las de adobe tradicional. Ninguna estructura obtuvo una clase de vulnerabilidad baja, esto se debe a que ninguna de ellas presentaba un buen diseño sísmico. Con estos resultados se comprobó la factibilidad y aplicabilidad del método, ya que se esperaba que la mayoría de las edificaciones resultara con una vulnerabilidad alta debido a las deficiencias estructurales del sistema resistente y otros aspectos importantes como estado de conservación, número de niveles y carencia de diseño sísmico. La distribución de manzanas de todo el pueblo puede ser clasificada tomando como referencia el centro del pueblo, ya que conforme se alejan las edificaciones del centro hacia los extremos aumenta la vulnerabilidad sísmica debido al aspecto socio-económico. Esta tendencia puede representarse a nivel territorial por medio de un SIG que represente el flujo de clases de vulnerabilidad. Por medio de una correlación entre las intensidades sísmicas y las clases de vulnerabilidad es posible determinar escenarios de daño sísmico para diferentes intensidades. En etapas subsecuentes de este proyecto se analizaran diferentes propuestas de refuerzo sísmico para las estructuras que obtuvieron vulnerabilidades sísmicas altas, así como el impacto de los diferentes escenarios de daño sísmico en el desarrollo sustentable de la ZMG.

AGRADECIMIENTOS

Al primer Autor de este artículo de investigación le gustaría extender su agradecimiento al Programa para el Desarrollo Profesional Docente PRODEP-SEP, por el apoyo otorgado en el marco de la generación y aplicación innovadora del conocimiento para nuevos Profesores de Tiempo Completo. Se agradece la participación de los Coautores de este artículo, su colaboración y comentarios han sido fundamentales. Además, se extiende un agradecimiento especial a los estudiantes de Licenciatura de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de la Zona Metropolitana de Guadalajara que han colaborado con el proyecto de investigación de forma muy profesional y entusiasta.

REFERENCIAS

- Aguiar, R., Barbat, A., Caicedo, C. and Canas, J. (1994). "Seismic vulnerability of buildings (in Spanish)". Monographs of Seismic Engineering, Published by the International Center of Numerical Methods (CIMNE), Barcelona, Spain.
- ATZJ (2008). Ayuntamiento de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. "Plan intermunicipal de desarrollo Urbano 2008".
- ATZJ (2010). Ayuntamiento de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. "Programa municipal de desarrollo 2010".
- ATZJ (2013). Ayuntamiento de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. "El municipio de Tlajomulco de Zúñiga y sus localidades".
- Bandy, W., Mortera-Gutierrez, C., Urrutia-Fucugauchi, J. y Hilde, T. W. C. (1995). "The subducted Rivera-Cocos plate boundary: Where is it, what is it, and what is its relationship to the Colima rift?." *Geophysical Research Letters*, Vol. 22: pp. 3075-3078.
- Barbat, A. H., Pujades, L. G. and Lantada, N. (2008). "Seismic Damage Evaluation in Urban Areas Using the Capacity Spectrum Method: Application to Barcelona". *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28: 851-865.
- Benedetti, D. and Petrini, V. (1984). "Seismic vulnerability of masonry buildings: Proposal of an assessment methodology." *The Construction industry*, Vol. 18: pp. 66-78, Rome, Italy.
- Carreño, M. L., Cardona, O. D. and Barbat, A. H. (2007). "Urban Seismic Risk Evaluation: A Holistic Approach". *Journal of Natural Hazards*, 40: 137-172.
- Carreño, M. L., Cardona, O. D. and Barbat, A. H. (2012). "New methodology for urban seismic risk assessment from a holistic perspective". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10: 547-565.
- GNDT (1990). "Seismic risk of public buildings (in Italian)." National Council of Investigation, National Group for the earthquake protection, Italy.
- INEGI (2010). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. "Censo de población del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco 2000 y 2010".
- Lantada, N., Pujades, L. and Barbat, A. (2009). "Vulnerability index and Capacity Spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison". *Journal of Natural Hazards*, 51: 501-524.
- MDS-CFE (1993). "Manual de Diseño de Obras Civiles (Diseño por Sismo)". Comisión Federal de Electricidad (CFE), México.

- Preciado, A. (2007). "Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios históricos en el estado de Colima, México." Tesis de Maestría, Universidad de Colima, México.
- Preciado, A. (2011). "Seismic vulnerability reduction of historical masonry towers by external prestressing devices". Doctoral thesis, Technical University of Braunschweig, Germany and University of Florence, Italy.
- Preciado A. and Orduña A. (2014). "A correlation between damage and intensity on old masonry churches in Colima, Mexico by the 2003 M7.5 earthquake." *Journal of Case Studies in Structural Engineering*, 2: 1-8.
- Preciado, A., Orduña, A., Bartoli, G. and Budelmann, H. (2015a). "Façade seismic failure simulation of an old Cathedral in Colima, Mexico by 3D Limit Analysis and nonlinear Finite Element Method". *Journal of Engineering Failure Analysis*, 49: pp. 20-30.
- Preciado, A., Bartoli, G. and Budelmann, H. (2015b). "Fundamental aspects on the seismic vulnerability of ancient masonry towers and retrofitting techniques". *Journal of Earthquakes and Structures*, 9(2): pp. 339-352.
- Pujades, L. G. (2012). "Seismic performance of a block of buildings representative of the typical construction in the Example district in Barcelona, Spain". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(1): 331-349.
- Rodriguez-Lozoya, H., Quintanar, L., Rebollar, C., Gomez, J, Yagi, Y., Dominguez, T., Reyes, G., Javier, C. and Alcantara, L. (2007). "Source characteristics of the 22nd January 2003 M_w 7.5 Tecoman, Mexico, earthquake and its rupture process". *Journal of Geophysical Research*.
- UCOL (1997). "The macro-earthquake of Manzanillo occurred on October 9th, 1995 (in Spanish)." University of Colima (UCOL), Government of the state of Colima and the Mexican Society of Seismic Engineering.
- Yagi, Y., Mikumo, T., Pacheco, J. y Reyes, G. (2004). "Source ruptures process of the Tecoman, Colima, Mexico earthquake of January 22nd, 2003, determined by joint inversion of teleseismic body wave and near-field data." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 5, pp. 1795-1807.
- Zobin, V. M. (2004). "The earthquakes and their hazards: How to survive to them? (in Spanish)." University of Colima, Mexico.

