

El terremoto 19S en Morelos: la experiencia operativa del INEEL en la evaluación del riesgo estructural

Jesús Salvador García-Carrera, M en I,⁽¹⁾ Ulises Mena-Hernández, D en I,⁽¹⁾
Francisco Javier Bermúdez-Alarcón, D en C.⁽²⁾

García-Carrera JS, Mena-Hernández U,
Bermúdez-Alarcón FJ.

El terremoto 19S en Morelos: la experiencia operativa
del INEEL en la evaluación del riesgo estructural.
Salud Publica Mex 2018;60(supl 1):S65-S82.

<https://doi.org/10.21149/9408>

Resumen

El sismo del 19 de septiembre de 2017 en México causó daños catastróficos en el estado de Morelos que afectaron a más de 23 000 inmuebles en prácticamente todos los municipios del estado. Después de un sismo, resultan de gran importancia las acciones de emergencia existentes en la región para dar apoyo a la sociedad, tanto en el rescate de personas atrapadas como en la evaluación de la condición estructural que presentan los inmuebles, y de esta manera, mitigar sus efectos. Las acciones de emergencia requieren de planeación, organización, recursos económicos y materiales y, sobre todo, de trabajo en equipo. Desafortunadamente muchas sociedades no están preparadas para contener grandes desastres, por lo que puede resultar muy difícil hacer frente a una gran emergencia sin las condiciones adecuadas. Durante la emergencia del 19 de septiembre se vivió una situación jamás esperada en el estado de Morelos por los daños provocados por el sismo de magnitud 7.1, con epicentro a menos de 75 km de distancia, que puso a prueba al sistema de emergencia del estado. De manera particular, investigadores del Instituto

García-Carrera JS, Mena-Hernández U,
Bermúdez-Alarcón FJ.

The S19 earthquake in Morelos: the operational experience
of INEEL in the evaluation of structural risk.
Salud Publica Mex 2018;60(supl 1):S65-S82.

<https://doi.org/10.21149/9408>

Abstract

The earthquake of September 19, 2017 in Mexico caused catastrophic damage in the state of Morelos to more than 23 thousand structures in almost all municipalities. After an earthquake, emergency actions in the area are of great importance to support society, rescue trapped people as well as to assess the structural condition of the structures, and in this way, mitigate the negative effects. Unfortunately, society is not prepared to contain major disasters, and it can be very difficult to face a major emergency without the right conditions. The earthquake of September 19, with magnitude 7.1 and epicenter less than 75 km away, caused an emergency never expected in the state of Morelos, because of the damage it produced, which put Morelos' emergency system to the test. In particular, researchers from the National Institute of Electricity and Clean Energies (INEEL) initiated inspection actions in the buildings of their own institute, and subsequently placed themselves under the orders of the Civil Protection office of the State of Morelos to carry out post-seismic inspections of government buildings, schools and, in general,

(1) Gerencia de Ingeniería Civil, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. Cuernavaca, Morelos.

(2) Director General, Coordinación Estatal de Protección Civil Morelos. Cuernavaca, Morelos.

Fecha de recibido: 16 de enero de 2018 • **Fecha de aceptado:** 29 de enero de 2018

Autor de correspondencia: Jesús Salvador García Carrera. Gerencia de Ingeniería Civil, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.
Reforma 113, col. Palmira. 62490 Cuernavaca, Morelos.
Correo electrónico: jsgarcia@ineel.mx

Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) iniciaron acciones de inspección en los inmuebles de su propio instituto, y posteriormente se pusieron a las órdenes de Protección Civil del Estado de Morelos para realizar inspecciones post-sísmicas de los inmuebles de gobierno, escuelas y, en general, de las viviendas de Morelos. La tarea principal del apoyo del INEEL consistió en dictaminar si los inmuebles debían continuar operando o ser habitables, si debían ser desalojados para hacer una revisión detallada o incluso si debían ser demolidos debido al alto riesgo de colapso que presentaban. El apoyo proporcionado por el INEEL no sólo se concentró en la evaluación post-sísmica de los inmuebles, sino que ha sido el inicio de una mayor colaboración con las autoridades del Estado, que resultará en el mejoramiento de los planes de emergencia y, sobre todo, en la actualización de las normas de diseño.

Palabras clave: Morelos; hogares; sismo; daños

the homes of Morelos. The main task was to decide if the buildings were able to be inhabited again, if they should be evicted for a detailed review or if they should be demolished due to their high risk of collapse. The support was not only oriented to the post-seismic evaluation of the buildings, but was the beginning of working days with the State authorities, which will result in the improvement of the emergency plans and, above all, in the update of the design standards.

Keywords: Morelos; homes; earthquake; damage

El martes 19 de septiembre de 2017 (19-S), a las 13:14:40 horas, ocurrió un evento sísmico con magnitud 7.1 que provocó daños a todo tipo de estructuras: edificios habitacionales e industriales, puentes, carreteras, escuelas, iglesias y monumentos históricos, de concreto, acero o mampostería. En otras palabras, el daño fue generalizado en estructuras debido al proceso constructivo utilizado, a la falta de aplicación de reglamentos, al daño que presentaban debido a la falta de mantenimiento o por ampliaciones inadecuadas realizadas a los inmuebles. En estructuras cuya vulnerabilidad es baja, el daño se centró en los elementos no estructurales con niveles de medio a severo, mientras que en estructuras con vulnerabilidad alta, los daños se centraron en elementos estructurales con niveles desde severo hasta el colapso.

En el estado de Morelos se reportó el fallecimiento de 74 personas y el daño en más de 23 000 casas en los 33 municipios que lo conforman; los 10 municipios más afectados fueron Tepalcingo, Tetela del Volcán, Jojutla, Axochiapan, Ayala, Puente de Ixtla, Ocuituco, Tepoztlán, Zacatepec y Tlaquiltenango. El comportamiento de los inmuebles sorprendió a todos los habitantes, porque nunca imaginaron que los efectos del sismo podrían manifestarse tan dramáticamente. Los daños fueron muy variados: desde la aparición de grietas en elementos no estructurales (figura 1a) hasta la falla de elementos estructurales que provocaron el colapso de las construcciones (figura 1b). Desafortunadamente, el daño más recurrente fue el agrietamiento de muros en viviendas de mampostería, debido a las fuerzas cortan-

tes provocadas por el sismo. El nivel de agrietamiento fue tan alto que provocó el colapso de una gran cantidad de viviendas o las llevó a un estado en el que se requiere su demolición (figura 1b).

Así, después del sismo del 19-S, una de las prioridades de las autoridades fue tener certeza de la integridad de las construcciones para salvaguardar la vida de las personas y darles continuidad a las actividades de la población. En este sentido, las inspecciones postsísmicas toman un papel fundamental porque de manera inmediata permiten determinar la condición estructural de los inmuebles. El resultado de la evaluación, que está en función del tipo de daño y de su riesgo (bajo, medio o alto), determina si la estructura puede ser ocupada nuevamente o deshabitarse completamente. En otras palabras, esta evaluación basada en criterios de desempeño permite decidir si el edificio puede tener una ocupación inmediata porque se encuentra en un nivel de seguridad de vida; debe revisarse en un segundo nivel por la condición que presenta (prevención de colapso) o, finalmente, presenta un estado de colapso inminente.¹

Uno de los grandes retos que tienen los gobiernos es contar con grupos de especialistas que tengan la capacidad técnica para aplicar los formatos de evaluación postsísmica, debido al alto grado de responsabilidad que se tiene en su aplicación. En este sentido, la Gerencia de Ingeniería Civil (GIC) del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) cuenta con uno de los pocos grupos de especialistas en el estado, compuestos por profesionistas con grados de maestría



a) Daño medio en muro de carga



b) Colapso de muro de carga

FIGURA 1. DAÑOS EN CASA HABITACIÓN ESTRUCTURADA CON MAMPOSTERÍA

y doctorado en las áreas de estructuras, geotecnia, hidráulica y sismología, con amplia experiencia en el desarrollado de recomendaciones de diseño de estructuras por sismo y viento, y en procedimientos de inspección, diagnóstico y reparación de estructuras del sector energético. A partir del sismo del 19-S, la GIC-INEEL se puso a las órdenes de la Coordinación Estatal de Protección Civil Morelos (CEPCM), así como de las Secretarías de Gobierno, de Innovación, Ciencia y Tecnología, de Obras Públicas o de Administración para realizar la evaluación postsísmica de las construcciones del estado de Morelos.

Las evaluaciones se realizaron a viviendas, escuelas, hospitales o inmuebles de gobierno, tanto en zonas urbanas como rurales. En esta última zona se observó un daño muy extendido en viviendas debido al tipo estructuración y materiales utilizados, lo que comprueba la poca eficiencia de las construcciones hechas a base de muros de adobe, mampostería simple formada con piedra bola de río y pedacería de tabique recocado artesanal, y aquellas construidas siguiendo mínimos o nulos criterios de diseño.

Este artículo pretende describir y recopilar la experiencia obtenida por la GIC-INEEL durante la revisión y evaluación de estructuras derivadas del sismo del 19-S en los diferentes municipios del estado de Morelos.

Sismicidad en el estado de Morelos

El estado de Morelos está expuesto a sismos de fallamiento normal y profundidad intermedia (entre 30 y

100 km), además de sismos generados en la zona de subducción. El sismo del 19-S tuvo la característica de ser un sismo intraplaca, con un mecanismo focal que desarrolló una falla de tipo normal que, si bien es un evento poco frecuente (similar a los generados en el eje neovolcánico),² puede provocar grandes daños en estructuras como casas de adobe, iglesias o edificios muy antiguos, o casas de mampostería simple y no confinada. Esto se debe a los siguientes aspectos: la cercanía a las áreas poblacionales y, sobre todo, el importante componente vertical (figura 2a). En la figura 2b se muestran los epicentros ocurridos en el estado de Morelos registrados desde el año 1990 hasta el mes de octubre de 2017. En esta figura, los círculos en color verde corresponden a sismos con magnitud menor de 4.0, los triángulos naranjas mayor que 4.0 y menor que 6.0, y la estrella en color rojo, los sismos mayores de 6.0, como fue el caso del sismo del 19-S, con una magnitud de 7.1.

De acuerdo con la base de datos del Catálogo de Sismos del Servicio Sismológico Nacional (SSN),³ desde el 1 de enero de 1990 al 31 de octubre de 2017, se han registrado 80 eventos sísmicos con epicentro en Morelos o muy cercano al estado. El sismo de mayor magnitud fue de 7.1, con epicentro a 12 km al sureste de Axochiapan, Morelos; a éste le siguen uno con magnitud entre 4 y 6 grados y 78 sismos con magnitud menor que 4.

Como se aprecia en la figura 2b, a pesar de que la sismicidad en el estado de Morelos es relativamente baja, los estudios más recientes de peligro sísmico indican

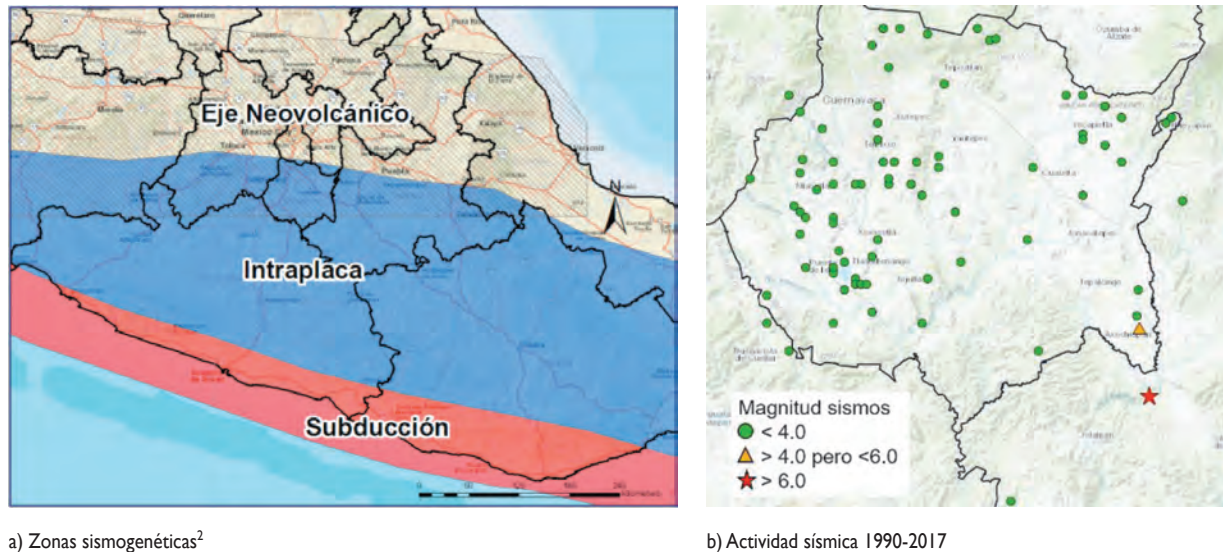


FIGURA 2. INFORMACIÓN SÍSMICA DEL ESTADO DE MORELOS

que pueden desarrollarse aceleraciones a nivel de roca entre 100 y 200 cm/s^2 , lo que lleva a clasificar al estado de Morelos como una zona sísmica alta.²

El capítulo de “Diseño por Sismo” del *Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) 2015 (CDS-MDOC)* divide al país en cuatro zonas sísmicas (figura 3a) en función de las aceleraciones estimadas. Para el estado de Morelos, las aceleraciones estimadas a nivel de roca (a_r^0 en cm/s^2) se encuentran entre 113 a 140 cm/s^2 .²

Por otra parte, en la figura 3b se muestra el mapa preliminar de las aceleraciones máximas en roca que generó el sismo del 19-S.⁴ Cerca del epicentro se registraron aceleraciones entre 130 y 150 cm/s^2 , sobre todo cercanas a los municipios de Axochiapan, Tepalcingo, Tlaquiltenango, Jojutla o Zacatepec.

Sismos que provocaron daños en zonas rurales y urbanas en México

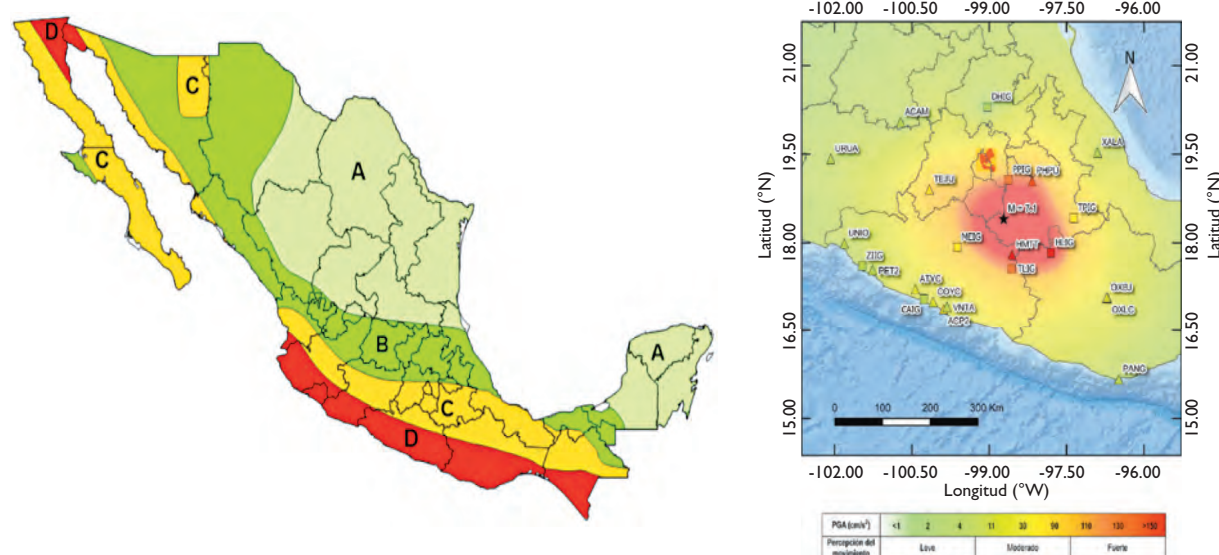
Históricamente han ocurrido grandes sismos en la República mexicana que serán recordados por el número de estructuras dañadas y por el número de personas fallecidas. En el cuadro I se muestran algunos de los sismos de los últimos 100 años que han generado daños importantes en zonas rurales y urbanas en México.

El sismo de Acambay ocurrido el 19 de noviembre de 1912 en el Estado de México (sismo intraplaca) provocó daños en varias viviendas y edificios históricos (figura

4), como la antigua iglesia de Acambay. En Ciudad de México se alcanzaron aceleraciones en roca del orden de 10 cm/s^2 .⁵ La figura 4a muestra el derrumbe de la iglesia de Acambay mientras que la figura 4b muestra una postal del daño de varias viviendas de adobe, elaborada con motivo de este sismo.

El 28 de agosto de 1973, Orizaba, Veracruz, despertó con daños en sus viviendas y edificios, así como con la muerte de algunos de sus habitantes como consecuencia de un sismo intraplaca de magnitud 7.3. El sismo se sintió con fuerza en algunas ciudades de Puebla y Oaxaca, y provocó el colapso o daños fuertes en más de 17 000 inmuebles, entre los que destacan las iglesias de San Juan de Dios (torre y cúpula colapsada), La Concordia, La Soledad y Santa Gertrudis y la Catedral de San Miguel (bóveda y nave central). En Ixtaczoquitlán, la iglesia de la Inmaculada Concepción quedó completamente colapsada, así como otros edificios históricos como el Exconvento de San José, el Teatro Ignacio de la Llave El Toreo, el Edificio de la Packard, entre otros.

La Ciudad de México sufrió uno de los desastres más devastadores de su historia tras el sismo del 19 de septiembre de 1985. Un sismo de magnitud 8.1 originado frente a las costas de Michoacán, a más de 400 km, provocó grandes daños en colonias como Doctores, Guerrero, Roma y Tlatelolco, entre otras (figura 6), lo que trajo como resultado la destrucción total o parcial de más de 2 000 inmuebles y más de 8 000 personas fallecidas.⁶ Este sismo, originado en la zona de subducción entre la

a) Intensidades Programa de Diseño Sísmico (PRODISIS),²b) Mapa de intensidades⁴

Fuente: Servicio Sismológico Nacional

FIGURA 3. INFORMACIÓN SÍSMICA DEL ESTADO DE MORELOS**Cuadro I
ALGUNOS SISMOS HISTÓRICOS EN MÉXICO**

Lugar o epicentro	Fecha	Magnitud	Descripción
Acambay, Edo. de México	19 - nov - 1912	6.9	Más de 100 muertos y daños importantes en edificios históricos
Acapulco, Guerrero	28 - jul - 1957	7.7	Más de 160 muertos, conocido como el sismo del Ángel debido a la caída del Ángel de la Independencia
Orizaba, Veracruz	28 - ago - 1973	7.3	Más de 600 muertos
Petalán, Guerrero	14 - mar - 1979	7.6	Más de 5 muertos, caída de la Universidad Iberoamericana en Ciudad de México
Michoacán	19 - sept - 1985	8.1	8 000 muertos, 30 000 viviendas destruidas y más de 60 000 con daños
Colima	9 - oct - 1995	8.0	58 muertos y daños a casas y edificios
Tehuacán, Puebla	15 - jun - 1999	7.1	20 muertos y daños en 34 000 viviendas, 1 200 escuelas y 800 iglesias
Costa de Colima	21 - ene - 2003	7.6	29 muertos y más de 10 000 viviendas afectadas
Mexicali, B. C.	04 - abril - 2010	7.2	Daños en el sector eléctrico y en carreteras
Ometepec, Guerrero	20 - mar - 2012	7.4	Daños cercanos al epicentro
Petalán, Guerrero	04 - abril - 2014	7.2	Más de 500 viviendas con daños en Guerrero, daños menores edificios públicos, hospitales y centros de salud, así como una escuela
Pijijiapan, Chiapas	07 - sept - 2017	8.2	Casi 100 muertos y cientos de viviendas y decenas de edificios colapsados
Axochiapan, Morelos	19 - sept - 2017	7.1	369 muertos, así como miles de viviendas destruidas y decenas de edificios colapsados y dañados

placa de Cocos y Norteamérica, causó daños también en los estados de Jalisco, Michoacán y Guerrero.

Otro sismo intraplaca que provocó fuertes daños a viviendas, iglesias, edificios históricos y escuelas ocurrió el 15 de junio de 1999, con epicentro a 20 km al sur de

Tehuacán, Puebla. El sismo se percibió en los estados de Morelos, Oaxaca, Guerrero y Ciudad de México. En general, los daños más fuertes se observaron en varios municipios del estado de Puebla, principalmente en casas estructuradas con mampostería de adobe. En la figura 7a



a) Iglesia de Acambay



b) Vista del poblado de Acambay

Fuente de ambas figuras: Centro Nacional de Prevención de Desastres

FIGURA 4. DAÑOS TRAS EL SISMO DE ACAMBAY, ESTADO DE MÉXICO, EN 1912⁵



a) Iglesia de la Inmaculada Concepción



b) Iglesia de la Concordia

Fuente de ambas figuras: Centro Nacional de Prevención de Desastres

FIGURA 5. DAÑOS PROVOCADOS POR EL SISMO DE ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO, EN 1973



a) Edificio colapsado en la colonia Roma



b) Edificio ubicado en esquina

Fuente de ambas figuras: Centro Nacional de Prevención de Desastres

FIGURA 6. DAÑOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO OCASIONADOS POR EL SISMO DE 1985

se muestran los daños por cortante y deslizamiento por cortante de un muro de mampostería, y en la figura 7b se observan severos daños en la fachada de la Iglesia de Nuestra Señora de los Remedios en San Andrés Cholula.⁷

El sismo del 21 de enero de 2003 frente a las costas de Colima tuvo una magnitud de 7.6, con una profundidad de 10 km; fue producto de la interacción de placas en la zona subducción. Este sismo provocó más de 30 víctimas mortales y generó grandes daños a viviendas estructuradas con adobe, mampostería simple o mampostería confinada pero mal construida. De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred),⁸ en el estado de Colima 2 728 viviendas fueron clasificadas con riesgo alto o inseguro para habitar, mientras que 4 150 viviendas fueron clasificadas con riesgo medio o de cuidado, es decir, que no tienen riesgo de colapso pero sí daños que deben ser reparados. En la figura 8 se muestran algunos daños observados durante el sismo de Tecomán y que son comunes en construcciones con las características estructurales mencionadas. La figura 8a muestra los daños en muros por cortante y falta de confinamiento en los extremos de muros y aberturas. Por otra parte, en la figura 8b se muestra una vivienda de mampostería simple, donde no hay elementos que den confinamiento a los muros.

La noche del jueves 7 de septiembre de 2017, un sismo en la zona de subducción frente a las costas de Chiapas, con magnitud de 8.2, provocó el colapso de viviendas en Juchitán, Oaxaca, así como en Pijijiapan, Chiapas. De hecho, este movimiento sísmico fue percibido en más de 15 estados de la República mexicana, así como en países de Centroamérica como Guatemala,

El Salvador, Honduras y Belice. La cifra de muertos por este evento fue aproximadamente de 100. En Chiapas se reportaron 60 000 viviendas con diferentes niveles de daño; en Oaxaca se reportaron 63 335 viviendas que presentaron daños parciales y colapso. Como en otras ocasiones, las viviendas que presentaron daños por este sismo son las estructuradas con adobe o con mampostería simple. Asimismo, hubo severos daños en inmuebles históricos, escuelas y hospitales, entre otros. En la figura 9 se muestran dos estructuras: la primera prácticamente colapsó y la segunda muestra daños fuertes que hacen peligrar la estabilidad de la estructura y, por lo tanto, la hacen inhabitable.

Recientemente, el 19 de septiembre de 2017, el centro del país se vio afectado por un sismo de origen intraplaca que dejó grandes daños en los estados de Morelos, Puebla, Guerrero y Ciudad de México. En el estado de Morelos, los daños se concentraron en los municipios de Cuernavaca, Jiutepec, Cuautla y, fundamentalmente, Jojutla. Sin embargo, se observó mucho daño en localidades donde la mayoría de las construcciones son a base de adobe. Algo que ha sorprendido a la ingeniería mexicana es que, en la Ciudad de México, más de 40 edificios presentaron mecanismos de colapso y más de 3 000 inmuebles sufrieron daños importantes, a pesar de contar con uno de los reglamentos y procedimientos de construcción más estrictos del país.

Evaluación del riesgo estructural de hogares

Después de cualquier evento sísmico, una acción primordial para conocer si una estructura puede o no tener una



a) Vivienda tipo duplex



b) Iglesia de Nuestra Señora de los Remedios

Fuente de ambas figuras: Centro Nacional de Prevención de Desastres

FIGURA 7. DAÑOS POR EL SISMO DE TEHUACÁN, PUEBLA, MÉXICO, EN 1999⁸



a) Daño severo en Villa de Álvarez



b) Daños en mampostería simple

Fuente de ambas figuras: Centro Nacional de Prevención de Desastres

FIGURA 8. DAÑOS EN VIVIENDAS TRAS EL SISMO DE TECOMÁN, COLIMA, MÉXICO. 2003⁸

ocupación inmediata es la evaluación del riesgo estructural con una inspección postsísmica, la cual debe realizarse por personal calificado con experiencia en seguridad estructural. Como la inspección se centra en los elementos estructurales y no estructurales de los inmuebles, no importa el tamaño, tipo de estructura, uso o importancia, ya que el objetivo es evaluar el estado del inmueble y verificar si tiene evidencia de un posible colapso o daños

severos que pongan en riesgo su estabilidad estructural, lo que tiene como consecuencia su desalojo. Si esta evaluación no se lleva a cabo, las personas pueden ingresar o acercarse a una estructura dañada seriamente que puede colapsarse después del sismo, tal y como ocurrió en el edificio ubicado en la esquina Medellín y San Luis Potosí, en la Colonia Roma, en la Ciudad de México. Este edificio colapsó una hora después del sismo sobre personas que



a) Estructura en esquina



b) Casa de mampostería con grandes aberturas

FIGURA 9. DAÑOS ORIGINADOS POR EL SISMO DE CHIAPAS, MÉXICO, 2017

volvieron a ocupar el inmueble y los escombros cayeron sobre personas que caminaban cerca del edificio. En este inmueble, de acuerdo con cifras oficiales, sólo se rescató a seis personas, de las cuales cuatro estaban con vida y dos habían fallecido.

Así, uno de los objetivos en la evaluación estructural de cualquier inmueble es definir si éste puede continuar operando o puede habitarse, o si se requiere su desalojo para evitar tragedias como la del edificio mencionado. Esto se lleva a cabo señalando a los inmuebles con un semáforo de riesgo: verde sin riesgo o riesgo bajo, amarillo con riesgo medio y rojo con riesgo alto.

El riesgo bajo se asigna cuando la estructura no presenta daños estructurales ni daños en elementos no estructurales. El riesgo medio se asigna cuando se presentaron daños en elementos no estructurales, los cuales deben ser reparados, y no existen daños en elementos estructurales visibles, sin embargo, debe realizarse un análisis detallado para verificar su estabilidad estructural. Y, finalmente, el riesgo alto que es cuando se presentan daños evidentes en elementos estructurales como columnas, travesaños y muros de carga, los cuales ponen en peligro la estabilidad estructural.

Ahora bien, las características estructurales pueden variar en los entornos rural y urbano; esto define qué tan vulnerable son las construcciones y cuál es su capacidad de soportar los desplazamientos a los que son inducidas por los sismos. Esto conlleva a tener criterios de evaluación diferentes según los tipos de construcción. En otras palabras, los daños esperados en una vivienda de adobe serán diferentes a los de una vivienda de mampostería confinada, incluso para un edificio estructurado con marcos de concreto o acero con uso habitacional, por lo

que los criterios de evaluación y sus resultados serán diferentes en cada caso.

Características de las construcciones en los ámbitos rural y urbano

Debido al nivel socioeconómico, las construcciones en las zonas rurales suelen ser muy vulnerables como consecuencia de la falta de controles, del uso de determinado tipo de material (adobe o mampostería simple) y, sobre todo, de la inadecuada práctica de la “autoconstrucción”, donde sólo se siguen criterios y recomendaciones de las personas que se dedican a este ramo y desconocen las normativas de diseño estructural y sísmico. En general, la calidad de las construcciones se ve afectada por su adaptación a factores locales como la temperatura ambiente; es decir, una vivienda en costa, donde el clima es caluroso, tendrá muros de gran altura con grandes ventanas o aberturas para una ventilación natural, mientras que en una vivienda en clima frío las alturas de los muros serán bajas y con un menor número de ventanas.

Algo muy importante es que este tipo de viviendas no cuenten con un diseño estructural o con la revisión de un especialista en estructuras para garantizar su comportamiento adecuado ante un evento sísmico. En la figura 10 se muestran dos tipos de viviendas que son altamente vulnerables ante un sismo, cuya construcción es muy común en el ámbito rural. La imagen de la izquierda es una casa con muros de adobe, mientras que la imagen de la derecha es una casa de mampostería simple.

Por otra parte, en el ámbito urbano existe la tendencia de construir las viviendas con mampostería



a) Mampostería de adobe



b) Mampostería simple

FIGURA 10. TIPOS DE CONSTRUCCIONES EN EL ÁMBITO RURAL

confinada o, incluso, llegan a tener una combinación entre muros de mampostería con marcos de concreto o acero. En ocasiones, por su ubicación, sobre todo en lugares con plusvalía, las viviendas llegan a ser diseñadas arquitectónicamente pero no siempre estructuralmente, a pesar de que los reglamentos de construcción exigen que todas las construcciones, aunque tengan un nivel de seguridad convencional, deben diseñarse con criterios sísmicos vigentes.

En la figura 11 se muestran dos tipos de construcciones: 11a es una construcción de departamentos estructurados con base en muros de concreto y 11b corresponde a una torre de departamentos estructurados con marcos de concreto y muros de cortante de concreto. Además, tiene muros diafragma.

Daños en el estado de Morelos

El sismo del 19-S, como se ha comentado, fue un evento de falla normal de profundidad intermedia, que generó ondas con gran contenido de altas frecuencias o periodos cortos, que fue lo que posiblemente afectó a estructuras de baja altura como las casas habitación de pocos niveles. No obstante, los problemas de “autoconstrucción” y falta de mantenimiento, así como otros aspectos relacionados con suelo, incrementaron el nivel de daño.

Así, el estado de Morelos resultó con severas afectaciones: desde el colapso de casas habitación, daños severos en edificios de departamentos, problemas de inestabilidad en taludes, puentes colapsado o dañados, daños extendidos en escuelas, iglesias colapsadas o con daños severos, hasta monumentos históricos derrum-

bados, entre otros. De acuerdo con listas oficiales de la Coordinación Estatal de Protección Civil Morelos (CEPCM), más de 23 000 inmuebles tuvieron daños en el estado de Morelos (cuadro II); de éstos, 7 300 quedaron completamente destruidos en los municipios más afectados: Tetela del Volcán, Jojutla, Ocuilco, Tepalcingo y Tlaquiltenango.⁹

En la ciudad de Cuernavaca, aproximadamente a 80 km de distancia del epicentro, se tuvieron afectaciones en diferentes puntos de la ciudad: desde edificios históricos y emblemáticos hasta edificios de reciente construcción. En la figura 12 se muestran dos estructuras: la figura de la izquierda corresponde a la emblemática Casa Latinoamericana ubicada en el centro de Cuernavaca, construida aproximadamente en 1950, que presentó el colapso del torreón en la parte central de edificio. Este torreón, considerado estructuralmente como un apéndice, colapsó y cayó sobre la recepción y parte del estacionamiento. Por otra parte, la figura de la derecha muestra un edificio estructurado con marcos de concreto para uso habitacional, que presentó problemas de columna corta en varias secciones en planta baja por la adaptación de un andador a un costado del edificio. Ambas estructuras, de diferentes años y, por ende, diferentes criterios de construcción, se vieron afectadas por las fuerzas sísmicas actuantes que provocaron daños severos que las clasifican como en riesgo alto; por lo tanto, no se puede permitir el uso inmediato de los edificios.

Así, tras arduas jornadas de trabajo para la evaluación de los daños en las estructuras en el estado de Morelos por parte de las brigadas de la GIC-INEEL, se muestran algunos de los daños comunes observados en



a) Construcción de departamentos



b) Torre de departamentos en Cuernavaca

FIGURA 11. TIPOS DE CONSTRUCCIONES EN EL ÁMBITO URBANO

Cuadro II
NÚMERO DE VIVIENDAS AFECTADAS POR EL SISMO DEL 19-S EN MORELOS, MÉXICO⁹

No.	Municipio	Hogares destruidos	Hogares con daños	No.	Municipio	Hogares destruidos	Hogares con daños
1	Tetela del Volcán	831	1 058	18	Jiutepec	158	746
2	Jojutla	652	1 157	19	Cuernavaca	152	540
3	Ocuituco	529	511	20	Emiliano Zapata	142	278
4	Tepalcingo	486	2 263	21	Tetecala	111	274
5	Tlaquiltenango	396	510	22	Xochitepec	109	115
6	Totolapan	334	412	23	Tlayacapan	95	211
7	Ayala	333	914	24	Temoac	90	31
8	Yecapixtla	324	413	25	Jonacatepec	82	141
9	Puente de Ixtla	293	816	26	Temixco	82	199
10	Jantetelco	281	191	27	Tlalnepantla	65	211
11	Tlaltizapán	258	566	28	Amacuzac	64	187
12	Axochiapán	243	1 161	29	Zacualpan de Amilpas	55	450
13	Yautepec	242	323	30	Atlatlahucan	49	107
14	Miacatlán	232	170	31	Coatlán del Río	47	106
15	Cuautla	209	194	32	Huitzilac	45	350
16	Tepoztlán	203	744	33	Mazatepec	28	289
17	Zacatepec	190	745		Total	7 410	16 383

los ámbitos rural y urbano que se recopilaron durante esta emergencia.

Entorno rural

Las viviendas en el ámbito rural pueden catalogarse, según su tipo de estructuración (adobe o mampostería

simple), como muy vulnerables y, ante un evento sísmico, podrían presentar daños severos o incluso el colapso. En la figura 13 se muestran dos tipos de viviendas en dos diferentes localidades. La figura 13a muestra el colapso parcial de un muro de mampostería con base en piedra bola juntada, con mezcla de calhidra y arena, además de muros de adobe. Por otra parte, en la figura 13b se



a) Edificio con más de 70 años de construcción



b) Edificio con menos de cinco años de construcción

FIGURA 12. ESTRUCTURAS DAÑADAS EN LA CAPITAL DEL ESTADO DE MORELOS

muestra lo que fue una vivienda con muros de adobe. Ambas localidades estuvieron muy cercanas al epicentro y los daños en este tipo de viviendas dejan evidencia de su vulnerabilidad.

Asimismo, en la figura 14a se aprecia una vivienda con muros de adobe donde se separó el muro por la falta de confinamiento lateral. La figura 14b muestra una vivienda con muros de adobe completamente colapsada. Estas dos localidades, con mayor distancia con respecto al epicentro, también presentaron daños considerados como pérdida total del inmueble; este mismo resultado se aprecia en las viviendas de la figura 13. En ambas figuras (13 y 14) se muestran las fallas típicas en este tipo de estructuras que corresponden al volteo central en muros con gran longitud, grietas verticales y dislocamiento en esquinas, y que se deben a que las fuerzas sísmicas generan un desgarramiento vertical en las esquinas, acción muy parecida a querer separar los muros desde afuera en sentidos opuestos, es decir, las fuerzas sísmicas actúan perpendicularmente al plano tratando de separar el muro corto del muro largo.¹⁰

Lo que se observó en este sismo es que estas estructuras que tienen poca resistencia a fuerzas laterales tienden a fallar localmente y presentar problemas de inestabilidad, lo que tiene como resultado el colapso de la vivienda o un daño tan severo que no puede ser ocupada y requiere demolición.

Entorno urbano

Ahora bien, pensar en el entorno urbano hace referencia a construcciones mejor planeadas con sistemas estruc-

turales menos vulnerables; sin embargo, durante las evaluaciones post-sísmicas elaboradas por las brigadas de la GIC-INEEL en la zona metropolitana del valle de Cuernavaca, que abarca municipios como Cuernavaca, Jiutepec, Temixco, Emiliano Zapata y Xochitepec, se encontraron viviendas con daños medios y severos, hasta inmuebles colapsados. Los daños observados no sólo fueron en casa habitación de uno o dos niveles, sino también en edificios departamentales de cuatro a seis niveles. Según la clasificación de riesgo discutida anteriormente, estos daños se consideraron como riesgo alto o edificación insegura, motivo por el cual no puede haber ocupación hasta haber hecho las reparaciones y reforzamiento correspondientes.

Por otra parte, en municipios fuera de esta zona que pueden ser considerados como urbanos debido al número de habitantes y a diversos aspectos socioeconómicos, como Jojutla y Zacatepec, los daños encontrados fueron severos y ponían en riesgo la estabilidad estructural, hasta el colapso de las viviendas. Desafortunadamente, muchos de estos problemas estuvieron asociados con estructuras con piso suave o planta baja débil, falta de confinamiento tanto en elementos horizontales como verticales, irregularidad torsional, discontinuidad en muros, cambios de rigidez estructural, plantas alargadas y malos o insuficientes muros en una dirección. En general, los problemas anteriores se observaron en muchas de las viviendas revisadas por las brigadas de la GIC-INEEL.

En la figura 15 se muestran dos viviendas cuyos muros de carga fallaron por cortante. En la figura de la izquierda se aprecia que la falla del muro continúa



a) Vivienda en Tepalcingo, Morelos



b) Vivienda en Axochiapan, Morelos

FIGURA 13. ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA SIMPLE (PIEDRA BOLA Y ADOBE)



a) Vivienda en Ocuituco, Morelos



b) Vivienda en Tlayehualco, Tlaquiltenango, Morelos

FIGURA 14. ESTRUCTURAS DAÑADAS EN EL ENTORNO RURAL DEL ESTADO DE MORELOS



FIGURA 15. MUROS DE CARGA CON FALLA POR CORTANTE

al elemento de concreto (castillo), lo que deja ver que una práctica incorrecta en la construcción es aparentar castillos o columnas falsas mediante el aplanado.

En la figura 16 se muestran dos viviendas tipo residencial que desarrollaron mecanismos de colapso al no resistir las fuerzas laterales. En estas viviendas, como se aprecia, se presumen arquitectónicamente bien planeadas, sin embargo, el resultado fue el mismo.

También se observó daño severo en edificios multifamiliares de cinco niveles (cuatro departamentos en cada nivel) estructurados con base en muros de carga de mampostería confinada, ubicados en la parte noroeste de la ciudad. Estos edificios, separados por la barranca del Salto de San Antón (con una distancia radial entre

ellos menor a 700 m), presentaron daños severos que pusieron en peligro la estabilidad estructural del sistema y, por lo tanto, se clasificaron de manera inmediata como lugares inseguros para habitar y debían ser desocupados. Sin embargo, estos edificios cumplieron con el objetivo principal de diseño: no colapsar a pesar de quedar seriamente dañados.

Se observó que en ambas estructuras los daños más severos se presentaron en los primeros dos niveles, con grietas por cortante y deslizamiento. Estas grandes grietas por cortante penetraron hasta los elementos de concreto (castillos) como consecuencia de falta de confinamiento en el acero horizontal. Este tipo de mecanismos de colapso es muy común en estas



FIGURA 16. VIVIENDAS RESIDENCIALES COLAPSADAS



FIGURA 17. EDIFICIOS MULTIFAMILIARES EN CUERNAVACA, MORELOS

estructuras debido a que se presentan grietas diagonales por esfuerzos de tensión perpendicular. Por esta razón, los muros de mampostería fallan debido a la baja resistencia a la tensión comparada con su resistencia a la compresión.

Respuesta social del INEEL para la evaluación del riesgo estructural

El sismo del 19-S provocó tal cantidad de daños que prácticamente hubo afectaciones en todo el estado de Morelos (cuadro II). Desafortunadamente, la magnitud de la tragedia sorprendió y superó a todos los niveles de gobierno debido a que no se tenía registro de un evento similar en la zona centro del país. El sismo más reciente que provocó una gran afectación fue en 1985, y sus mayores daños se concentraron prácticamente en la Ciudad de México.

Ante la magnitud de la tragedia, se conformaron muchos grupos que prestaron un servicio social para evaluar una gran cantidad de estructuras: desde casas habitación de uno a tres niveles, edificios departamentales, escuelas públicas y privadas, hospitales y edificios del gobierno municipal, estatal y federal, hasta puentes, laderas y cerros inestables. En un nivel mayor de inspección se utilizó la instrumentación estructural para conocer el comportamiento de edificios emblemáticos, puentes carreteros y cerros inestables, con la finalidad de emitir recomendaciones basadas en datos experimentales que permiten reducir incertidumbres.

Por otra parte, grupos de especialistas (en ingeniería estructural, geotecnia e ingeniería sísmica) se unieron a las inspecciones post-sísmicas con el objetivo de evaluar y, sobre todo, verificar los niveles de riesgo de los inmuebles revisados. Desafortunadamente, debido a la magnitud del sismo, muchos grupos de voluntarios evaluaron inmuebles con resultados incorrectos, es decir, algunos inmuebles que habían sido declarados con riesgo alto o inseguro tenían daños estructurales que no eran tan severos o sólo en elementos no estructurales que no ponen en peligro a la estructura y a sus ocupantes; en el caso contrario, en ciertos casos, en los que las estructuras se evaluaron sin daños, se confirmó que la estabilidad estructural estaba en riesgo. Esto provocó mucha desconfianza en los resultados de las primeras inspecciones, por lo que se tuvo que volver a revisar la mayoría de los inmuebles.

Un fenómeno muy recurrente en todas las zonas afectadas es que, a pesar de determinar inmuebles con un riesgo alto, los propietarios continuaron viviendo en ellos. Por ejemplo, en la figura 18 se muestran viviendas que fueron declaradas con riesgo de colapso por los daños severos en muros de carga y que los habitantes continuaron ocupando.

Los inmuebles que deben permanecer sin daño o daño mínimo en los elementos no estructurales son las escuelas. En este sentido, las inspecciones realizadas por los investigadores de la GIC-INEEL reportaron daños severos en varias escuelas, con la recomendación de demolición para varias de ellas. El daño más común



a) Vivienda de un nivel



b) Vivienda de dos niveles

FIGURA 18. CASAS CON RIESGO DE COLAPSO



FIGURA 19. DAÑOS EN ESCUELAS EN MORELOS (EFECTOS DE COLUMNA CORTA)

encontrado en las escuelas revisadas fue por efecto de columna corta, asociado con estructuras con más de 40 años de construcción, donde la reparación y rehabilitación de las estructuras serían más costosas que volver a construir, pues su reparación debe cumplir la normatividad vigente de diseño sismorresistente y estructural. En la figura 19 se muestran dos escuelas, una en Jojutla y otra en Zacatepec, que presentaron problemas por efecto de columna corta, así como daños severos en muros diafragma de mampostería.

Los dictámenes técnicos elaborados por los investigadores de la GIC-INEEL han ayudado a aclarar inspecciones realizadas en escuelas en municipios de Cuernavaca, Jojutla, Cuautla, Huitzilac o Zacapetec, lo que permite a las autoridades correspondientes tomar la decisión de reconstruirlas o demolerlas. Varias escuelas en las que ya había sido entregado un dictamen estructural donde se manifestaba que no existía ningún riesgo para estudiantes y profesores, fueron nuevamente evaluadas y se tuvo el resultado de que, si bien no estaba comprometida la estabilidad estructural, sí existe el riesgo de una posible caída de un muro o el desprendimiento de aplanados que pueden lastimar a los ocupantes.

La mayoría de los daños observados en escuelas, viviendas, iglesias, edificios históricos, etc., tuvieron un mismo patrón o comportamiento. La aplicación de normas ha evolucionado y, desafortunadamente, para sistemas constructivos realizados hace más de 50 años éstas no eran tan estrictas y, sobre todo, eran muy poco utilizadas. Hablando de materiales, en general se han utilizado y se utilizan sin controles de calidad, y en su

mayoría son artesanales, como el adobe o el tabique rojo recocado.

Uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT)

Una de las experiencias valiosas que dejó este evento sísmico fue el aprovechamiento de nuevas tecnologías en los trabajos de inspección. El uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) o drones para acceder a inmuebles con riesgo de colapso o de gran altura facilitó la realización de la evaluación post-sísmica. Con los drones se pueden obtener imágenes y videos de alta calidad que permiten tomar decisiones de manera inmediata y generar modelos en tercera dimensión para análisis más detallados.

Esta tecnología fue aplicada por los investigadores de la GIC-INEEL en varias inspecciones en calles de Jojutla y en inmuebles de Jiutepec o Cuernavaca. Con los drones se recorrían muchas calles en poco tiempo, identificando de manera inmediata elementos que podrían provocar explosiones, como tanques estacionarios.

En la figura 20a se muestra una imagen de los daños observados con drones en el torreón de la Casa Latinoamericana en Cuernavaca. Con la información obtenida por los drones se pueden identificar zonas donde hay elementos colapsados y su nivel de colapso, lo que es determinante en la decisión de acceder al lugar para realizar tareas de rescate de persona o inspecciones, y en la planeación de los trabajos de demolición. Por otra parte, la figura 20b muestra un recorrido aéreo por una calle de Jojutla. Este recorrido permitió, además de reconocer el número de viviendas



a) Daños en un edificio en Cuernavaca



b) Daños observados en una calle en Jojutla

FIGURA 20. USO DE DRONES PARA LAS INSPECCIONES POST-SÍSMICAS

afectadas rápidamente, ver el daño exterior de uno de los edificios más altos de la ciudad, que albergaba un centro comercial, un gimnasio y cines.

Conclusiones

El sismo de intraplaca del 19-S causó severos daños en varios estados del centro del país y la muerte de 369 personas (74 en el estado de Morelos). Históricamente, el sismo del 19-S ha sido el evento que ha provocado la mayor cantidad de daños y víctimas en Morelos. Los sismos que se han percibido en el estado generalmente provienen de la zona de subducción; sin embargo, por la distancia y la atenuación de las ondas sísmicas, no han causado tantos daños como el este sismo.

Es importante recalcar que Morelos corresponde a una zona de alta sismicidad (zona C) conforme al CDS-MDOC.⁴ Por tal motivo, todas las estructuras deben diseñarse con criterios sismorresistentes de acuerdo con las normas de diseño y reglamentos de construcción vigentes.

Sismos del pasado han dejado en evidencia que las construcciones con base en muros de adobe, mampostería simple y con pobre confinamiento, así como aquéllas con omisión de la aplicación de un diseño estructural, son altamente vulnerables a los sismos. Se ha visto que los sismos como el ocurrido en Acambay en 1912, Orizaba en 1973, Tehuacán en 1999 y este último sismo, Axochiapan en 2017, liberan una gran energía y generan fuertes aceleraciones en roca en poblaciones cercanas, lo que causa daños importantes.

La evaluación postsísmica de cualquier estructura es de suma importancia para determinar el riesgo y definir si el inmueble puede tener una ocupación inmediata, es decir, conforme a una evaluación del daño en elementos estructurales se debe determinar si es de riesgo bajo, medio o alto. Así, según el tipo de riesgo se debe tomar la decisión de ocupar el inmueble sin problemas, reparar los daños y, posteriormente, volver a hacer uso de la estructura; o desocuparla por el riesgo de colapso e, incluso, definir si se trata de una pérdida total y debe ser demolida.

El apoyo social que brindó la GIC-INEEL a la sociedad del estado de Morelos para las evaluaciones postsísmicas de estructuras, tanto de dependencias de gobierno como privadas, y a particulares, dejó en evidencia un alto compromiso profesional por parte de los investigadores que, con base en su experiencia en el área de ingeniería estructural, geotecnia e ingeniería sísmica, determinaban el estado de daño y definían el riesgo de la estructura.

El uso de tecnologías en vehículos aéreos no tripulados o drones permitió tener una mejor organización para el desarrollo de las inspecciones postsísmicas; se conoció el nivel de daños desde una vista aérea para determinar el número de brigadas necesarias para evaluar un número de hogares en una zona. Además, con esto se pudo tener una mejor referencia de los daños en zonas inaccesibles y de alto riesgo sin exponer a ningún investigador.

Así, la sociedad reconoció el trabajo de las brigadas de apoyo en las inspecciones y evaluaciones post-

sísmicas a diferentes estructuras en varios municipios del estado de Morelos, lo que trajo como resultado la tranquilidad y seguridad de las personas que viven o trabajan en determinado inmueble para continuar con sus labores cotidianas. Cuando el resultado obtenido de la evaluación determinaba un riesgo alto, sin importar el tipo de estructura, se daba aviso a los propietarios, así como a la autoridad competente, para salvaguardar siempre la seguridad y bienestar de las personas y así evitar una posible tragedia.

Para terminar, las arduas jornadas de trabajo durante las inspecciones postsísmicas, así como los estudios instrumentales para inmuebles con un carácter histórico importante, dejan en evidencia el compromiso social por parte de la GIC con la sociedad del estado de Morelos. Ante una emergencia, los investigadores anteponen su profesionalismo para brindar el apoyo necesario a través del conocimiento adquirido por años de experiencia en cada una de las disciplinas de ingeniería con las que cuenta la GIC, experiencia que dio tranquilidad y seguridad a la población y, por supuesto, a las dependencias que buscaron el apoyo interinstitucional ante un evento sísmico que dejará una cicatriz en nuestro estado, pero que con el tiempo se atenuará y aportará un conocimiento importante tanto en el área de estructuras, geotecnia e ingeniería sísmica, como el ámbito social en los entornos rural y urbano, para estar mejor preparados ante otro evento sísmico que se presente.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los investigadores, personal de *outsourcing* y becarios de la Gerencia de Ingeniería Civil del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (GIC-INEEL) por el apoyo brindado en las brigadas de evaluación e inspecciones postsísmicas a diferentes instituciones gubernamentales, educativas, privadas, así como a particulares, durante la etapa

de emergencia posterior al sismo ocurrido el 19 de septiembre de 2017.

Declaración de conflicto de intereses. Los autores declararon no tener conflicto de intereses.

Referencias

1. Terán GA. Uso del análisis no lineal como herramienta para enriquecer la práctica de la ingeniería sísmica en México. En: XIII Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 2014.
2. Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Comisión Federal de Electricidad. Diseño por Sismo. En: Manual de Obras Civiles. Comentarios. 5ª Edición. México: INEEL, CFE, 2015.
3. Servicio Sismológico Nacional. SSN: Catálogo de Sismos. [internet]. [citado oct 31, 2017]. Disponible en: <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
4. Servicio Sismológico Nacional. Reporte especial. Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla – Morelos (M 7.1) México: Instituto de Geofísica, UNAM, 2017.
5. Servicio Sismológico Nacional. Sismos Históricos. Reporte especial. Sismo de 1912 en Acambay, Edo. de México (M~6.9). México: Instituto de Geofísica, UNAM, 2017.
6. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Registro de daños en infraestructura y líneas vitales ocasionados por sismo y viento (año 2003-2015). México: Cenapred, Dirección de Investigación, feb 2016.
7. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Informes técnicos: El sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999. México: Cenapred, Área de Ingeniería Estructural y Geotecnia, 1999.
8. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Informes técnicos: El sismo de Tecmán del 21 de enero de 2003 (Me 7.6). México: Cenapred, Dirección de Investigación, 2003.
9. Coordinación Estatal de Protección Civil Morelos. Censo oficial de viviendas dañadas en el estado de Morelos, sismo 19 de septiembre de 2017. Cuernavaca, Morelos: CEPCM, Dirección de Técnica y de Investigación, 2017.
10. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Cartilla breve para refuerzo de la vivienda rural de autoconstrucción contra sismo y viento. México: Cenapred, 2014. ñadas en el estado de Morelos, sismo 19 de septiembre de 2017. Coordinación Estatal de Protección Civil Morelos. Dirección de Técnica y de Investigación. Cuernavaca, Morelos: nov 2017 Cenapred. Cartilla breve para refuerzo de la vivienda rural de autoconstrucción contra sismo y viento. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2014.