

ASSESSMENT OF THE SEISMIC VULNERABILITY OF HOUSING IN SILTEPEC, CHIAPAS (MEXICO)

J. Alejandro Ruiz Sibaja ⁽¹⁾, Eber A. Godínez Domínguez ⁽²⁾, Sergio A. Díaz Alvarado ⁽³⁾, O. Emmanuel Pereyra Roblero ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Profesor-Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Boulevard Belisario Domínguez Km. 1081, Terán, 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. asibaja@unach.mx

⁽²⁾ Profesor-Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Boulevard Belisario Domínguez Km. 1081, Terán, 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. eber.godinez@unach.mx

⁽³⁾ Profesor-Investigador, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Cunduacán-Jalpa Km. 1, Col. La Esmeralda, 86690, Cunduacán, Tabasco. aberto.diaz@ujat.mx

⁽⁴⁾ Director de GPR Construcciones, Calle Central Sur N° 5, 29050, Col. Reforma, 29010, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. emmanuelpereyra117@gmail.com

Received: March 2023. Accepted: August 2023. Published: September 2023

ABSTRACT

In this paper, the seismic vulnerability of 74 housing located at 13 city blocks in the urban center of Siltepec, Chiapas, Mexico, have been assessed. For this purpose, two methods are used: 1) the typological classification according to the European Macro Seismic Scale (EMS-98) and 2) the Vulnerability Index Method (VIM) of RISK-UE. The latter is a refined method of the first which quantifies the construction factors in a better way and the behavior of every building which directly affect the estimation of their vulnerability. The results obtained are presented in seismic vulnerability tables and maps, and it is shown that, in the studied area, there are High Vulnerability Class Buildings (B) and Very High Class (A). It is observed that the seismic vulnerability assessment, according to the EMS scale criteria, is significantly improved when applying the VIM which perceives an increase in Class A constructions (from 26 to 44) and a decrease in Classes B (from 26 to 20) and C (20 to 10) according to the EMS evaluation.

Keywords: Seismic vulnerability, earthquakes, housing, evaluation methods, urban center.

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE VIVIENDAS DE SILTEPEC, CHIAPAS (MÉXICO)

RESUMEN

Se presenta un estudio en que se evalúa la vulnerabilidad sísmica de 74 viviendas de 13 manzanas del núcleo urbano de Siltepec, Chiapas, México. Para este fin, se emplean dos métodos: 1) el basado en la clasificación tipológica según la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98) y, 2) el del Índice de Vulnerabilidad Sísmica (MIV) de RISK-UE. El segundo método es un refinamiento del primero, ya que cuantifica mejor los factores de construcción y comportamiento de cada edificio, los cuales inciden directamente en la estimación de su vulnerabilidad. Los resultados obtenidos se presentan en tablas y figuras que resumen la vulnerabilidad sísmica estimada, y muestran que en la zona estudiada predominan las viviendas

con clases de vulnerabilidad alta (B) y muy alta (A). Se observa que la estimación de la vulnerabilidad sísmica aplicando los criterios de la Escala EMS mejora significativamente al aplicar MIV, ya que se detecta un incremento de construcciones de clase A (de 26 a 44) y una disminución de las de clase B (de 26 a 20) y C (de 20 a 10), respecto a la evaluación realizada con EMS.

Palabras clave: Vulnerabilidad sísmica, sismos, viviendas, métodos de evaluación, núcleo urbano.

1 Introducción

El análisis de vulnerabilidad sísmica de centros urbanos se centra principalmente en el pronóstico de los daños, y para ello es necesario conocer: 1) la distribución espacial y las características estructurales de los edificios, relacionadas con su comportamiento dinámico y, 2) las condiciones del terreno, que modifican la respuesta sísmica del sitio. Frecuentemente, las construcciones desplantadas en los centros históricos de ciudades de México, así como las localizadas en los barrios marginales, expuestas a terremotos, son las que presentan mayor riesgo sísmico. Esto se debe a que gran parte de sus edificios tienen una alta vulnerabilidad sísmica, pues están contruidos con materiales de baja calidad (por ejemplo, Ruiz et al., 2011, 2015 y 2019; Sánchez-Tizapa et al., 2017; Godínez-Domínguez et al., 2021), sin diseño sísmico adecuado, deteriorados por el envejecimiento (inadecuado mantenimiento), por reformas inadecuadas o por su vecindad con edificaciones de distinto material, configuración y altura. Este último rubro puede favorecer el golpeteo entre estructuras adyacentes, provocando mecanismos que conducen a colapsos estructurales parciales o totales, no únicamente en edificios de varios niveles, sino también en viviendas unifamiliares de pocos niveles (por ejemplo, Godínez-Domínguez et al., 2021; Tena-Colunga & Sánchez-Ballinas, 2022).

La vulnerabilidad sísmica de un conjunto de edificios es su predisposición intrínseca a sufrir daños por sacudidas sísmicas de una severidad determinada (Hill & Rossetto, 2008; FEMA, 2020) y, por tanto, es una medida de su capacidad resistente frente a estos eventos. Como se mencionó, la vulnerabilidad es una característica propia de las edificaciones que depende de la calidad de su diseño, materiales y construcción. Mediante la evaluación de su vulnerabilidad, se determina el grado de daño esperable en un edificio, para cada nivel del movimiento sísmico del terreno.

En general, se utilizan dos métodos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica: 1) los empíricos, que proceden del área de la sismología, y se basan en estudios post-sismo, donde los daños a distintos tipos de edificaciones, se relacionan con el movimiento del suelo, estimado o medido. Estos métodos ponderan la acción mediante un solo parámetro, normalmente la intensidad macrosísmica o la aceleración pico del terreno, PGA (Peak Ground Acceleration, por sus siglas en inglés), y determinan las características resistentes de las construcciones mediante clases o índices de vulnerabilidad (se denominan también macrosísmicos o uniparamétricos, Lantada et al., 2010); 2) los deterministas o analíticos, que provienen del campo de la vulnerabilidad estructural y de la ingeniería sísmica, donde se calcula el comportamiento sísmico a través del análisis dinámico de estructuras individuales y de edificios tipo, como hace HAZUS, un software de estimación de riesgos desarrollado por FEMA (2020). Estos métodos cuantifican la acción mediante espectros de demanda y la resistencia sísmica mediante

parámetros con significado físico directo, tal como los espectros de capacidad (que también se denominan espectrales o multiparamétricos). En este estudio, se recurre al uso de métodos empíricos, por lo que se describen con más detalle en secciones posteriores.

En el presente trabajo se evalúa la vulnerabilidad sísmica de un conjunto de estructuras pertenecientes a 13 manzanas (un total de 74 viviendas) del centro urbano de Siltepec, para las cuales se realizó una inspección y clasificación detallada de las viviendas, con el propósito de analizar la distribución espacial de su vulnerabilidad.

2 Antecedentes

Para evaluar la vulnerabilidad sísmica de una parte del núcleo urbano de Siltepec (Chiapas), localidad ubicada al sur de México, se ha optado por utilizar dos métodos empíricos que han mostrado su capacidad para el estudio de centros urbanos o de una parte de estos: 1) el método basado en la Escala de Intensidad Macrosísmica Europea EMS-98 (Grünthal, 1998), en lo sucesivo MEMS y, 2) el Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV) del proyecto RISK-UE (Milutinovic & Trendafiloski, 2003).

El MEMS es un método sencillo que asigna clases de vulnerabilidad a los edificios, considerando esencialmente su tipología constructiva, el material predominante usado en la construcción del sistema resistente y el nivel de diseño. La metodología MIV consiste en obtener un índice de vulnerabilidad característico de cada edificio, V_i^* , en función de la calidad estructural, a partir de las clases de vulnerabilidad de la EMS-98, y tener en cuenta factores modificadores tales como: calidad de la ejecución material, posición, geometría en planta y en altura, etc. Esto ofrece la ventaja de la simplicidad y al mismo tiempo permite considerar numerosas incertidumbres ligadas a cada edificio en particular. Sin embargo, es evidente que existe subjetividad intrínseca en ambas metodologías.

Tabla 1. Clases y tipos de vulnerabilidad según la escala Macrosísmica Europea 98.

Clase de vulnerabilidad	Tipo de vulnerabilidad
A	Muy alta
B	Alta
C	Media
D	Baja
E	Muy baja
F	Casi nula

Fuente: elaboración propia

La Escala Macrosísmica Europea (EMS-98) establece seis clases de vulnerabilidad, ordenadas de menor a mayor resistencia sísmica (A, B, C, D, E, F). Estas clases establecen las características más probables de resistencia ante fuerzas sísmicas, de cada tipología constructiva estudiada (ver Tabla 1), aunque considera la posibilidad de que diferentes tipos de edificios pueden pertenecer a una misma clase de vulnerabilidad y también que edificios de una tipología pueden presentar respuestas sísmicas diferentes (Barbat et al., 2010) y por tanto vulnerabilidades diferentes.

La escala EMS considera cuatro categorías de tipologías, en función de la construcción de su sistema resistente: mampostería, concreto armado, acero y madera. Dentro de cada categoría considera diversos tipos de edificios caracterizados en función de los materiales empleados en su construcción y de las características de diseño, 15 tipos en total. Cada tipología de edificios admite diversos rangos posibles de pertenencia a clases de vulnerabilidad definidos como: más probable, probable y menos probable o excepcional.

Dentro de las clases de vulnerabilidad decrecientes consideradas (A-F), en función del tipo de construcción, la A representaría una vivienda de adobe, la B una construcción de ladrillo y la C una estructura de concreto armado sin diseño sismorresistente (DSR) o de mampostería con losa maciza de concreto reforzado. Las clases D y E reflejarían descensos de la vulnerabilidad en función de un mejor DSR y la F representaría una estructura con la más alta resistencia sísmica.

El MEMS presenta, además, siete aspectos que afectan a la vulnerabilidad de una estructura, junto con el tipo de construcción: calidad y fabricación, estado de preservación, regularidad, ductilidad, localización, refuerzo y diseño sismorresistente. Al contrario que en el Método del Índice de Vulnerabilidad, en el MEMS no se cuantifican estos parámetros, sólo se indica que, en función de la opinión de los expertos, la acumulación de fortalezas o debilidades pueden hacer cambiar su clasificación.

La vulnerabilidad de un edificio se puede definir también mediante un índice de vulnerabilidad numérico, como se hace en el MIV, desarrollado en el proyecto RISK-UE (Milutinovic & Trendafiloski, 2003). En este método, se cuantifica la acción sísmica en términos de la intensidad macrosísmica y la resistencia sísmica del edificio se evalúa en términos de un índice de vulnerabilidad, V_I . Este índice se encuentra entre 0 y 1, siendo sus valores más altos para los edificios más vulnerables y los más bajos para edificios que resisten sismos fuertes. Es una metodología simplificada, resultado de la combinación del método del índice de vulnerabilidad y de la EMS-98.

El método es robusto, sencillo de aplicar, y permite cuantificar, con un alto nivel de detalle, la vulnerabilidad de los edificios a partir de la calidad del sistema estructural y de la influencia de otros factores (nivel de diseño, la geometría en planta y en altura, la posición con edificios colindantes o el estado de conservación del edificio) que pueden modificar su comportamiento sísmico.

En el MIV se clasifica primero a los edificios en tipologías estructurales caracterizadas mediante índices de vulnerabilidad básicos V_I^* o tipológicos. Las características particulares de cada edificación, entre las que se hallan el número de pisos y el nivel de protección sísmica, se tienen en cuenta mediante

modificadores de este índice básico. Cuando un edificio se corresponde con alguno de los tipos definidos en la matriz de estructuras de esta metodología, se le asigna el índice de vulnerabilidad V_I^* correspondiente al valor más probable. Posteriormente, a este valor se le suman índices modificadores para adaptarlo a las características particulares de cada edificación. Una primera modificación del índice de vulnerabilidad básico deberá tener en cuenta el período de construcción, así como otras características constructivas y el cumplimiento de la normativa sismorresistente vigente en esa época. Modificaciones adicionales se basan en las características geométricas y de posición propias de cada edificio. Por lo tanto, el índice de vulnerabilidad final, V_I , más probable de cada edificio particular se calcula mediante la ecuación 1 (Lantada et al., 2010).

$$V_I = V_I^* + \Delta V_R + \sum_{i=1}^n \Delta V_{C_i} \quad (1)$$

En la ecuación 1, ΔV_R representa los modificadores regionales y ΔV_{C_i} se refiere a los modificadores por comportamiento. El modificador ΔV_R se introduce para tomar en cuenta la calidad particular de la construcción del edificio a un nivel regional. El modificador ΔV_{C_i} se asigna sobre las bases de las características específicas de cada edificio, y considera los efectos debidos a diferentes modificadores de comportamiento: número de pisos, estado de conservación (mantenimiento), morfología del suelo, piso blando, irregularidad de la estructura, cimentación y posición en el conjunto de edificios.

3 Características generales del sitio de estudio

Siltepec es un municipio localizado en región VII (Sierra) Madre de Chiapas, la cabecera municipal (del mismo nombre) se encuentra a 150 km de la costa de Chiapas, sus coordenadas geográficas son 15° 33', 27.20" N y 92° 19' 23.93" O. Su extensión territorial es de aproximadamente 879.71 km², que equivalen al 32.24% de la superficie de la región Sierra y 0.90% de la superficie del estado. La altitud media en el municipio es de 1580 m.s.n.m. (SCT, 2021). En Siltepec predomina el clima semicálido húmedo, lo cual favorece al adecuado desarrollo de plantaciones de café, y que este sea el principal cultivo en la zona. El municipio tiene 25 937 habitantes (INEGI, 2020), de los cuales 3 645 habitan en la cabecera municipal, cuya actividad económica principal es el comercio (Data México, 2019), y en la que existen 853 viviendas particulares habitadas (Pueblos América, 2020), que se han construido sin atender las recomendaciones de un adecuado diseño sismorresistente. De acuerdo con el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MDOC-15 2015), Siltepec se encuentra en la zona sísmica D, la de mayor nivel de peligro sísmico en México (Figura 1).

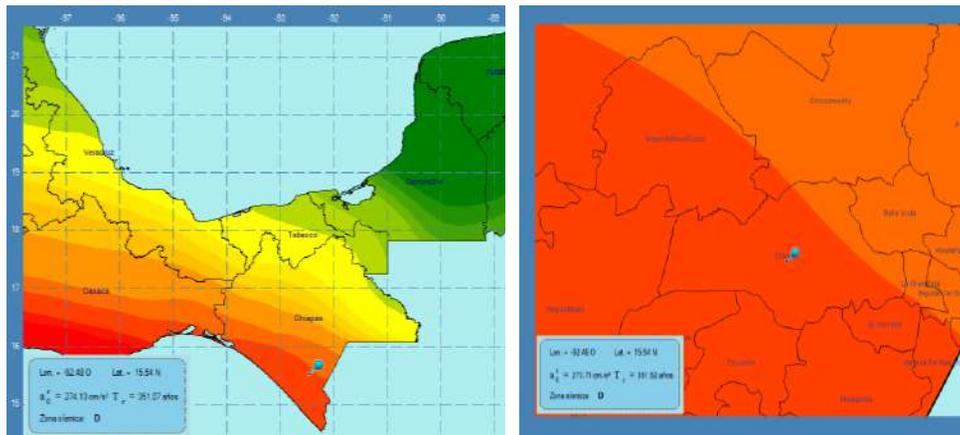


Figura 1. Ubicación de Siltepec dentro de las zonas sísmicas de México.
Fuente: PRODISIS, 2017.

Chiapas, junto con Guerrero y Oaxaca, forma parte de la zona de mayor sismicidad de México. Esta sismicidad se debe a la interacción de tres placas tectónicas: la placa de Cocos, la placa de Norte América y la placa del Caribe. En Chiapas se han reportado grandes terremotos históricos, nueve de magnitud $M_w \geq 7$ en el siglo XX y dos de magnitud $M_w \geq 7$ en el siglo XXI, cuya frecuencia es alta, 46 sismos de magnitud $M_w \geq 5.5$ entre 2012 y 2022 (SSN, 2022). Los sismos de Chiapas se originan en cinco fuentes sismogénicas (Rodríguez-Lomelí & García-Mayordomo, 2019): 1) la debida al proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la Norteamericana, da origen a sismos de gran magnitud ($M_w > 7.0$) (Suárez & Singh, 1986; Pardo & Suárez, 1995), 2) la generada por la deformación interna de la placa subducida, con sismos de profundidad intermedia (de 80 a 300 km), 3) la originada por la deformación cortical asociada a sistemas de fallas superficiales, con temblores de pequeña profundidad ≤ 40 km (Figueroa, 1973), y magnitud moderada que producen daños locales, tales como los enjambres de Chiapa de Corzo entre julio y octubre de 1975 (Figueroa et al., 1975), 4) la asociada a los volcanes activos como el Complejo Volcánico Tacaná y el volcán El Chichonal y, 5) la relacionada con el contacto entre las placas norteamericana y del Caribe, con generación de sismos muy importantes, como el del 18 de abril de 1902, que destruyó parte de Antigua Guatemala y alcanzó intensidad VIII en la zona del Soconusco, Chiapas (Benito et al., 2012).

La actividad frecuente de los sismos en Chiapas, supone un riesgo alto de daños a edificaciones e infraestructura, así como de pérdida de vidas humanas, principalmente a causa de las condiciones de vulnerabilidad de la zona y a una práctica constructiva que carece de una normativa obligatoria para el cálculo estructural. La mayoría de los proyectos de estructuras que se realizan en Chiapas, cuando se aplican, se basan en normativas como el reglamento de construcción y las normas técnicas de la Ciudad de México o en la propuesta del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MDOC-15, 2015). Sin embargo, en muchos casos no se consideran las condiciones locales del suelo y el peligro sísmico de la región (o se utiliza información obsoleta), ni las características de los materiales, los procesos y técnicas constructivas de la zona.

Se han identificado tres tipologías de construcción en Siltepec, siendo las estructuras murarias de adobe y bloque de concreto, con techo de lámina de zinc, las más abundantes. Estas viviendas, usualmente, se han construido sin asesoría técnica especializada, y sin atender los lineamientos mínimos para desarrollar un buen comportamiento ante sismos. Esto indica la necesidad, y el gran interés, de realizar un estudio de vulnerabilidad sísmica, con una muestra lo suficientemente significativa de estas tipologías.

4 Metodología

Como se mencionó, las tipologías estructurales en el área de estudio (Figura 2) son diversas, desde murarias de adobe, y bloque de concreto, hasta estructuras de madera. En la Figura 3 se muestran dos ejemplos de las estructuras visitadas y evaluadas.

Con la finalidad de reunir de forma ordenada, básica y rápida, la información estructural importante y el estado de las edificaciones, se utilizó un formato durante la visita de campo (Figura 4). En ella se registraron las características relevantes de los edificios, tomando en cuenta cuatro aspectos: información general de la edificación, características de los elementos estructurales y no estructurales, datos relacionados con la vulnerabilidad de la edificación, notas de campo e información fotográfica.

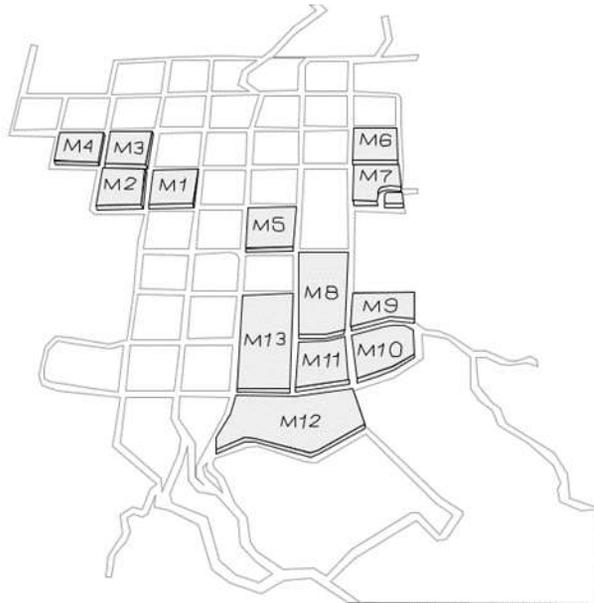


Figura 2. Ubicación de las manzanas donde se encuentran las 74 edificaciones evaluadas.

Fuente: elaboración propia.



Figura 3. Ejemplos de los edificios estudiados con estructuras murarias de adobe (izquierda) y de bloque de concreto (derecha), ambos con techo de lámina de zinc.
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Formato de captura de datos para evaluación estructural.
Fuente: CENAPRED (2021).

Después de registrar las características de cada una de las 74 edificaciones investigadas in situ, estas se agruparon de acuerdo con su uso, ubicación en la manzana (y relación con sus colindantes) y sus características estructurales en términos del material de construcción (mampostería de adobe, bloque de concreto y madera), cimentación y sistema de piso-techo, facilitando la evaluación de la vulnerabilidad final con los métodos MEMS y MIV.

4.1 Tipologías identificadas

De las 74 edificaciones visitadas, se identificaron 72 estructuras de mampostería (97.30% del total) y dos de madera (2.70% del total). Se observa que la tipología dominante es la de mampostería, a base de muros de adobe (26 edificaciones), y de bloque de concreto (46 edificaciones). En las viviendas de mampostería, se observaron deficiencias en lo referente a la disposición de los elementos de confinamiento (Figura 3), por lo que no pueden considerarse como sistemas a base de mampostería confinada, más bien su comportamiento se asemeja al de sistemas de mampostería simple, en especial para las construcciones de adobe, altamente vulnerables a acciones sísmicas.

Las dos estructuras de madera presentan un diseño y conservación malos. En la Tabla 2 se muestran las tipologías identificadas por cada manzana y en la Figura 5 se muestran los porcentajes de las distintas tipologías encontradas en la zona de estudio. El sistema de techo más utilizado es a base de lámina de zinc (en 52 viviendas, 70.27% del total) y de lámina de asbesto (2, 2.70% del total), los cuales conforman diafragmas flexibles. Asimismo, se identifican estructuras con losa maciza de concreto reforzado, que conforman un diafragma rígido en 20 viviendas, 27.03% del total). En la mayoría de los casos existe una unión deficiente entre el techado y los muros.

Tabla 2. Tipología de las viviendas en cada manzana.

Número de manzana	Madera	Adobe	Bloque de concreto	Total
M-1		6	1	7
M-2		4	1	5
M-3		1	1	2
M-4	1		1	2
M-5	1		1	2
M-6		3	3	6
M-7		3	5	8
M-8		2	10	12
M-9		1	2	3
M-10			6	6
M-11		6	6	12
M-12			5	5
M-13			4	4
Total	2	26	46	74

Fuente: elaboración propia

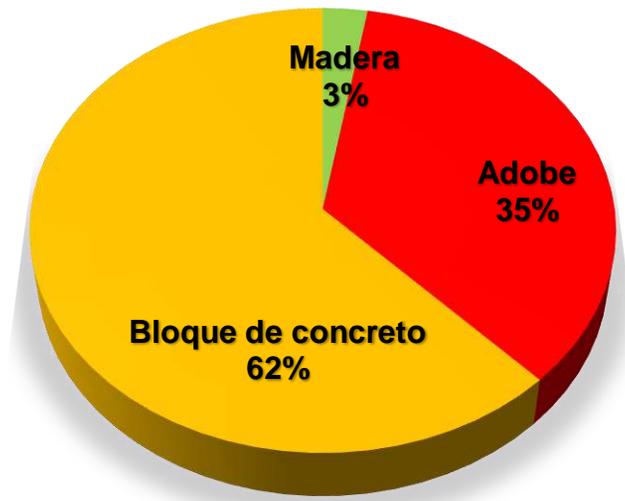


Figura 5. Tipologías identificadas en el área de estudio.
Fuente: elaboración propia.

4.2 Número de niveles de los edificios

Todas las edificaciones de la zona estudiada son de baja altura (uno o dos niveles), tal como se muestra en la Figura 6. Se ha comprobado que conforme aumenta la altura de las edificaciones, aumentan las cargas axiales, de forma que en la edificación se producen mayores momentos de volteo debido a los desplazamientos en la base (Poulos, 2016). En consecuencia, la baja altura de las edificaciones visitadas, es uno de los factores fundamentales en su resistencia a los terremotos. Cabe suponer que, por experiencia propia, los habitantes de Siltepec hayan aprendido a limitar la altura de sus viviendas.



Figura 6. Porcentajes de edificaciones por número de niveles.
Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 3, se muestra un resumen por manzana del número de niveles de las viviendas.

Tabla 3. Número de niveles de las edificaciones visitadas en cada manzana.

Número de manzana	Un nivel	Dos niveles	Total
M-1	6	1	7
M-2	5		5
M-3	2		2
M-4	2		2
M-5	1	1	2
M-6	4	2	6
M-7	4	4	8
M-8	11	1	12
M-9	2	1	3
M-10	3	3	6
M-11	12		12
M-12	3	2	5
M-13	4		4
Total	59	15	74

5 Discusión de resultados

5.1 MEMS

En primera instancia, se clasificaron las edificaciones en función de su tipología. Posteriormente, se consideró la existencia de características sismorresistentes del edificio superiores o inferiores a la media de esa tipología, de forma tal que se le consideró de una clase de menor o mayor vulnerabilidad, respectivamente. En la Tabla 4 se muestran las clases de vulnerabilidad EMS de las 13 manzanas.

Tabla 4. Clase de vulnerabilidad EMS de las viviendas de cada tipología estructural según MEMS.

Tipología Estructural	Número de viviendas	Vulnerabilidad EMS					
		A	B	C	D	E	F
Adobe de barro y techo de lámina de zinc	26	26					
Bloque de concreto y techo de lámina de zinc	24		24				

Bloque de concreto y techo de lámina de asbesto	2		2				
Bloque de concreto y techo de losa maciza de CR	20			20			
Madera y techo de lámina de zinc	2				2		
Total	74	26	26	20	2		

Fuente: elaboración propia

Los resultados de la aplicación del MEMS por manzanas se detallan tanto en la Tabla 5 como en la Figura 7.

Tabla 5. Resultados de la asignación de la clase de vulnerabilidad con el MEMS por manzanas.

Manzana	Número de edificaciones	Vulnerabilidad EMS					
		A	B	C	D	E	F
M-1	7	6		1			
M-2	5	4	1				
M-3	2	1	1				
M-4	2		1		1		
M-5	2		1		1		
M-6	6	3	1	2			
M-7	8	3	1	4			
M-8	12	2	9	1			
M-9	3	1	1	1			
M-10	6		1	4			
M-11	12	6	5	1			
M-12	5			5			
M-13	4		3	1			
Total	74	26	26	20	2		

Fuente: elaboración propia

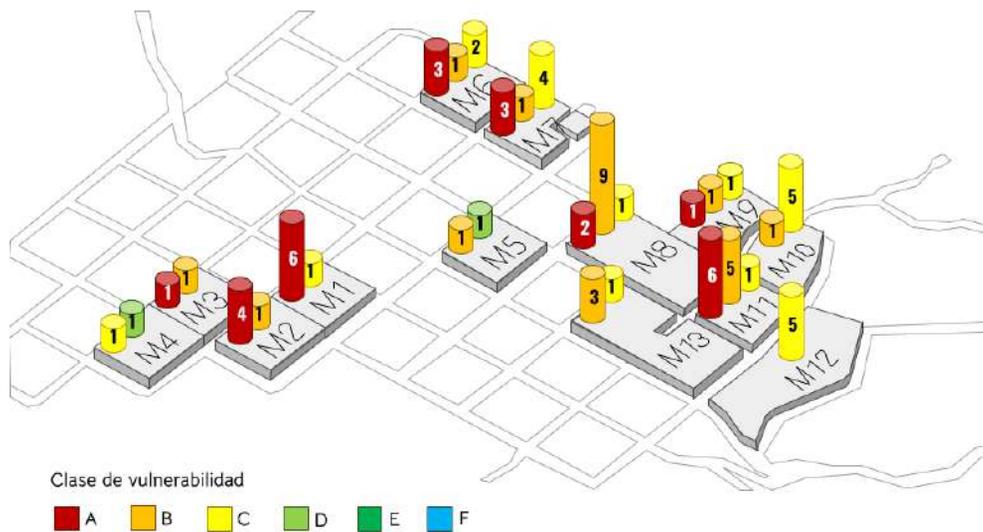


Figura 7. Representación del número de edificaciones y clase de vulnerabilidad de acuerdo con el MEMS.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican que la mayoría de las edificaciones son de vulnerabilidad muy alta o clase A (35.14%) y alta o clase B (35.14%). Las estructuras de clase A, son de adobe con diafragma flexible, sin mantenimiento y con unión deficiente entre el techado y los muros.

Las edificaciones de clase B son de tipologías de bloque de concreto y diafragma flexible, con escaso mantenimiento, y con conexiones mal realizadas entre el sistema de techo y los muros.

Las estructuras de clase C o vulnerabilidad media (27.02%), corresponden a la tipología de bloque de concreto y losa maciza de CR, con mantenimiento deficiente, confinamiento insuficiente, y entrega inadecuada entre el techado y los muros.

En menor medida, existen edificaciones de vulnerabilidad baja o clase D (2.70%), de tipologías de madera con diafragma flexible, con mantenimiento nulo, y conexión defectuosa entre el techado y los muros.

5.2 MIV

Después de la evaluación aplicando el MEMS, las viviendas se clasificaron de acuerdo con las tipologías consideradas en la matriz de estructuras de edificios (BTM) de Risk-UE. De las edificaciones murarias, las 26 de adobe se equipararon a la tipología M2, las 26 de bloque de concreto con diafragma flexible correspondieron a la M3.1, las 20 de bloque de concreto con diafragma rígido a la M3.4 y, finalmente, las 2 de madera con diafragma flexible a la W.

En la Tabla 6 se muestra un ejemplo de evaluación del índice VI y de la clase EMS correspondiente con el método MIV de Risk-UE. El cálculo se refiere a la manzana 8 (Figura 1), situada en la zona Centro Oriente, que consta de 12 edificaciones de

diferentes tipologías (adobe con diafragma flexible, mampostería con diafragma flexible y mampostería con diafragma rígido), por los que se considera representativa de la zona de estudio.

En las dos primeras columnas de la Tabla 6, se indica el número de la edificación en la manzana y su tipología Risk-UE, en las cuatro siguientes se muestran el índice tipológico o básico V_i^* , los factores modificadores regionales ΔV_R y de comportamiento $\Sigma \Delta V_{Ci}$ y el Índice de Vulnerabilidad resultante V_i . En las dos últimas columnas se muestra la clase EMS correspondiente obtenida con cada método (la columna de la izquierda es la clase EMS obtenida a través del MIV y la de la derecha es la clasificación con el MEMS).

Tabla 6. Índices de vulnerabilidad y la clase EMS correspondiente según los métodos MIV y MEMS.

Manzana 8							
Edificio	Tipología	Método MIV Risk-UE				Clase de vulnerabilidad EMS correspondiente	
		V_i^*	ΔV_R	$\Sigma \Delta V_{Ci}$	V_i	MIV RISK-UE	MEMS
1	M3.4	0.616	-0.054	0.20	0.762	B	C
2	M3.1	0.74	-0.052	0.18	0.868	A	B
3	M3.1	0.74	-0.052	0.20	0.888	A	B
4	M3.1	0.74	-0.052	0.10	0.788	B	B
5	M3.1	0.74	-0.052	0.08	0.768	B	B
6	M3.1	0.74	-0.052	0.10	0.788	B	B
7	M2	0.84	0.01	0.16	1.01	A	A
8	M2	0.84	0.01	0.24	1.09	A	A
9	M3.1	0.74	-0.052	0.18	0.868	A	B
10	M3.1	0.74	-0.052	0.16	0.848	A	B
11	M3.1	0.74	-0.052	0.26	0.948	A	B
12	M3.1	0.74	-0.052	0.08	0.768	B	B

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 7 se muestra la clase de vulnerabilidad EMS estimada a partir del valor de V_i de los edificios de cada tipología, mediante el MIV, y el número total de edificios de cada clase. Los resultados indican que en la zona una gran mayoría de las edificaciones podrían clasificarse en categorías de vulnerabilidad A y B (muy alta y alta) y en menor medida existen edificios clasificados con vulnerabilidad C (media). Al comparar estos resultados con los obtenidos con MEMS (ver Tabla 5) se advierte que ha crecido el número de construcciones clasificadas como A (de 26 a 44) y

disminuido las de las clases B (de 26 a 20) y C (de 20 a 10). En la Figura 8 se representan los resultados anteriores, y en la Tabla 8 se detallan estos valores para todas las manzanas.

Tabla 7. Clasificación final, según su índice total, de la vulnerabilidad de las 74 edificaciones.

Tipología Estructural		Número de viviendas	A	B	C	D	E	F
Tipología EMS	Risk-UE		Índice de vulnerabilidad V_i					
			$V_i > 0.82$	$0.82 < V_i \leq 0.66$	$0.66 < V_i \leq 0.50$	$0.50 < V_i \leq 0.34$	$0.34 < V_i \leq 0.1$	$V_i \leq 0.18$
Adobe de barro y techo de lámina de zinc	M2	26	26					
Bloque de concreto y techo de lámina de zinc	M3.1	24	13	11				
Bloque de concreto y techo de lámina de asbesto	M3.1	2	2					
Bloque de concreto y techo de losa maciza de CR	M3.4	20	2	8	10			
Madera y techo de lámina de zinc	W	2	1	1				
Total		74	44	20	10			

Fuente: elaboración propia

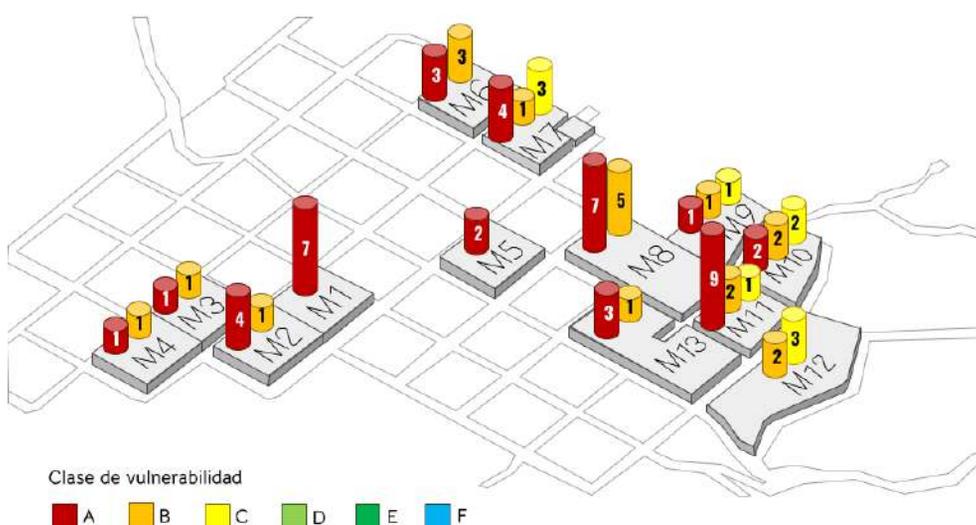


Figura 8. Representación del número de edificaciones de clase de acuerdo con el MIV.
Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Resultados de la asignación de la clase de vulnerabilidad EMS correspondiente al Índice de Vulnerabilidad obtenido con el MIV de las 74 edificaciones.

Manzana	Número de edificios	A	B	C	D	E	F
		Índice de vulnerabilidad V_i					
		$V_i > 0.82$	$0.82 < V_i \leq 0.66$	$0.66 < V_i \leq 0.50$	$0.50 < V_i \leq 0.34$	$0.34 < V_i \leq 0.1$	$V_i \leq 0.18$
M-1	7	7					
M-2	5	4	1				
M-3	2	1	1				
M-4	2	1	1				
M-5	2	2					
M-6	6	3	3				
M-7	8	4	1	3			
M-8	12	7	5				

M-9	3	1	1	1			
M-10	6	2	2	2			
M-11	12	9	2	1			
M-12	5		2	3			
M-13	4	3	1				
Total	74	44	20	10			

Fuente: elaboración propia

La variación encontrada entre ambos métodos, por cada manzana, indica la mejora que implica utilizar el MIV, y lo adecuado de realizar estudios adicionales con este método en el núcleo urbano, para proponer estrategias de reducción de la vulnerabilidad de estas edificaciones.

6 Conclusiones

La inspección in situ de 74 construcciones del núcleo urbano de Siltepec, Chiapas, indica que el sistema estructural predominante (97.30 %) es el de muros de carga (de adobe o bloque de concreto), y solo 2 edificaciones son de muros de madera. Se encontró que el 72.97% tiene diagramas flexibles y el 27.03% tiene diafragmas rígidos de CR. Las estructuras de adobe son el 35.14%, todas con pobre diseño sísmico y con muros de cerramiento no estructurales. Las estructuras de bloque de concreto constituyen el 53.03% (46 del total de 74), de las cuales 41 (la mayoría) tienen confinamiento deficiente, las cinco restantes son de construcción reciente (menos de diez años) y sus muros están mejor confinados, aunque se advierte carencia de confinamiento en vanos de algunas puertas y ventanas (como es usual en la autoconstrucción, o aún en casos en que existe participación de personal técnico supuestamente calificado), generando zonas susceptibles a sufrir daños. En la mayoría de los casos se notó una entrega deficiente entre el techado y los muros. Las dos viviendas de madera, son de diafragma flexible, con un diseño y conservación inadecuados.

La valoración de la vulnerabilidad sísmica del área de estudio, utilizando la clasificación tipológica y los criterios de la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98), indica que el 35.14% de las edificaciones son de vulnerabilidad muy alta (clase A) que corresponden a mampostería de adobe, con diafragma flexible, sin diseño sismorresistente y en mal estado de conservación. De igual manera, un 35.14% son de vulnerabilidad alta (clase B), y comprenden a estructuras de mampostería de bloque de concreto, con diafragma flexible, mal confinadas y sin mantenimiento adecuado. Las estructuras de bloque de concreto con diafragma rígido, constituyen el 27.03%, y pertenecen a la clase C (vulnerabilidad media), presentan confinamiento insuficiente y escaso mantenimiento. Se observaron muy pocas estructuras de madera (2.70%), que se clasifican como clase D (vulnerabilidad baja), con mantenimiento nulo, y diafragma flexible conectado de forma deficiente con los muros. La evaluación de la vulnerabilidad sísmica utilizando el MEMS, es más rápida pero menos rigurosa, y constituye una primera aproximación a la realidad física del problema, aplicable a inventarios muy grandes de construcciones.

La valoración de la vulnerabilidad sísmica, con un mayor nivel de detalle mediante el método MIV de Risk-UE, sobre todo considerando los factores con una alta influencia en el comportamiento sísmico, ha llevado a detectar un incremento significativo de construcciones de clase A (de 26 a 44) y una reducción en las edificaciones de las clases B (de 26 a 20) y C (de 20 a 10), respecto a la evaluación realizada con los criterios del MEMS.

Estos nuevos resultados indican que los factores modificadores considerados, en especial los de comportamiento, cuantifican con mayor precisión la variación de la vulnerabilidad de cada edificio. Además, esto confirma que el MIV es un método robusto, sencillo de aplicar y supone una mejora significativa en la evaluación individual de la vulnerabilidad de cada edificio ya que reduce las incertidumbres involucradas en el método EMS.

Los resultados alcanzados con el MIV, indican que la mayoría de las manzanas tienen edificaciones de vulnerabilidad muy alta y alta (clases A y B), y pocas edificaciones de vulnerabilidad media (clase C), estas últimas se han construido en la década reciente; cinco manzanas, en la periferia del centro urbano, tienen únicamente construcciones de clases A y B, en general más antiguas, y producto de la auto construcción.

Estos resultados de alta vulnerabilidad (59.46% son de clase A y 27.03% son de clase B), son un indicador de las condiciones de riesgo sísmico alto existente en el núcleo urbano de Siltepec, y ponen de manifiesto la necesidad de renovación de estas estructuras. De igual manera, la de llevar a cabo un estudio más amplio del poblado, para realizar un diagnóstico más completo que resulte útil para la prevención, mitigación y gestión de emergencias sísmicas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los alumnos de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) que participaron en las inspecciones a las viviendas de Siltepec (Chiapas), como parte del Programa de Servicio Social Comunitario. De igual manera, se agradece a los directivos de la FI de la UNACH, por su apoyo para la realización de este trabajo. El apoyo de Sofía Esmeralda Lagunes López y de Eva Isabel Rodríguez Troyano, en la elaboración de algunas de las figuras de este trabajo, fue fundamental. Finalmente, se agradece el apoyo de CONACYT, a través del proyecto 321260 de la convocatoria Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia para una vivienda adecuada y acceso justo al hábitat 2022.

REFERENCIAS

1. Barbat, A. H., Carreño M. L., Pujades L. G., Lantada N., Cardona O. D., & Marulanda M. C. (2010). Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area, *Structure and Infrastructure Engineering*, 6:1-2, 17-38. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15732470802663763?scroll=top&needAccess=true>.
2. Benito M. B., Lindholm C., Camacho E., Climent Á., Marroquín G., Molina E., Rojas W., Escobar J. J., Talavera E., Alvarado G. E., & Torres Y. (2012). A New

- Evaluation of Seismic Hazard for the Central America Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*; 102 (2): 504–523. <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/102/2/504/349573/A-New-Evaluation-of-Seismic-Hazard-for-the-Central>
3. CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres (2021). *Manual del formato de captura de datos para evaluación estructural de edificaciones de vivienda*. https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/2022/XLI/VE/220208_VE_ManualFormatoViviendaparaCapturadeDatos.pdf
 4. Data México. (2019). Siltepec. Municipio de Chiapas. <https://datamexico.org/es/profile/geo/siltepec#economia>
 5. FEMA. Federal Emergency Management Agency. (2020). Hazus Earthquake Model. https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-10/fema_hazus_earthquake_technical_manual_4-2.pdf
 6. Figueroa, J. (1973). Sismicidad en Chiapas. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
 7. Figueroa J., Lomnitz C., Dawson A., Meli R. y Prince J. (1975). Los sismos de julio a octubre de 1975, Instituto de Ingeniería de la UNAM.
 8. Godínez-Domínguez E. A., Tena-Colunga A., Pérez-Rocha L. E., Archundia-Aranda H. I., Gómez-Bernal A., Ruíz-Torres R. P., & Escamilla-Cruz J. (2021), The September 7, 2017 Tehuantepec, Mexico, earthquake: Damage assessment in masonry structures for housing. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. Vol. 56, 102123, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102123>
 9. Grünthal, G. (1998). European Macroseismic Scale 1998. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, Volume 15, Luxembourg. https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/rest/items/item_227033_4/component/file_227032/content
 10. Hill M. & Rossetto R. (2008). Comparison of building damage scales and damage descriptions for use in earthquake loss modelling in Europe. *Bull. Earthq. Eng.*, 6(2), 335–365. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-007-9057-y>
 11. INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2020). Recuperado el 27 de agosto de 2022, de <https://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/chis/poblacion/>
 12. Lantada, N., Irizarry J., Barbat A. H., Goula X., Roca A., Susagna T., & Pujades L. G. Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method. *Bull Earthquake Eng* 8, 201–229 (2010). <https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-009-9148-z>
 13. Milutinovic Z. V. & Trendafiloski G. S. (2003). *WP4: Vulnerability of current buildings. RISK-UE project Handbook*. RISK-UE project report.

http://www.civil.ist.utl.pt/~mlopes/conteudos/DamageStates/Risk%20UE%20W-P04_Vulnerability.pdf

14. MDOC-15 (2015). Manual de obras civiles de Comisión Federal de Electricidad Diseño por Sismo. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, México.
15. Pardo M. & Suárez G., (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implication. *J. Geophysical Research*, 100: 12357-12373.
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/95jb00919>
16. Poulos H.G. (2016). Tall building foundations: design methods and applications. *Innov. Infrastruct. Solut.* 1, 10.
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s41062-016-0010-2.pdf>
17. PRODISIS (Programa de Diseño Sísmico) (Versión 4.1.1). (2017). Windows. Cuernavaca, Morelos. Comisión Federal de Electricidad.
18. Pueblos América. (2020). Siltepec (Chiapas).
<https://mexico.pueblosamerica.com/i/siltepec/>
19. Rodríguez-Lomelí A.G. & García-Mayordomo J. Seismic hazard at a triple plate junction: the state of Chiapas (México). *Nat Hazards* 97, 1297–1325 (2019).
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-019-03710-4>
20. Ruiz Sibaja, J., Silva Acevedo, G., De León Argüello, A., Nazar Beutelspacher, M., Vidal Sánchez, F. (2011). Obtención de características geométricas y mecánicas del ladrillo de barro recocido de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Quehacer Científico en Chiapas*. 1(12) 14-26. https://www.dgip.unach.mx/images/pdf-REVISTA-QUEHACERCIENTIFICO/QUEHACER-CIENTIFICO-2011-jul-dic/obtencion_de_caracteristicas_geometricas_y_mecanicas%20.pdf
21. Ruiz Sibaja J. A., Vidal Sánchez F. (2015). Caracterización mecánica de piezas de adobe fabricado en la región de Tuxtla Gutiérrez. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 4(7).
<https://www.espacioimasd.unach.mx/index.php/Inicio/article/view/58/177>
22. Ruiz Sibaja J. A., Vidal Sánchez F., Zebadúa Sánchez A. (2019). Propiedades geométricas y mecánicas del bloque hueco de concreto fabricado en el área de Tuxtla Gutiérrez (Chiapas, Mex.). *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*. VIII (21), 8-31. <https://espacioimasd.unach.mx/index.php/Inicio/arti-cle/view/191>
23. Sánchez Tizapa S., Villaseñor Franco A., Guinto Herrera E., Barragán Trinidad R., & Mebarki A. (2017). A Proposal of Reference Values for Diagonal Compressive Strength and Compressive Strength of Masonry Design in Guerrero State, Mexico. *Revista ALCONPAT*, 7(3), 231 - 246.
<https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.159>
24. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2021). *Manifestación de Impacto ambiental modalidad Regional del camino Ángel Albino Corzo – Siltepec, en una*

longitud de 22 km (del km 12+000 al km 34+000), ubicado en el municipio de Siltepec en el estado de Chiapas. Geo Bios Sustentabilidad Ambiental.
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgiraDocs/documentos/chis/estudios/2021/07CH2021V0005.pdf>

25. Suárez, G., & Singh, K. (1986). Tectonic interpretation of the Trans Mexican Volcanic Belt - Discussion. *Tectonophys.* 127: 155-160.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0040195186900843>
26. Tena-Colunga A. & D. Sánchez-Ballinas D. (2022). Required building separations and observed seismic pounding on the soft soils of Mexico City. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* Vol. 161, 107413.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107413>