EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE VIVIENDAS TRADICIONALES DE ADOBE EN MÉXICO CON MÉTODOS PARA LA ARQUITECTURA VERNÁCULA

Adrià Sánchez Calvillo[1,2], Javier Ortega Heras[3], Elia Mercedes Alonso Guzmán[2]

[1]Sustainable Energy, Machinery and Buildings (SEMB) Research Group, INSPIRES Research Centre; Universitat de Lleida; Lleida, España, adria.sanchez@udl.cat

[2]Facultad de Ingeniería Civil; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Morelia, México, adria.sanchez@umich.mx, elia.alonso@umich.mx

[3]Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (ITEFI); Centro Superior de Investigaciones Científicas; Madrid, España, javier.ortega@csic.es

Palabras clave: índice de vulnerabilidad, curvas de fragilidad, mitigación de riesgos, conservación

Resumen

La vivienda de adobe es la edificación vernácula más común y representativa de México, con presencia en gran parte de su extenso territorio. Sin embargo, en las últimas décadas se ha visto abandonada y desplazada, siendo una de las causas no fundamentadas su aparente vulnerabilidad sísmica, pese a que son muy pocos los análisis profundos de su comportamiento estructural. Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica (MEVS) son herramientas de gran utilidad para comprender la respuesta y comportamiento de las edificaciones ante estos fenómenos naturales. Sin embargo, son escasas las propuestas y las aplicaciones de estos métodos en construcciones de tierra, siendo un ámbito por explotar que puede arrojar nuevos datos sobre su desempeño real. Por estos mismos motivos se decidió aplicar dos métodos diseñados específicamente para el análisis de arquitectura vernácula (SVIVA y SAVVAS) y hacer un estudio comparativo para la vivienda tradicional de adobe en México. A partir de una campaña de trabajo de campo y del levantamiento arquitectónico y fotográfico en casos de estudio de los estados de Michoacán, Oaxaca y Chiapas se recabó un extenso conjunto de datos de las viviendas tradicionales de adobe. La información fue clasificada y procesada a partir de los parámetros establecidos por SVIVA y SAVVAS y la asignación de clases de vulnerabilidad. La aplicación de los dos MEVS permitió hacer un estudio comparativo de los mismos a partir de la generación de curvas de vulnerabilidad y curvas de fragilidad del conjunto de inmuebles. Además, el análisis de los parámetros permitió encontrar las características constructivas de las viviendas de adobe con una mayor afectación en la vulnerabilidad sísmica, correlacionando los distintos casos de estudio. Ambos métodos demostraron ser herramientas de gran utilidad para este supuesto, dejando la puerta abierta a una mayor tecnificación y desarrollo en el ámbito de la arquitectura vernácula.

1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, México ha sufrido varios eventos destructivos con una afectación crítica en el patrimonio arquitectónico, tanto en las construcciones monumentales como las residenciales, generando graves daños y pérdidas en el territorio impactado. La vasta extensión territorial del país y su accidentada geografía ubicada en el contexto de cinco distintas placas tectónicas, comportan que muchas regiones presenten una alta sismicidad, siendo propensas a experimentar periódicamente terremotos de elevada magnitud e intensidad.

Los sismos de septiembre de 2017 en México provocaron la pérdida de incontables construcciones patrimoniales, incluyendo un elevado número de viviendas tradicionales y vernáculas, en su mayoría edificadas con adobe, la técnica más extendida y popular a lo largo del territorio del país. Esta situación, junto con otros factores socioculturales, ha generado que la percepción de la vivienda de adobe por parte de la población general se haya deteriorado, con la consecuencia de la sustitución y el reemplazo por materiales industrializados y sistemas constructivos modernos (Sánchez; Alonso; López, 2021). Pese a esta concepción generalizada de la arquitectura de tierra, la importancia histórica, social y cultural de estos

inmuebles es formidable (Momin et al., 2021), por lo que garantizar su conservación es una prioridad.

1.1 La vulnerabilidad sísmica de la vivienda de adobe

Esta concepción generalizada de la arquitectura de tierra como un sistema desfasado y endeble se ve reflejada en el desconocimiento técnico de sus propiedades y la ausencia de regulaciones para la edificación. Estos inmuebles y materiales de construcción no son considerados en las regulaciones o normativa de construcción sismorresistente en México, quedando totalmente excluidas contribuyendo al abandono de las técnicas tradicionales y la arquitectura vernácula. El manual de diseño, de la Comisión Federal de Electricidad (2008) no cuenta con ninguna referencia al adobe, pese al importante acervo que constituyen estas construcciones para el país.

Pese a la acuciante pérdida de este patrimonio en las últimas décadas, acrecentado por la ocurrencia de desastres naturales, progresivamente se encuentra más trabajos de investigación enfocados al análisis sísmico de estas estructuras, desde el nivel urbano y territorial (Preciado et al., 2020), hasta los análisis pormenorizados de edificios singulares (Momin *et al*., 2021). Precisamente, los eventos más catastróficos son los que permiten inferir la respuesta de estas construcciones y comprender mejor sus mecanismos de fallo (Blondet; Vargas; Tarque, 2008), al poder observar directamente en escenarios reales el comportamiento de los inmuebles y los daños generados (figura 1).

Figura 1. Afectación sísmica en viviendas de adobe tras los sismos de 2017

A partir del estudio del comportamiento de las edificaciones se puede detectar los factores más relevantes de la vulnerabilidad sísmica. Uno de los principales es la calidad de los materiales y de la ejecución en obra, además de la ausencia de elementos de refuerzo en toda la estructura (Blondet; Vargas; Tarque, 2008). Esta situación resulta contradictoria, debido a los principios de diseño y adaptación de la arquitectura vernácula; sin embargo, el fenómeno de la autoconstrucción ha involucionado a soluciones constructivas poco lógicas y consecuentes con el medio habitado.

Por otro lado, otros casos de estudio en los que las viviendas de adobe presentaban mejores características constructivas y estrategias sismorresistentes para su edificación, mostraron una buena respuesta a eventos de gran destrucción (Guerrero Baca, 2019). Esta polaridad de la respuesta estructural de las viviendas construidas con adobe nos da una idea de cómo las variantes morfológicas, constructivas y materiales de los inmuebles tienen un papel crítico en el comportamiento sísmico.

1.2 Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica

Entendiendo la vulnerabilidad como la predisposición de un objeto o elemento a experimentar daños ante un determinado evento (Vicente et al., 2011) es necesario con herramientas que permitan predecir y cuantificar las consecuencias de un terremoto a nivel urbano. Los costes de reconstrucción, restauración y rehabilitación de edificaciones después de sufrir eventos

destructivos suponen una contribución elevada del producto nacional bruto de los países afectados (Calvi et al., 2006). Por estos motivos, la necesidad de contar con herramientas de análisis, gestión y mitigación de los riesgos naturales se hace cada vez más patente.

En este marco se encuentran los métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica (MEVS), que cuentan con un largo recorrido en el ámbito de la ingeniería estructural y de la conservación patrimonial. Los MEVS pueden clasificarse en distintas categorías, siendo la distribución más extendida la que diferencia tres grupos: métodos empíricos, métodos analíticos y métodos híbridos (Calvi *et al*., 2006; Shabani; Kioumarsi; Zucconi, 2021). Los primeros se basan en la observación y el análisis comportamiento de los edificios ante eventos reales, mientras que los segundos se fundamentan en la simulación y el modelado para la predicción de la respuesta sísmica y la probabilidad de daños; finalmente, los métodos híbridos suponen una combinación de los dos anteriores.

Los MEVS utilizados en esta investigación, SVIVA y SAVVAS corresponden al último grupo, al contar con una fundamentación empírica en la recolecta de datos y el dictamen de expertos; así como una calibración numérica mediante datos pos sísmicos contrastados para la validación del sistema (Ortega *et al*., 2019). Precisamente las evaluaciones post-terremoto son la mejor herramienta para estudiar, comprobar y evaluar el comportamiento de las edificaciones a las solicitaciones estructurales de un sismo (Cancino *et al*., 2014), permitiendo validar este tipo de herramientas.

2 OBJETIVO

Las potenciales pérdidas materiales y humanas generadas por los terremotos, junto con los preceptos de la responsabilidad social hacen necesario contar con herramientas de análisis para evaluar la vulnerabilidad de las construcciones y poder actuar sobre la mitigación de riesgos. Los MEVS, especialmente aquellos basados en el índice de vulnerabilidad (I_v) cuentan con la ventaja de poder realizar una evaluación rápida de la vulnerabilidad de un conjunto de edificios a partir del trabajo de inspección y prospección de las viviendas.

Sin embargo, la arquitectura vernácula ha quedado fuera del radar de la gran mayoría de estudios, con pocos trabajos de referencia y una situación común en la que los MEVS e asignan las clases de vulnerabilidad más bajas a las construcciones tradicionales sin considerar sus características propias sismorresistentes. Este trabajo presenta una de las primeras aplicaciones de MEVS diseñados para el análisis de arquitectura vernácula en casos de estudio en México con importante presencia de arquitectura de tierra. A partir de la prospección en campo y la obtención de datos cualitativos y cuantitativos se pretende generar un análisis de la vulnerabilidad sísmica y de potenciales para las viviendas estudiadas.

3 ESTRATEGIA METODOLÓGICA

Partiendo de la problemática del abandono generalizado de la arquitectura de tierra en México, disminuyendo exponencialmente a nivel porcentual (Sánchez; Alonso; López, 2021); aunada a la reciente y a la tradicional historia sísmica del país hacen necesario plantear acciones para un mejor entendimiento de su funcionamiento estructural. Algunas de las herramientas más interesantes en este sentido son los métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica (MEVS): éstos de gran utilidad para comprender la respuesta y comportamiento de las edificaciones, así como ayudar en la prevención y mitigación de riesgos.

Pese a la extensa trayectoria y comprobación, son escasas las aplicaciones de los MEVS en edificaciones vernáculas, muchas veces referidas en la literatura como patrimonio menor, ya que no atraen tanta atención por su carácter no monumental (Dipasquale; Mecca; Correia, 2020). En esta investigación se aplicaron dos MEVS especialmente diseñados para el análisis de estas construcciones, designados como SVIVA y SAVVAS.

3.1 Los métodos SVIVA y SAVVAS

Ambos métodos SVIVA y SAVVAS parten de los índices de vulnerabilidad sísmica tradicionales propuestos por Benedetti y Petrini (1984), adaptados por Vicente *et al.* (2011) en una propuesta híbrida (2011) que combina el modelo GNDT (1993) con el método macrosísmico definido por Lagomarsino y Giovinazzi (2006), basado a su vez en la aplicación de la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 (Grünthal, 1998).

Estas nuevas propuestas buscan una mejor adecuación a la arquitectura vernácula, ya que los MEVS tradicionales no fueron diseñados tomando en cuenta las características singulares de estas edificaciones. SVIVA y SAVVAS fueron planteados y validados para la arquitectura vernácula portuguesa (Ortega *et al*., 2020), que engloba varios tipos de edificios construidos con técnicas como la mampostería de piedra, el adobe, la tapia y elementos cerámicos; compartiendo similitudes con tipos edificatorios vernáculos en otros países y regiones.

Ambos métodos se basan en la evaluación de diez parámetros de vulnerabilidad (P1-P10) detallados en la tabla 1. Para cada parámetro se asigna una clase de vulnerabilidad (A, B, C o D; de más a menos favorable), así como un peso (w) predefinido por el método tras una extensa modelación numérica y una calibración con datos pos sísmicos (Ortega, 2018). La principal diferencia entre los dos métodos es que SVIVA parte de la obtención de índices de vulnerabilidad de los edificios para calcular los daños en función de la intensidad sísmica; mientras que SAVVAS busca estimar la capacidad sísmica de los inmuebles en función de factores de carga asociados a estados límite de daño.

Tabla 1. Parámetros y asignación de clases de vulnerabilidad en SVIVA y SAVVAS.

Parámetros de vulnerabilidad		Clase de vulnerabilidad (c_{vi})				Peso (p_i)
		A	B	C	D	(w)
P1	Esbeltez de los muros	0	5	20	50	1.0
P2	Máxima separación entre muros	0	5	20	50	0.5
P3	Tipo de material	0	5	20	50	1.5
P4	Conexión entre muros	0	5	20	50	0.75
P5	Sistema de diafragma horizontal	0	5	20	50	1.5
P6	Sistema de cubierta	0	5	20	50	0.5
P7	Aberturas en los muros	0	5	20	50	1.5
P8	Número de niveles	0	5	20	50	1.5
P9	Daño estructural previo	0	5	20	50	0.75
P10	Coeficiente de índice de masa	0	5	20	50	0.5

Una vez definidos los parámetros de vulnerabilidad y tras la asignación y ponderación de las clases, los dos métodos cuentan con procedimientos de cálculo distintos. Para SVIVA, el índice de vulnerabilidad (I_v) se obtiene con la siguiente expresión (ecuación 1):

$$I_v = \sum_{i-1}^{10} c_{vi} \times p_i \quad (1)$$

Dónde: I_v = Índice de vulnerabilidad [0-100];

C_{vi} = Valor de la clase de vulnerabilidad del parámetro i;

p_i = Peso asignado a la clase de vulnerabilidad del parámetro i.

Por otro lado, SAVVAS tiene el propósito de obtener los estados límite de carga (LS) asociados a niveles de daño en las construcciones (figura 2), y expresados en función de la aceleración sísmica representada a partir de la gravedad (g), usando las siguientes formulaciones (ecuaciones 2 a 4).

$$LS1_i = e^{(1{,}97-0{,}06\lambda-0{,}1s-0{,}68\,ln(P3)-0{,}14P4-0{,}28P5-0{,}39LN(P6)-3{,}43P7b-0{,}82\,ln(N)-2{,}27LN(p9)+0{,}63P5P7b)} - c \quad (2)$$

$$LS2_i = 0.16 \times LS1(g) + 0.78 \times LS3(g) \quad (3)$$

$$LS3_i = e^{(2{,}16-0{,}04\lambda-0{,}05s-0{,}24P3-0{,}16P4-0{,}28P5-0{,}08P6+0{,}3P7a-2{,}79P7b-0{,}37N-0{,}15P9+0{,}74y_i+0{,}44P5P7b)} \quad (4)$$

Dónde: $LS1_i$ = Estado límite de desalojo inmediato, asociado a un μD = 2;

$LS2_i$ = Estado límite de limitación por daños vital, asociado a un μD = 3;

$LS3_i$ = Estado límite de seguridad vital, asociado a un μD = 4;

P_X = Clase de vulnerabilidad [1-4] del parámetro correspondiente;

λ = Coeficiente de esbeltez de los muros resultante de la división de la altura (h) ente el espesor (t), en referencia al parámetro P1;

s = Máxima separación entre muros medida en metros, en referencia al parámetro P2;

N = Número de niveles, en referencia al parámetro P8;

y_i = Coeficiente de índice de masa de la construcción, en referencia al parámetro P10.

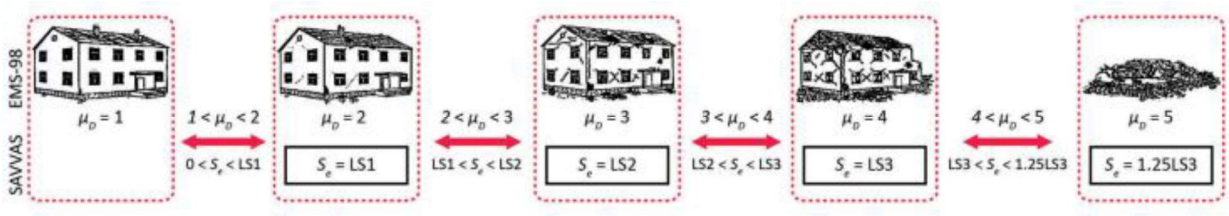

Figura 2. Correlación entre los estados límite de carga de SAVVAS, la aceleración sísmica y los grados de daño definidos en la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98) (Ortega et al., 2019).

A partir del cálculo del I_v y los LS pueden estimarse los daños en las edificaciones en función de la intensidad y la aceleración sísmica respectivamente, y eventualmente hacer un análisis de las pérdidas materiales y humanas y de los costos económicos de reconstrucción y reparación de las edificaciones. Tomando como referencia la figura 2 es posible relacionar los niveles de daño calculados con ambos MEVS con los mecanismos de fallo y los daños reportados en los últimos sismos en México, siendo de gran utilidad para la validación de estos métodos.

3.2 Campaña experimental y levantamiento arquitectónico

Para obtener la información relativa a los parámetros de las viviendas y evaluar y asignar las clases de vulnerabilidad, se realizó una campaña experimental con el objetivo de recabar información cualitativa y cuantitativa para este supuesto. A partir del diseño de fichas de trabajo se registró toda la información referente a los parámetros de vulnerabilidad (Sánchez-Calvillo *et al.*, 2022), en complementación con el levantamiento arquitectónico y fotográfico de las viviendas

La recolecta de datos se realizó en cuatro localidades del país: Ario de Rosales (AR) y Santa Cruz de Morelos (SC), en el estado de Michoacán; San Pablo Etla (SPE), en Oaxaca; y Copainalá (CO), en Chiapas. Mediante el trabajo de campo se obtuvo un total de 80 levantamientos con la información correspondiente registrada en las fichas de trabajo. Independientemente del uso común del adobe, cada uno de estos cuatro casos de estudio presentó marcadas características locales, como puede observarse en la Figura 3.

(a)

(b)

(c) (d)

Figura 3. Viviendas de adobe en las distintas localidades de estudio: (a) Ario de Rosales; (b) Santa Cruz de Morelos; (c) San Pablo Etla; (d) Copainalá.

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Índice de vulnerabilidad y demanda sísmica

La mayoría de los parámetros reciben una evaluación cuantitativa a partir de los datos recabados mediante el levantamiento arquitectónico, como por ejemplo la relación de esbeltez de los muros o el porcentaje de aberturas en los muros. Otros parámetros son definidos en las guías metodológicas de SVIVA/SAVVAS en función de las soluciones constructivas y materiales y las clases de vulnerabilidad asociadas. Por último, la asignación de clases de vulnerabilidad para algunos parámetros implica la valoración cualitativa del evaluador: P9. Daño estructural previo depende en gran medida del criterio de la persona que realiza la inspección y de la minuciosidad de la misma.

La Figura 4 muestra la distribución de la asignación de clases de vulnerabilidad para los diez parámetros evaluados. Puede observarse como algunos parámetros se muestran muy favorables a la vivienda de adobe tradicional de los casos de estudio, presentando las viviendas en su gran mayoría un notable estado de conservación, sistemas de cubierta ligeros con poco empuje o un solo nivel construido, siendo características óptimas para la resistencia sísmica. Por otro lado, otros parámetros reportaron clases de vulnerabilidad desfavorables para el conjunto de las viviendas, como los sistemas de diafragma horizontal y la conexión entre los elementos verticales y horizontales, el índice de masa o los materiales de construcción.

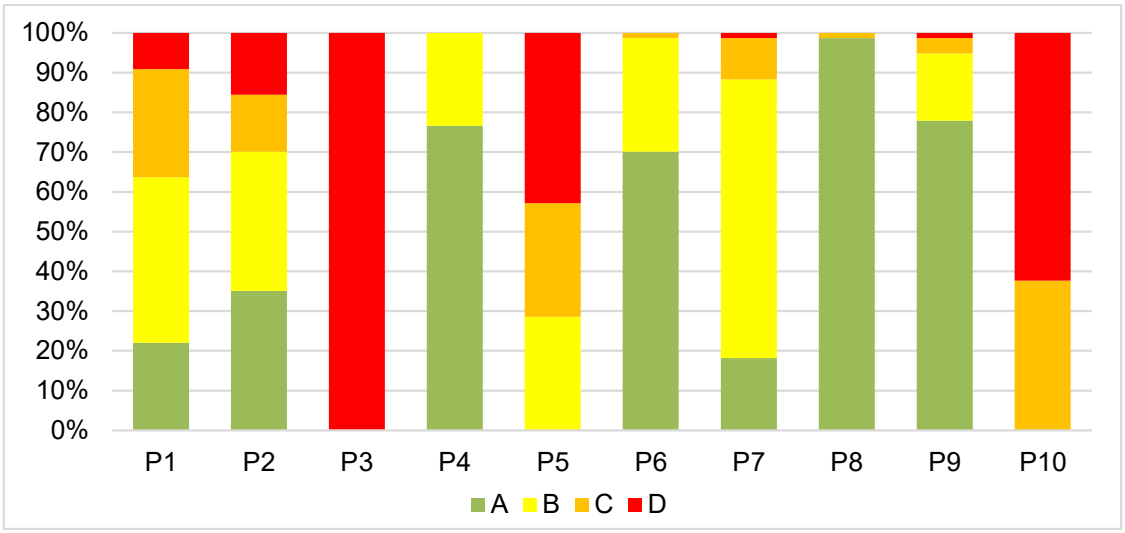

Figura 4. Distribución de los parámetros de vulnerabilidad para las viviendas de adobe.

El mismo análisis de la figura 4 y los parámetros permite identificar las características más vulnerables de las viviendas. Por ejemplo, una conexión deficiente e inestable entre los sistemas de diafragma y los muros (P5), puede provocar un fallo fuera de plano, ya que la estructura acusa una falta de rigidez y los muros tienden a actuar como elementos independientes ante las solicitaciones sísmicas (Ortega, 2018); la ausencia de refuerzos estructurales en las esquinas también contribuye a acrecentar este comportamiento (P4), aunque la mampostería de adobe suele presentar una correcta y eficiente trabazón en la mayoría de construcciones.

El parámetro del índice de masa (P10), fue bastante restrictivo con las viviendas siempre que presentaron morfologías en planta alejadas de la geometría ideal para su respuesta estructural. En este sentido, se detectó una futura revisión y/o adaptación de los MEVS para una mejor adecuación a las características observadas. Por otro lado, el parámetro tipo de material (P3) no presentó variabilidad al asignar la clase D a la mampostería de adobe, debido a las bajas resistencias mecánicas que presentan estos bloques respecto a otros materiales de construcción.

El procesamiento, asignación y cálculo de los parámetros permite obtener el I_v para SVIVA y los LS para SAVVAS mediante el uso de las ecuaciones 1-4. La tabla 2 muestra los valores obtenidos para los cuatro casos de estudio, así como el promedio de todas las viviendas de adobe. Puede observarse una menor vulnerabilidad para la localidad de AR, tomando en cuenta que un I_v elevado comporta un mayor riesgo; mientras que, al contrario, cuanto más altos sean los LS, mayor aceleración sísmica podrán soportar las viviendas antes de experimentar mecanismos de daño.

Tabla 2. Índices de vulnerabilidad y estados límites de carga obtenidos para los casos de estudio.

Promedio	I_v [0-100]	LS1 (g)	LS2 (g)	LS3 (g)
	33.79	0.250	0.377	0.436
AR	27.43	0.509	0.634	0.716
SC	36.66	0.271	0.330	0.371
SPE	37.96	0.183	0.288	0.334
CO	37.05	0.224	0.315	0.361

4.2 Evaluación de daños y curvas de vulnerabilidad

La Figura 5 muestra las curvas de vulnerabilidad para ambos MEVS. El gráfico de SVIVA muestra el grado de daño esperado [D1-D5] en función de la intensidad sísmica (rango I-XII), presentando los resultados a partir de una intensidad V, que corresponde a un terremoto poco fuerte en la escala de Mercalli. El gráfico de SAVVAS también presenta los grados de daño esperados, aunque en este caso en función de la aceleración sísmica expresada a partir de la gravedad (g). Los resultados se expresan a partir de los I_v y LS promedio y de la desviación estándar (σ), generando cinco escenarios posibles más o menos optimistas.

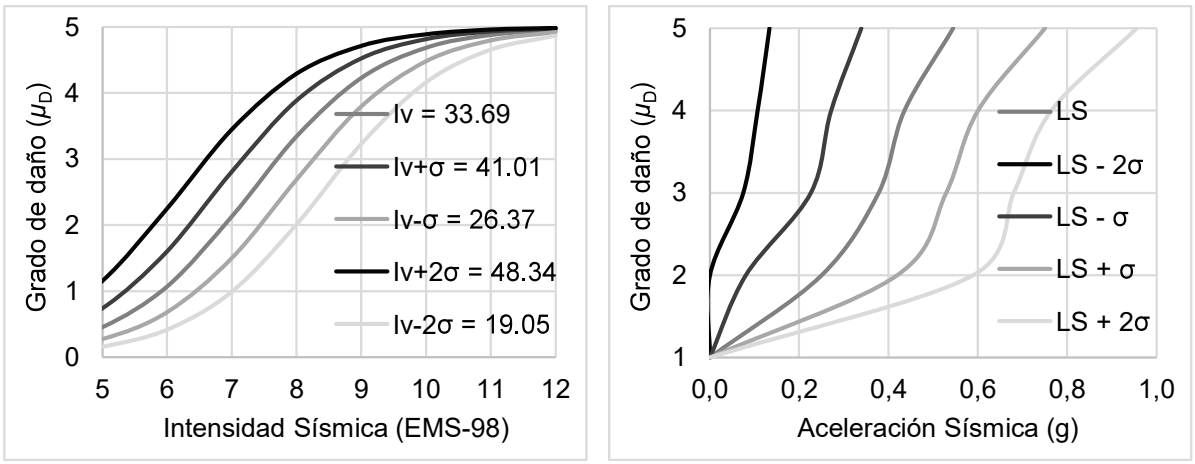

Figura 5. Curvas de vulnerabilidad generadas con SVIVA y SAVVAS.

En las curvas generadas con SVIVA, puede observarse como a partir de una intensidad sísmica de VIII en la escala de Mercalli, todos los escenarios comportan un grado de daño considerable en las viviendas, siendo una situación lógica que guarda relación con los eventos ocurridos en las últimas décadas. Por otro lado, las curvas de vulnerabilidad generadas mediante SAVVAS presentan un crecimiento exponencial muy distinto al anterior, con el escenario promedio presentando daños graves a partir de aceleraciones superiores a 0.4 g. Cabe destacar que el método SAVVAS no toma en cuenta el grado de daño 0, ya que el factor de carga LS1 delimita el inicio de la afectación estructural del edificio correspondiente a un grado de daño 2.

4.3 Curvas de fragilidad

La figura 6 muestra las curvas de fragilidad generadas para ambos MEVS. Estas curvas expresan la probabilidad de cada daño [D1-D5] en función de la intensidad sísmica o de la aceleración sísmica (en función de la gravedad). En este caso los gráficos presentan la probabilidad de daño acumulado sobre el porcentaje del total de las viviendas estudiadas: por ejemplo, para una intensidad VIII podemos esperar aproximadamente la ocurrencia de daños severos en un 80% de las viviendas, daños muy graves en un 45% del total construido y un 15% de viviendas colapsando totalmente.

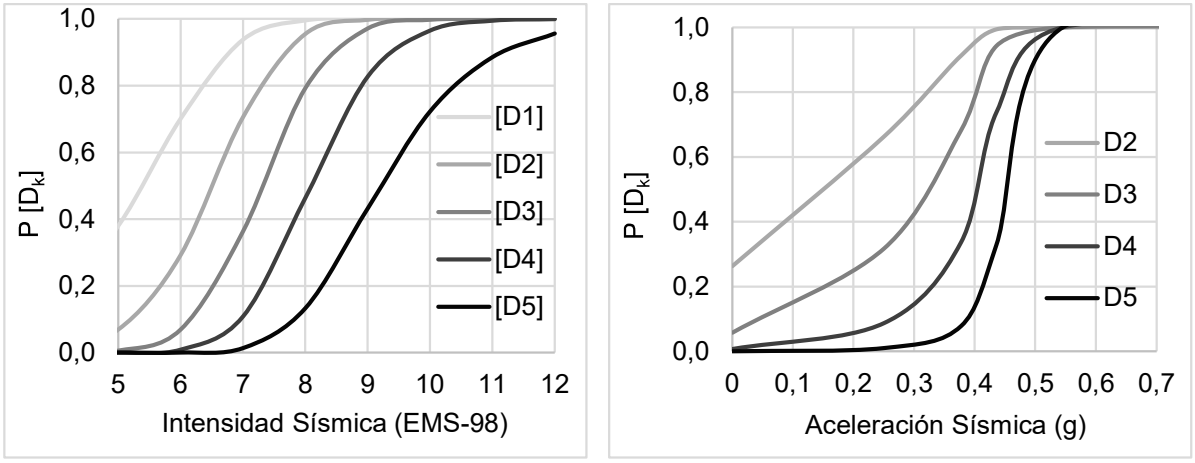

Figura 6. Curvas de fragilidad generadas con SVIVA y SAVVAS.

Para SAVVAS, la probabilidad se expresa a partir de la aceleración sísmica, pudiendo correlacionar los gráficos generados con los espectros de diseño en roca del Programa de Diseño Sísmico de México (PRODISIS), la principal referencia existente para este cometido. Adicionalmente, las curvas de fragilidad pueden ser combinadas con las herramientas SIG para identificar y mapear las zonas o grupos de viviendas con mayor vulnerabilidad de una población y poder reducir el riesgo ante estos eventos.

5 CONCLUSIONES

Existe un desconocimiento generalizado en torno la respuesta sísmica que ofrecen las construcciones de adobe, asociadas a un comportamiento frágil y una escasa resistencia. La mayoría de la población tiene este tipo de percepción, aunque en los últimos años puede reportarse una revalorización de esta arquitectura y cada vez encontramos mayores esfuerzos para caracterizar las viviendas y evaluar su comportamiento estructural. Si bien las capacidades mecánicas de la mampostería de adobe son relativamente bajas en comparación con otros materiales y soluciones constructivas, existen multitud de factores que contribuyen a la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, que los parámetros de SVIVA y SAVVAS tratan de agrupar y ponderar.

En este sentido, la vivienda tradicional de adobe, especialmente en aquellas regiones más propensas a los terremotos, ha desarrollado a lo largo del tiempo estrategias sismorresistentes, que se ven reflejadas las características de los inmuebles. Por ello

encontramos rasgos distintivos como distribuciones en planta simples, pocas aberturas, muros de considerable grosor y sistemas de cubierta flexibles entre otros. Los parámetros de vulnerabilidad de los MEVS toman en cuenta estos factores relevantes para aproximarse al comportamiento real de las edificaciones. Por ello, los resultados obtenidos a partir del método SAVVAS parecen guardar una mayor relación con el comportamiento real de las edificaciones reportado durante eventos sísmicos (Sánchez; Alonso; López, 2021).

La comparación de los cuatro casos de estudio y el análisis a partir de los parámetros de vulnerabilidad y su clasificación permitieron detectar aquellas estrategias sismorresistentes de mayor utilidad en las viviendas, además de efectuar un estudio comparativo entre las distintas localidades. El recorrido y utilidad de los MEVS es amplio, ya que las curvas de vulnerabilidad y fragilidad son de gran utilidad para la gestión y mitigación de riesgos, permitiendo el planteamiento de las acciones de refuerzo y/o de reparación. Además, posteriormente a la obtención de las curvas de fragilidad, es posible generar las estimaciones de pérdidas materiales y humanas y del costo económico de reconstrucción y reparación de los daños en función de la intensidad y/o la aceleración sísmica.

Queda patente que es necesaria una mayor incidencia en el estudio y análisis de la vulnerabilidad sísmica de estas edificaciones, encaminando esfuerzos a un mejor entendimiento de su comportamiento estructural. En este sentido es muy necesario calibrar y adaptar las herramientas existentes al contexto latinoamericano, tomando en cuenta las características propias de las construcciones, con la ventaja de que se cuenta con una gran cantidad de datos post-sísmicos de los eventos más recientes.

También resulta muy interesante no perder de vista aquellas propuestas y formulaciones que toman en cuenta el contexto urbano de las edificaciones y la interacción de las mismas dentro del agregado, como el trabajo desarrollado por Formisano *et al*. (2015). Gran parte del patrimonio arquitectónico construido con adobe se ve enmarcado en centros urbanos y conjuntos de inmuebles donde la respuesta estructural es mucho más solidaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Benedetti, D.; Petrini, V. (1984). On seismic vulnerability of masonry buildings: Proposal of an evaluation procedure. L'Industria Delle Costruzioni, 18(1), pp. 66-78.

Blondet, M.; Vargas, J.; Tarque, N. (2008). Behaviour of earthen structures during the Pisco earthquake of August 15, 2007. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China.

Calvi, G. M.; Pinho, R.; Magenes, G.; Bommer, J. J.; Restrepo-Vélez, L. F.; Crowley, H. (2006). Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. ISET Journal of Earthquake Technology, 43(3), pp. 75-104.

Cancino C.; Farneth, S.; Garnier, P.; Vargas, J.; Webster, F. (2014). Estudio de daños a edificaciones históricas de tierra después del terremoto del 15 de agosto del 2007 en Pisco, Perú. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

Comisión Federal de Electricidad (2008). Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo. México: Comisión Federal de Electricidad. Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Dipasquale, L.; Mecca, S.; Correia, M. (Eds.). (2020). From vernacular to world heritage. Firenze: Firenze University Press.

Formisano, A.; Florio, G.; Landolfo, R.; Mazzolani, F. M. (2015). Numerical calibration of an easy method for seismic behaviour assessment on large scale of masonry building aggregates. Advances in Engineering Software, 80, pp. 116-138. doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.09.013

GNDT (1993). Rischio sismico di edifici pubblichi. Roma: C.N.R - Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti.

Grünthal, G. (Ed.). (1998). European macroseismic scale 1998 EMS-98. Luxembourg: Centre Europèen de Géodynamique et de Séismologie

Guerrero Baca, L. F. (2019). Comportamiento sísmico de viviendas tradicionales de adobe, situadas en las faldas del volcán Popocatépetl, México. Gremium, 6(11), pp. 105-118.

Lagomarsino, S.; Giovinazzi, S. (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. Bulletin of Earthquake Engineering, 4, pp. 415-443. doi:10.1007/s10518-006-9024-z

Momin, S.; Lovon, H.; Silva, V.; Ferreira, T.M.; Vicente, R. (2021). Seismic vulnerability assessment of portuguese adobe buildings. Buildings 2021, 11(200). doi.org/10.3390/buildings11050200

Ortega, J. (2018). Reduction of the seismic vulnerability of vernacular architecture with traditional strengthening solutions. Tesis de doctorado. Portugal: University of Minho.

Ortega, J.; Vasconcelos, G.; Rodrigues, H.; Correia, M. (2020). Seismic vulnerability and loss assessment of Vila Real de Santo António, Portugal: Application of a novel method. International Journal of Architectural Heritage, 15(10), pp. 1585-1607. doi:10.1080/15583058.2019.1709915

Ortega, J.; Vasconcelos, G.; Rodrigues, H.; Correia, M.; Ferreira, T. M.; Vicente, R. (2019). Use of post-earthquake damage data to calibrate, validate and compare two seismic vulnerability assessment methods for vernacular architecture. International Journal of Disaster Risk Reduction, 39(101242). doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101242

Preciado, A.; Ramirez-Gaytan, A.; Santos, J. C.; Rodríguez, O. (2020). Seismic vulnerability assessment and reduction at a territorial scale on masonry and adobe housing by rapid vulnerability indicators: The case of Tlajomulco, Mexico. International Journal of Disaster Risk Reduction, 44. doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101425

Sánchez, A.; Alonso, E. M.; López, M. (2021). Vulnerabilidad sísmica y la pérdida de la vivienda de adobe en Jojutla, Morelos, México, tras los sismos de 2017. Vivienda y Comunidades Sustentables, 10, pp. 9-29. doi.org/10.32870/rvcs.v2i10.162

Sánchez-Calvillo, A.; Alonso-Guzmán, E. M.; Ortega-Heras, J.; Solís-Sánchez, A. (2022). Identificación, documentación y catalogación de viviendas de tierra en Michoacán para su estudio y caracterización. 20º SIACOT: Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra (pp. 478-488). Trinidad, Cuba: PROTERRA/Oficina del Conservador

Shabani, A.; Kioumarsi, M.; Zucconi, M. (2021). State of the art of simplified analytical methods for seismic vulnerability assessment of unreinforced masonry buildings. Engineering Structures, 239(112280). doi:https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112280

Vicente, R.; Parodi, S.; Lagomarsino, S.; Varum, H.; Mendes, J. (2011). Seismic vulnerability and risk assessment: case study of the historic city centre of Coimbra, Portugal. Bulletin of Earthquake Engineering, 9, pp. 1067–1096. doi:10.1007/s10518-010-9233-3

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico del Laboratorio de Materiales de la UMSNH y el grupo de investigación G-CARMA del CSIC, así como el soporte económico de CONACYT y CIC-UMSNH. Igualmente se recibió el apoyo económico de la Red de Científicos Españoles en México (RECEMX) y la Fundación Ramón Areces mediante el programa Beca de Movilidad RECEMX II Edición. El proyecto de investigación y la colecta de datos fueron parcialmente financiados por el premio del 1er Concurso Internacional de Proyectos de Cooperación y Desarrollo del 15th International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020).

AUTORES

Adrià Sánchez Calvillo, doctor en arquitectura, maestro en construcción avanzada en la edificación, especialista en restauración de sitios y monumentos y arquitecto técnico. Investigador postdoctoral en el grupo Sustainable Energy, Machinery and Buildings (SEMB) de la Universidad de Lleida, e investigador asociado al Cuerpo Académico Consolidado UM-147 de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMNSH; miembro del Comité Nacional Español de ICOMOS.

Javier Ortega Heras, doctor en ingeniería civil por la Universidade do Minho, máster en “Structural Analysis of Historical Constructions”, y arquitecto. Investigador en el grupo G-CARMA del Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (ITEFI) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de España. Es miembro de ICOMOS y co-fundador de FENEC, asociación que ofrece servicios de ensayos no destructivos y análisis estructural especializado para el patrimonio construido.

Elia Mercedes Alonso-Guzmán, doctora en ciencias químicas, maestra en metalurgia y ciencias de los materiales e ingeniera civil. Primera Profesora Emérita de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Es la responsable del Primer Cuerpo Académico Consolidado-UM-147 de la Facultad de Ingeniería Civil “Ciencias, Ingeniería y Tecnología de los Materiales para la Construcción” y del Grupo de Investigación de Materiales.