

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS HISTÓRICOS DE MAMPOSTERÍA USANDO MODELOS SEMÁNTICOS APOYADOS EN EVIDENCIAS EMPÍRICAS: APRENDIZAJES EN MÉXICO

Rafael Ramírez Eudave ^{1*} y Tiago Miguel Ferreira ²

RESUMEN

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica asociada a las construcciones históricas representa diversos retos metodológicos y de escala. La no linealidad en el comportamiento estructural en edificios de mampostería no reforzada, la variedad de soluciones constructivas y las incertidumbres inherentes al período de vida de estos edificios dificultan enormemente la aplicación de métodos de análisis generalizadores y representativos. Sin embargo, existen métodos paramétricos que ofrecen la posibilidad de evaluar (de manera semicuantitativa) el nivel de seguridad de un edificio ante ciertas demandas sísmicas. Tales métodos han sido diseñados y calibrados sobre la evidencia empírica (daños y colapsos) recogida tras sismos de gran magnitud, destacando una serie de parámetros que influyen significativamente el comportamiento sísmico de edificios históricos. Los modelos semánticos apoyados en estos parámetros son lo suficientemente fáciles de construir como para considerar su aplicación a escala urbana, a través del uso de herramientas como las bases de datos geográficas, métodos de visualización remota e, incluso, catálogos existentes. Este trabajo presenta una serie de experiencias realizadas en ciudades históricas mexicanas para discutir la conveniencia, limitaciones y oportunidades que estas estrategias pueden significar para una gestión y mitigación más eficaz del riesgo sísmico.

PALABRAS CLAVES

Vulnerabilidad sísmica; Mampostería no reforzada; Métodos paramétricos; Ingeniería forense; México

EMPIRICAL EVIDENCE-BASED SEMANTIC MODELS FOR SEISMIC VULNERABILITY ASSESSMENT OF MASONRY HISTORICAL BUILDINGS: LESSONS FROM MEXICAN EXPERIENCES

ABSTRACT

Assessing the seismic vulnerability of historical buildings presents several challenges due to, for example, the non-linear behaviour of unreinforced masonry structures, the variety of construction solutions, and the uncertainties associated with their lifespan. Because of this, generalising and representing analysis may not be applicable, but there are parametric methods that enable semiquantitative assessments of a building's safety level under specific seismic demands. These methods have been designed and calibrated based on empirical evidence gathered after intense earthquakes that caused significant damages and collapses. These analyses have identified meaningful parameters that influence the seismic behaviour of historical buildings. By utilising these parameters, semantic models can be developed and implemented at an urban scale using, for instance, geographical databases, remote-sensing methods, and even existing catalogues. This work reviews various experiences from Mexican historical cities, which are used herein to discuss the usefulness, limitations and opportunities of these approaches in managing and mitigating seismic risk more efficiently.

KEYWORDS

Seismic vulnerability; Unreinforced masonry structures; Parametric methods; Forensic engineering; Mexico

1. Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE), Department of Civil Engineering, University of Minho, Guimarães, Portugal.

2. College of Arts, Technology and Environment, School of Engineering, University of the West of England (UWE Bristol), Bristol, Reino Unido.

*Autor de correspondencia: r.92@outlook.es

DOI:

<https://doi.org/10.55467/reder.v8i1.142>

RECIBIDO

26 de abril de 2023

ACEPTADO

5 de agosto de 2023

PUBLICADO

1 de enero de 2024

Formato cita

Recomendada (APA):

Ramírez Eudave, R. & Ferreira, T.M. (2024). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios históricos de mampostería usando modelos semánticos apoyados en evidencias empíricas: Aprendizajes en México. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 8(1), 131-150. <https://doi.org/10.55467/reder.v8i1.142>



Todos los artículos publicados en REDER siguen una política de Acceso Abierto y se respaldan en una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres (REDER)

INTRODUCCIÓN

La concepción típica del riesgo como el producto de un evento definido por su probabilidad de ocurrencia y magnitud (peligrosidad), de la capacidad que tiene un sistema para sobrellevar la perturbación del evento (vulnerabilidad) y los elementos que son susceptibles de considerarse pérdidas ante la falla del sistema (exposición) deja poco lugar a dudas con respecto a la importancia de conocer el estado presente de vulnerabilidad de nuestros sistemas para una efectiva caracterización y gestión el riesgo.

Los conceptos de vulnerabilidad y riesgo aplicados al patrimonio construido

La tipificación de riesgo contenida en la norma internacional ISO 31000 [1] describe que éste es el efecto de la incertidumbre para cumplir un objetivo. Tal concepto, aplicado a construcciones, puede extrapolarse directamente a la incertidumbre relacionada con el comportamiento satisfactorio de una estructura para mantener su integridad física ante un evento dado. En ese sentido, Gavarini [2] describe la vulnerabilidad como el nivel de “debilidad” de un edificio ante un sismo de una intensidad determinada, de manera que las correspondencias entre la vulnerabilidad e intensidad sísmica permiten obtener una función teórica de daño (Figura 1). Se concluye entonces que la caracterización de la intensidad del fenómeno perturbador (terremoto) y de la vulnerabilidad de los sistemas son fundamentales para perfilar escenarios potenciales de pérdidas.

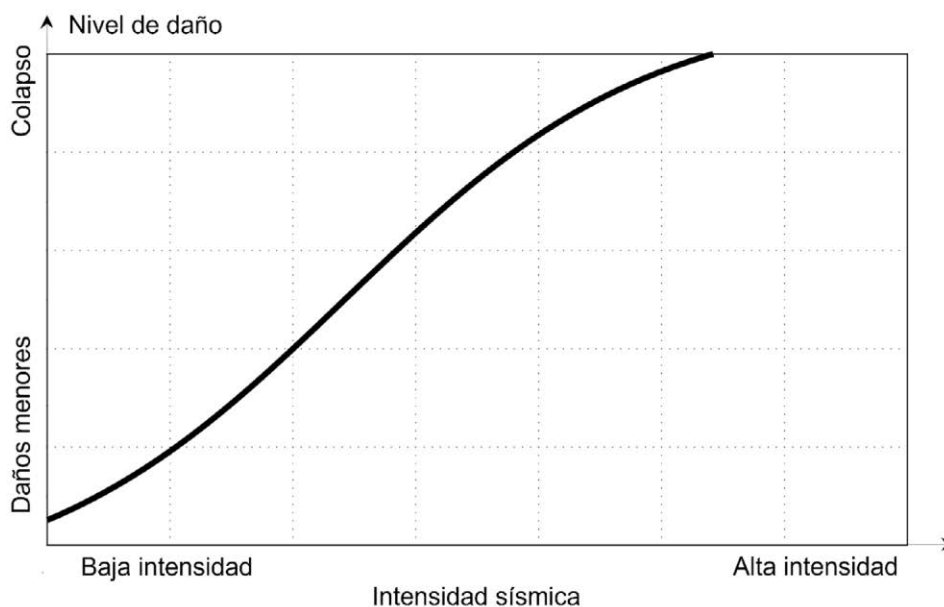


Figura 1. Ejemplo ilustrativo de la correspondencia intensidad sísmica/daño. La función de vulnerabilidad estructural describe efectivamente tal correspondencia
Fuente: Autores, 2024.

En el contexto del patrimonio construido expuesto a eventos sísmicos, es esencial acotar las componentes del riesgo y sus indicadores. El terremoto (en cuanto a evento perturbador) puede expresarse a través de su magnitud (energía liberada), su recurrencia (en términos estadísticos de períodos de retorno), su origen y su intensidad (efectos locales). La conceptualización de la vulnerabilidad de un edificio, sin embargo, puede resultar más problemática porque involucra numerosas discusiones acerca de los umbrales en que se considera que existe una perturbación en el sistema y en el sostenimiento de sus funciones.

Abordar la falla de un edificio desde el punto de vista de ingeniería estructural puede ser una fuente de consenso objetivo. Partiendo de una evaluación orientada a los estados límite de servicio (típicamente contenidos en los rangos de comportamiento elástico de la estructura) y de falla, resulta relativamente seguro afirmar que la falla se alcanza cuando la estructura no tiene una recuperación completa tras haber sido sometida a una excitación dinámica, lo que implica su reparación y/o refuerzo como estrategias de recuperación.

Sin embargo, esta visión excluye una discusión más completa (y compleja) sobre los valores y función de los bienes culturales, que a menudo exceden la integridad estructural. Supongamos, como ejemplo, los bienes culturales integrados a las estructuras (tales como frescos, esculturas, relieves), que pueden sufrir daños relevantes ante un sismo incluso si el edificio tiene un

comportamiento aceptable desde el punto de vista estructural. La discusión necesaria es si tales deterioros ponen en cuestión el cumplimiento de los objetivos del bien cultural, si tienen que ser evaluados como una unidad con la estructura o, incluso, si la capacidad del elemento más vulnerable debe determinar la vulnerabilidad del conjunto.

Aunque estos análisis son necesarios y pertinentes, difícilmente pueden ser generalizadores. Uno de los aspectos más generalizadores en el patrimonio construido es la integridad de sus estructuras y, a partir de un método inductivo, puede resultar coherente tipificar la vulnerabilidad de estos bienes a partir de criterios de ingeniería estructural como una base de evaluación a escalas territoriales.

La evaluación estructural de edificios históricos

La ley mexicana determina que son monumentos históricos “...los bienes vinculados con la historia de la nación, a partir del establecimiento de la cultura hispánica en el país.” [3]. Esta descripción, naturalmente, abarca a una multitud de bienes con funciones, materiales, escalas y condiciones disímboles, desde piedras de molino hasta grandes monumentos religiosos.

Un aspecto recurrente ha sido la atención priorizada a ciertos bienes que, bajo criterios históricos, sociales, constructivos o urbanos, se consideran colectivamente de mayor interés. No es de extrañar, por lo tanto, que exista un corpus relativamente amplio en la literatura dedicada al estudio y análisis de estructuras históricas religiosas, grandes monumentos civiles y militares. En estos bienes patrimoniales es habitual la aplicación de métodos teóricos y experimentales diseñados a la medida, tales como caracterizaciones mecánicas específicas, monitoreo de propiedades dinámicas y modelos computacionales de elementos finitos.

Existen, incluso, esfuerzos orientados a la tipificación de la vulnerabilidad sísmica (de manera más o menos generalizada) para ciertas tipologías, como las religiosas. Un ejemplo relevante es el trabajo de Díaz Fuentes et al. [4], que explora una caracterización parametrizada de templos prototipo a partir de macroelementos estructurales (bloques idealizados con una rigidez infinita) y los mecanismos de colapso que pueden activarse en éstos. Esta propuesta tiene sus bases en diferentes marcos conceptuales sobre comportamiento estructural simplificado [5], la evaluación semicuantitativa del daño sísmico en estructuras [6] y métodos de evaluación basados en encuestas modelo [7].

Sin embargo, existe una ausencia generalizada de estudios orientados a construcciones de menor escala (a menudo edificios habitacionales), a pesar de los diversos estudios tipológicos y estilísticos que continuamente se dan a conocer. Tal falta es comprensible por la variedad tipológica y constructiva que se encuentra en el territorio mexicano, pero no limita necesariamente la adopción de estrategias amplias a partir de premisas sencillas.

Las mamposterías no reforzadas son la solución estructural más frecuente en edificaciones mexicanas de cualquier tipo antes del inicio del siglo XX. Para efectos de esta investigación, se incluyen dentro de esta categoría también las construcciones construidas en adobe. Esta categorización es fundamental para establecer una relación entre una tipología estructural lo suficientemente amplia (edificios de mampostería de pequeña escala) y un método generalizado para representar la relación causal entre intensidad sísmica y daño.

Este criterio tipológico ha sido explorado en las últimas décadas para ejercer exploraciones de ingeniería forense en edificios dañados y colapsados en diferentes eventos sísmicos alrededor del mundo. Merece especial atención el trabajo desarrollado tras los sismos italianos en Friuli (1976), Irpinia (1980), Abruzzo (1984), Marche (1997), Pollino (1998) y L'Aquila (2009), que ha permitido refinar las observaciones empíricas y determinar no solo mecanismos típicos de colapso, sino el establecimiento de patrones que influyen la capacidad de resistencia sísmica [8].

Los sismos de 2017 en México y algo que podemos aprender de ellos

Es importante reconocer que todo escenario de desastre impone la responsabilidad de aprender sobre los errores subyacentes, mejorar las políticas públicas y establecer estrategias de prevención. Los sismos de Tehuantepec (7 de septiembre de 2017, $M_w=8.2$) y de Puebla-Morelos (19 de septiembre de 2017, $M_w=7.1$) dejaron tras de sí daños que preliminarmente ascienden a casi 180 mil viviendas dañadas (aproximadamente 0.56% del total nacional censado en 2015). En ciertos estados, sin embargo, la proporción es mucho mayor. Por ejemplo, en Oaxaca (un estado con un muy alto grado de marginación) las viviendas dañadas representan más del 6% del censo [9].

En cuanto a edificios patrimoniales, la Secretaría de Cultura estimó daños en 2340 monumentos históricos [10]. Esta cifra incluye 1680 templos, pero excluye una cantidad desconocida de edificios habitacionales que se consideran históricos por determinación de ley. Este aspecto no es trivial, dado que ciertas regiones con concentraciones de edificios históricos experimentaron serias pérdidas tras los sismos de 2017. Algunos municipios en el estado de Morelos, por ejemplo, albergan hasta un 20% de viviendas históricas de adobe en la actualidad [11].

La cercanía temporal con estos eventos sísmicos permitió realizar ejercicios de ingeniería forense con la finalidad de evaluar, retrospectivamente, la vulnerabilidad sísmica de algunos grupos de estructuras. Este análisis revisa la aplicabilidad de métodos paramétricos desarrollados para otros paisajes urbanos históricos, partiendo de la hipótesis de representatividad tipológica. Sin establecer límites cuantitativos de aplicabilidad, el método presentado en este trabajo se considera apto para edificios habitacionales de escala unifamiliar con estructuras verticales constituidas por muros y/o pilas de mampostería (de piedra, tabique o adobe).

METODOLOGÍA

La presente investigación se fundamenta en el Método de Índice de Vulnerabilidad propuesto originalmente en 1993 por el Grupo Nacional por la Defensa ante los Terremotos (Italia) [7]. El análisis de los datos de daño y colapso durante varias décadas de sismos en territorio italiano permitió aislar diez características que resultaron estadísticamente significativas para modelar una función causal de intensidad sísmica y daño. Sucesivas aplicaciones y revisiones de este método en las últimas décadas (aplicados, entre otros, en Portugal [12]–[15], Argelia [16], Rumanía [17] y Croacia [18]) permitieron ajustes y calibraciones hasta alcanzar un conjunto de catorce parámetros. Tales parámetros representan una serie de propiedades materiales, geométricas y estructurales que son evaluadas de manera semicuantitativa.

La aplicación de este método en ambientes urbanos históricos mexicanos pretende mitigar la incertidumbre asociada al comportamiento sísmico de construcciones históricas sin por ello reemplazar la elaboración de análisis netamente estructurales. A pesar de no tratarse de un cálculo sobre la capacidad estructural, identificar proactivamente los edificios más proclives al daño ante un evento de intensidad determinada puede resultar una herramienta útil de clasificación y primer contacto para un aprovechamiento más estratégico de los recursos materiales y humanos que demanda un análisis estructural pormenorizado.

La divulgación de los resultados y hallazgos alcanzados mediante la aplicación de este método en México (y su análisis retrospectivo en el contexto de los terremotos de 2017) pretende ofrecer bases críticas para la implementación en ambientes semejantes dentro del ámbito latinoamericano.

El Método de Índice de Vulnerabilidad requiere la realización de una descripción selectiva de la realidad física para aislar un conjunto de parámetros (BP1 a BP14) que constituyen un modelo semántico (un modelo que describe relaciones entre sus elementos y las relaciones entre éstos con el mundo físico) del objeto de estudio. Cada parámetro aporta un valor numérico que se introduce en una serie de modelos matemáticos que representan las relaciones existentes entre intensidades sísmicas y niveles de daño (Figura 2).

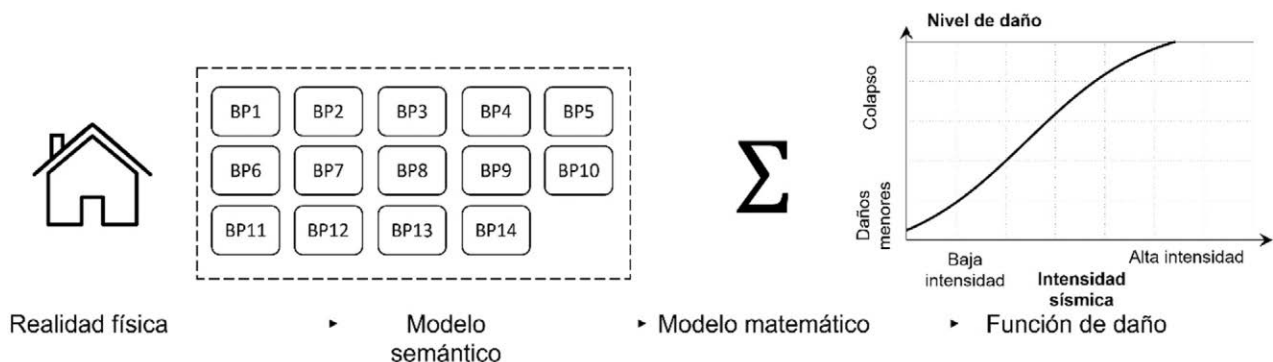


Figura 2. Esquema del flujo de trabajo
Fuente: Autores, 2024.

Descripción de los parámetros

Los parámetros que permiten calcular el índice de vulnerabilidad combinan aspectos cuantitativos y cualitativos que se normalizan mediante la asignación de un grado. De manera sucinta, los parámetros son:

- » BP1. Tipo y organización del sistema resistente. Evalúa cualitativamente las conexiones entre elementos verticales y horizontales, la calidad del aparejo de la mampostería (*cuatrapeo*), la transmisión eficaz de demandas gravitacionales y a cortante, el confinamiento en los entresijos y refuerzos a tensión.
- » BP2. Calidad del sistema resistente. Se califica a partir del tamaño y tipo de unidad de la mampostería (mampuesto), el tipo de mortero y el tipo de junta vertical y horizontal.
- » BP3. Resistencia convencional. Es un cálculo simplificado de la resistencia global a cortante a nivel de entresijo por medio del método de fuerzas equivalentes en dos direcciones principales. Se asume una rigidez infinita de los diafragmas (despreciando irregularidades en planta). La dirección menos resistente se asume como una pared equivalente a cortante (sujeta a cargas verticales y horizontales equivalentes) para establecer umbrales de seguridad de acuerdo con las aceleraciones máximas en la zona de estudio.
- » BP4. Distancia máxima entre paredes. Permite evaluar la capacidad que los muros perpendiculares a la fachada tienen para limitar el fallo fuera del plano de ésta.
- » BP5. Número de niveles. Este parámetro hace corresponder una mayor altura con un nivel más elevado de vulnerabilidad.
- » BP6. Localización y condiciones de suelo. En este parámetro se combina la pendiente del terreno, el tipo y consistencia del suelo y, finalmente, la presencia y nivel de los cimientos.
- » BP7. Posición del edificio e interacciones. Califica la interacción que un edificio puede tener con construcciones adyacentes en función de la diferencia de altura (observando fenómenos de columna corta entre diafragmas no coincidentes) o, en su caso, calificar si se trata de un edificio aislado.
- » BP8. Configuración en planta. Gradúa la regularidad de la huella del edificio mediante la comparación entre el volumen rectangular dominante y los volúmenes excéntricos.
- » BP9. Regularidad en altura. Compara el diferencial de superficie construida entre dos plantas consecutivas, implicando variaciones de rigidez y de centro de masa.
- » BP10. Alineación y tipo de vanos en fachada. Evalúa el porcentaje de vanos en el muro de fachada y eventuales desalineaciones (horizontales y verticales) que favorezcan la activación de mecanismos fuera del plano o de falla en el plano (concentración de esfuerzos).
- » BP11. Diafragmas horizontales. Califica las conexiones entre diafragmas y muros en términos de la transmisión eficiente de cargas verticales a las paredes.
- » BP12. Sistema de cubierta. Se gradúa a partir de la masa, claros libres y condiciones de soporte de la cubierta, incluyendo los empujes horizontales que podrían favorecer mecanismos fuera del plano.
- » BP13. Fragilidades y estado de conservación. Consigna la evidencia visual de aspectos con daños que puedan precipitar mecanismos de colapso, tales como grietas, deformaciones y degradación de elementos.
- » BP14. Elementos no estructurales. Califica la presencia de elementos no estructurales, pero con una masa que imponga cargas excéntricas relevantes en los sistemas estructurales, tales como depósitos de agua, balcones, etc.

Obtención del índice y construcción de la función de daño

A cada uno de los 14 parámetros se le asigna una clase de vulnerabilidad $C_{vi} = \{A=0; B=5; C=20; D=50\}$ que está determinada por el grado en que la configuración evaluada en el parámetro favorece o empeora el comportamiento sísmico global de la estructura, de tal manera

que un parámetro con $C_{vi}=A$ representa la configuración más deseable y favorecedora mientras que $C_{vi}=D$ representa la peor condición posible.

A modo de ejemplo, el parámetro BP5 (Número de niveles) “castiga” las construcciones con más niveles, entendiendo que son más vulnerables ante un sismo. Se califica con un $C_{vi}=A=0$ para construcciones con una sola planta (las menos vulnerables). Los edificios con 2 o 3 plantas reciben una clase de vulnerabilidad $C_{vi}=B=5$, mientras que aquellos con 4 o 5 plantas tienen un $C_{vi}=C=20$. Cualquier edificio con más niveles recibe por defecto una clase de vulnerabilidad $C_{vi}=D=50$.

Adicionalmente, cada parámetro está asociado con un peso relativo p_i de acuerdo con la importancia del parámetro con respecto al comportamiento global de la estructura. Los pesos relativos y los criterios adoptados para la asignación de grados fueron determinados y sostenidos desde la primera aplicación del método en México, verificada en el municipio de Atlixco (Puebla) [19]. Un índice preliminar I_{vf}^* se obtiene como la sumatoria de los productos del valor asociado a la clase de vulnerabilidad C_{vi} por el peso relativo del parámetro p_i (Ecuación 1). Este índice es normalizado a un índice $I_v=[0,100]$ (Ecuación 2) que se transforma en un valor de vulnerabilidad V (Ecuación 3).

Ecuación 1

$$I_{vf}^* = \sum_{i=1}^{14} C_{vi} \times p_i$$

Ecuación 2

$$I_v = \frac{I_{vf}^* \times 100}{750}$$

Ecuación 3

$$V = 0.592 + 0.0057 \times I_v$$

Una manera gráfica de exponer estas relaciones se presenta en la Figura 3. Esta gráfica circular representa, en sectores, el peso proporcional de cada uno de los parámetros, mientras que los valores numéricos de las clases de vulnerabilidad se representan como anillos concéntricos proporcionales a los valores $C_{vi}=\{A=0;B=5;C=20;D=50\}$. El cruzamiento de ambas divisiones genera fracciones de anillo proporcionales, cuya suma total representa el grado máximo del índice de vulnerabilidad atribuible por este método. Si se colorean los sectores según las clases de vulnerabilidad atribuidos a cada parámetro, lo que se obtiene es un esquema visual con una proporción real en área del índice de vulnerabilidad de una construcción dada.

Aunque el valor V ya es un resultado útil para realizar estudios a nivel urbano y jerarquizar la vulnerabilidad en grupos de construcciones, es posible ir un paso más allá y desarrollar funciones de daño mediante la introducción de una dada intensidad sísmica $I_{(EMS-98)}$ (en la Escala Macrosísmica Europea o EMS-98) y la capacidad dúctil de la estructura (Q). Aunque la ductilidad de la estructura puede obtenerse a través de medios experimentales, también existen valores típicos contenidos en los códigos de construcción.

La escala EMS-98 caracteriza la intensidad sísmica (i.e., se relaciona con el grado de afectación local y no con la energía liberada), por lo que no sustituye el análisis basado en indicadores como la aceleración espectral. Sin embargo, el método aquí presentado se apoya en los escenarios de proporción de daño anticipados dentro de la escala para identificar individualmente qué estructuras tienen mayores posibilidades de estar contenidas dentro del conjunto de daños y pérdidas. Dicho de otra forma, este método pretende clasificar cada construcción dentro de una distribución de daño de mayor escala.

La función de daño, correspondiente con el modelo matemático expresado en la Ecuación 4, permite asociar un valor de daño μ_D en función de la intensidad sísmica. Es importante notar que el valor V usado en esta ecuación sufre una corrección para intensidades sísmicas menores a 7 (Ecuación 5). Ambas ecuaciones pertenece a la calibración realizada por Blyth et al. en 2020 [20].

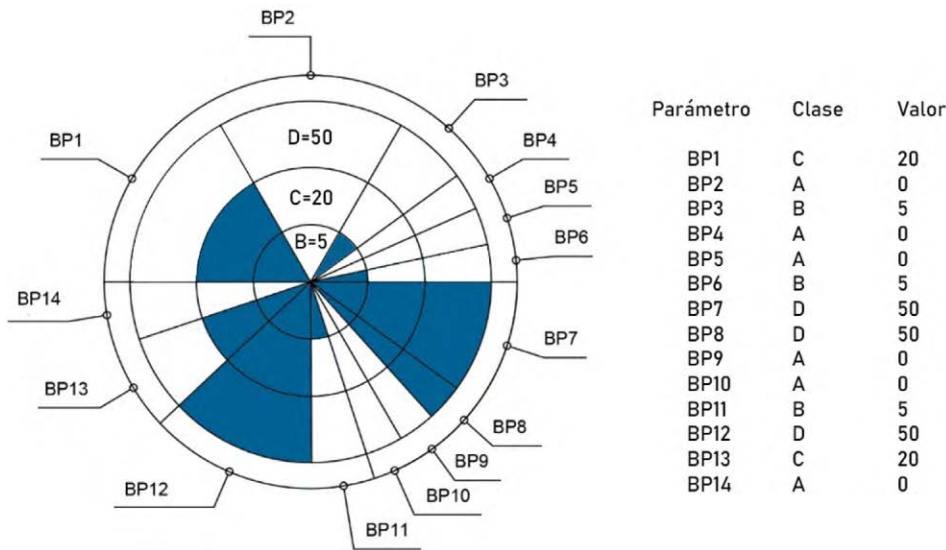


Figura 3. Esquema circular que representa la participación proporcional que cada parámetro tiene
Fuente: Autores, 2024.
Nota: De manera concéntrica, los anillos representan proporcionalmente en área las clases de vulnerabilidad desde A=0 hasta D=50.

Ecuación 4

$$\mu_D = 2.5 + \left[3 \times \tanh \left(\frac{I_{EMS-98} + 6.25 \times V - 12.7}{Q} \right) \right] \times f(V, I); 0 \leq \mu_D \leq 5$$

Ecuación 5

$$f(V, I) = \begin{cases} e^{\frac{V}{(2 \times I - 7)}} & I \leq 7 \\ 1 & I > 7 \end{cases}$$

Aunque los valores de μ_D son continuos en un intervalo $0 > \mu_D > 5$, el marco conceptual de la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 ofrece una correspondencia entre niveles discretos de daño macroscópico e intervalos cuantitativos para μ_D (Tabla 1). A pesar de que la gradación para D_k parte de criterios descriptivos cualitativos, resulta útil para establecer una relación entre los daños anticipados por medio del método de índice de vulnerabilidad y los daños reales en la estructura. La función de daño $\mu_D(V, I_{(EMS-98)}, Q)$ puede ser representada gráficamente por medio de una curva, facilitando la interpretación de los resultados (Figura 4).

Grado de daño discreto, D_k	Intervalo correspondiente de μ_D
D ₀ – Sin daños observables.	0.00 – 0.50
D ₁ – Daños mínimos. Presencia de grietas muy localizadas del grosor de un cabello.	0.51 – 1.42
D ₂ – Daños moderados. Grietas alrededor de los vanos y pérdida localizada de materiales de recubrimiento (aplanados, acabados cerámicos, etcétera).	1.43 – 2.50
D ₃ – Daños graves. Grandes grietas diagonales, aparición de grietas en parapetos, paredes de mampostería significativamente separadas de los diafragmas. Pérdida generalizada de acabados.	2.51 – 3.50
D ₄ – Daños muy graves. Fachadas con vanos de gran tamaño presentan patrones de agrietamiento generalizado e incluso colapsos parciales. Evidencia de grietas a cortante y desagregación de materiales.	3.51 – 4.00
D ₅ – Destrucción y colapso con mecanismos fuera del plano.	4.01 – 5.00

Tabla 1. Niveles discretos de daño de acuerdo con el marco EMS-98
Fuente: Autores, 2024, basada en el trabajo de Ramírez Eudave y Ferreira (2022) [6].

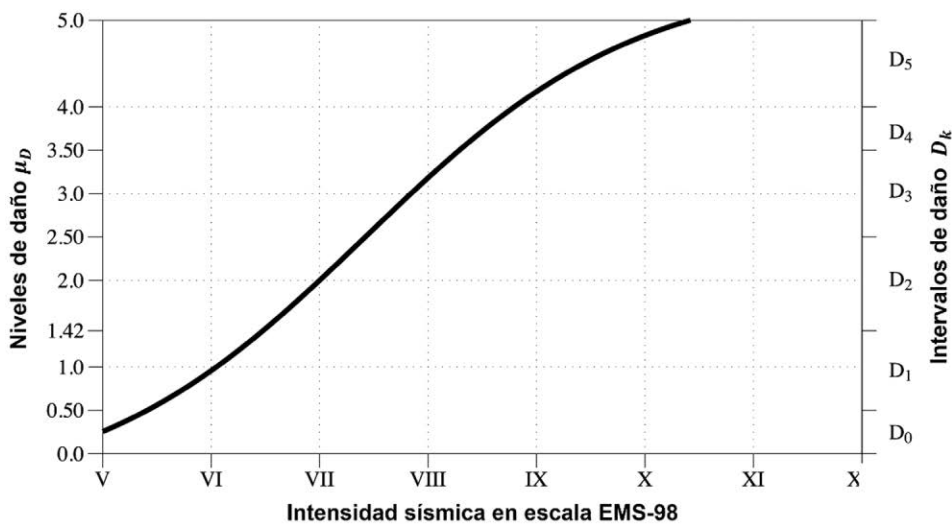


Figura 4. Ejemplo de una curva que asocia las intensidades sísmicas en las abscisas contra los niveles de daño continuos μ_D y a los intervalos cualitativos D_k en los ejes de las ordenadas
Fuente: Autores, 2024.

Adquisición y gestión de datos

Además de contar con una metodología de evaluación, es crucial diseñar una estrategia robusta de obtención y gestión de datos para emprender caracterizaciones a escala urbana. En este sentido, ciertas fuentes de información pueden resultar especialmente útiles para obtener descripciones generales. Un caso paradigmático es el Catálogo Nacional de Monumentos Históricos mexicano, desarrollado por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) [21]. Aunque este catálogo no tiene una vocación de diagnóstico material o estructural, algunos campos que contiene pueden ayudar significativamente a ensamblar el modelo paramétrico de evaluación de la vulnerabilidad sísmica.

El Catálogo se compone de fichas individuales que contienen información estandarizada de bienes históricos. Aunque en la mayor de los casos una ficha corresponde a un edificio, ocasionalmente la misma construcción puede estar asociada a varias fichas (comúnmente en el caso de grandes complejos religiosos) o bien, pueden encontrarse fichas de bienes no habitables (lápidas, mausoleos, piedras de molino, etc.). Sin embargo, el modelo de ficha es común a todos los bienes e incluye una serie de campos que pretende ofrecer descripciones generales del bien cultural.

Los grupos de descriptores son localización, identificación (nombre del edificio, uso y siglo de construcción), características (materiales de fachada, muros, entresijos y cubiertas; geometría de cubiertas y entresijos; anchos de muros, número de niveles y estado de conservación), aspectos legales (régimen de propiedad), fotografías (dos), planta arquitectónica esquemática, croquis de localización, fuentes históricas y bibliográficas complementarias y, finalmente, observaciones (Figura 5).

Este catálogo combina campos cualitativos y cuantitativos que han sido reformulados a lo largo de las últimas décadas para intentar establecer criterios coordinados y conjuntos cerrados para los términos, conceptos y descripciones que, hasta la fecha, dependen en gran medida del bagaje y experiencia del catalogador.

La elección del método paramétrico discutido en la sección anterior se da por la fuerte afinidad que existe entre los campos del Catálogo con respecto a los parámetros del método. Trece de los catorce parámetros son directa o indirectamente extraíbles de una ficha debidamente elaborada [23], por lo que se presume que es posible usar el catálogo en su estado actual (con más de cien mil entradas) para comenzar la caracterización de gran parte del patrimonio construido a nivel nacional.

A pesar de los retos que esta fuente de información representa (incompletitud de una parte significativa de las fichas, inconsistencia entre los datos mostrados, información desactualizada y dificultades de acceso a los registros), el Catálogo puede ayudar a realizar bases de datos parciales que puedan recurrir a inspecciones en sitio tan solo para recabar datos faltantes y confirmar los

modelos prellenados, disminuyendo sustancialmente la inversión de recursos en la elaboración de levantamientos de datos de escala urbana.

CONSULTA PÚBLICA DEL CATÁLOGO NACIONAL DE MONUMENTOS HISTÓRICOS INMUEBLES

MONUMENTO HISTÓRICO

Clave de Ficha: I-09-02041 Descargar detalle Citar ficha Contáctanos

Nombre: Capilla de Manzanares o del Señor de la Humildad
Tipo y subtipo de ficha: Inmueble Religioso

Fachada y muro lateral de la capilla, 2016. Ábside y coro, 2016. Levantamiento arquitectónico. Croquis de localización.

Expandir todos

TIPO DE FICHA	LOCALIZACIÓN	IDENTIFICACIÓN
ASPECTOS LEGALES	REFERENCIAS RELIGIOSO ADMINISTRATIVAS	INFORMACIÓN HISTÓRICA
FUENTES CONSULTADAS	MONOGRAFÍA	DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA
CARACTERÍSTICAS FORMALES Y MATERIALES	FECHA DE ELABORACIÓN / FECHA DE ACTUALIZACIÓN	

CENTRO DE DOCUMENTACIÓN DE LA CNMH

PLANOTECA DEL AHJE ARCHIVO HISTÓRICO JORGE ENCISO FOTOTECA CONSTANTINO REYES-VALERIO

Figura 5. Ejemplo de consulta pública de ficha de catálogo a través del portal electrónico

Fuente: Secretaría de Cultura, 2023.

Nota: Cada pestaña puede desplegarse para consultar los grupos de descriptores correspondientes [22].

Durante el curso de esta investigación se exploró exitosamente la implementación del modelo paramétrico como una base de datos desarrollada en un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG). Estos sistemas tienen la ventaja implícita de facilitar los trabajos en campo a través de la georreferenciación de los objetos de estudio, además de permitir la consulta de información asociada a peligros locales, tales como la sismicidad característica de una zona. Estas bases de datos son susceptibles de almacenar diversos tipos de campos, tales como cadenas de texto, datos numéricos, de opción múltiple, lógicos, etcétera. Por lo tanto, son un medio adecuado para diseñar modelos semánticos expandibles y actualizables.

En aras de favorecer la reproducibilidad de este flujo de trabajo, se optó por usar herramientas multiplataforma de software libre y código abierto, tales como el software QGIS [24]. La capacidad de implementar complementos en lenguajes de programación C++ o Python ha permitido la aparición de múltiples herramientas específicas. En el contexto de esta investigación, se exploró particularmente un sistema integrado para almacenar y sincronizar las bases de datos mediante almacenamiento en una “nube” informática. Esta tarea, realizada mediante la plataforma Mergin [25] posibilita la distribución de las bases de datos en dispositivos móviles habilitados con la *app* gratuita Input [26] para realizar la edición y sincronización de la base de datos en campo, en tiempo real.

Paralelamente, se desarrolló un software diseñado a la medida del método paramétrico de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Este programa [27] permite la realización de operaciones de lectura y escritura en bases de datos geográficas sin la necesidad de trabajar en ambientes de desarrollo GIS. En otras palabras, permite consultar la información relativa a la vulnerabilidad sísmica como una base de datos simplificada, facilitando la interpretación y gestión de datos. Este programa es nuclear para la implementación de procedimientos más robustos, tales como la ejecución de cálculos conducentes a índices de riesgo, curvas de daño e, incluso, tratamientos estadísticos que desemboquen en el entrenamiento de algoritmos de *Machine Learning*.

El Catálogo, la base de datos editable en sitio y el software descrito representan, en conjunto, un sistema completo (Figura 6) que permite elaborar los modelos semánticos de vulnerabilidad sísmica a partir de información nueva y existente, con la capacidad de interpretar de manera semiautomática los datos de entrada para devolver índices de vulnerabilidad y niveles potenciales

de daño ante un determinado sísmico. Los aspectos técnicos de la implementación se encuentran reportados en el trabajo de Ramírez Eudave et al., tomando como punto de partida los principios de uso de software libre y de acceso abierto [28].



Figura 6. Esquema de flujo de la información para alimentar la base de datos
Fuente: Autores, 2024.

Selección y alcance de los casos de estudio

La implementación de esta metodología en paisajes históricos urbanos mexicanos enfrentó varios retos que, a su vez, pusieron a prueba la robustez y aplicabilidad de las estrategias de adquisición de datos disponibles. De manera muy concreta, las restricciones de movilidad impuestas en el contexto de los confinamientos durante la pandemia por COVID-19 limitaron la realización de campañas en sitio y el trabajo en equipo.

Sin embargo, fue posible realizar tres aproximaciones experimentales con escalas, métodos y retos distintos en cada caso. En todas estas implementaciones, la lógica subyacente es la misma: realizar una evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las construcciones en su estado previo al sismo de Puebla-Morelos de 2017 para anticipar un nivel de daño teórico en correspondencia a la intensidad de ese terremoto. Posteriormente, el nivel de daño predicho se contrasta con los daños reales que se verificaron tras el sismo (Figura 7).

La consignación de los niveles de daño observado se realizó de manera mixta, buscando una clasificación coherente con las evidencias visuales en sitio (a pesar de la distancia temporal con respecto al sismo), los testimonios ofrecidos por los habitantes (a menudo respaldados por fotografías o videos presentados en el momento) y, ocasionalmente, fuentes terciarias como medios de comunicación y testimonios de autoridades.

La resolución de la información limitó fuertemente la clasificación de los daños en niveles altamente discretizados, por lo que se decidió proceder con los niveles de daño D_k (de 0 a 5) propuestos en la escala EMS-98 (cfr. Tabla 1).

El primer experimento fue iniciado en agosto de 2020 sobre construcciones de la ciudad de Atlixco, Puebla. La imposibilidad de realizar evaluaciones en sitio obligó al desarrollo de una evaluación mixta a partir de fuentes de visualización remota, evidencias documentales y fuentes periodísticas. Se seleccionaron nueve edificios que cumplieran, acumulativamente, las siguientes características:

- » Estar incluidos en el Catálogo Nacional de Monumentos Históricos;

- » Contar con fichas de catálogo actualizadas y completas;
- » Disponer de imágenes completas y con una calidad razonable en la vista de calle de la plataforma Google Maps [29] tanto antes como después del sismo;
- » Haber recibido cobertura periodística que permitiera el acceso a fotografías y videos que permitieran evaluar con una certeza razonable el nivel de daño tras el sismo.

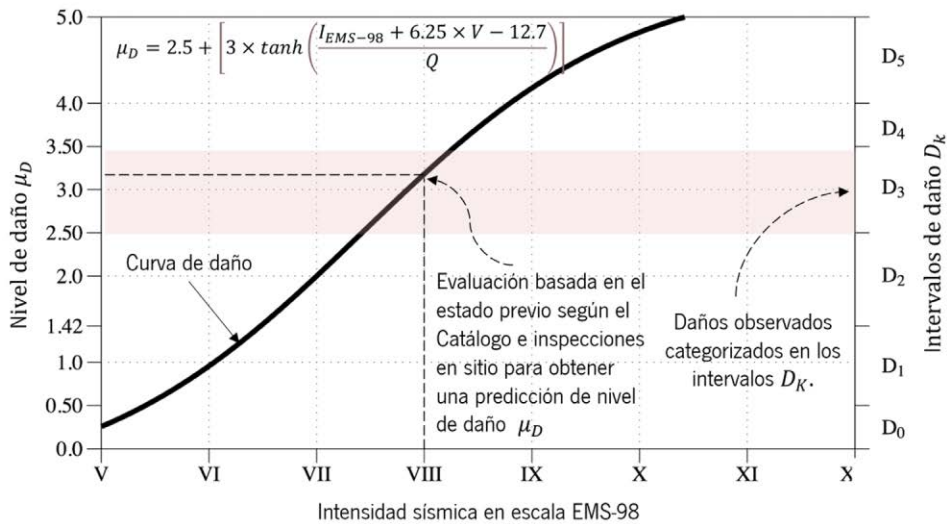


Figura 7. Esquema representando un ejemplo de consistencia entre los daños predichos por el método analítico contra los daños observados en el edificio
Fuente: Autores, 2024.

La segunda campaña (iniciada en marzo de 2021) consistió en un desarrollo de la muestra en Atlixco a partir de la disponibilidad de información adicional provista en un conjunto de tesis de maestría de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla [21–24]. El trabajo de catalogación en estas tesis permitió ampliar significativamente la muestra poblacional hasta alcanzar 83 edificios en total, superando el obstáculo de los registros incompletos y/o desactualizados en el Catálogo Nacional de Monumentos Históricos.

Dado que estas tesis fueron desarrolladas a lo largo de 2017, algunas fichas consultadas incluyen consideraciones de los daños verificados tras los sismos, representando fuentes valiosas de información para los fines de la presente investigación. Esta segunda etapa también fue mayormente documental, pero existió la posibilidad de hacer una verificación en sitio que involucró el uso de las bases de datos SIG distribuidas discutidas con anterioridad.

Finalmente, la más extensa campaña experimental fue ejecutada a lo largo de 2022, adoptando estrategias de evaluación mixtas (documental y en sitio) aplicadas a cuatro municipios del estado mexicano de Morelos, totalizando 167 edificios documentados. Esta última etapa puso a prueba no solo el uso de bases de datos SIG, sino al programa desarrollado para la implementación de la metodología, por lo que representa un experimento de todo el flujo de trabajo descrito aquí. En un sentido amplio, esta campaña representa también una demostración de la potencial implementación a gran escala que podría seguirse de manera proactiva para evaluar las construcciones históricas como complemento a las actividades regulares de catalogación de bienes históricos.

En este documento se consignan las principales observaciones y aprendizajes obtenidos a lo largo de estas campañas experimentales. Sin embargo, los resultados de cada campaña han sido reportados de manera específica en publicaciones individuales en donde se abunda no solo en la caracterización de la muestra, sino en las estrategias descritas en adelante. Tales referencias abarcan tres artículos relacionados con el análisis de compatibilidad entre el método y el catálogo de monumentos históricos [23], con la gestión de la incertidumbre durante la adquisición y manipulación de datos [19] y, finalmente, con la calibración del modelo mediante el uso de algoritmos de *Machine Learning* [34].

RESULTADOS

Para efectos de exposición de resultados, la primera campaña experimental (con una muestra de 9 edificios) se nombrará Atlixco-I, mientras que la ampliación de la muestra a 83 construcciones se nombrará Atlixco-II. Se resumen los resultados divididos por campaña experimental con consideraciones particulares para después presentar observaciones más generales.

Atlixco-I

El primer experimento partió de una base de representatividad y de certidumbre limitadas con respecto a la cantidad de la muestra (9 edificios) y los métodos de adquisición de datos. Sin embargo, las curvas de daño construidas sobre la base del método paramétrico se ajustaron satisfactoriamente a los niveles de daño verificados tras los sismos. Esto se interpretó como un primer indicio de consistencia entre la metodología adoptada y el tipo de construcciones evaluadas.

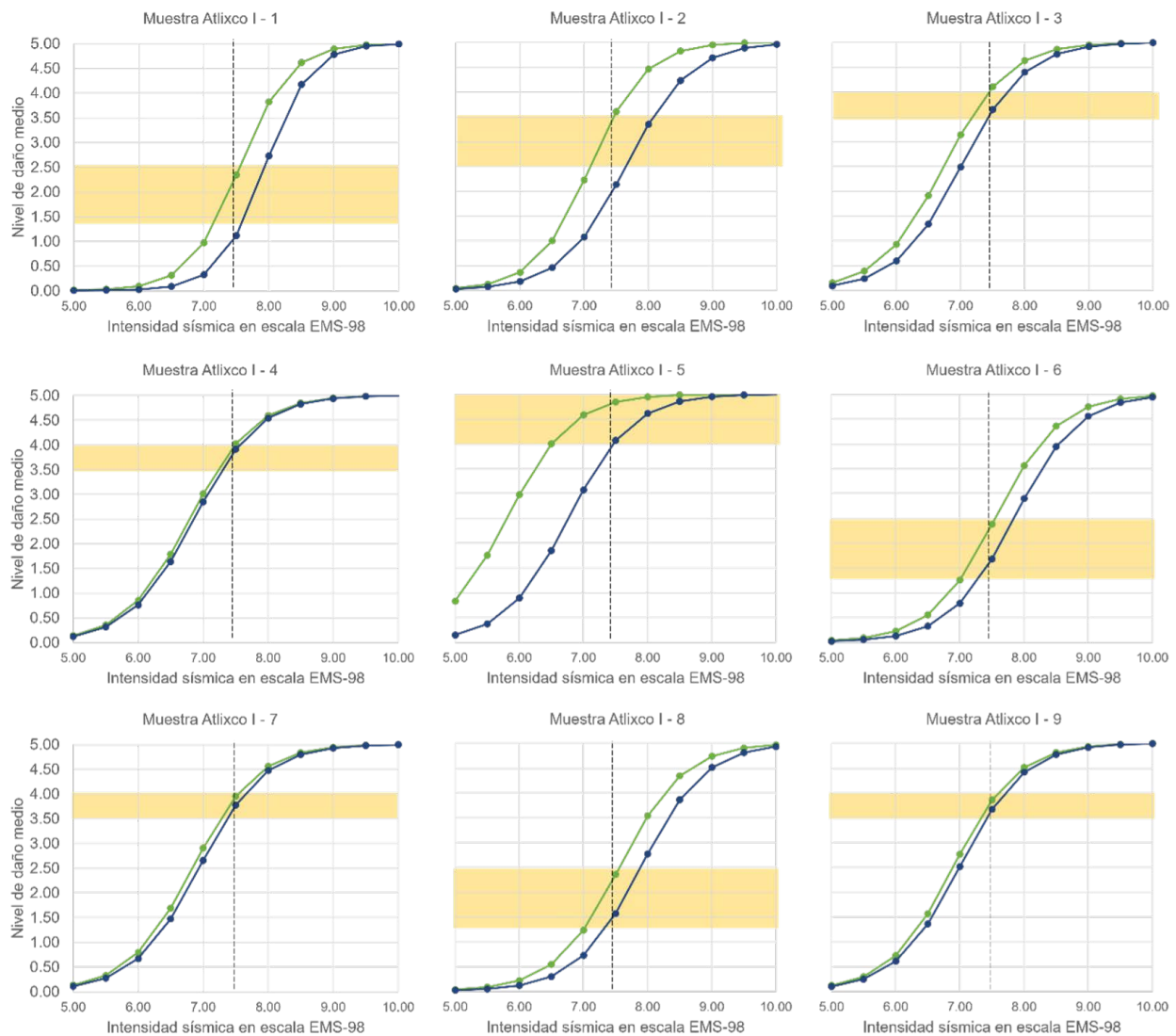


Figura 8. Ejemplo de gráfico delimitado por una curva inicial (azul) y una conservadora (verde)

Fuente: Autores, 2024.

Nota: Una predicción exitosa es aquella en la cual el traslape entre el área sombreada y el cruce con la línea punteada negra (intensidad sísmica $I_{EMS-98}=7.5$) se dan entre ambas curvas (cfr. Figura 7).

Atlixco-I también permitió identificar una serie de limitaciones y potenciales incertidumbres epistémicas del método. Algunas de ellas, inherentes al tamaño de la muestra y a la adquisición remota de los datos, solo podrían explorarse a profundidad cuando la contingencia pandémica lo permitiese.

Como reto principal, se planteó la duda sobre cómo proceder con la evaluación de los parámetros cuando las características calificadas se encuentran muy cerca del umbral entre

dos clases de vulnerabilidad c_{vi} distintas. Esta situación problematizadora es relativamente común en aquellos parámetros que requieren juicios cualitativos para asignar una clase (tales como evaluar si un elemento se encuentra en buen o mal estado, si existe daño, si una grieta es significativa, etcétera), lo que puede impactar significativamente el resultado aritmético del índice de vulnerabilidad y, en consecuencia, el nivel de daño estimado. La estrategia que se adoptó para reducir esta incertidumbre fue la realización de una encuesta dual que permitiera asignar dos clases de vulnerabilidad al mismo parámetro en caso de duda razonable del encuestador.

Es así como un edificio se asocia a dos valores de vulnerabilidad y a dos curvas de daño, aceptando que la curva de daño representativa del edificio se encuentra razonablemente contenida en el intervalo de los límites de éstas. Esta suposición, contextualizada dentro de las limitaciones del experimento, también puede extrapolarse a la realización de evaluaciones de la vulnerabilidad sísmica a partir de evidencias parciales (tales como fichas de catálogo incompletas), incluso si esto conlleva la generación de intervalos amplios. Aunque estas evaluaciones serán más útiles en la medida que la incertidumbre sea abatida a partir de observaciones más detalladas o nueva evidencia, representan un producto *a priori* que dista mucho de un desconocimiento absoluto. Tal como se puede constatar en la Figura 8, los niveles de daño observado se encuentran comprendidos dentro del área delimitada por ambas curvas, permitiendo sostener la hipótesis de representatividad del método de análisis para la muestra ensayada.

Atlixco-II

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de la muestra de Atlixco-II (en el estado previo al terremoto de Puebla-Morelos) se realizó exclusivamente a partir de fuentes documentales, lo que perpetuó algunas incertidumbres identificadas desde Atlixco-I. Sin embargo, la calidad de la información y la posibilidad de la verificación de los daños en sitio mejoraron de manera significativa la calidad del experimento. Es importante resaltar que gran parte de los edificios dañados en los eventos sísmicos de Puebla-Morelos se encontraban, en pleno 2021, apuntalados o con otras intervenciones emergentes ante la falta de trabajos de estabilización y reparación. Al margen de las implicaciones que tal situación tiene en términos sociales, de protección civil y de resiliencia, también fue posible realizar una evaluación contrastada de los daños en las estructuras.

La incertidumbre ante faltantes en la información y problemas para categorizar los parámetros también influyó esta campaña experimental. Por ello se decidió diseñar una estrategia que pudiera ser integrada a la metodología en lugar de realizar dos evaluaciones paralelas (como se hizo para Atlixco-I). El método elegido consiste en que cada parámetro se asocia a un factor de confianza QC (Quality Check) que describe el grado de certidumbre que el catalogador tiene con respecto a la clase de vulnerabilidad c_{vi} asignada al parámetro. Los cuatro niveles posibles son:

- » QC1. Alta calidad. La clase de vulnerabilidad se asignó con un alto nivel de certidumbre a partir de información explícita de las fichas de catálogo en conjunto con verificación en sitio.
- » QC2. Calidad media. Deducción a partir de fuentes secundarias contrastadas (fotografías, dibujos, testimonios, etcétera).
- » QC3. Calidad baja. Inferencia razonable basada en similitudes tipológicas e hipótesis fundadas en la experiencia del catalogador.
- » QC4. Ausencia de información. La clase de vulnerabilidad fue asignada a título indicativo y se considera apenas mejor que una decisión aleatoria.

Estos factores QC son útiles para generar una evaluación alternativa y conservadora del índice de vulnerabilidad, manteniendo la estrategia de ofrecer un intervalo de niveles de vulnerabilidad y daño que puede ser contrastado con el intervalo de valores μ_D de los daños reales. Si ambos intervalos comparten un dominio, por mínimo que sea, se sostiene la hipótesis de representatividad. Esta condición de prueba se verificó en todos los inmuebles analizados, permitiendo concluir de manera más contundente que la metodología sostiene la representatividad de estos edificios.

En la Figura 9 se muestra una síntesis gráfica para realizar esta comparación. Las barras blancas representan los niveles de daño reales discretos D_k , asociados a intervalos de daño μ_D . Las líneas horizontales y las cruces representan, respectivamente, el valor del nivel de daño analítico inicial y el conservador (a través del uso de los QC). Por lo tanto, una mayor distancia

entre esta barra y la cruz está asociada con una mayor incertidumbre. En casos como la Muestra 6, tal incertidumbre es inexistente, indicando que la adquisición de información fue completamente satisfactoria. Las Muestras 4, 5 y 6 son casos en que la evaluación inicial se encuentra fuera del rango de los daños reales, pero donde el intervalo entre ésta y el valor conservador produce un solapamiento de ambos dominios. En el resto de las Muestras (1, 2, 3, 8, 9 y 10) el intervalo analítico se encuentra íntegramente comprendido dentro de la barra que representa el daño real producido por el sismo de 2017, revelando un buen ajuste entre éste y los daños predichos por el modelo matemático.

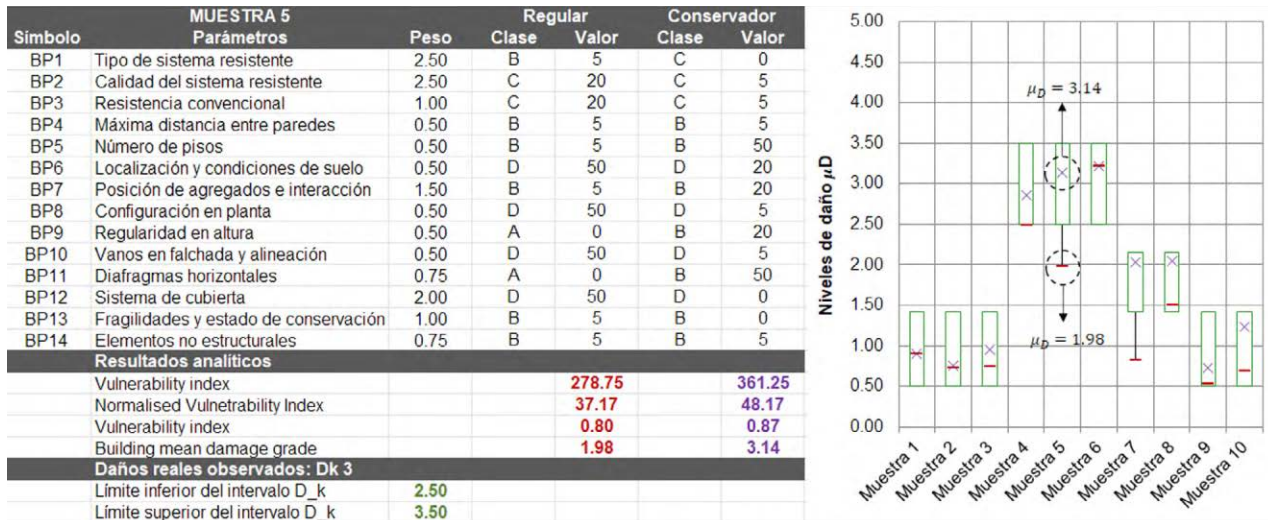


Figura 9. Ejemplo de cálculo de los niveles de daño analíticos para la Muestra 5 a partir de la clasificación de los parámetros (izquierda) y visualización en forma de intervalos traslapados (derecha)
Fuente: Autores, 2024.

Un aspecto adicional de interés sobre la asignación de factores QC es que puede realizarse una puntuación semicuantitativa para calificar qué tanta certidumbre existe sobre un determinado edificio de manera global. En efecto, la suma y normalización de los valores QC puede ser de utilidad para jerarquizar qué muestras requieren información más detallada. Los valores QC pueden ser tratados aritméticamente para normalizarlos en un índice de incertidumbre que permita comparar, dentro de una muestra, qué casos tienen una incertidumbre relativa mayor. Si esto se contrasta en una matriz con los niveles de daño, se puede incluso concluir qué edificios conjugan una mayor vulnerabilidad e incertidumbre, apuntando fácilmente a aquellos bienes que requieran una atención más urgente (Figura 10).

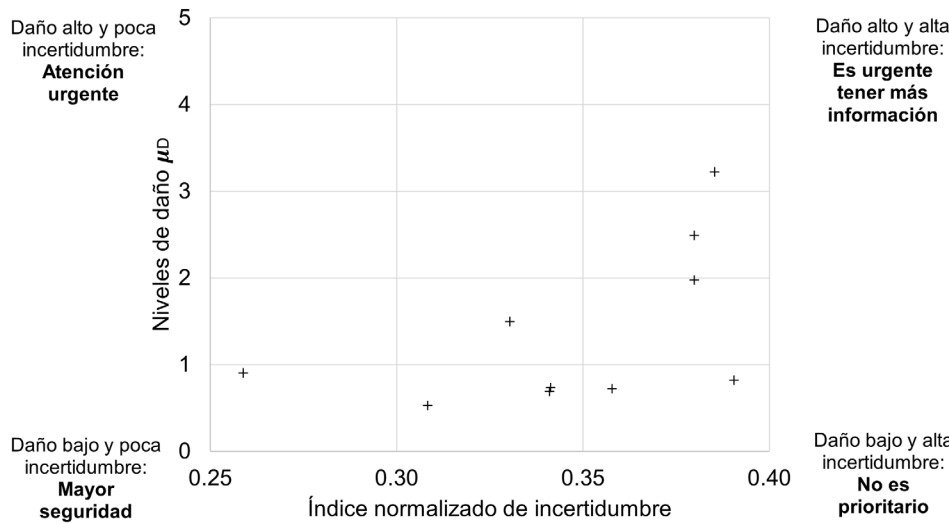


Figura 10. Vista de los intervalos de daño (izquierda)

Fuente: Autores, 2024.

Nota: Existen muestras con una dispersión mayor debido a incertidumbres mayores. A la derecha, dispersión del índice normalizado de incertidumbre y niveles de daño en el plano cartesiano.

Morelos

Las campañas realizadas en el estado de Morelos pusieron a prueba la robustez y estabilidad de las herramientas diseñadas para realizar adquisición de datos a escala urbana. A diferencia de las experiencias de Atlixco-I y II, en el estado de Morelos se seleccionaron cuatro centros históricos pertenecientes a sendos municipios, de manera que la muestra abarcó un total de 167 construcciones a largo de la entidad. Este trabajo consistió en una etapa previa de preparación en que se sistematizó la información encontrada en fuentes documentales y en una segunda fase de visitas de campo donde la información fue completada, verificada y/o corregida.

Al igual que en los ejercicios precedentes, se partió de los inmuebles inscritos en el Catálogo Nacional de Monumentos Históricos, tomando este documento como punto de partida para habilitar la base de datos SIG. Las limitaciones en términos de recursos materiales y humanos condicionaron fuertemente la campaña en sitio, por lo que el total de 167 edificios fue visitado en cuatro jornadas.

Una de las claves para agilizar estas prospecciones fue la adopción del factor QC, dado que permite tomar registro de una situación en que no se puede obtener información fiable (típicamente por falta de acceso a las construcciones) y seguir adelante sin que eso ponga en causa el conjunto de los trabajos y su calidad de conjunto. Otro aspecto crítico fue la captura de los datos directamente en la base de datos, durante las campañas de campo, a través de la base de datos almacenada en la nube informática. El uso del sistema de posicionamiento del teléfono fue, en todo momento, la manera más ágil de rastrear los edificios para levantar las encuestas.

En esta campaña se puso a prueba el procedimiento ensayado en Atlixco-II i.e., la elaboración de intervalos de niveles de daño a partir de un valor inicial y uno conservador para la vulnerabilidad a partir del factor QC. Los resultados arrojaron un alto nivel de consistencia, con traslapes entre ambos intervalos en más del 93% de las muestras. Sin embargo, el tamaño de la muestra se vio también como la oportunidad de evaluar la representatividad del método e, incluso, proponer una calibración que diera como resultado un mejor ajuste tipológico.

Las calibraciones que este método ha tenido se han realizado fundamentalmente en la distribución de los pesos p_i de cada parámetro, ajustando la importancia relativa de cada uno de éstos en el comportamiento global de la estructura. Este proceso, típicamente realizado a través de regresiones múltiples y por medios analíticos, suele ser complejo y difícil, pues implica una serie de balances no lineales. Sin embargo, una alternativa puede ser el reconocimiento de patrones ocultos en relaciones causales de datos de entrada y de salida por medio de inteligencia artificial. En otras palabras, el uso de algoritmos entrenados para reconocer qué relaciones matemáticas (modelos) pueden establecerse entre una serie de datos de entrada (en este caso, los parámetros y sus clases de vulnerabilidad) y resultados asociados a éstos (los niveles de daño estructural).

La calidad de los modelos basados en inteligencia artificial es muy dependiente del volumen, dispersión y consistencia de los datos de entrenamiento, por lo que pueden existir limitaciones importantes ante muestras relativamente pequeñas. Sin embargo, la implementación de un algoritmo clasificador del tipo bosque aleatorio ("Random Forest Classifier – RFC") demostró ser capaz de establecer un conjunto de pesos ajustados manteniendo un nivel razonable de representatividad.

El proceso general de este tipo de calibración tiene mucha semejanza con los procedimientos empíricos de ingeniería forense (Figura 6). En términos muy generales, la base de datos se divide en dos grandes fracciones. Una destinada a "entrenar" al algoritmo y una reservada para evaluar la calidad de las predicciones del algoritmo. Esta última fracción típicamente ronda el 20% de los datos totales. Entendiendo que la evaluación de la vulnerabilidad sísmica es un problema de clasificación (donde a cada edificio se le asigna un nivel de daño según una intensidad sísmica dada), se tienen datos de entrada y de salida entre los que se presume una relación causal.

Hasta este momento, hemos aceptado que la relación causal está dada por el modelo matemático presentado en las secciones previas. Sin embargo, al algoritmo sólo se le presentarán las entradas (modelos semánticos, constituidos por los parámetros y sus clases de vulnerabilidad) y las salidas (los niveles de daño reales que tales edificios tuvieron), sin reconocer *a priori* el modelo que gobierna las relaciones entre ambas.

El algoritmo analiza la información y “entrena” un modelo que ha establece unas relaciones causales que presume significativas entre los datos de entrada y de salida. Una manera de evaluar qué tan representativas son esas relaciones causales es a través de comparar las predicciones que el algoritmo genera ante nuevas entradas. Para este efecto, se le presentan al algoritmo entrenado únicamente las entradas de la fracción de datos reservada para evaluación. Si las predicciones del modelo son consistentes con las salidas conocidas de antemano para tales entradas, podemos sostener que el modelo representa de manera razonable al fenómeno y que, en consecuencia, las relaciones causales establecidas por el mismo son significativas (Figura 11).

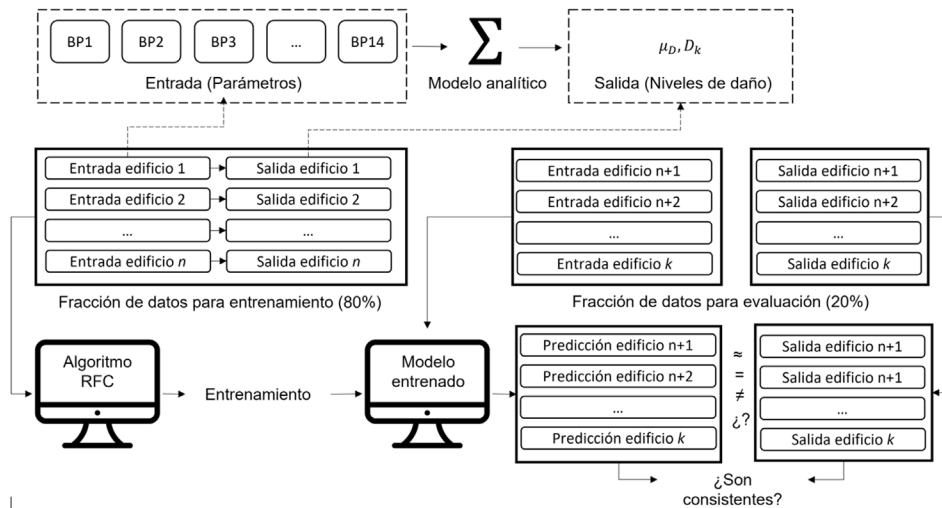


Figura 11. Diagrama general del procedimiento de entrenamiento y evaluación de un algoritmo de Machine Learning entrenado
Fuente: Autores, 2024.

Es así como, de manera muy superficialmente expuesta, un algoritmo de Machine Learning pudo asistir el proceso de calibración y ajuste del modelo para diferentes ambientes construidos, reasignando los pesos proporcionales de los parámetros ante la evidencia recogida en campo. Este procedimiento obvia algunos aspectos fundamentales del tratamiento de datos, como la selección de parámetros significativos para explicar los resultados, pues se está partiendo de un modelo semántico previamente diseñado para representar la vulnerabilidad sísmica de construcciones en mampostería. La implementación técnica de esta calibración se reporta pormenorizadamente en el trabajo de Ramírez Eudave et al. [28], donde se detallan los pasos y ajustes seguidos.

	Original	Calibrado
MMI. Intensidad sísmica en escala EMS-98	NA	6.10%
BP14. Elementos no estructurales	5.14%	1.34%
BP13. Fragilidad y estado de conservación	6.86%	12.52%
BP12. Sistema de cubiertas	13.09%	7.91%
BP11. Diafragmas horizontales	4.91%	8.99%
BP10. Vanos en fachada y alineación	0.33%	2.59%
BP9. Regularidad en altura	0.33%	5.66%
BP8. Configuración en planta	0.33%	7.51%
BP7. Posición relativa con adyacencias	10.00%	10.47%
BP6. Situación geológica	3.33%	6.46%
BP5. Número de niveles	3.33%	1.15%
BP4. Máxima distancia entre paredes	3.33%	8.82%
BP3. Resistencia convencional	6.67%	1.55%
BP2. Calidad del sistema resistente	16.67%	11.91%
BP1. Tipo de sistema resistente	16.67%	7.01%

Tabla 2. Redistribución de pesos después de la calibración por Machine Learning

Fuente: Autores, 2024.

Nota: Al haber combinado muestras de municipios distintos, la intensidad sísmica local MMI se convierte en un parámetro susceptible de alterar el resultado.

Los resultados de esta calibración, reportados en la Tabla 2, demuestran cambios sustanciales en varios de los parámetros. Es importante reconocer que esta calibración puede verse fuertemente condicionada por la variabilidad de las clases dentro de cada parámetro (i.e., un

parámetro que presente poca variabilidad dentro de la muestra será asociado a un peso relativo menor), por lo que este modelo calibrado puede no ser extrapolable a otros ambientes tipológicos. Sin embargo, la posibilidad de ejecutar estas calibraciones de manera expedita y relativamente sencilla abre la posibilidad de generar modelos diferentes adaptados a modelos de arquitectura vernácula, por ejemplo. La condición para que tal ajuste sea válido es que esté realizado a partir de evidencia empírica de hechos precedentes verificables.

DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El propósito de los trabajos aquí expuestos es, sobre todo, demostrar la factibilidad de realizar evaluaciones de la vulnerabilidad sísmica de estructuras históricas a escala urbana a partir de información existente y con una cantidad mínima de recursos para adquirir los datos que sean necesarios para completar las descripciones paramétricas aquí presentadas.

Los casos de estudio en Atlixco y Morelos han permitido sostener satisfactoriamente la hipótesis de aplicabilidad y representatividad del método simplificado de estimación de la vulnerabilidad sísmica, basado en los parámetros propuestos tras una serie de evaluaciones de ingeniería forense en ambientes históricos urbanos europeos.

El hecho de haber podido realizar las evaluaciones de manera remota y recurriendo a fuentes documentales mayormente existentes al momento de los sismos de Puebla-Morelos en 2017 demuestra que existían medios para realizar evaluaciones de la vulnerabilidad sísmica en ese momento. Esto debe llamar nuestra atención hacia la necesidad de replantear las acciones proactivas como una política continua que atañe no solamente a intereses culturales, sino de desarrollo urbano, protección civil y sostenibilidad.

Es fundamental que el paradigma reactivo ante eventos sísmicos incluya la resiliencia a largo plazo como una construcción que involucre el aprovechamiento de la información existente, así como la recopilación sistematizada y coherente de los escenarios de daños y colapsos para elaborar y perfeccionar métodos de evaluación de la vulnerabilidad a través de la ingeniería forense. De manera análoga, es urgente repensar los modelos actuales de catalogación para incluir en estos parámetros de una evaluación efectiva de las vulnerabilidades más relevantes ante eventos naturales, incluyendo los sismos.

Incluso si la seguridad estructural de las construcciones es típicamente evaluada tras un acontecimiento sísmico (por medio de brigadas con especialistas en ingeniería o arquitectura), es importante que los resultados de estas campañas se recojan en registros de escala territorial para realizar análisis de forma retroactiva. Esto, sin duda, nos permitiría aprender mucho sobre la vulnerabilidad sísmica asociada a determinadas tipologías, constituyendo una etapa de resiliencia vinculada a la investigación científica. En este mismo tenor, resulta de interés contar con escalas semicuantitativas para calificar los niveles de daño, tales como el propuesto por el marco conceptual del sistema EMS-98.

A pesar de que la escala de intensidad sísmica EMS-98 se relaciona con efectos locales del terremoto, sigue siendo útil para situar a una construcción específica dentro del contexto de daños y pérdidas estadísticos asociados a una intensidad determinada. El uso de esta escala permite, además, el aprovechamiento y contextualización de información de daños y pérdidas asociados a terremotos no registrados instrumentalmente, lo que abre la posibilidad de realizar estudios basados en ventanas temporales amplias que cuenten con evidencias documentales de otro tipo, incluso testimoniales.

El método sugerido en esta investigación parece tener una representatividad adecuada en los medios urbanos estudiados. Es importante tener en cuenta, sin embargo, que las tipologías arquitectónicas pueden ser una limitación importante en ciertos casos. En consecuencia, los análisis tipológicos y la catalogación no deben limitarse a aspectos constructivos y de diseño, sino también a la tipificación de mecanismos de colapso, patrones típicos de daño y vulnerabilidades específicas.

Aunque el análisis de la vulnerabilidad no es directamente equivalente al análisis de riesgo (pues no necesariamente evalúa los elementos expuestos), sí es imprescindible para llevar a cabo una identificación oportuna de estructuras y edificios que puedan alcanzar estados límites ante una determinada demanda sísmica. Incluso, ciñéndose tan solo a los resultados normalizados dentro

de una población, dan pie para establecer prioridades de atención que conduzcan a análisis más detallados en aquellos bienes que, de manera preliminar, parezcan ser más vulnerables.

Un análisis de interés (que no ha formado parte de estas experiencias) es la evaluación de un entorno urbano a largo plazo basado en horizontes de vida nominal de las estructuras. El cruzamiento de las curvas de intensidad sísmica y daño con los sismos típicos de acuerdo con diferentes períodos de retorno puede ser esclarecedor para realizar evaluaciones cualitativas sobre comunidades que sean colectivamente más vulnerables en diferentes umbrales del tiempo.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos utilizados para la realización de los experimentos descritos en este artículo están disponibles mediante solicitud razonable y expresa a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por la Fundação para a Ciência e a Tecnologia y el Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior de Portugal a través de la unidad de Investigación y Desarrollo (R&D) del instituto para la Sustentabilidad e Innovación en Ingeniería Estructural (Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering - ISISE) bajo la referencia UIDB / 04029/2020. La investigación fue financiada por la Fundação para a Ciência e a Tecnologia (Portugal) a través de la beca PD/BD/150385/2019 atribuida al primer autor.

REFERENCIAS

- [1] ISO - International Organization for Standardization, "ISO 31000 Risk management — principles and guidelines," *61010-1 Iec2001*, vol. 2006, p.24, 2009.
- [2] C. Gavarini, "Seismic risk in historical centers," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 21, no. 5, pp. 459–466, Jul. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(01\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(01)00027-6)
- [3] Cámara de Diputados, *Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas*. México: Diario Oficial de la Federación, 2012, pp. 1–15.
- [4] D. Díaz Fuentes, L. C. Bustos, J. Gómez Badillo, R. Caffarella, M. Laterza, and M. D'Amato, "Evaluación sistemática de templos y conjuntos religiosos afectados por los terremotos de septiembre del 2017 y análisis de los resultados. Aplicación en 10 iglesias del Estado de Morelos, México," *Arch. Churubusco*, vol. 2, no. 4, 2018.
- [5] D. D'Ayala and E. Speranza, "Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings," *Earthq. Spectra*, vol. 19, no. 3, pp. 479–509, 2003. <https://doi.org/10.1193/1.1599896>
- [6] Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, "European Macroseismic Scale 1998," *Cah. du Cent. Eur. Géodynamique Séismologie*, vol. 15, p. 99, 1998. <https://doi.org/10.2312/EMS-98.full.en>
- [7] GNDT, "Manuale Per Il Rilevamento Della Vulnerabilità Sismica Degli Edifici," 1993.
- [8] A. Goretti and G. Di Pasquale, "An overview of post-earthquake damage assessment in Italy. Earthquake Eng. Res. Inst.," *Earthq. Eng. Res. Inst. Work. report, Pasadena, CA, USA, 18 pp*, 2002.
- [9] S. Caprano, S. Ortiz, and R. Valencia, "Los efectos económicos de los sismos de septiembre," *Revista Economía Informa*, vol. 408, no. January-February, pp. 16–33, 2018.
- [10] M. García *et al.*, *Sismos y patrimonio cultural: testimonios, enseñanza y desafíos, 2017 y 2018*, 1st ed. Mexico: Secretaría de Cultura, 2018.
- [11] INEGI - Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "Encuesta Intercensal 2015," *Subsistema de Información Demográfica y Social*, 2023. <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/#Microdatos>
- [12] T.M. Ferreira, R. Maio, and R. Vicente, "Seismic vulnerability assessment of the old city centre of Horta, Azores: calibration and application of a seismic vulnerability index method," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 15, no. 7, pp. 2879–2899, Jul. 2017. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0071-9>
- [13] T.M. Ferreira, R. Vicente, J.A.R. Mendes da Silva, H. Varum, and A. Costa, "Seismic vulnerability assessment of historical urban centres: case study of the old city centre in Seixal, Portugal," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 11, no. 5, pp. 1753–1773, Oct. 2013. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9447-2>

- [14] T.M. Ferreira, R. Vicente, and H. Varum, "Seismic vulnerability assessment of masonry facade walls: Development, application and validation of a new scoring method," *Struct. Eng. Mech.*, vol. 50, no. 4, pp. 541–561, May 2014. <https://doi.org/10.12989/sem.2014.50.4.541>
- [15] T.M. Ferreira, "Out-of-plane Seismic Performance of Stone Masonry Walls: Experimental and Analytical Assessment," Universidade de Aveiro, 2015.
- [16] A.E. Athmani, A. Gouasmia, T.M. Ferreira, R. Vicente, and A. Khemis, "Seismic vulnerability assessment of historical masonry buildings located in Annaba city (Algeria) using non ad-hoc data survey," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 13, no. 8, pp. 2283–2307, Aug. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9717-7>
- [17] M. Mosoarca, I. Onescu, E. Onescu, B. Azap, N. Chieffo, and M. Szitar-Sirbu, "Seismic vulnerability assessment for the historical areas of the Timisoara city, Romania," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 101, no. November 2018, pp. 86–112, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.013>
- [18] M. Hadzima-Nyarko, G. Pavica, and M. Lesic, "Seismic vulnerability of old confined masonry buildings in Osijek, Croatia," *Earthquakes Struct.*, vol. 11, no. 4, pp. 629–648, Oct. 2016. <https://doi.org/10.12989/eas.2016.11.4.629>
- [19] R. Ramírez Eudave, T.M. Ferreira, and R. Vicente, "Parameter-based seismic vulnerability assessment of Mexican historical buildings: Insights, suitability, and uncertainty treatment," *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 74, p. 102909, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.102909>
- [20] A. Blyth *et al.*, "Assessment and mitigation of seismic risk at the urban scale: an application to the historic city center of Leiria, Portugal," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 18, no. 6, pp. 2607–2634, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00795-2>
- [21] INAH, "Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles," *Centro de Documentación de la CNMH*, 2019. <https://catalogonacionalmhi.inah.gob.mx/consultaPublica>
- [22] Coordinación Nacional de Monumentos Históricos, "Ficha de catálogo I-09-02041 Capilla de Manzanares o del Señor de la Humildad," *Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles*, 2023. https://catalogonacionalmhi.inah.gob.mx/consulta_publica/detalle/11991
- [23] R. Ramírez Eudave and T.M. Ferreira, "On the potential of using the Mexican National Catalogue of Historical Monuments for assessing the seismic vulnerability of existing buildings: a proof-of-concept study," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 19, no. 12, pp. 4945–4978, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01154-5>
- [24] QGIS Development Team, "QGIS Geographic Information System (Software)." 2021.
- [25] M. Dobias, Sab, M. Varga, and P. Petrik, "Iutraconsulting/mergin: 2021.6.1 (Software)." Zenodo, 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6376045>
- [26] T. Mizera *et al.*, "Iutraconsulting/input: Release 1.3.0 (Software)." Zenodo, 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6375199>
- [27] R. Ramírez Eudave, "Seismic Vulnerability Calculator and Database (Software)." Guimarães, 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7180849>
- [28] R. Ramírez Eudave, D. Rodrigues, T.M. Ferreira, and R. Vicente, "Implementing Open-Source Information Systems for Assessing and Managing the Seismic Vulnerability of Historical Constructions," *Buildings*, vol. 13, no. 2, p. 540, Feb. 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13020540>
- [29] C. Columbro, R.R. Eudave, T.M. Ferreira, P.B. Lourenço, and G. Fabbrocino, "On the Use of Web Mapping Platforms to Support the Seismic Vulnerability Assessment of Old Urban Areas," *Remote Sens.*, vol. 14, no. 6, pp. 1–25, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14061424>
- [30] A. Flores Rodríguez, "Catálogo de zona de monumentos, Atlixco, Puebla, sector 1. Un enfoque contemporáneo de catalogación del patrimonio cultural.," Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2018.
- [31] F. Ruíz Herrera, "Catálogo de zona de monumentos, Atlixco, Puebla, sector 1. Un enfoque contemporáneo de catalogación del patrimonio cultural.," Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2018.
- [32] E. Tototzintle Huitle, "Catálogo de zona de monumentos, Atlixco, Puebla, sector 1. Un enfoque contemporáneo de catalogación del patrimonio cultural.," Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2018.
- [33] P. Martínez Bret, "Catálogo de zona de monumentos, Atlixco, Puebla, sector 1. Un enfoque contemporáneo de catalogación del patrimonio cultural.," Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2018.

- [34] R. Ramírez Eudave, T. M. Ferreira, R. Vicente, B. Paulo, and F. Peña, "Parametric and Machine Learning-Based Analysis of the Seismic Vulnerability of Adobe Historical Buildings Damaged After the September 2017 Mexico Earthquakes," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–24, 2023. <https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2200739>