

Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de un conjunto histórico urbano: el caso del barrio Yungay de Santiago de Chile

Giorgia Amoruso

Pontificia Universidad Católica de Chile

Universitat Politècnica de València

giorgia.amoruso@gmail.com

Nuria Chiara Palazzi

Universidad Andrés Bello

nuria.palazzi@unab.cl

Artículo producido a partir de la tesis desarrollada en cotutela con el Doctorado en Arquitectura y Estudios Urbanos

Profesores guía: Adolfo Alonso Durà, Blanca Elvira Pérez Villalón, Saverio Sturm

<https://doi.org/10.7764/AA.2024.12>

Resumen

La investigación presentada en el artículo se basa en el análisis de la vulnerabilidad sísmica de los conjuntos urbanos históricos. Estos se consideran sistemas complejos de gran valor material e inmaterial, y cuyo valor patrimonial es mayor que la suma de valores tangibles de los edificios que lo constituyen. Poseen una vulnerabilidad excepcional ante la ocurrencia de eventos sísmicos, pues corren el riesgo de perderse de manera definitiva. El artículo busca responder a la complejidad de estos conjuntos a través de un modelo de evaluación de la vulnerabilidad específico que permita entender su comportamiento, prever y tipificar los daños y traducir estos aprendizajes en insumos valiosos para políticas públicas de prevención y conservación del territorio urbano. Para ello, se trabaja un enfoque interdisciplinario que vincula la ciencia y las herramientas de diagnóstico de la ingeniería con los estudios tipológicos, espaciales y formales propios de la arquitectura.

Palabras clave: Conjuntos históricos urbanos, barrio Yungay, riesgo sísmico, vulnerabilidad.

INTRODUCCIÓN

Los conjuntos urbanos históricos son sistemas complejos cuyo valor patrimonial es mayor que la simple suma de valores tangibles de los edificios que lo constituyen. Se trata, de hecho, de “asentamientos humanos vivos, fuertemente condicionados por una estructura física proveniente del pasado y reconocibles como representativos de la evolución e identidad de un pueblo” (UNESCO/PNUD 1977).

En contextos altamente sísmicos como el chileno, estos fragmentos de ciudad están constantemente expuestos al riesgo de desaparecer, llevándose con ellos, también la herencia inmaterial de la que son titulares. Los megaterremotos de Algarrobo del 1985 (Mw 8.0) y del Maule en 2010 (Mw 8.8) que sacudieron al Valle Central, han evidenciado la alta vulnerabilidad tanto de su patrimonio inmueble, como del entramado de las relaciones sociales y culturales que lo anima.

El terremoto del Maule fue devastador en términos de pérdida de vidas humanas (más de 500 víctimas), económicas (entre 15-30 mil millones de dólares) y de destrucción de infraestructura y vivienda (medio millón de hogares resultaron gravemente dañados) (ARCMT 2011). En particular, 370 mil edificios patrimoniales de mampostería simple —partes de los conjuntos urbanos históricos del Valle Central— quedaron completamente destruidos o irreparablemente dañados, 500.000 viviendas presentaron daños estructurales severos y más de 200.000 familias perdieron sus hogares (Consejo Nacional de la Cultura y las Artes 2013, MINVU 2010). La magnitud de las implicancias sociales, materiales y económicas producidas por este evento sísmico, evidenció la necesidad de disponer e implementar políticas públicas orientadas a la prevención y mitigación del riesgo sísmico, particularmente en lo que concierne a los conjuntos urbanos históricos.

A la fecha, diversas estrategias y métodos para evaluar la vulnerabilidad sísmica de estructuras históricas en Chile, han sido aplicadas. Sin embargo, la mayoría de estos análisis sólo han sido desarrollados en edificios reconocidos como Monumentos Nacionales (iglesias, palacios, etc.), dejando de lado a los conjuntos urbanos históricos (Palazzi et al. 2020). Si bien existen estudios que centran su atención en el desempeño sísmico de monumentos que constituyen unidad estructural individual (Jorquera et al. 2016; Sandoval, Valledor y Lopez-García 2017; Torres et al. 2018; Palazzi et al. 2018), son escasas las investigaciones focalizadas en la evaluación de la vulnerabilidad de los fragmentos históricos de las ciudades (Palazzi et al. 2020).

Es en este contexto, que la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de conjuntos urbanos históricos chilenos, se convierte en una herramienta imprescindible para la planificación preventiva, la protección y conservación de este tipo de edi-

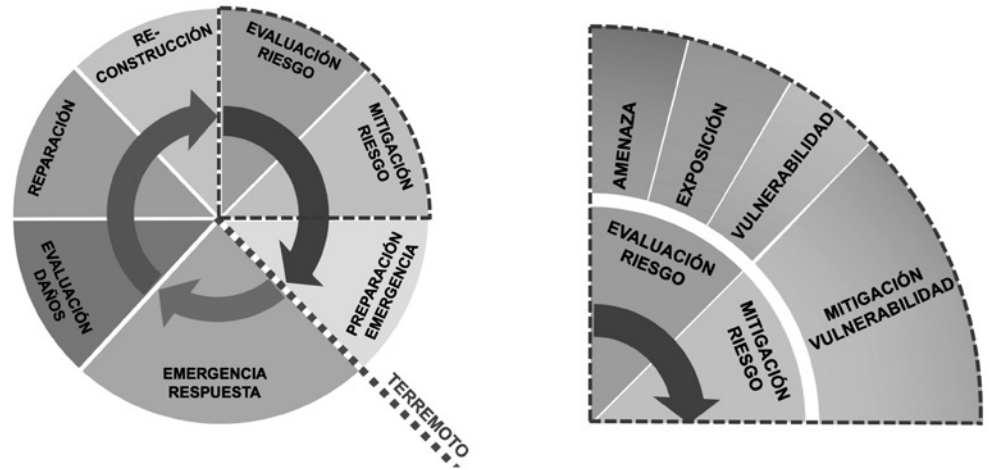


FIG. 01: Construcción del patrimonio a través de los imaginarios urbanos. Fuente: elaboración propia, 2020.

ficaciones, contribuyendo a la mitigación de las pérdidas humanas y socioeconómicas inherentes a eventos sísmicos futuros. A partir de lo anterior, esta investigación se centra en la simulación y evaluación del comportamiento sísmico de fragmentos de una ciudad histórica, viviendas y edificios ordinarios, que son parte de agregados estructurales (manzanas urbanas) del pericentro de Santiago —pero comunes a muchas otras ciudades del territorio nacional—. Esto, con el objetivo de entender cabalmente su comportamiento, prever y tipificar los daños y traducir estos aprendizajes en insumos valiosos para políticas públicas de prevención y conservación del territorio urbano que alberga a miles de familias a lo largo de todo Chile. El enfoque por medio del cual se pretende llevar a cabo esta investigación es de tipo interdisciplinario, ya que vincula la ciencia y las herramientas de diagnóstico de la ingeniería con los estudios tipológicos, espaciales y formales propios de la arquitectura.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el contexto de la identificación e implementación de estrategias orientadas a la prevención y mitigación del riesgo sísmico, existe el “ciclo de gestión del riesgo” (FIG. 01). Esta herramienta ha permitido poner orden en la materia, definiendo las fases *ex ante* y *ex post* de una amenaza exógena originada por un fenómeno natural (por ejemplo, un evento sísmico) y está orientada a una correcta gestión del riesgo. La evaluación del riesgo es generalmente realizada a través de la combinación de tres variables: exposición (E, es decir, personas, cosas, bienes que pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza), amenaza (A, es decir, la probabilidad de exceder cierta intensidad de agitación del suelo en un período y área fija) y vulnerabilidad (V, es decir, la probabilidad de alcanzar un cierto nivel de daño bajo los efectos de un evento sísmico en un período y área fija). La evaluación exitosa de las variables E, A y V es imprescindible para determinar estrategias de mitigación de riesgos confiables y efectivas. En particular, la predicción

de la vulnerabilidad sísmica es un componente fundamental de un modelo de pronóstico de daño y pérdida debido a un escenario determinado, que permite reducir las causas y anticipar el alcance del daño. La mitigación del riesgo pasa necesariamente por la mitigación de las vulnerabilidades. Esto otorga a la evaluación de la vulnerabilidad un papel clave.

Los enfoques empíricos basados en la evaluación de características tipológicas, estructurales y materiales de los edificios, generalmente se emplean como una herramienta adecuada en la evaluación integral de la vulnerabilidad a escala urbana, dado el gran número de estructuras a analizar. El más utilizado de estos procedimientos, llamado “método del índice de vulnerabilidad” (VI), permite la extrapolación sistemática de un índice, VI, relacionado con los niveles de vulnerabilidad sísmica de una cierta estructura, analizando diferentes factores de vulnerabilidad.

1. EL CASO DE ESTUDIO DEL BARRIO YUNGAY EN SANTIAGO DE CHILE

El barrio Yungay, ubicado en el área poniente de Santiago de Chile (FIG. 02), fue fundado en 1839 por decreto presidencial de Joaquín Prieto en la propiedad rural que fue de José Santiago Portales Larraín para conmemorar la victoria de Chile en la Guerra de la Confederación contra Perú y Bolivia. Desde su fundación hasta la primera década del siglo XX, Yungay fue consolidado y conectado con el centro de la ciudad. Entre 1929 y 1989, se mantuvo sin cambios, hasta que se revocó el Plan Oficial de Urbanización de la comuna de Santiago, causando el crecimiento de dinámicas especulativas a través del reemplazo de edificios históricos por torres de múltiples pisos.

A pesar de los terremotos que sacudieron este patrimonio (en particular de Algarrobo 1985, 8.0Mw y del Maule 2010, 8.8Mw) y del avance de la modernidad, el barrio Yungay es uno de los pocos en la ciudad de Santiago que todavía conserva características propias de conjunto ur-

bano histórico. Además, tiene una interesante y ejemplar historia de resiliencia y de lucha de la ciudadanía por la protección del patrimonio material e inmaterial del barrio.

2. PRIMER NIVEL DE ANÁLISIS

Debido al gran número de edificios que conforman el barrio Yungay, al momento de aplicar el método VI a los edificios (3.123 estructuras entre históricas y de nueva construcción distribuidas en 96 manzanas urbanas), el primer nivel de análisis propuesto ha tenido como objetivo identificar clases tipológicas de estas estructuras, para luego calcular el tamaño muestral representativo de cada clase. Las clases han sido identificadas teniendo en cuenta las siguientes características:

i. Período de construcción de los edificios en relación con los principales hitos de políticas públicas y normas sísmicas. Se definieron los siguientes periodos: 1880 a 1910, fundacional; 1910 a 1940, higienista; 1940 a 1960, comienzo de la modernización; 1960 a 1990, degradación y fragmentación; 1990 a 2010, plan de renovación urbana; 2010 a 2022, periodos de conciencia y defensa.

ii. Materialidad de los elementos estructurales, considerando la escala EMS-98 (TABLA 01).

iii. Número de pisos. Se definió, para mampostería o albañilería simple, tres rangos: 1 piso, 2 a 3 pisos, 4 pisos. Para otras materialidades, se establecieron dos rangos: 1 a 9 pisos y 10 o más pisos.

Las principales fuentes consultadas para caracterizar los 3.123 edificios del barrio Yungay han sido los catastros de 1910, 1939 y 1960, el catastro del Servicio de Impuestos Internos (SII) y fuentes documentales municipales (para específicos edificios). Los datos recolectados han sido posteriormente verificados consultando las plataformas de Google Maps, Google Street View y Google Earth en distintos años (2012, 2014, 2015 y 2021) y a través de exhaustivas vistas a terreno. Los resultados de este primer análisis han sido mapeados como se muestra en las FIGURAS 03 Y 04 (open source Qgis).

Los tamaños de las muestras por cada clase tipológica de edificios se calcularon utilizando la expresión: $ss = \frac{\{z^2 p(1-p)\}/e^2}{\{1+[z^2 p(1-p)]/e^2 N\}}$, donde n es el tamaño de la población, z es la puntuación z, E es el error de margen, y P es la desviación estándar, para la cual se determina un intervalo de confianza CI = 85% y un margen de error del 10%, como se resume en la TABLA 02.

Una vez identificado el tamaño muestral representativo de una clase tipológica, se empleó el método del Índice VI, propuesto por Ferreira, Maio y Vicente (2017) para edificios en agregación de mampostería o albañilería no reforzada (URM) y por Ferreira, Rodriguez y Vicente (2020) para las estructuras de hormigón armado/ albañilería confinada (RC/CM), con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad sísmica de estas estructuras.



FIG. 02: Localización Barrio Yungay. Fuente: elaboración propia a partir de Google Maps.

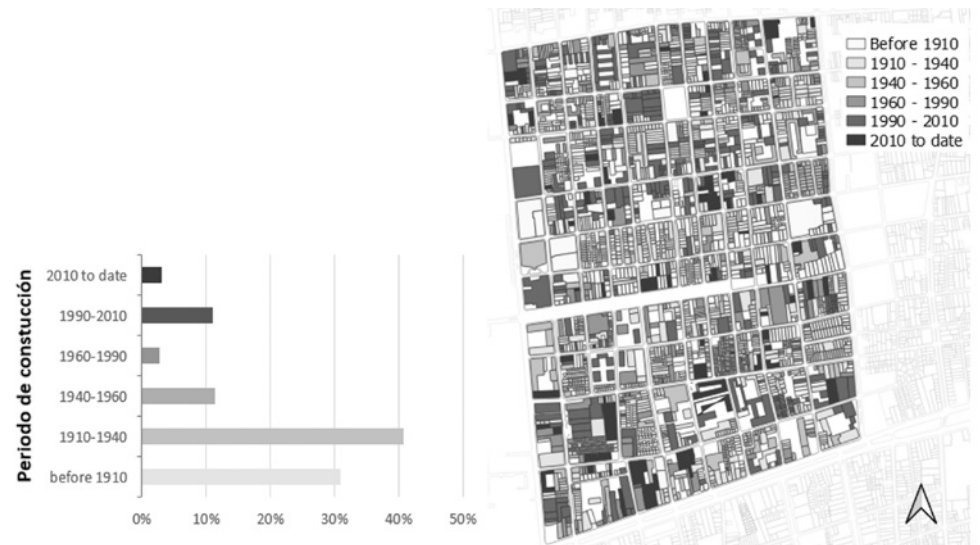


FIG. 03: Análisis primer nivel: distribución % y mapa de edificios del barrio Yungay dependiendo del periodo de construcción. Fuente: elaboración propia mediante la aplicación open source Qgis

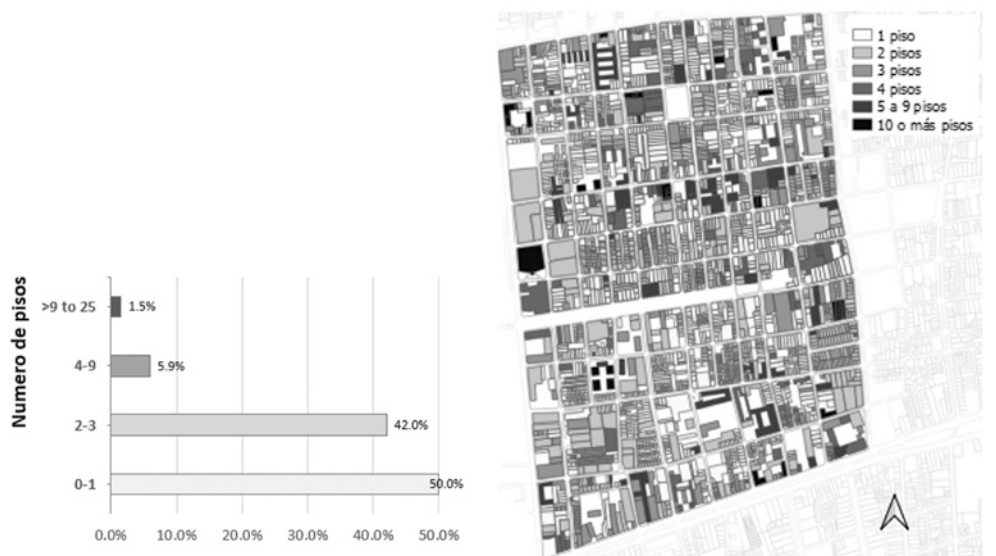


FIG. 04: Análisis primer nivel: distribución % y mapa de edificios del barrio Yungay dependiendo de los números de pisos. Fuente: elaboración propia mediante la aplicación open source Qgis, 2023

TIPO DE ESTRUCTURA		CLASE DE VULNERABILIDAD					
		A	B	C	D	E	F
Mampostería	Cascotes. Piedras del campo	○					
	Adobe (ladrillos de barro)	○—					
	Piedras pequeñas, sencillas	— ○					
	Piedras grandes, masivas		— ○—				
	No reforzada, con unidades de piedra manufacturadas	— ○—					
	No reforzada, con forjados de hormigón armado		— ○—				
	Reforzada o confinada			— ○—			
Hormigón armado	Estructura sin diseño sismorresistente	— ○—					
	Estructura con nivel moderado de diseño sismorresistente		— ○—				
	Estructura con nivel alto de diseño sismorresistente			— ○—			
	Muros sin diseño sismorresistente	— ○—					
	Muros con nivel moderado de diseño sismorresistente		— ○—				
	Muros con nivel alto de diseño sismorresistente			— ○—			
Metal	Estructuras Metálicas			— ○—			
Madera	Estructuras de Madera		— ○—				

- Clase de vulnerabilidad más probable
- Rango probable
- Rango de casos excepcionales menos probables

TABLA. 01: Tabla correlativa de clases de vulnerabilidad y tipos de estructuras – escala EMS 98.

PERIOD	MATERIAL	N° STORIES	N° BUILDINGS	N° B. SELECCION	
befor 1910	MASONRY	1	551	48	
		1-2	193	42	
			744		
1910-1940	MASONRY	1	768	49	
		2-3	340	46	
	4	1			
				1109	
	AC-HA	1-9	311	45	
>10	0				
			311		
			1420		
1940-1960	MASONRY	1	27	18	
		2-3	14	12	
	4	1	1		
				42	
	AC-HA-STEEL	1-9	242	43	
>10	1	1			
			243		
			285		
1960-1990	MASONRY	1	31	20	
		2-3	13	11	
				44	
	AC-HA-STEEL	1-6	202	42	
			202		
			246		
1990-2010	MASONRY	1	0	2	
		2-3	2	2	
				2	
	AC-HA-STEEL	1-9	296	45	
>10	39	23			
			335		
			337		
after 2010	MASONRY	1	0		
		2-3	0		
				0	
	AC-HA-STEEL	1-9	88	33	
>10	3	3			
			91		
			91		
TOT			3123	484	

TABLA. 02: Tabla del cálculo del tamaño de las muestras significativo por cada grupo de pertenencia. Fuente: elaboración propia, 2023

Parámetros para edificios de albañilería y mampostería no reforzada	A	B	C	D	Pesos (p)	Peso relativo	
Grupo 1. Sistema estructural del edificio							50/100
BP1. Tipo de estructura resistente	0	5	20	50	2.50	16.67	
BP2. Calidad de la estructura resistente	0	5	20	50	2.50	16.67	
BP3. Esbeltez convencional	0	5	20	50	1,00	6.67	
BP4. Máxima distancia entre muros	0	5	20	50	0.50	3.33	
BP5. Número de pisos	0	5	20	50	0.50	3.33	
BP6. Ubicación y tipo de suelo	0	5	20	50	0.50	3.33	
Grupo 2. Irregularidad e interacciones							20/100
BP7. Posición e interacción en la agregación	0	5	20	50	1.50	10.0	
BP8. Configuración en planta	0	5	20	50	0.50	3.33	
BP9. Regularidad en su altura	0	5	20	50	0.50	3.33	
BP10. Alineamientos de las aperturas en fachada	0	5	20	50	0.50	3.33	
Grupo 3. Entrepisos y techo							18/100
BP11. Tipos de entrepisos	0	5	20	50	0.75	4.91	
BP12. Estructura de cubierta	0	5	20	50	2.00	13.09	
Grupo 4. Conservación y otros elementos							12/100
BP13. Estado de conservación	0	5	20	50	1.00	6.86	
BP14. Elementos no-estructurales	0	5	20	50	0.75	5.14	

TABLA. 03: Parámetros para el cálculo del índice de vulnerabilidad para edificios de hormigón armado y albañilería confinada. Fuente: elaboración propia basada en Ferreira, Rodrigues y Vicente 2020

3. SEGUNDO NIVEL DE ANÁLISIS

El método VI se aplicó a un total de 484 edificios, evaluando —a través de extensas visitas a terreno realizadas por las autoras durante un periodo de 3 meses— 14 parámetros de vulnerabilidad para los edificios de albañilería y mampostería simple (249 URM edificios, de acuerdo con la Tabla 03) y 8 para estructuras de hormigón armado y albañilería confinada (235 RC/CM edificios, de acuerdo con la tabla 04) que consideran aspectos geométricos, morfológicos y características estructurales, constructivas y de conservación. Para cada edificio, el índice VI se calculó como suma ponderada de los parámetros de vulnerabilidad, resumidos en las TABLAS 03 Y 04, de la siguiente manera:

$$VI_{URM} = \sum_{i=1}^{14} C_{Vi} \times p_i$$

$$VI_{RC/CM} = \sum_{i=1}^8 C_{Vi} \times p_i$$

Donde C_{Vi} es la clase de vulnerabilidad asignada a cada parámetro (es decir, A = 0; B = 5; C = 20; y D = 50, de la clase A, la mejor, a la clase D, la peor) y corresponde a la variabilidad del parámetro evaluado —en Ramírez Eudave, Ferreira y Vicente (2022), se proporciona una descripción extensa de cada parámetro y definición precisa de las categorías C_{Vi} —, y p_i es el peso asociado a cada parámetro que refleja la influencia de una sola característica en la vulnerabilidad global del edificio.

Las ponderaciones de los parámetros se obtuvieron a través de daños observados post-terremotos y al análisis experimental realizado y presentado en Ferreira, Maio y Vicente (2017). Este segundo nivel de evaluación ha requerido un estudio más detallado de los edificios seleccionados y sus características. Por lo tanto, ha sido necesario, no solo el estudio de fuentes documentales, como los registros catastrales y las tablas del Servicio de Impuestos Internos (SII), sino también numerosas visitas a terreno para evaluar algunos de los parámetros no deducibles de la información documental. Por ejemplo, el estado de conservación y, en general, para comprobar la veracidad de los datos presentes en las fichas del SII.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de la aplicación del método VI a los edificios en albañilería y mampostería no reforzada del barrio Yungay (FIG. 05), muestran que el 9.3% de ellos presentan un VI en el rango entre [0 ÷ 20] (es decir un bajo nivel de vulnerabilidad), el 31.2% presenta una vulnerabilidad media (20 ÷ 40), mientras el 59.5% presenta un nivel de vulnerabilidad medio-alto con un valor VI en el rango [40 ÷ 100], generalmente asociado a edifi-

Parámetros	A	B	C	D	Pesos (pi)
BP1. Configuración del edificio	0	5	20	50	1.50
BP2. Posición del edificio	0	5	20	50	0.50
BP3. Año de construcción	0	5	20	50	1.50
BP4. Configuración en planta	0	5	20	50	2.00
BP6. Regularidad en su altura	0	5	20	50	2.00
BP7. Mecanismo de soft-story	0	-	-	50	2.00
BP8. Presencia de columnas cortas	0	5	20	50	2.00
BP9. Presencia de otras vulnerabilidades	0	5	20	50	0.50

TABLA. 04: Parámetros para el cálculo del índice de vulnerabilidad para edificios de hormigón armado y albañilería confinada. Fuente: elaboración propia basada en Ferreira, Rodrigues y Vicente 2020



FIG. 05: Distribución del índice de vulnerabilidad VI. Fuente: elaboración propia mediante la aplicación open source Qgis, 2023

cios de 2 a 3 pisos construidos durante el período 1940-1960 y caracterizados por un mal estado de conservación.

De los 14 parámetros de vulnerabilidad analizados, los parámetros BP9, BP10 y BP11 presentan poca variabilidad y se caracterizan por Clases de tipo A en más del 80% de los casos. Por otro lado, es posible observar que el mayor nivel de vulnerabilidad de las estructuras URM se debe al tipo de estructura resistente (parámetro BP1, BP2), generalmente caracterizada por muros de albañilería no reforzada fuertemente deteriorada y/o a la ausencia de conexiones entre muros ortogonales (Clase C-D). Se detectan como ulteriores parámetros de vulnerabilidad, la presencia de estructuras de techos con empuje no contenido desde tirantes o soleras inferiores (BP13) y de elementos no estructurales sobresalientes (como ornamentaciones, antetechos etc., BP14). Finalmente, con respecto a los edificios de hormigón armado y albañilería confinada, el 36.3% presenta baja vulnerabilidad, el 40.5% presenta una vulnerabilidad media ($20 < VI < 40$) y 23.2% valores de VI en el rango $[40 \div 100]$. Es posible observar en la figura 05, que el 69.2% de los edificios existentes en barrio Yungay presenta un nivel de vulnerabilidad por encima de 40, correspondiente a una media-alta propensión al daño potencialmente generado por futuros terremotos.

CONCLUSIONES

El método propuesto pretende ser una guía para la evaluación de la vulnerabilidad en los conjuntos históricos, mediante dos niveles de análisis. Los resultados obtenidos a través de la aplicación del método deberían proporcionar los conocimientos necesarios para evaluar el riesgo y para dirigir las acciones de mitigación de manera consciente, privilegiando las acciones que tengan un mayor impacto para la protección de las vidas humanas y para la tutela del patrimonio histórico cultural. Es relevante aclarar que la investigación en cuestión se limita a la evaluación de la vulnerabilidad, y no pretende proponer una evaluación integral de los riesgos ni acciones concretas de mitigación, las cuales serán objeto de futuras investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

ARCMCT (American Red Cross Multi-Disciplinary Team). 2011. *Report on the 2010 Chilean earthquake and tsunami response*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1053, versión 1.1 <https://pubs.usgs.gov/of/2011/1053/>

Ramírez Eudave, Rafael, Tiago Miguel Ferreira y Romeu Vicente. 2022. "Parameter-Based Seismic Vulnerability Assessment of Mexican Historical Buildings: Insights, Suitability, and Uncertainty Treatment". *International Journal of Disaster Risk Reduction* 74, 102909.

Ferreira, Tiago Miguel, Rui Maio y Romeu Vicente. 2017. "Analysis of the Impact of Large-Scale Seismic Retrofitting Strategies Through the Application of a vulnerability-Based Approach on Traditional Masonry Buildings". *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 16: 329-348.

Ferreira, Tiago Miguel, Hugo Rodrigues y Romeu Vicente. 2020. "Seismic Vulnerability Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings in Urban Centers". *Sustainability* 12, no. 5: 1-20.

Consejo Nacional de las Culturas y las Artes. 2013. *Reconstrucción Patrimonial en Chile 2010-2012*. Santiago de Chile: Quad Graphics Ltda.

Jorquera, Natalia, Julio Vargas, María de la Luz Lobos, y David Cortez. 2016. "Revealing Earthquake-Resistant Geometrical Features in Heritage Masonry Architecture in Santiago, Chile". *International Journal of Architectural Heritage* 11, no. 4: 519-538.

MINVU (Ministerio de Vivienda y Urbanismo). 2010. *Plan de reconstrucción terremoto y maremoto del 27 de febrero de 2010*. <https://www.minvu.cl/wp-content/uploads/2019/06/Reporte-WEB-27F-2010-Julio-2020.pdf>

Palazzi, Nuria Chiara, Luisa Rovero, Ugo Tonietti, Juan Carlos De la Llera y Cristián Sandoval. 2018. "Seismic vulnerability assessment of unreinforced masonry churches in central Chile". 11 International Conference on Structural Analysis of Historical Construction – SAHC2018.

Palazzi, Nuria Chiara, Philomene Favier, Luisa Rovero, Cristian Sandoval y Juan Carlos de la Llera. 2020. "Seismic Damage and Fragility Assessment of Ancient Masonry Churches located in Chile". *Bulletin of Earthquake Engineering* 18: 3433-3457.

Sandoval, Cristián, Roberto Valledor, y Diego Lopez-García. 2017. "Numerical Assessment of Accumulated Seismic Damage in a Historic Masonry Building. A Case Study". *International Journal of Architectural Heritage* 11, no. 8: 1177-1194.

Torres, Wilson, José Luis Almazán, Cristian Sandoval, y Fernando Peña. 2018. "Fragility Analysis of the Nave Macro-Element of the Cathedral of Santiago, Chile". *Bulletin of Earthquake Engineering* 16, no.7: 3031-3056.

UNESCO/PNUD. 1977. *Conclusiones del coloquio sobre la preservación de los centros históricos ante el crecimiento de las ciudades contemporáneas, Quito, Ecuador*.