

Herramienta automatizada para evaluación rápida de la vulnerabilidad estructural y no estructural de hospitales

A. Rivera-Rogel (1), F. López-Almansa (2), A. Albareda-Valls (3), J. Avellaneda (4), A. Sánchez-Vaqué (5)

(1) Alumna de Doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Tecnología de la Arquitectura, Barcelona, alicia.rivera.rogel@gmail.com

(2) Profesor, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Tecnología de la Arquitectura, Barcelona, francesc.lopez-almansa@upc.edu

(3) Profesor, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Tecnología de la Arquitectura, Barcelona, albert.albareda@upc.edu

(4) Profesor, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Tecnología de la Arquitectura, Barcelona, jaume.avellaneda@upc.edu

(5) Ingeniero, JG Ingenieros SA, asanchez@jgingenieros.es

Resumen

Se presenta una herramienta para evaluar de forma rápida y automatizada la vulnerabilidad sísmica estructural y no-estructural de hospitales en relación a su operatividad después de un sismo fuerte. Los elementos no-estructurales se clasifican en componentes arquitectónicos (exteriores e interiores), instalaciones (mecánicas, eléctricas y comunicaciones, y distribución), equipamiento médico, y contenido; se consideran los daños causados por desplazamientos entre plantas y por aceleraciones absolutas. La vulnerabilidad se determina a partir de las respuestas a una serie de preguntas. La herramienta se calibra con daños observados; se conocen las acciones sísmicas que generaron estos daños (obtenidas de los acelerogramas registrados en estaciones sísmológicas cercanas). La calibración consiste en comparar los daños observados con los predichos; éstos se obtienen combinando los índices de vulnerabilidad proporcionados por la herramienta con la amenaza sufrida.

Palabras-Clave: hospitales, daños observados, evaluación rápida de la vulnerabilidad sísmica

Abstract

A tool for rapid and automatic assessment of the seismic structural and non-structural vulnerability of hospitals is presented; this vulnerability refers to the operability after strong earthquakes. The non-structural elements are classified into architectural components (exterior and interior), facilities (mechanical, electrical and communications, and distribution), medical equipment, and content; the damages caused by drifts and by accelerations are considered. The vulnerability is determined from the answers to a series of questions. The tool is calibrated with observed damages; the seismic actions that generated these damages are known (obtained from accelerograms recorded in the nearest seismological stations). The calibration is based in comparing the observed damages with the predicted ones; such damages are obtained by combining the vulnerability indexes provided by the tool with the actual seismic demand.

Keywords: hospitals, observed damage, seismic vulnerability rapid assessment

1 Introducción

En ingeniería sísmica se asigna habitualmente una elevada importancia a los edificios hospitalarios debido a su intensa ocupación, la vulnerabilidad de los pacientes albergados y, sobre todo, la vital necesidad de mantener su funcionamiento después de fuertes eventos sísmicos. Este estudio se centra en la vulnerabilidad sísmica de hospitales; debe aclararse que no se trata de analizar en detalle un determinado edificio, sino en examinar un amplio conjunto de edificaciones para detectar tendencias generales. En otras palabras, el objetivo es explorar de forma global varios hospitales que representen a la mayor parte de los existentes, más que ocuparse en profundidad de un único caso. En este contexto, hay bastantes estudios sobre el desempeño estructural de edificios en general e incluso de hospitales en particular; no obstante, estas investigaciones arrojan poca (o ninguna) luz acerca de la operatividad de éstos después de terremotos severos, ya que ésta depende sobre todo de la afectación de los elementos no estructurales [FEMA 154 2002; Achour N 2007; Lang, Verbicaro, Singh 2009; De Angelis, Pecce 2015; PAHO/WHO 2000]. El comportamiento sísmico de los elementos no estructurales de edificios hospitalarios y su repercusión en la operabilidad de éstos han recibido cierta atención [Lang, Verbicaro, Singh 2009; PAHO/WHO 2015]. A partir de estos trabajos, este estudio propone criterios para evaluar y reducir el riesgo sísmico de hospitales, teniendo en cuenta los componentes estructurales y no estructurales, las instalaciones y el contenido (equipo).

2 Elementos constructivos e instalaciones de hospitales

2.1 Consideraciones generales

Este apartado discute la problemática de las componentes no-estructurales de hospitales; los siguientes subapartados describen su clasificación y afectación, respectivamente.

2.2 Clasificación de componentes no-estructurales de hospitales

Este subapartado describe la clasificación de los componentes no-estructurales de hospitales considerada en este estudio; ésta se basa en la propuesta en [FEMA E-74 2012; HAZUS 2017]. Estos elementos se clasifican en las siguientes cuatro categorías:

- **Componentes arquitectónicos.** Elementos no estructurales que pertenecen intrínsecamente al edificio; se clasifican según la ubicación en: exteriores (revestimientos, acristalamiento, fachada, tabiques, parapetos, escaleras, marquesinas, etc.) e interiores (techos falsos, puertas, particiones, etc.).
- **Instalaciones.** Esta categoría incluye instalaciones mecánicas, eléctricas y de comunicación, y sistemas de distribución. Las instalaciones mecánicas hacen referencia a climatización (calderas, enfriadores, unidades climatizadoras, etc.). Las instalaciones eléctricas son depósitos, ascensores, estación transformadora, grupos electrógenos, cuadros eléctricos, etc.; las instalaciones de comunicación pueden ser red informática, seguridad, instalaciones de detección de incendios, etc. Los sistemas de distribución se refieren a tuberías (transporte y evacuación de aguas residuales), conductos de climatización, bandejas para electricidad, etc.
- **Equipamiento médico.** Abarca todos los elementos destinados a uso médico. Se agrupan en seis categorías: (i) servicios asistenciales (emergencia, quirófanos, cuidados intensivos, neonatología, hospital de día, unidades de enfermería, diálisis, etc.), (ii) diagnóstico y tratamiento (endoscopias, diagnóstico por la imagen, radioterapia, medicina nuclear, etc.), (iii) almacenamiento refrigerado (morgue, medicamentos, fecundación asistida, etc.), (iv) laboratorios y farmacia (cámara frigorífica,

banco de sangre, microscopios, etc.), (v) servicios generales (esterilización, cocina, lavandería, etc.) y (vi) gases medicinales (oxígeno, aire medicinal, vacío médico, óxido nitroso, dióxido de carbono, etc.).

- **Contenido.** Elementos no médicos ubicados dentro del edificio (incluso de forma permanente) y que no son instalaciones; se incluyen muebles, accesorios, adornos, electrodomésticos, contenedores de basura, parapetos, estantes, etc.

2.3 Efectos de los movimientos sísmicos sobre los componentes no-estructurales de hospitales

Los movimientos sísmicos afectan a los elementos no-estructurales (no sólo de hospitales, sino de cualquier edificio) de dos maneras: imponiéndoles deformaciones que les pueden dañar (efecto estático) y generando en ellos aceleraciones que les pueden volcar (efecto dinámico). Por ejemplo, un tabique puede ser dañado por las distorsiones angulares producidas (en su plano) por la deriva y puede volcar a causa de la aceleración absoluta en el plano perpendicular.

3 Gradación del daño

3.1 Estados de daño

La operatividad de los hospitales se evalúa siguiendo los lineamientos propuestos en [HAZUS 2017; FEMA 356 2000; ASCE/SEI 41-17 2017] en cuatro niveles (estados) de daño denominados: leve (L), moderado (M), extenso (E) y completo (C). Los dos subapartados siguientes definen estos niveles para elementos estructurales y no estructurales, respectivamente.

3.2 Daño estructural

Leve (Operacional - Habitable): Daños estructurales limitados; la afectación de los ocupantes es muy baja.

Moderado (Ocupación Inmediata - Habitable): Existe interrupción de la operatividad para proteger equipos y contenidos valiosos; no obstante, se da ocupación inmediata estructural.

Extenso (Seguridad de vida - Acceso restringido en algunas zonas): Daños significativos en la estructura, no obstante, todavía existe un margen de seguridad respecto al colapso estructural. Algunos elementos estructurales pueden verse severamente afectados, pero esto no conduce a grandes escombros dentro o afuera del edificio. Pueden ocurrir heridos durante el terremoto, sin embargo, el riesgo de afectación a la vida de los ocupantes se espera que sea bajo. Es posible reparar la estructura,

Completo (Cerca del colapso- Entrada prohibida): El riesgo de que los ocupantes resulten heridos es significativo debido a la caída de escombros. La estructura no es reparable técnicamente y no es segura para volver a ser ocupada; una réplica puede provocar su colapso.

3.3 Daño no estructural

Leve (Operacional - Habitable): No se presenta ningún daño visible; los sistemas se encuentran totalmente funcionales.

Moderado (Ocupación Inmediata - Habitable): No hay peligro para la vida humana. Los sistemas, en general, permanecen utilizables, siempre que la energía esté disponible; sin embargo, se requieren reparaciones menores.

Extenso (Seguridad de vida - Acceso restringido en algunas zonas): El nivel de riesgo para la vida humana es bajo. No se esperan grandes bloqueos en las rutas de salida, pero existe acumulación de escombros. El uso de las instalaciones en determinadas zonas de la edificación es restringida.

Completo (Cerca del colapso- Entrada prohibida): El nivel de riesgo para la vida humana es elevado. Se presentan daños severos en elementos no estructurales y la mayoría de sistemas de emergencia se encuentran fuera de servicio. El hospital no se encuentra operativo.

4 Evaluación rápida de la vulnerabilidad sísmica

La evaluación rápida de la vulnerabilidad sísmica de un determinado edificio consiste en determinar dicha propiedad (cuantificada habitualmente mediante un índice de vulnerabilidad) a partir de las respuestas a un cuestionario que incluye preguntas generales sobre las cualidades sismorresistentes del edificio a analizar; es destacable que dichas preguntas no requieren cuantificación, sino valoraciones en términos de varias opciones posibles (por ejemplo, ninguna, escasa o importante contribución a la vulnerabilidad).

El objetivo de esta investigación es desarrollar una herramienta automatizada para evaluar la vulnerabilidad sísmica estructural y no estructural de hospitales. Esta herramienta será calibrada a partir de daños observados (apartado 6) y de la acción sísmica que los generó (apartado 5). En estos momentos esta herramienta se encuentra en fase de desarrollo, no siendo posible presentar aún ningún resultado.

5 Cuantificación de la sollicitación sísmica

5.1 Estrategia general

El efecto de un determinado movimiento sísmico sobre un edificio (o cualquier otra construcción) puede representarse mediante dos cantidades, correspondientes éstos a los efectos estáticos y dinámicos. El efecto estático se expresa mediante la deformación estructural (deriva, es decir, desplazamiento entre plantas) y el dinámico (inercial) se cuantifica a través de la aceleración absoluta. El efecto de deriva causa daños tanto estructurales como no estructurales (por ejemplo, agrietamiento de muros de relleno) y el efecto inercial genera principalmente daños no estructurales (caída de escombros, rotura de tuberías, desprendimiento del falso techo, vuelco de depósitos, entre otros). La sollicitación (tanto en términos de deriva como de aceleración) se estima a partir del acelerograma que excitó al edificio. Dicho acelerograma se obtiene a partir del registro de la estación sismológica más cercana. Si esa estación corresponde a un tipo de suelo diferente o tiene una profundidad de lecho rocoso distinta a la del hospital en estudio, los acelerogramas registrados se modifican convenientemente; a estos efectos se utiliza el programa DeepSoil [Hashash et al. 2017]. Cuando la estación más cercana está ubicada a una distancia del origen del terremoto significativamente diferente a la del hospital, el acelerograma se corrige con leyes de atenuación adecuadas para el lugar [Aguiar et al. 2010; Saragoni et al. 2004].

La cuantificación de la sollicitación en términos de deriva y de aceleración se describe en los dos siguientes subapartados, respectivamente.

5.2 Efecto de la deriva

El efecto de la deriva se caracteriza aproximadamente por el promedio de ambas ordenadas espectrales horizontales para los correspondientes períodos fundamentales del edificio; la componente vertical no se tiene en cuenta, dada su escasa influencia en edificios ordinarios. Dichas ordenadas se refieren a los espectros individuales amortiguados al 5% de las componentes horizontales de los acelerogramas registrados. Dado que el daño está mejor correlacionado con el desplazamiento que con la fuerza [Priestley, Calvi, Kowalski 2007], se utilizan espectros de desplazamiento (S_d) en lugar de pseudo-aceleración (PS_a). Así, esta solicitación (D) se puede escribir como

$$D = \frac{\left(\frac{2\pi}{T_{Fx}}\right)^2 PS_{ax}(T_{Fx}, \zeta) + \left(\frac{2\pi}{T_{Fy}}\right)^2 PS_{ay}(T_{Fy}, \zeta)}{2} = \frac{S_{dx}(T_{Fx}, \zeta) + S_{dy}(T_{Fy}, \zeta)}{2} \quad (1)$$

En la Ec. (1), PS_{ax} y PS_{ay} se refieren a los espectros de pseudo-aceleración de las correspondientes componentes de los acelerogramas, T_{Fx} y T_{Fy} son los períodos fundamentales en las direcciones x e y , respectivamente, y ζ es el factor de amortiguamiento.

5.3 Efecto inercial

El efecto inercial se expresa como el producto de dos factores: el primero representa el efecto de los acelerogramas en el edificio, y el segundo se refiere a la respuesta del edificio a dichos acelerogramas; de hecho, tal operación puede entenderse conceptualmente como la convolución entre la señal de entrada y la función de transferencia del edificio. El primer factor se caracteriza aproximadamente por el promedio de las tres componentes de las tres ordenadas espectrales de aceleración (S_a) en ambas direcciones horizontal y vertical; tales ordenadas espectrales están asociadas con los períodos fundamentales correspondientes del edificio en dichas direcciones. El segundo factor es la ordenada del espectro del piso que corresponde a la ubicación del elemento en consideración y el período fundamental horizontal de este elemento; dado que ambas circunstancias son más bien aleatorias (es decir, un determinado elemento se puede ubicar en cualquier planta y puede tener distintos períodos según sean sus características), en su lugar se utiliza el promedio de los espectros de piso en el rango de períodos de interés *para* los elementos no estructurales más comunes. Por otro lado, comúnmente, el período *fundamental* en la dirección vertical (T_{Fz}) no está fácilmente disponible; por lo tanto, la ordenada espectral de aceleración vertical para dicho período se reemplazará con el promedio de las ordenadas espectrales correspondientes a lo largo del rango de períodos de interés. Así, esta solicitación (A) se puede escribir como

$$A = \frac{S_{ax}(T_{Fx}, \zeta) + S_{ay}(T_{Fy}, \zeta) + \frac{1}{T'} \int_0^{T'} S_{az}(T, \zeta) dT}{3} \frac{1}{T''} \int_0^{T''} S_f(T, z) dT \quad (2)$$

En la Ec. (2), S_{ax} , S_{ay} y S_{az} se refieren a los espectros de aceleración de los componentes correspondientes de los acelerogramas, T_{Fz} es el período fundamental en la dirección vertical, T' es el período fundamental en la dirección vertical, S_f es el espectro de planta adimensional [EN-1998 2005], z es la altura de la ubicación de los componentes no estructurales, y T'' es el período de dichos componentes. S_f depende del período fundamental (en dirección horizontal) del componente no estructural, de la altura z , de la altura del edificio (H) y del período fundamental del edificio (dada la incertidumbre en la orientación de los citados componentes con respecto a los ejes del edificio, dicho período está

representado por el promedio de, T_{Fx} y T_{Fy}). La selección de los valores de T' , z y T'' en la ecuación (2) se discute a continuación.

- Con respecto a T' , se contemplan dos formas modales principales: la vibración axial (vertical) de las columnas y la vibración de flexión de las losas; ambas configuraciones son razonablemente independientes. Obviamente, para los edificios de baja a mediana altura, el período correspondiente a la segunda forma será el más bajo (por lo que es el fundamental); al contrario, para edificios de gran altura, ocurrirá lo contrario. Para edificios de hormigón, el período para la vibración axial de las columnas varía entre 0.03 y 0.04 s para edificios de una planta; para edificios de 8 plantas, dicho rango es de 0.12 a 0.16 s [Papadopoulou 1989; ATC-76 2014]. Para la vibración de flexión de las losas, el período oscila entre 0.02 s (losas rígidas, luces pequeñas) y 0.25 s [ATC-1 1999.]. En base a estas consideraciones, en cada caso se seleccionará el valor más adecuado de T' .
- En lo que respecta a z , se distinguen dos situaciones: las instalaciones se distribuyen a lo largo de toda la altura del edificio, o se concentran cerca de cierto nivel. En el primer caso, se toma la altura promedio ($z = H / 2$); En el segundo caso, obviamente, se selecciona dicho nivel. Las situaciones intermedias serán analizadas individualmente.
- En cuanto a T'' , se han revisado diversos estudios. El trabajo [Juárez, Ventura 2008] describe experimentos y observaciones de campo para determinar el período fundamental de una serie de elementos (generadores eléctricos, calderas, bombas, tuberías, aire médico, bastidores de relés, entre otros); los períodos oscilan entre 0.043 s (tuberías) y 0.526 s (una bomba en particular). El artículo [Cosenza et al. 2015] proporciona, a partir de una serie de ensayos, períodos fundamentales horizontales para armarios, escritorios y monitores; dichos períodos oscilan entre 0.05 s (escritorios) y 0.23 s (armarios). La referencia [Mahrenholtz et al. 2014] enumera los períodos fundamentales de los componentes mecánicos y eléctricos, los cuales oscilan entre 0.10 s y 0.25 s. Las investigaciones [Magliulo et al. 2012; Magliulo et al. 2014] se ocupan de los techos y las particiones de placa de yeso, respectivamente; no se proporciona información sobre sus períodos fundamentales. En [Petrone et al. 2014], los períodos de particiones internas de ladrillo hueco se determinan experimentalmente; el período fundamental en el plano es 0.033 s. En resumen, se adopta $T'' = 0.25$ s para la gran mayoría de las situaciones y los casos particulares se analizan individualmente.

6 Casos reales analizados

Este apartado describe los hospitales considerados (Tabla 1), las acciones sísmicas que les afectaron (Tabla 2 y Tabla 3) y los daños que se produjeron (Tabla 4). Esta información se utiliza en la calibración de la herramienta propuesta.

La Tabla 1 describe las características más relevantes de los hospitales considerados [Achour 2007; Aguiar et al. 2016; EERI 2016; FEMA 577 2007; GEER-ATC 2010; GEER-ATC 2016; Hopkins 2008; McIntosh 2013; Morales 2017; Price 2012; Shinozuka 1995; Lee, Loh 2000; Tang 2000; Valcárcel 2013; Villouta 2010]; a continuación se discute el significado de las propiedades consignadas. El año se refiere a la construcción. La regularidad en planta corresponde a la simetría mecánica, es decir a la excentricidad entre los centros de gravedad y de rigidez; la regularidad en alzado representa la uniformidad a lo largo de la altura del edificio, es decir, la ausencia de cambios bruscos entre plantas consecutivas que puedan generar concentración de daños. Las dos características siguientes tienen

significados similares (aunque distintos): la configuración irregular (habitualmente en planta) señala el riesgo de patologías debidas a la ausencia de efecto diafragma rígido, y la planta baja blanda es un caso particular (especialmente peligroso) de falta de uniformidad en altura. Las columnas cortas responden a muros de relleno de albañilería que no cubren la totalidad de la altura, y el riesgo de impacto corresponde normalmente a juntas sísmicas de espesor insuficiente. El tipo de suelo está clasificado según la normativa americana [ASCE/SEI 7-10 2010]. La aceleración de diseño es el valor para el cual fue proyectado el edificio (valor que se conoce habitualmente como PGA) y el período fundamental corresponde a movimientos de traslación en cualquiera de las dos direcciones horizontales principales del edificio.

Tabla 1 – Principales características de los hospitales analizados

País (ciudad)	Año	Plantas/ altura (m)	Regularidad (planta/alzado)	Config. irreg.	Planta baja blanda	Columnas cortas	Riesgo de impacto	Tipo de suelo	Acel. de diseño (g)	Per. fund. (s)
Califor. (Sylmar)	1965	5/17.80	SÍ/SÍ	NO	SÍ	NO	SÍ	C	0.50	0.56
Califor. (Sylmar)	1976	4/18.80	SÍ/SÍ	NO	NO	NO	NO	C	0.50	0.44
Japón (Kobe)	1967	10/33	SÍ/SÍ	NO	NO	NO	SÍ	D	-	1.08
Turquía (Adap.)	1985	6/20.2	NO/SÍ	NO	NO	NO	SÍ	B	-	0.46
Taiwan (Tsu.)	1997	9/30	SÍ/SÍ	NO	NO	NO	NO	C	-	0.99
Perú (Pisco)	1930	1/4	NO/NO	NO	NO	NO	NO	C	-	0.16
Perú (Ica)	1964	4/13.18	NO/NO	SÍ	NO	SÍ	SÍ	D	0.30	0.34
Italia (L'Aquila)	1980	3/10.40	NO/NO	SÍ	SÍ	NO	SÍ	C	0.25	0.38
Chile (Concep.)	1984	6/20	NO/SÍ	NO	NO	SÍ	NO	C	0.10	0.46
Chile (Curan.)	2007	5/17.30	NO/SÍ	NO	NO	NO	SÍ	D	0.40	0.41
NZ (Christchurch)	1980	9/29.6	SÍ/SÍ	NO	NO	NO	SÍ	D	-	0.62
España (Lorca)	1990	4/12.6	NO/NO	SÍ	SÍ	NO	SÍ	D	0.12	0.46
Ecuador (Bahía)	1976	5/14.25	SÍ/SÍ	NO	NO	SÍ	SÍ	D	0.44	0.44
Ecuador (Chone)	1982	7/21.6	NO/NO	SÍ	NO	SÍ	SÍ	D	0.35	0.74
Ecuador (Manta)	1970	5/16.32	NO/NO	SÍ	NO	NO	SÍ	D	0.35	0.58
Ecuador (Manta)	1984	7/21.6	SÍ/NO	NO	NO	SÍ	SÍ	C	0.35	0.74
México D.F.	1989	7/23.4	NO/NO	NO	NO	NO	NO	D	-	0.80

La Tabla 2 y la Tabla 3 resumen las características más relevantes de los movimientos sísmicos que produjeron los daños observados en los hospitales descritos en la Tabla 1; la Tabla 2 presenta los datos generales del terremoto y de la estación sismológica más próxima al hospital correspondiente, y la Tabla 3 contiene información sobre los acelerogramas registrados en dicha estación. Estos acelerogramas se analizan con el programa SeismoSignal 2016 [SeismoSoft 2016] para obtener la información contenida en la Tabla 3.

Tabla 2 – Movimientos sísmicos que generaron los daños observados

País (Terremoto)	Fecha	M_w	Profundidad hip. (km)	Estación	R_{rup} (km)	$v_{s,30}$ (m/s)	Tipo de suelo
California (San Fdo.)	02/09/1971	6.6	8.9	Pacoima Dam	1.81	2016	A
California (Northridge)	17/01/1994	6.7	18.2	Olive View	5.3	440	C
Japón (Kobe)	16/01/1995	6.9	21.9	KJMA	0.96	312	D
Turquía (Kocaeli)	17/08/1999	7.6	17	Izmit	7.21	811	B
Taiwan (Chi-Chi)	20/09/1999	7.7	33	CHY080	2.69	496	C
Perú (Pisco)	15/08/2007	8	39	ICA2	36.9	250	D
Italia (L'Aquila)	06/04/2009	6.3	8.8	AQV	6.27	475	C
Chile (Maule)	27/02/2010	8.8	22.9	CCSP	-	390	C
				CONC	-	230	D
NZ (Christchurch)	21/02/2011	6.1	5.9	Hospital	4.85	194	D
España (Lorca)	11/05/2011	5.1	1	Lorca	-	360	C
Ecuador (Muisne)	16/04/2016	7.8	20.6	ACHN	34	200	D
				AMNT	76	496	C
México (Puebla)	19/09/2017	7.1	48	SCT B-2	-	-	D

En la Tabla 3, I_A es la intensidad de Arias [Arias 1970], “Pulso” se refiere a la relevancia de los pulsos de velocidad (efectos de proximidad de falla o de directividad) y la duración efectiva corresponde al intervalo entre el 5% y el 95% de la intensidad de Arias [Trifunac, Brady 1975].

Tabla 3 – Acelerogramas registrados

País (Terremoto)	Componente horizontal 1				Componente horizontal 2				Componente vertical			
	PGA (g)	I_A (m/s)	Pulso	Duración efectiva (s)	PGA (g)	I_A (m/s)	Pulso	Duración efectiva (s)	PGA (g)	I_A (m/s)	Pulso	Duración efectiva (s)
Calif. (San Fdo.)	1.84	36.25	SÍ	8.44	1.70	45.10	SÍ	7.69	1.12	14.23	SÍ	6.22
Calif. (Northrid.)	0.61	2.60	SÍ	6.80	0.84	5.01	SÍ	5.32	0.54	1.14	SÍ	8.44
Japón (Kobe)	0.83	8.39	NO	8.38	0.63	5.44	NO	9.54	0.34	1.87	NO	9.70
Turquía (Kocaeli)	0.23	0.81	NO	13.27	0.17	0.56	NO	15.07	0.15	0.5	NO	16.72
Taiwan (Chi-Chi)	0.80	9.29	SÍ	21.76	0.86	6.95	SÍ	21.99	0.73	1.95	SÍ	12.72
Perú (Pisco)	0.27	2.93	SÍ	86.72	0.33	3.56	SÍ	85.47	0.19	1.44	SÍ	87.85
Italia (L'Aquila)	0.66	2.84	NO	7.56	0.56	2.00	NO	7.67	0.53	0.99	NO	5.93
Chile (Maule)	0.61	14.26	NO	73.84	0.65	17.32	NO	69.70	0.58	11.26	NO	62.95
	0.24	3.02	NO	80.68	0.22	2.60	NO	66.12	0.16	1.96	NO	88.21
NZ (Christch.)	0.35	1.79	NO	9.94	0.36	2.41	NO	10.57	0.60	2.19	NO	5.46
España (Lorca)	0.36	0.51	SÍ	0.96	0.15	0.11	SÍ	3.56	0.11	0.05	SÍ	3.40
	0.29	3.88	NO	31.89	0.33	4.08	NO	25.73	0.16	0.50	NO	34.40
Ecuador (Muisne)	0.32	4.79	NO	31.89	0.36	5.04	NO	25.73	0.17	0.62	NO	34.40
	0.37	4.98	NO	20.95	0.49	6.27	NO	23.34	0.20	0.028	NO	36.52
México (Puebla)	0.40	2.41	NO	17.41	0.51	2.21	NO	16.26	0.16	0.40	NO	21.80
	0.09	1.19	SÍ	45.04	0.09	0.52	SÍ	58.73	0.04	0.08	SÍ	54.48

La Tabla 4 describe los daños observados en los hospitales descritos en la Tabla 1. Se sigue la clasificación expuesta en el apartado 2 y el daño se clasifica en términos de los niveles de daño descritos en el apartado 3.

Tabla 4 – Daños observados

País (Terremoto)	Daño estruct.	Elementos arquitectónicos		Instalaciones			Uso médico		Contenido
		Ext.	Int.	Mecánicas	Eléctr. y comunicaciones	Distrib.	Equip.	Gases	
Calif. (San Fdo.)	E	E	C	C	C	C	C	C	C
Calif. (Northr.)	N	L	L	M	M	M	M	M	M
Japón (Kobe)	L	M	M	M	M	M	M	M	M
Turquía (Kocaeli)	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Taiwan (Chi-Chi)	M	E	E	C	C	C	E	E	C
Perú (Pisco)	M	C	C	C	C	C	C	C	C
	E	C	C	C	C	C	C	C	C
Italia (L'Aquila)	E	E	M	M	M	M	M	M	M
Chile (Maule)	M	M	E	M	M	M	M	M	M
	M	M	M	L	L	L	L	L	L
NZ (Christch.)	L	L	M	E	E	E	E	E	E
España (Lorca)	L	L	M	L	L	L	L	L	L
	M	M	C	C	C	C	C	C	C
Ecuador (Muisne)	E	C	E	E	E	E	E	E	C
	M	C	M	E	C	C	C	C	C
	L	L	M	M	M	M	M	M	M
México (Puebla)	L	L	M	L	L	L	L	L	M

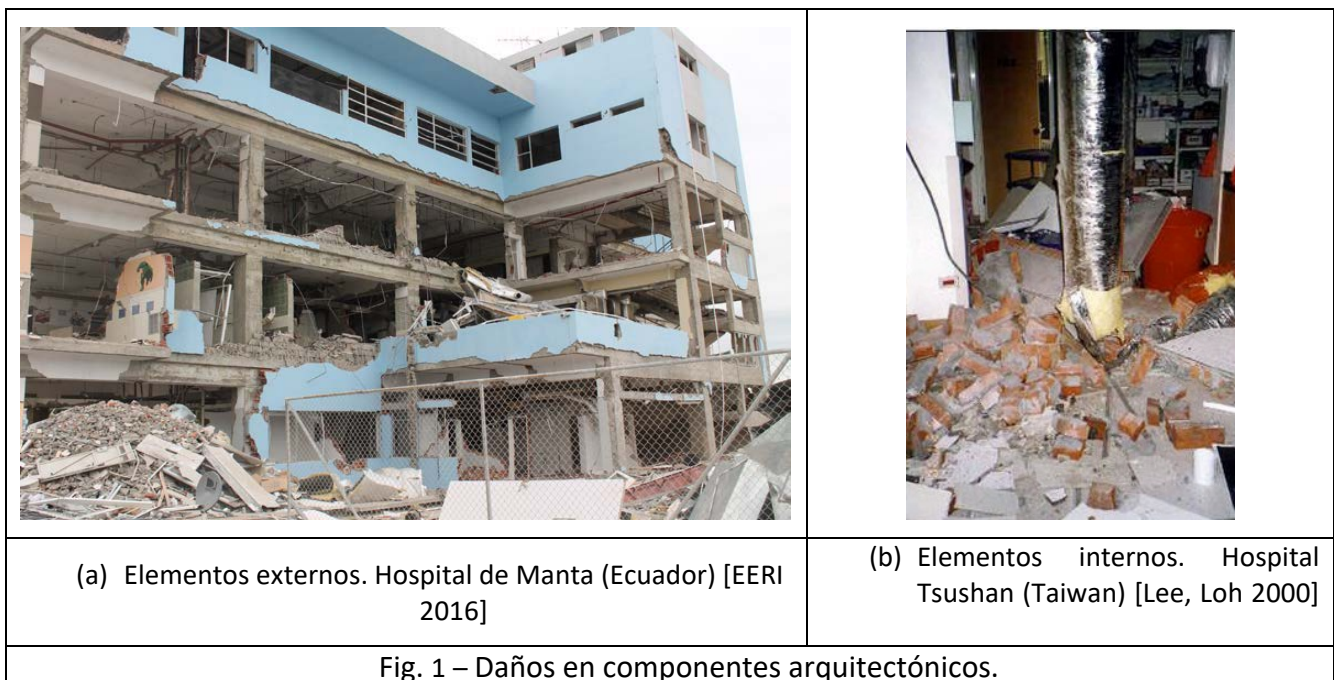
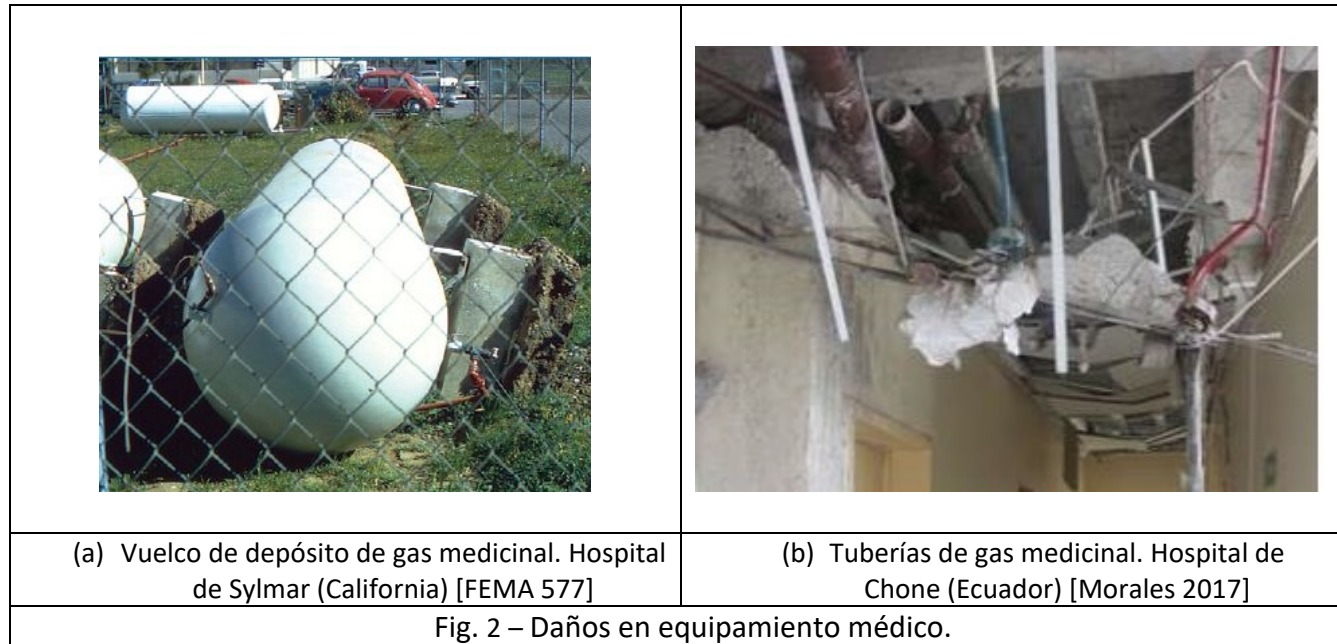


Fig. 1 – Daños en componentes arquitectónicos.

La Fig. 1 presenta imágenes de daños en elementos arquitectónicos externos (Fig. 1.a) e internos (Fig. 1.b). Análogamente, la Fig. 2 muestra daños en equipamiento médico.



7 Conclusiones

Se presenta una herramienta automatizada para evaluar de forma rápida y automatizada la vulnerabilidad sísmica de hospitales teniendo en cuenta tanto su estructura como el resto de elementos que lo componen. Es destacable que este estudio no se orienta a los daños en general, sino a su repercusión en la operatividad de los hospitales después de terremotos severos. Esta herramienta será calibrada con daños observados.

8 Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al apoyo financiero otorgado a la primera autora mediante la beca doctoral concedida por parte de la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Gobierno de la República del Ecuador. Además se dispuso del apoyo financiero del Gobierno español (Ministerio de Ciencia y Tecnología), proyectos BIA2014-60093-R y CGL2015-6591.

Referencias

- [1] Achour N. (2007). Estimation of a Malfunctioning of a Health Care Facility in case of Earthquake. PhD. Thesis. *Kanazawa University, Japan*.
- [2] Achour N, Miyajima M, Kitaura M, Price A. (2011). Earthquake-Induced Structural and Nonstructural damage in Hospitals. *Earthquake Spectra*, **27**(3):617-634.
- [3] Aguiar R, García E, Villamarín J. (2010). Leyes de atenuación para sismos corticales y de subducción para el Ecuador. *Revista Ciencia*, **13** (1):1-18.
- [4] Aguiar R, Zevallos M, Palacios J, García L, Menéndez E. (2016). *Reforzamiento de estructuras con disipadores de energía. Terremoto de Ecuador del 16 de abril de 2016*. Instituto Panamericano de Geografía e Historia IPGH.
- [5] Arias A. (1970). A measure of earthquake intensity. *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. MIT Press 438-443.
- [6] ASCE/SEI 7-10. (2010). *Minimum design loads for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers.
- [7] ASCE/SEI 41-17. (2017). *Seismic Evaluation and retrofit of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers.

- [8] ATC-1. (1999). *ATC Design Guide 1. Minimizing Floor Vibration*. Applied Technology Council.
- [9] ATC-40. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Applied Technology Council.
- [10] ATC-76-1. (2014). *Quantification of Building System Performance and Response Parameters*. Applied Technology Council.
- [11] Badillo AH, Whittaker AS, Reinhorn AM. (2007). Seismic fragility of suspended ceiling systems. *Earthquake Spectra*, **23**(1):21-40.
- [12] CISMID (2018). Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres.
- [13] Cosenza E, Di Sarno L, Maddaloni G, Magliulo, Petrone C, Prota A. (2015). Shake table test for the seismic fragility evaluation of hospital rooms. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **44**:23-40.
- [14] De Angelis A, Pecce M. (2015). Seismic nonstructural vulnerability assessment of school buildings. *Natural Hazards*, **79**:1333-1358.
- [15] EERI (2016). "Performance of Hospitals." *Earthquake Engineering Research Institute*.
- [16] EN-1998. (2005). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*. European Committee for Standardization.
- [17] FEMA 273. (1997). *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. Federal Emergency Management Agency.
- [18] FEMA 356. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Federal Emergency Management Agency.
- [19] FEMA 154. (2002). *Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazard: a handbook*. Federal Emergency Management Agency.
- [20] FEMA 577. (2007). *Design Guide for Improving Hospital Safety in Earthquakes, Floods, and High Winds: Providing Protection to People and Buildings*. Federal Emergency Management Agency.
- [21] FEMA E-74. (2011). *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures*. Federal Emergency Management Agency.
- [22] FEMA P-58-1. (2012). *Seismic performance assessment of buildings*. Federal Emergency Management Agency.
- [23] GEER-ATC (2010). *Geo-engineering Reconnaissance of the 2010 Maule, Chile Earthquake*. Geotechnical Extreme Events Reconnaissance – ATC.
- [24] GEER-ATC (2016). *Reconnaissance Report of the April 16th 2016 Muisne, Ecuador*. Geotechnical Extreme Events Reconnaissance – ATC.
- [25] HAZUS MH 2.1 (2017). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model*. Federal Emergency Management Agency.
- [26] Hashash YMA, Musgrove MI, Harmon JA, Ilhan O, Groholsk, DR, Phillips CA, Park D. (2017). "DEEPSOIL 7.0, User Manual".
- [27] Hopkins D, Bell D, Benites R, Burr J, Hamilton C, Kotze R. (2008). The Pisco (Perú) earthquake of 15 august 2007. NZSEE Reconnaissance Report. *Bulletin of the New Zealand society for earthquake engineering*, **41**:109-190.
- [28] Juárez García H, Ventura CE. (2008). Seismic performance of operational and functional components (OFCS): field observation and shake table testing. *14th WCEE. Beijing, China*.
- [29] Land D, Verbicaro M, Singh Y. (2009). *Seismic vulnerability assessment of hospitals and schools based on questionnaire survey*. Kjeller, Norway.
- [30] Lee G, Loh C (Eds.). (2000). *The Chi-Chi, Taiwan, Earthquake of September 21, 1999: Reconnaissance Report*. Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- [31] Magliulo G, Pentangelo V, Maddaloni G, Capozzi V, Petrone C, Lopez P, Talamonti R, Manfredi G. (2012). Shake Table Tests for Seismic Assessment of Suspended Continuous Ceilings. *Bulletin of Earthquake Engineering* **10**:1819-1832.
- [32] Magliulo G, Petrone C, Capozzi V, Maddaloni G, Lopez P, Manfredi G. (2014). Seismic Performance Evaluation of Plasterboard Partitions via Shake Table Tests. *Bulletin of Earthquake Engineering* **12**:1657-1677.
- [33] Mahrenholtz P, Hutchinson TC, Eligehausen R. (2014). Shake Table Tests on Suspended Nonstructural Components Anchored in Cyclically Cracked Concrete. *Journal of Structural Engineering* **140**(11):1-11.
- [34] McIntosh J. (2013). Review of the impact of the February 22nd earthquake on the Canterbury health care system. Master Degree Thesis. *University of Canterbury*.
- [35] Morales E. (2017). Sustainable and low cost room seismic isolation for essential care units of hospitals in developing countries. PhD. Thesis. *State University of New York, Buffalo*.
- [36] NDMA. (2016). National Management Disaster Guidelines. Hospital Safety. National Disaster Management Authority. Government of India.

- [37] NIST GCR 10-917-7 (2010). Program Plan for the Development of Collapse Assessment and Mitigation Strategies for Existing Reinforced Concrete Buildings. National Institute of Standards and Technology, NEHRP Consultants Joint Venture A partner-ship of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering
- [38] PAHO/WHO (2008). *Principles of Disaster Mitigation in Health Facilities*. Pan American Health Organization and World Health Organization.
- [39] PAHO/WHO (2015). *Hospital safety index, guide for evaluators*. Pan American Health Organization and World Health Organization.
- [40] Papadopoulou O. (1989). *The effect of vertical excitation of reinforced concrete multi-storey structures*. MSc. Dissertation. Imperial College, London.
- [41] PEER. (2018). Ground Motion Database. *Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley*.
- [42] Petrone C, Magliulo G, Manfredi G. (2014). Shake Table Tests for the Seismic Assessment of Hollow Brick Internal Partitions. *Engineering Structures* **72**:203-214.
- [43] Porter K, Kennedy R, Bachman R. (2006). Developing fragility functions for building components for ATC-58. A Report to ATC-58. *Applied Technology Council*.
- [44] Priestley MJN, Calvi GM, Kowalski MJ. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. IUSS Press.
- [45] Price J, De Sortis A, Schotanus M. (2012). Performance of the San Salvatore Regional Hospital in the 2009 L'Aquila Earthquake. *Earthquake Spectra* **28**:239–256.
- [46] RENAC (2016). Acelerogramas del terremoto del 16 de abril de 2016. Red Nacional de Acelerógrafos del Instituto Geofísico de la Universidad Politécnica Nacional, Quito.
- [47] RENADIC (2017). Red Nacional de acelerógrafos. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- [48] RISK-UE. (2003). *An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns*. WP4: Vulnerability of current buildings. European Commission.
- [49] Saragoni R, Astroza M, Ruiz S. (2004). Comparative study of subduction earthquake ground motion of North, Central and South America. *13th WCEE. Vancouver, Canada*.
- [50] SeismoSoft. (2016). A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. Available from SeismoSoft.com.
- [51] Shinozuka M. (1995). *The Hanshin-Awaji earthquake of January 17, 1995: performance of lifelines*. Technical report NCEER-95-0015, Buffalo, New York.
- [52] Soroushian S, Ryan KL, Maragakis M. (2012). Seismic response of ceilings/sprinklers piping non-structural systems in NEES TIPS/NEES non-structural/NIED collaborative test on a full scale 5-story building. *43rd Structural Congress, ASCE, Chicago*.
- [53] Tang A. (2000). Izmit (Kocaeli), Turkey, earthquake of August 17, 1999 including Duzce earthquake of November 12, 1999: lifeline performance. American Society of Civil Engineers.
- [54] Trifunac MD, Brady AG. (1975). Study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America* **65**(3):581–626.
- [55] USGS (2018). Downloaded from: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>. United States Geological Survey.
- [56] Valcárcel J. (2013). Análisis y gestión del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales. Tesis Doctoral. *Universidad Politécnica de Cataluña*.
- [57] Ventura CE, Kharrazi MHK. (2004). Performance of OFC'S in earthquakes by shake table tests. *13th WCEE. Vancouver, Canada*.
- [58] Villouta J. (2010). Ficha de evaluación técnica daños edificio por terremoto, La Torre HGGB. Concepción, Chile.
- [59] Zolfaghari MR, Jahanbakhsh S. (2012). Development of Seismic Fragility Curves for Hospital Equipment. *15th WCEE. Lisbon, Portugal*.