

Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de hospitales de Costa Rica con la aplicación de índices de vulnerabilidad

Vulnerability seismic assessment of hospitals in Costa Rica with the application of vulnerability indices

Ing. Diego A. Hidalgo-Leiva, M.Sc.

Laboratorio de Ingeniería Sísmica

Universidad de Costa Rica

San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica

Correo Electrónico: diego.hidalgo@ucr.ac.cr

Ing. Víctor Schmidt-Díaz, Ph.D.

Laboratorio de Ingeniería Sísmica

Universidad de Costa Rica

San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica

Correo Electrónico: victor.schmidt@ucr.ac.cr

Ing. Miguel F. Cruz Azofoifa, Ph.D.

Miguel Cruz y Asociados Ltda.

Barrio Escalante, San José, Costa Rica

Correo Electrónico: miguel.cruz@mfcruz.com

RESUMEN

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica en instalaciones hospitalarias es un tema de mucho interés por su potencial impacto socio-económico. Los hospitales son sistemas complejos que, a diferencia de las estructuras convencionales, poseen una mayor vulnerabilidad no estructural y funcional. La evaluación de la vulnerabilidad puede realizarse de forma detallada o de forma simplificada. Las evaluaciones simplificadas poseen una alta aplicabilidad en la evaluación regional de la vulnerabilidad sísmica ya que permiten obtener un panorama sobre las posibles fuentes de vulnerabilidad de las instalaciones de manera rápida y sencilla, y, permiten realizar comparaciones entre diferentes estructuras con características similares.

Para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica, se aplicaron dos índices de vulnerabilidad cualitativos en 7 centros de salud clase A de Costa Rica. Con los resultados de las evaluaciones se ha desarrollado una metodología para caracterizar el desempeño de las estructuras mediante curvas de fragilidad

Recibido: Agosto de 2016

Aceptado: Septiembre de 2016

obtenidas de la literatura. La calibración de las curvas de fragilidad se realizó evaluando los daños observados en los centros de salud ante eventos sísmicos históricos concluyendo con una nueva propuesta a utilizar en futuras evaluaciones.

Palabras Claves: Vulnerabilidad sísmica, daño estructural, evaluación hospitalaria, índices de vulnerabilidad, curvas de fragilidad.

ABSTRACT

The seismic vulnerability assessment in hospital facilities is a subject of high interest for its potential socio-economic impact. Hospitals are complex systems that, unlike conventional structures, have greater non-structural and functional vulnerability. The evaluation of the vulnerability could be assessed with a detailed or a simplified evaluation. Simplified evaluations are broadly applied in the region for the seismic vulnerability assessments. The simplified evaluations can quickly and easily give an overview of possible sources of vulnerability on facilities, and also allow comparisons between different structures with similar characteristics.

In order to evaluate the seismic vulnerability, it has been applied two qualitative vulnerability indexes in 7 Class A hospitals of Costa Rica. With the results of the assessment, a methodology has been developed to characterize each structure with a family of fragility curves, obtained of the literature. The calibration of the curves was performed using the observed damage on the structures caused by notable earthquakes. Finally, we conclude with a proposal of a new approach for future evaluations.

Keywords: Seismic vulnerability, structural damage, hospital assessment, vulnerability indexes, fragility curves.

1 INTRODUCCIÓN

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de sistemas complejos que se componen por una serie de elementos expuestos con diferentes características, como los centros de salud, es un proceso complejo y difícil de lograr con evaluaciones deterministas. Por esta razón, se han propuesto diferentes metodologías para la evaluación cualitativa de la vulnerabilidad sísmica (Cruz, 2007; Monti y Nuti, 1996; Pan American Health Organization, 2008; Safina, 2002), las cuales además de contemplar el posible desempeño estructural, consideran el posible efecto del daño no-estructural. Estas metodologías son poco precisas en la localización del daño, pero representan una herramienta de fácil aplicación y de bajo costo, permitiendo evaluaciones cuyo enfoque es más orientativo hacia la toma de decisiones dentro de un entorno comparativo.

En el presente proyecto se realizaron evaluaciones de la vulnerabilidad a hospitales clase A, utilizando dos indicadores cualitativos de la vulnerabilidad sísmica: el índice propuesto por Cruz (2007), que se llamará IPC y el índice de la Organización Panamericana de la Salud (2008), que se llamará IOPS.

Se propone en esta investigación una metodología para correlacionar las evaluaciones cualitativas de los índices citados, con curvas de fragilidad, las cuales se basan en el criterio de expertos y que se encuentran resumidas en el del ATC-13 (ATC, 1985) Se realizara además una calibración entre las curvas de fragilidad y las evaluaciones cualitativas, de acuerdo a los daños observados en centros de salud de Costa Rica durante eventos sísmicos anteriores, para posteriormente realizar la evaluación de las estructuras para el nivel de demanda sísmica de la norma de diseño vigente.

2 METODOLOGÍA

Los índices empleados para determinar la vulnerabilidad estructural, se encuentran desarrollados en los documentos citados, por lo que no se presenta por completo en este documento los criterios o procedimientos propios, pues la aplicación de los índices se ha realizado de acuerdo a la metodología requerida por cada uno. Se presentará entonces, el procedimiento básico para la aplicación de los mismos.

De la misma forma, las curvas de fragilidad tomadas como referencia, han sido validadas para las estructuras y condiciones de demanda específicas de la zona de California, por lo que se considera necesaria la calibración de las curvas con los daños reportados por estructuras del tipo específico a evaluar, que en este caso son hospitales.

2.1 Índice IPC

El IPC (Cruz, 2007) es un índice de vulnerabilidad sísmica no normalizado, el cual divide la posible vulnerabilidad en 5 clases: Suelo, Forma, Resistencia, Contenido y Organización. Cada una de estas posibles fuentes de vulnerabilidad posee dos tipos de indicadores: los absolutos y los relativos. Se define un indicador absoluto como aquel parámetro o condición específica, que de existir ocasionaría un paro del servicio del centro de salud durante un sismo fuerte, mientras que los indicadores relativos son aquellos aspectos relevantes dentro de la vulnerabilidad, pero que se considera que de presentarse durante un sismo por sí solos no son capaces de detener la operación del hospital. En total el IPC se compone de 17 indicadores absolutos y 20 indicadores relativos.

Para determinar la vulnerabilidad de la estructura, se realiza su evaluación cualitativa en la que se determina si cada uno de los criterios tiene posibilidad de darse o no. En caso afirmativo se asigna un valor de 1.0 para caso de los indicadores absolutos y de 0.25 a los relativos. En caso de considerar que no se presentará el factor se coloca un valor de 0.0. Al finalizar la evaluación se realiza una sumatoria de todos los índices y el valor final será el IPC. Dada esta metodología se entiende por qué éste índice no es normalizado, pues existe la posibilidad de que múltiples indicadores absolutos se den, lo cual sumaría valores mayores a 1.0. Los valores del IPC por si solos no revelan realmente el nivel de

vulnerabilidad, pero si señalan de manera acertada los principales factores que podrían verse afectados durante un sismo.

2.2 Índice IOPS

El IOPS (Pan American Health Organization, 2008) es un índice de vulnerabilidad propuesto por un grupo de expertos. Es un índice normalizado, que se compone de 145 indicadores cualitativos, de los cuales 13 evalúan el desempeño estructural, 71 determinan el desempeño de elementos no-estructurales y 61 indicadores de enfocan en la seguridad funcional organizativa.

Al realizar la evaluación, existen tres posibles niveles de vulnerabilidad para cada indicador (Bajo, Medio y Alto). A cada indicador se le asigna entonces un valor numérico de acuerdo al nivel de vulnerabilidad, para posteriormente realizar una sumatoria de todos los indicadores de una misma categoría. Para poder normalizar el indicador, se propuso por parte del grupo de expertos que cada una de las tres categorías posea una contribución máxima, empleada como un factor de peso para la ponderación. De esta forma, se considera que el desempeño estructural posee un peso del 50%, el desempeño No-estructural un 30% y la seguridad organizativa un 20%.

El principal problema a la hora de emplear el sistema de pesos para la normalización del índice global de vulnerabilidad, es que existen ciertas combinaciones de indicadores que a nivel práctico se correlacionan con una mayor vulnerabilidad a la reflejada por el IOPS. El IOPS posee una herramienta informática que se encarga de calcular el valor final del indicador normalizado, no pudiendo modificar la metodología de cálculo. Este indicador se debe tomar también como un parámetro de referencia, el cual posee más valor al realizar comparaciones entre varios centros de salud del mismo nivel de importancia.

Para poder compatibilizar el uso del IOPS con el IPC, se utilizará una escala numérica similar para las evaluaciones, tomando un valor de 0 si la vulnerabilidad es baja, 0.5 si es media y 1.0 si es alta, realizando igual que para el IPC sumatorias en los resultados finales.

2.3 Casos empleados en el estudio

Se realizó la evaluación de vulnerabilidad a los centros de salud mostrados en la Tabla 1, tanto con el IPC como con el IOPS, esto para dos escenarios distintos. El primer escenario simula las condiciones en las que se encontraban los hospitales antes de un sismo de referencia (se excluye de este caso el Hospital San Rafael y San Vicente de Paul, por ser hospitales nuevos), para el cual se registraron daños en el centro de salud en específico. El segundo escenario refleja las condiciones encontradas a la hora de realizar las evaluaciones, que en general reflejarán una disminución de la vulnerabilidad, debido a los esfuerzos realizados en cada uno de los centros para mitigar los factores de vulnerabilidad identificados después de los sismos históricos o sismos de referencia, compatibilizando los criterios de desempeño con los dados por la norma sismo resistentes disponible a la fecha en que se realizó la readecuación sísmica.

En todos los hospitales se contó con la colaboración del personal de los centros de salud, con lo cual fue posible la reconstrucción de las condiciones que poseían antes del sismo de referencia, además de poder llevar a cabo las

evaluaciones de las condiciones existentes, permitiendo el acceso a las instalaciones, sin el cual no es posible realizar las evaluaciones de manera correcta.

Tabla 1 Hospitales a los que se aplicó el IPC y IOPS para el presente estudio, así como el sismo de referencia en que se presentó daño.

Hospital	País	Sismo Referencia
México	Costa Rica	Alajuela, 1990 (Schmidt-Díaz, 2006)
Tony Facio	Costa Rica	Limón, 1991 (Schmidt-Díaz, 2006)
Escalante Pradilla	Costa Rica	Buenavista, 1983 (Vargas Monge, 1985)
Ciudad Neilly	Costa Rica	Puerto Armuelles 2003 (Linkimer y Schmidt-Díaz, 2004)
Monseñor Sanabria	Costa Rica	Cóbano 1990 (Schmidt-Díaz, 2006)
San Rafael de Alajuela	Costa Rica	Sin Daños
Nuevo San Vicente de Paul	Costa Rica	Sin Daños

2.4 Curvas de Fragilidad

Las curvas de fragilidad son funciones que representan la probabilidad de excedencia de algún parámetro de respuesta que generalmente modela el daño estructural, respecto a un parámetro de demanda, que por lo general es un parámetro de intensidad sísmica.

El proyecto ATC-13 (ATC, 1985), utilizó la opinión de ingenieros estructurales con experiencia en evaluaciones de daños, aplicando el método Delphi para obtener de manera estructurada, la apreciación subjetiva del grupo de expertos sobre el posible desempeño de diferentes tipologías de estructuras ante sismos de diferente intensidad (se emplea la Intensidad Modificada de Mercalli, IMM, como parámetro de intensidad sísmica), transformando los resultados de los formularios de evaluación en matrices de probabilidad de daño para posteriormente construir las curvas de fragilidad.

Las curvas de fragilidad se encuentran resueltas en el trabajo de Anagnos, Rojahn y Kiremidjian (1995), quienes utilizan la distribución acumulativa de probabilidad de la función Beta para el ajuste de los valores dadas en las matrices de probabilidad de daño. Cada tipología estructural posee tres posibles alturas delimitadas por la cantidad de niveles y se consideran 6 niveles de daño (df=0.1%, 1%, 10%, 30%, 60% y 99%) utilizando una función del costo de reparación o sustitución de la estructura (df) para modelar dicho daño.

Como parte de las limitaciones propias de la metodología del ATC-13, en todas las evaluaciones se considera el tipo estándar de construcción, por lo que es posible que existan estructuras cuyas condiciones sean peores o mejores a las consideradas a la hora de realizar los ajustes. Por esta razón, el propio documento del ATC-13, propone que se apliquen variaciones en las curvas, desplazándolas en unidades completas de la intensidad IMM. Si se considera que las estructuras poseen un mejor comportamiento se desplazarán 2 unidades hacia la derecha, mientras que si poseen un peor comportamiento se desplazarán 2 unidades a la izquierda.

Estudios posteriores sobre el análisis de líneas vitales (ATC, 1991) modifican éste esquema de desplazamiento para las curvas de fragilidad, proponiendo cambios más suaves (cambios de una unidad de intensidad en lugar de dos), además de ampliar el rango de desplazamiento permitidos hasta 3 unidades, pues se considera que en el conjunto de factores que componen los sistemas de las líneas vitales, es posible que algunos elementos posean una mayor vulnerabilidad que el promedio de los elementos.

Los niveles de daño central (df) se pueden correlacionar con estados discretos de daño, los cuales a su vez se correlacionan con objetivos de desempeño estructural. De esta manera, al realizar las evaluaciones de acuerdo con los objetivos de desempeño del CSCR-10 (CFIA, 2011), se emplearán únicamente dos curvas de fragilidad, una por cada objetivo de desempeño exigido por el código. La primera curva es la que posee un df del 10%, daño que se relaciona con el estado discreto de daños ligeros y estos a su vez con el objetivo de desempeño de ocupación inmediata, y la segunda curva será la que posee un df del 30%, que se relaciona con el estado discreto de daño de moderado, que a su vez se correlaciona con el objetivo de desempeño de seguridad a la vida.

El CSCR-10 (CFIA, 2011) solicita que para estructuras del grupo de importancia A (grupo que incluye a los hospitales), se garantice que cumplirán con el objetivo de desempeño de Ocupación Inmediata para un evento sísmico con una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años de exposición (10/50) y un nivel de seguridad a la vida con daños estructurales controlados, para el caso de un sismo con una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años (2/50).

2.5 Calibración de curvas de fragilidad con el daño observado

Debido a que la fragilidad global de las estructuras se define en gran medida por el comportamiento de su estructura, se realizará una división de los resultados tanto del IPC como del IOPS. Para determinar la ubicación de la curva de fragilidad, es decir, determinar en cuantas unidades se debe desplazar la curva de fragilidad para que se aproximen los daños observados con el sismo de referencia a los daños correspondientes con el objetivo de desempeño modelado con las curvas de $df=10\%$ y 30% , se emplearán únicamente los indicadores relacionados con el comportamiento estructural.

Por otro lado, se ha formulado anteriormente (FEMA, 2007; Monti y Nuti, 1996) que el daño en los componentes no estructurales, se correlacionan más con el límite de pérdida de funcionalidad de la estructura, es decir, si existe mucho daño en elementos no estructurales, sin importar si el daño estructural es controlado, las instalaciones perderán su capacidad de funcionamiento, lo cual equivale a un colapso operacional. Esto se modela con un límite superior a las curvas de

fragilidad. Además se considera un límite inferior en las curvas de fragilidad en la probabilidad de excedencia de 0.2, debido a que para valores menores de probabilidad de excedencia es difícil de correlacionar el daño en las estructuras (Monti y Nuti, 1996). Después de determinar el límite superior de las curvas, se normaliza el tramo restante de curva, considerando que dentro del sector de curva contemplado se modela de manera adecuada la probabilidad de excedencia para las condiciones de funcionalidad dadas por el posible daño no estructural, de acuerdo a las evaluaciones de los índices IPC y IOPS.

En la Figura 1 se muestra una curva de fragilidad (CF) Promedio, correspondiente a estructuras de concreto reforzado tipo dual, para un df del 10% (ATC, 1985). Se observa el efecto de modificar el desempeño de la estructura desplazando la curva en una (-1) y dos (-2) unidades de intensidad IMM. Además, se muestra el límite de pérdida de funcionalidad máximo, con una probabilidad acumulada de 0.8, pero podrá ser inferior dependiendo de los criterios de vulnerabilidad no estructural (IOPS) o indicadores relativos (IPC).

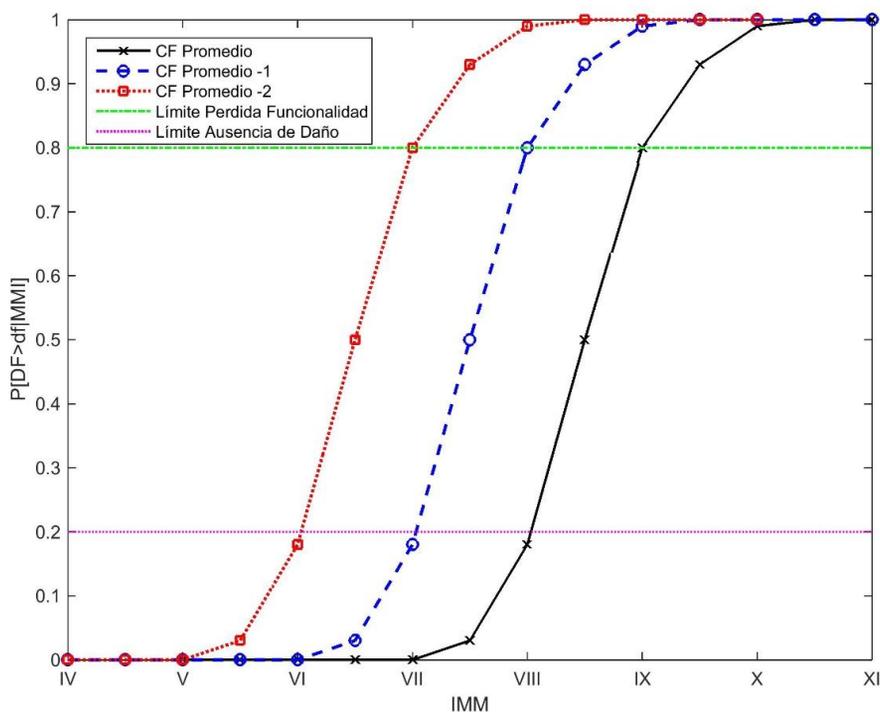


Figura 1 Ejemplo de modificaciones propuesta a curva de fragilidad (CF), mostrando tanto la variación que afecta el desempeño estructural, como la que modifica la pérdida de funcionalidad.

Teniendo en cuenta las modificaciones propuestas, el procedimiento final de la calibración de las curvas de fragilidad consiste en tomar los resultados de las evaluaciones realizadas con los índices IPC y IOPS, para el escenario con las condiciones que tenían los hospitales para el sismo de referencia y junto con los reportes de intensidad macro sísmica (ver referencias en Tabla 1), se asignan los valores necesarios para ajustar el nivel de daño que se presentó en cada uno de los

hospitales, realizando finalmente una propuesta integral para la modificación en evaluaciones futuras.

3 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA: ESCENARIO CON SISMOS DE REFERENCIA

Se realizó una reconstrucción de las condiciones que poseían los hospitales al momento en que fueron afectados por los sismos de referencia. Sabiendo el nivel de daño estructural y no estructural que se produjo en cada centro de salud, así como las condiciones posteriores al evento, se ajustaron las curvas de fragilidad, para que reflejen el daño observado. Las correcciones se aplican de igual forma a las dos curvas disponibles ($df=10\%$ y 30%), aunque solo una de ellas es utilizada para la calibración, esto dependiendo del nivel de daño observado. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra un resumen de los daños Estructurales y No-Estructurales que se consideraron en la recreación de las condiciones que poseía cada uno de los centros de salud.

Tabla 2 Resumen de daños para cada sismos de referencia en los hospitales evaluados.

Hospital	Sismo de Referencia	Daño No Estructural	Daño Estructural
México	Buenavista 1983	Problemas en equipos de rayos X, problemas con el servicio por más de dos años. Fractura en ventanales y losas sanitarias.	No se presentó
	Cóbano 1990	Caída de cielos, agrietamiento en paredes internas y fractura de vidrios.	Inicios de formación de rótulas plásticas en columnas de estructuras sin reforzar.
	Alajuela 1990	Caída de objetos y cielos falsos, agrietamiento en paredes internas y fractura de vidrios.	Inicios de rótulas plásticas en edificios sin reforzar. Inicio de falla de algunas columnas ligadas a paredes donde se dio columna el efecto de columna corta.
Dr. Escalante Pradilla	Buenavista 1983	Caída de cielos, agrietamiento en paredes internas y fractura de vidrios, caída de objetos, pérdida de sistemas de electricidad y abastecimiento de agua, colapso de tuberías que provocaron inundaciones parciales. Salida de funcionamiento de elevadores.	Formación de algunas rótulas plásticas en columnas de primer nivel, problemas en columnas del primer nivel, por efecto de columnas corta.

Hospital	Sismo de Referencia	Daño No Estructural	Daño Estructural
Ciudad Neilly	Puerto Armuelles 2003	Caída de objetos, cielos, agrietamiento en paredes internas y fractura de vidrios. Falla de tuberías de agua potable y pluvial.	Posible desprendimiento de concreto de recubrimiento de dos columnas esquineras, las cuales posterior a estudios formales se descartó el daño estructural.
Tony Facio	Limón 1991	Fallo del techo del último nivel, caída de objetos y cielos. Falla de fachadas frágiles. Levantamiento de pisos en primer nivel. Falla en anclajes de equipos.	Inicio de falla en vigas de voladizos perimetrales. Algunas columnas centrales (edificio de 4 niveles) sufrieron pérdida de recubrimiento.
Monseñor Sanabria	Cóbano 1990	Caída de cielo, fractura de vidrios, colapso de paredes divisorias de mampostería de arcilla, caída de objetos. Salida de funcionamiento de elevadores.	Inicio de formación de rótulas plásticas en columnas con problema de columna corta, la integrarlas con paredes de mampostería.

En la Tabla 3 se muestra el resumen de las evaluaciones con los índices IPC y IOPS. La descripción completa de los daños reportados y de la recreación de las condiciones que presentaba cada una de las estructuras se puede consultar en el trabajo final de graduación de Hidalgo (2012). En ésta misma tabla se muestran las sumatorias finales de cada una de las evaluaciones realizadas con los índices de vulnerabilidad, además del valor necesario tanto en el desplazamiento lateral de las curvas (Factor Estructural), como en el límite superior por pérdida de funcionalidad (Límite Funcionalidad), determinados en el resultado del proceso de calibración, para poder correlacionar el resultado de las evaluaciones con el daño observado en las estructuras.

El elemento que modifica en mayor medida el posible daño de las estructuras es el Factor Estructural, por lo que se consideró necesario que para ambas evaluaciones el resultado final fuese el mismo. Para el caso del Límite de Funcionalidad, fue más difícil lograr una relación lineal entre los resultados de los dos índices, pues el IOPS cuenta con una gran cantidad de indicadores, los cuales evalúan aspectos con diferentes pesos en la vulnerabilidad total de la estructura, pero por el esquema planteado en la propia metodología, todos poseen el mismo impacto sobre el IOPS, por lo que resulta en valores más elevados a la hora de realizar la sumatoria.

Como resultado de estas evaluaciones y del proceso de calibración, se proponen rangos para la aplicación de los factores de corrección (ver Tabla 4). Los valores mostrados en la Tabla 4, cuentan con un aporte subjetivo, el cual se basa en la experiencia de los autores en la evaluación de la vulnerabilidad, pues en las reconstrucciones históricas realizadas, no se contó con información para el escenario con baja vulnerabilidad durante eventos sísmicos importantes, por lo que los factores de corrección fueron propuestos de manera tal que se logre reflejar el

efecto esperado para estructuras con dicho nivel de vulnerabilidad, consiguiendo además que la aplicación de los factores de corrección sea escalonada.

Tabla 3 Resultados de la evaluación para condiciones previas al sismo de referencia y factores aplicados para modelar daño observado.

		H. México	H. E. Pradilla	H. C. Neily	H. T. Facio	H. M. Sanabria
IPC	Indicadores Absolutos	8	6	7	4	6
	Indicadores Relativos	1,75	1,75	2,25	2	1
	Factor Estructural ⁽¹⁾	-4	-3	-4	-3	-3
	Límite Funcionalidad ⁽¹⁾	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7
IOPS	Indicadores Estructurales	5,5	4,5	6,5	3,5	4,5
	Indicadores No Estructurales	21	28	18	24	19,5
	Factor Estructural ⁽¹⁾	-4	-3	-4	-3	-3
	Límite Funcionalidad ⁽¹⁾	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6

⁽¹⁾ Factores asignados para hacer coincidir la curva de fragilidad con el daño observado.

Tabla 4 Factores de corrección derivados de calibración con daños observados, aplicables a IPC y IOPS.

Vulnerabilidad Estructural			Vulnerabilidad No-Estructural		
Factor de Corrección	IPC Rango	IOPS Rango	Límite Funcionalidad	IPC Rango	IOPS Rango
0	0	0	0,8	0	0
-1	1-2	1-3	0,7	0,25-2	0,5-10
-2	3-6	3,5-6	0,6	2,25-4	10,5-20
-3	>6	>6	0,5	>4	>20

Nota: Si la estructura fue construida o reforzada antes de 1986 se corrige con un factor adicional de -1 por poseer un diseño con un código antiguo.

4 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA: ESCENARIO DE CONDICIONES ACTUALES Y SISMO DE CSCR

Una vez que se han establecido los factores de corrección de las curvas de fragilidad, se realizó la evaluación de los hospitales con los índices de vulnerabilidad para el segundo escenario seleccionado. En la Tabla 5 se muestra el resumen de la evaluación de vulnerabilidad realizada a cada hospital, así como los factores de corrección por aplicar a las curvas, de acuerdo a los valores definidos previamente en la Tabla 4.

Se observa una diferencia en el Factor Estructural del Hospital México y el Tony Facio, donde el IPC corrige el comportamiento estructural en (-1) y el IOPS en (-2), el resto de los hospitales poseen los mismos factores de corrección. Las curvas resultantes se utilizaron para verificar el daño probable de acuerdo con las solicitudes del CSCR-10 (CFIA, 2011), aplicando el sismo 2/50.

Para poder aplicar la demanda del código (dada como función de la aceleración pico efectiva), se realiza una correlación entre la aceleración pico y la pico efectiva, de acuerdo al estudio de Laporte (2006), para después utilizar las relaciones de Linkimer (2007) para obtener la intensidad IMM, la cual variará de acuerdo a la Zona Sísmica y el tipo de estrato de suelo (se toma suelo S₃ para definir el nivel de amenaza más desfavorable).

Tabla 5 Resultados de la evaluación de vulnerabilidad para las condiciones actuales.

		H. México	H. E. Pradilla	H. C. Neily	H. T. Facio	H. M. Sanabria	H. S. Rafael	H. S. V. Paul
IPC	Indicadores Absolutos	1	2	1	1	2	0	0
	Indicadores Relativos	0,5	1,25	1,75	1,25	1	0,25	0,25
	Factor Estructural	-1	-2	-1	-1	-2	0	0
	Límite Funcionalidad	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
IOPS	Indicadores Estructurales	5	3	3	3,5	4,5	0	0
	Indicadores No Estructurales	11,5	9	8,75	12,25	10	0,25	0,25
	Factor Estructural	-2	-2	-1	-2	-2	0	0
	Límite Funcionalidad	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7

El único hospital que no se encuentra en una zona sísmica III es el Hospital de Ciudad Neily, el cual se ubica cerca de la península de Osa (zona IV), que se ve influenciada de manera más directa por los sismos originados en la zona de subducción formada por el choque entre las placas de Cocos y Caribe, además de la zona de contacto con la micro placa de Panamá y la placa de Nazca al sur de la península.

Éste hospital era de los que presentaba peores condiciones en el primer escenario de la evaluación, sin embargo, ha sido sometido a una gran readecuación sísmica la cual no solo contempló elementos estructurales, sino que además redujo de manera significativa la vulnerabilidad no estructural, lo cual se refleja en la evaluación realizada bajo las condiciones actuales.

En la Figura 2 se presenta el resultado de las evaluaciones de daño de los hospitales las cuales fueron realizadas para el sismo extremo (importancias de 1.25) según se define en el CSCR-10 (CFIA, 2011). Se muestran las curvas correspondientes con el df de 10% y df de 30%, con lo cual es posible evaluar los objetivos de desempeño para cada nivel de daño. El sismo representa el valor central (media) de la regresión empleada (Linkimer, 2007), esto implica que es posible que existan sismos con igual aceleración que produzcan una intensidad mayor o menor a la mostrada.

Para determinar si existe posibilidad de sobrepasar algún nivel de daño en particular, se toma el valor del ID igual a 0.5 como valor límite, por lo que si la intersección entre la demanda y la curva de fragilidad está por debajo de este valor, se considera poco probable que se supere dicho nivel de daño.

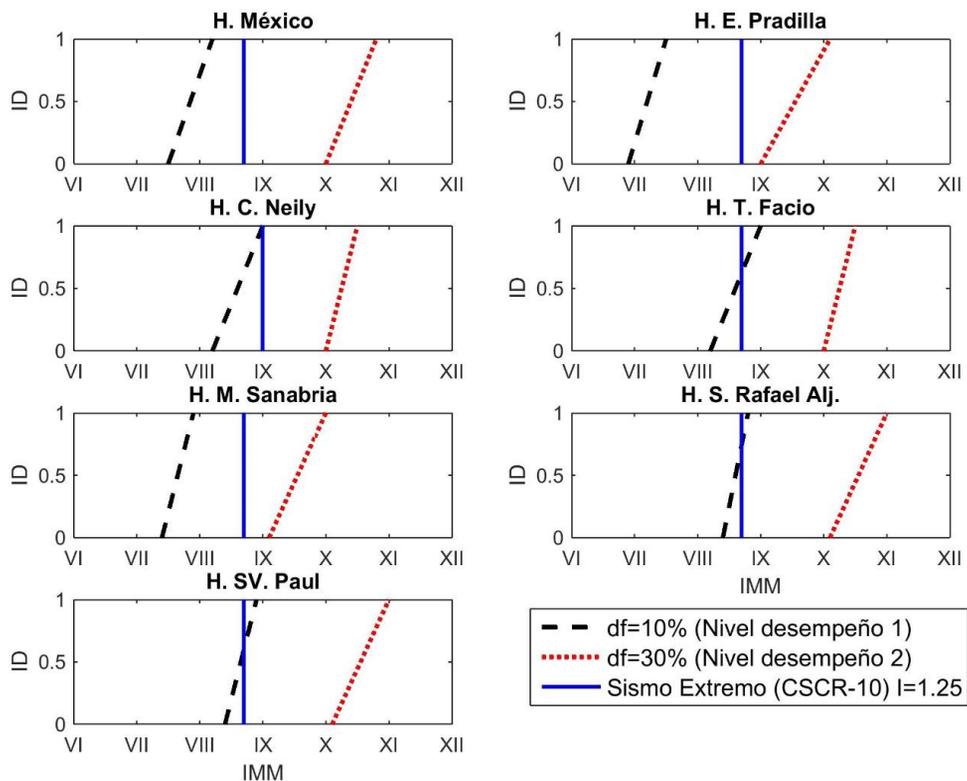


Figura 2 Resumen de evaluación del daño de los hospitales para el sismo extremo del CSCR-10 y las condiciones actuales de vulnerabilidad.

5 DISCUSIÓN

La determinación de la vulnerabilidad sísmica por medio de índices cualitativos es una herramienta adecuada para caracterizar y comparar sistemas complejos como lo son las redes de salud de países o regiones enteras; esto siempre que se utilice la misma herramienta y el mismo criterio para determinar los puntos débiles que posee cada estructura, permitiendo comparar los resultados a un nivel macro.

Uno de los principales inconvenientes de los índices de vulnerabilidad cualitativos es que no contemplan la amenaza sísmica como una variable, por lo que se pierde de vista el hecho de que esto modifica el riesgo y por ende el nivel de daño esperado en el tiempo de acuerdo al emplazamiento de la estructura analizada.

La interacción entre el daño estructural y el daño no-estructural es compleja de caracterizar, por lo que se usó en esta investigación una metodología con la cual se refleje el efecto del daño no-estructural sobre las curvas de fragilidad que caracteriza el daño estructural, esto con la introducción del concepto de fallo por funcionalidad, el cual dependerá del nivel de vulnerabilidad que adicione al sistema los elementos no-estructurales.

El IOPS consigue una mejor caracterización de la vulnerabilidad no-estructural, sin embargo, el nivel de detalle que posee implica una mayor necesidad de recursos y de tiempo en la evaluación. La caracterización de la vulnerabilidad estructural para este índice en edificios sometidos a reestructuraciones o adecuaciones sísmicas, no es claro y genera resultados inesperados en la vulnerabilidad final, castigando las estructuras que han pasado por este tipo de procesos.

El IPC es más simple y su aplicación no requiere de una inversión de recursos tan alta en comparación al IOPS. La definición de la vulnerabilidad estructural está mejor caracterizada por el IPC, pues considera indicadores típicamente empleados en el análisis y diseño de estructuras, como efectos de piso blando, columna corta o capacidad a corte en la base, entre otros.

A pesar de las deficiencias encontradas en cada uno de los índices, se logró realizar la calibración del modelo propuesto, consiguiendo resultados similares con ambas evaluaciones. Esta calibración fue empleada para la determinación del posible daño que sufrirían las estructuras evaluadas, esto aplicando la demanda que exige el CSCR-10 (CFIA, 2011) (ver Figura 2), concluyendo que para ninguno de los casos evaluados la amenaza alcanza el nivel de desempeño de seguridad de la vida, el cual se modela con la curva de fragilidad con $df=30\%$, correspondiente con el objetivo de desempeño deseado para el nivel de amenaza empleada en la evaluación (2/50) para este tipo de estructuras.

En todos los casos analizados, para el nivel de desempeño de ocupación inmediata ($df=10\%$), se sobrepasa el valor del ID de 0.5, por lo que se puede esperar que los edificios posean daños ligeros, que puede ocasionar la salir de operación momentáneamente, sin embargo, este nivel de daño no debe suponer un riesgo a la vida de las personas que estén dentro o fuera del centro de salud.

Tal y como se indicó, la evaluación para el segundo escenario se realizó transformando la aceleración pico efectiva en aceleración pico y ésta a su vez al valor equivalente en intensidad IMM. Este tipo de regresiones conlleva un error o dispersión de los datos, tanto de fuentes epistémicas como aleatorias y que se encuentra intrínseco en las regresiones empleadas. Esta dispersión no es mostrada en las evaluaciones, las cuales podrían afectarse con valores de amenaza mayores a las empleadas, por lo que es de esperar que para aquellos hospitales en que el sismo de evaluación esté cerca del nivel de desempeño 2, pueda alcanzarse un nivel de probabilidad alto (mayor a 0.5) en el ID, para el df del 30%, lo cual implicaría un nivel de daño mayor al esperado o deseado por el CSCR para este nivel de

amenaza, lo cual podría ocurrir con facilidad para los hospitales Monseñor Sanabria y Escalante Pradilla, esto de acuerdo a lo mostrado en la Figura 2.

Los dos centros de salud San Rafael de Alajuela y San Vicente de Paul, poseen las menores probabilidades de daño, lo cual se ajusta a lo esperado pues poseen un diseño sismorresistente acorde con las normas de diseño más actualizadas. Además, su diseño interior ha considerado los principales elementos que reducen la vulnerabilidad no-estructural.

6 CONCLUSIONES

Los centros de salud analizados en el presenta estudio, son los que poseen mayor capacidad de atención y mayor diversidad de servicios en Costa Rica, de ahí que es de esperar que sean puntos focales en la atención de futuras emergencias, por lo que la evaluación y mitigación de la vulnerabilidad que posee este tipo de estructuras debe ser una prioridad, con el objetivo de resguardar tanto el bienestar social como económico del país.

Los métodos simplificados para la evaluación de la vulnerabilidad y el daño sísmico, generalmente, dejan de lado la amenaza sísmica en la zona de estudio, esto debido a que por lo general se basan en métodos de calificación cualitativos, los cuales no pueden ser modificados para diferentes niveles de amenaza. En este estudio se han empleado dos índices de vulnerabilidad con diferentes enfoques: el IPC (Cruz, 2007) y el IOPS (Pan American Health Organization, 2008).

El IPC es un índice simple, que refleja mejor la vulnerabilidad estructural, pero que al no estar normalizado dificulta la comparación entre diferentes evaluaciones. El IOPS por su parte, es buen indicador de la vulnerabilidad no-estructural, pero es confuso en la evaluación de la vulnerabilidad estructural y además requiere de una mayor cantidad de recursos para poder implementarlo.

El método que se propone en este artículo, logra evaluar el posible daño en los hospitales, con la implementación de una herramienta que trabaja como una extensión de los índices de daño ya disponibles, requiriendo de poco esfuerzo adicional para su uso. Con el método propuesto, se logra evaluar el daño para diferentes escenarios de amenaza sísmica, así como para diferentes niveles de daño o niveles de desempeño, dando un panorama más claro de la vulnerabilidad estructural y del posible nivel de daño.

La calibración realizada utiliza los registros históricos de daño en eventos de gran importancia en Costa Rica, la cual en general fue encontrada de manera incompleta, requiriendo de la colaboración del personal que aún labora en los centros y que se encontraban durante los eventos históricos. La documentación de este tipo de eventos debe de realizarse de manera sistemática, pues las lecciones dadas en cada evento deben de permear en el diseño de futuros centros de salud, para evitar así cometer los mismos errores.

El desempeño esperado en las estructuras evaluadas, se ajusta a las exigencias del CSCR-10, sin embargo, debido a la dispersión que poseen las regresiones empleadas para caracterizar la amenaza, se considera recomendable ampliar el estudio del riesgo sísmico en el Hospital Escalante Pradilla y en el Hospital Monseñor Sanabria.

7 AGRADECIMIENTOS

El primer autor de este artículo desea agradecer a la doctora María del Rocío Saenz, MSc, por su amplia colaboración durante la elaboración del proyecto. Además, se le agradece al departamento de ingeniería de la Caja Costarricense del Seguro Social por la colaboración dada y permitir realizar las evaluaciones a los hospitales, así como a todo el personal de ésta institución quienes colaboraron con sus testimonios. Por último, al personal del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica por su colaboración durante la elaboración de esta investigación.

8 REFERENCIAS

- Anagnos, T., Rojahn, C., Kiremidjian, A., 1995. "NCEER-ATC joint study on fragility of buildings". National Center for Earthquake Engineering Research.
- ATC, 1991. "ATC-25: Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States". Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- ATC, 1985. "ATC 13: Earthquake Damage Evaluation Data for California". Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- CFIA, 2011. "Código Sísmico de Costa Rica 2010", 4a ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Cruz, M., 2007. "Indicadores de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico en Hospitales", en: ACIES (Ed.), Memorias del XI Seminario de Ingeniería Sísmica y Estructural. CFIA, San José, Costa Rica.
- FEMA, 2007. "FEMA 577: Design Guide for Improving Hospital Safety in Earthquakes, Floods, and High Winds" . Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Hidalgo, D.A., 2012. "Aplicación de Índices de Vulnerabilidad en Instalaciones Hospitalarias". Universidad de Costa Rica.
- Laporte, M., 2006. "Correlación entre la aceleración pico y la aceleración pico efectiva y valores de PGV/PGA y $PGA*PGD/PGV^2$, del banco de datos de movimientos fuertes de América Central", en: IX Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica. CFIA, San José, pp. 1-21.
- Linkimer, L., 2007. "Relationship between peak ground acceleration and Modified Mercalli intensity in Costa Rica". Revista Geológica de América Central **38** 81-94.
- Linkimer, L., Schmidt-Díaz, V., 2004. "Sismos en la península de Burica entre diciembre del 2003 y febrero del 2004". Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Monti, G., Nuti, C., 1996. "A procedure for assessing the functional reliability of hospital systems". Structural Safety **18**, 277-292. doi:10.1016/S0167-4730(96)00022-7
- Pan American Health Organization, 2008. "Hospital Safety Index: Evaluation Forms for Safe Hospitals", en: Series Hospitals Safe Disasters. World Health Organization, Washington, D.C., p. 34.

- Safina, S., 2002. "Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo sísmico". Universitat Politècnica de Catalunya.
- Schmidt-Díaz, V., 2006. "Redefinición de la escala de intensidad Mercalli Modificada para Costa Rica". Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Vargas Monge, W., 1985. "Vulnerabilidad sísmica de los sistemas vitales, algunas consideraciones sobre el terremoto de San Isidro del 3 de julio de 1983". Universidad de Costa Rica.