

CAPÍTULO 10

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LOS HOSPITALES DE CATALUÑA

10.1. INTRODUCCIÓN

Una de las etapas más importante en el proceso de evaluación del desempeño sísmico de un sistema esencial lo constituye, sin duda alguna, la apropiada caracterización de la vulnerabilidad sísmica de sus elementos integrantes. En el caso particular del sistema sanitario es imprescindible la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los centros de atención de salud y especialmente de los hospitales.

En el presente capítulo se describe la aplicación realizada con los métodos empíricos de categorización, sobre los 64 Hospitales que conforman la Red de Hospitales de Utilización Pública de Cataluña - XHUP, que forma parte de la estructura sanitaria de Cataluña y tiene como objetivo principal caracterizar la vulnerabilidad sísmica y definir un modelo de fragilidad para cada uno de estos hospitales.

Estos resultados han servido de base para la elaboración del diagnóstico preliminar sobre el nivel de vulnerabilidad sísmica de edificios esenciales de Cataluña (González et al., 2001 y 2002), que ha sido presentado por el Instituto Cartográfico de Cataluña – ICC, como parte del programa de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de hospitales, realizado para la Dirección General de Emergencia y Seguridad Civil de la Generalitat de Cataluña, y que ha servido de fundamento para la redacción del Plan de Emergencia Sísmica de Cataluña - SISMICAT (González et al., 2000).

Asimismo, los resultados de esta evaluación permiten definir el modelo de fragilidad de los hospitales, necesario para la aplicación del enfoque de vulnerabilidad sistémica al estudio del Sistema Sanitario de Cataluña (Safina et al., 2002), desarrollado en el Capítulo 11.

10.2. VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LOS HOSPITALES DE CATALUÑA

El objetivo de esta evaluación está dirigido a proporcionar un primer diagnóstico sobre la vulnerabilidad sísmica de los hospitales de Cataluña, que permita evaluar la capacidad de respuesta sísmica del sistema sanitario de la región, así como, jerarquizar y racionalizar la toma de decisiones relativas a la mitigación del riesgo sísmico.

Considerando el moderado nivel de sismicidad que caracteriza a la región, así como la limitada información disponible de cada hospital, que versa básicamente sobre aspectos generales de las edificaciones, se justifica la aplicación de los *métodos empíricos de categorización*, como alternativa para estimar de manera preliminar, la vulnerabilidad sísmica de estas edificaciones. La estrategia de evaluación empleada en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los hospitales de Cataluña, se basa en los criterios propuestos en los apartados 7.6 y 7.7 del Capítulo 7.

10.2.1. Procesamiento de la información

El procesamiento de toda la información disponible permitió conformar una *base de datos centralizada*, que resume los aspectos más relevantes de los 64 hospitales estudiados. Para cada hospital, se creó una *ficha técnica* (ver Anexo II), parcialmente publicada por González et al. (2000), que cuenta con una descripción de los datos generales de la edificación, entre los que destacan; nombre, ubicación, año de construcción, altura, material predominantes, remodelaciones y ampliaciones efectuadas, existencia de planos, capacidad de camas y nivel del centro (hospital general, de referencia, de alta tecnología).

Tomando como base el año de construcción y de acuerdo con la evolución de la normativa sísmica en España y sus implicaciones sobre las edificaciones esenciales de Cataluña, descritas en el apartado 9.6.1. del capítulo 9, se indica la norma sísmica, zonificación, intensidad y requerimiento sísmico, que presuntamente fue aplicado en el diseño original. Finalmente, se incluye la zonificación sísmica actual, conforme al mapa de zonificación sísmica de Cataluña (Fig. 9.13), considerando los efectos de suelo (Goula et al., 1999) a partir de la caracterización geológica de los municipios de la región (Fleta et al., 1998). También se incluye un apartado de comentarios, donde se describen los aspectos relevantes de la configuración estructural, estado de conservación, servicios complementarios, señalización de emergencia, entre otros., e incluso se incluyen fotos con vistas generales de las edificaciones.

Sobre la base de esta información, se establece una clasificación de la tipología estructural de acuerdo con tres criterios preestablecidos, designados como ICC, EMS-98 y finalmente, el criterio adoptado en el presente estudio.

10.2.1.1. Criterio de clasificación del ICC

El criterio de clasificación designado como ICC, consiste en asimilar los edificios que albergan hospitales a edificios de viviendas, bajo el argumento que sus características estructurales no difieren demasiado y por lo tanto, el estudio de vulnerabilidad sísmica puede realizarse utilizando la misma metodología que ha sido desarrollada y aplicada a edificios de vivienda en Cataluña (Chávez, 1998).

La metodología tiene un carácter estadístico y se basa en tres parámetros habitualmente disponibles a partir de los censos de las edificaciones, como son: la altura, la edad y la situación de la edificación. De acuerdo con esta metodología, cada edificación puede ser clasificadas según 18 tipologías estructurales predefinidas, indicadas en la Tabla 10.1., según su altura, edad y situación. Cada tipología se caracteriza mediante una distribución de probabilidad de pertenencia a las clases de vulnerabilidad (A, B, C y D) definidas de acuerdo con la escala EMS-92 (Grünthal, 1993).

Para aplicar esta metodología a edificios individuales, es necesario atribuir una tipología determinada a cada uno de los grupos definidos en la tabla. De esta manera, la vulnerabilidad de cada tipología queda definida como la media del conjunto de edificios de cada grupo (González et al., 2001).

Así por ejemplo, el Hospital General Vall d’Hebron (ver ficha en Anexo II), clasifica como una edificación de la tipología estructural 6 (ver Tabla 10.1), por tratarse de una edificación construida antes del año 1950, con más de 5 niveles de altura y ubicada en zona rural (entendida en el sentido que para la fecha de su construcción, se ubicaba a las afuera de la zona urbana de la capital), atribuyéndole un 60% de pertenecer a la clase de vulnerabilidad A y un 40% de pertenecer a la clase de vulnerabilidad B.

Tabla 10.1. Clasificación de los edificios esenciales en tipologías según su vulnerabilidad (Tomada de González et al., 2001)

	< 1950		1951 – 1970		> 1970	
	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural
< 5 Plantas	20% A 80% B Tipología 1	30% A 70% B Tipología 4	5%A+50%B 45% C Tipología 7	15%A+70%B 15% B Tipología 10	85% C 15% D Tipología 13	5%A+20%B 65%C+10%D Tipología 16
= 5 Plantas	20% A 80% B Tipología 2	40% A 60% B Tipología 5	10%A+60%B 30% C Tipología 8	20%A+70%B 10% C Tipología 11	5%A+20%B 65%C+10%D Tipología 14	10%A+30%B 55%C+5%D Tipología 17
> 5 Plantas	40% A 60% B Tipología 3	60% A 40% B Tipología 6	15%A+70%B 15% C Tipología 9	30%A+65%B 5% C Tipología 12	8%A+27%B 60%C+5%D Tipología 15	15%A+45%B 40% C Tipología 18

10.2.1.2. Criterio de clasificación del EMS-98

El criterio de clasificación designado como EMS-98, sigue los mismos principios empleados en la clasificación anterior, con la diferencia que se aplica una adaptación de la metodología propuesta por la nueva escala EMS-98 (Grünthal, 1998), según la cual, se definen 15 tipologías de estructuras, sobre la base de tres parámetros característicos de la estructura; el material empleado, el sistema resistente y el nivel de diseño sísmico.

Cada tipología de estructura se caracteriza mediante una distribución de probabilidad de pertenencia a cada clase de vulnerabilidad, Dicha distribución designa de manera cualitativa la clase de vulnerabilidad más probable y describe de manera gráfica la dispersión del rango probable a las siguientes clases de vulnerabilidad, tal como lo indica la Fig. 5.8. del capítulo 5.

Utilizando como base este rango gráfico y para fines de cuantificación numérica, en el presente estudio se ha establecido una correspondencia con la probabilidad que la edificación pertenezca a una clase de vulnerabilidad determinada. La Tabla 10.2. muestra la definición empleada.

Así por ejemplo, el Hospital General Vall d’Hebron (ver ficha en Anexo II), clasifica como una edificación de la tipología estructural 8 (ver Tabla 10.2), por tratarse de una edificación aporricada de hormigón armado sin diseño antisísmico, atribuyéndole un 6.32% de pertenecer a la clase de vulnerabilidad A, 34.70% de pertenecer a la clase de vulnerabilidad B, 52.6% de pertenecer a la clase de vulnerabilidad C y 6.30% de pertenecer a la clase de vulnerabilidad D.

Tabla 10.2. Composición porcentual de las clases de vulnerabilidad para cada tipología de estructura. Adaptado de EMS-98 (Grünthal, 1998)

Material	Tipo	Descripción de la Estructura	Clases de Vulnerabilidad					
			A	B	C	D	E	F
Mampostería	1	Piedra cruda, sin tallar	100.0					
	2	Adobe (ladrillo de tierra)	60.24	39.78				
	3	Piedra tallada	10.71	89.29				
	4	Sillería		37.08	56.18	6.74		
	5	No reforzado c/ bloque hormigón	9.68	80.65	9.67			
	6	No reforzado c/ forjado de HA		37.08	56.18	6.74		
	7	Reforzado / confinada			6.74	56.18	27.08	
Hormigón Reforzado	8	Pórtico sin DAS	6.32	34.74	52.63	6.32		
	9	Pórtico con moderado DAS		4.92	27.05	40.98	27.05	
	10	Pórtico con alto DAS			4.92	27.05	40.98	27.05
	11	Muros sin DAS		6.74	56.18	37.08		
	12	Muros con moderado DAS			6.74	56.18	37.08	
	13	Muros con alto DAS				6.74	56.18	37.08
Acero	14	Estructura Metálica			4.92	27.05	40.98	27.05
Madera	15	Estructuras de madera		4.92	27.05	40.98	27.05	

HA...Hormigón Armado DAS...Diseno AntiSismico

10.2.1.3. Criterio de clasificación adoptado

Ambos criterios de clasificación (ICC y EMS-98) definen tipologías estructurales diferentes que asocian a las mismas clases de vulnerabilidad definidas por la escala EMS; sin embargo, adolecen de emplear pocos parámetros, de naturaleza bastante genérica, al punto que la sistemática aplicación de ambas metodologías produce en algunos casos, divergencias significativas de difícil interpretación.

Con el objeto de solventar esta situación, se ha propuesto un tercer criterio de clasificación, designado como el *criterio adoptado*, según el cual, se ha considerado la totalidad de la información disponible para cada hospital en conjunción con los dos criterios anteriores, de manera que la designación de las proporciones de las clases de vulnerabilidad incorporan las consideraciones del criterio ICC (altura, edad y ubicación), las consideraciones del criterio EMS-98 (material, sistema resistente y nivel de diseño sísmico) y consideraciones particulares de cada caso, tales como: regularidad, estado de conservación, previsiones de emergencia, etc.

De hecho, el criterio adoptado simplemente redistribuye la probabilidad de pertenencia a cada clase de vulnerabilidad de los criterios de clasificación del ICC y EMS-98 de cada hospital, en función de la valoración del autor en base a la información detallada disponible. Estas consideraciones se han implementado de manera sistemática sobre la totalidad de la base de datos disponible, y aunque adolece de cierta subjetividad, representan un paso más, una mejor aproximación de los resultados obtenidos con la aplicación de los criterios anteriores.

La Tabla 10.3., resume los valores de probabilidad de pertenencia a cada clase de vulnerabilidad P[T] de cada hospital, de acuerdo con el criterio adoptado.

Tabla 10.3. Probabilidad de pertenencia a cada clase de vulnerabilidad P[T]
s/ criterio adoptado

Ident.	A	B	C	D
1	0.050	0.250	0.550	0.150
2	0.050	0.250	0.550	0.150
3	0.075	0.300	0.500	0.125
4	0.150	0.450	0.350	0.050
5	0.200	0.750	0.050	0.000
6	0.050	0.250	0.550	0.150
7	0.050	0.250	0.450	0.250
8	0.050	0.300	0.500	0.150
9	0.050	0.300	0.500	0.150
10	0.250	0.450	0.250	0.050
11	0.150	0.800	0.050	0.000
12	0.150	0.700	0.150	0.000
13	0.050	0.400	0.450	0.100
14	0.250	0.700	0.050	0.000
15	0.200	0.750	0.050	0.000
16	0.000	0.050	0.600	0.350
17	0.050	0.250	0.600	0.100
18	0.100	0.500	0.350	0.050
19	0.150	0.500	0.300	0.050
20	0.150	0.500	0.300	0.050
21	0.050	0.150	0.700	0.100
22	0.150	0.700	0.150	0.000
23	0.200	0.600	0.200	0.000
24	0.150	0.450	0.350	0.050
25	0.200	0.750	0.050	0.000
26	0.050	0.450	0.450	0.050
27	0.250	0.700	0.050	0.000
28	0.050	0.500	0.400	0.050
29	0.050	0.350	0.550	0.050
30	0.100	0.350	0.500	0.050
31	0.100	0.400	0.450	0.050
32	0.100	0.400	0.450	0.050
33	0.150	0.800	0.050	0.000
34	0.150	0.450	0.350	0.050
35	0.200	0.600	0.200	0.000
36	0.050	0.250	0.550	0.150
37	0.150	0.800	0.050	0.000
38	0.000	0.100	0.650	0.250
39	0.050	0.250	0.550	0.150
40	0.150	0.500	0.300	0.050
41	0.050	0.250	0.550	0.150
42	0.050	0.400	0.500	0.050
43	0.050	0.500	0.400	0.050
44	0.050	0.350	0.550	0.050
45	0.100	0.350	0.500	0.050
46	0.050	0.300	0.550	0.100
47	0.000	0.250	0.550	0.200
48	0.100	0.350	0.500	0.050
49	0.100	0.350	0.500	0.050
50	0.150	0.450	0.350	0.050
51	0.150	0.750	0.100	0.000
52	0.250	0.700	0.050	0.000
53	0.150	0.500	0.300	0.050
54	0.050	0.550	0.350	0.050
55	0.100	0.450	0.400	0.050
56	0.150	0.800	0.050	0.000
57	0.300	0.650	0.050	0.000
58	0.200	0.700	0.100	0.000
59	0.300	0.600	0.100	0.000
60	0.100	0.450	0.400	0.050
61	0.150	0.800	0.050	0.000
62	0.100	0.400	0.450	0.050
63	0.200	0.700	0.100	0.000
64	0.075	0.300	0.550	0.075

10.2.2. Estimación del daño potencial para cada hospital

La estimación del daño que experimenta una edificación considerando la ocurrencia de un evento sísmico de intensidad I en su emplazamiento, puede ser establecida a partir de las matrices de probabilidad de daño $P[GD=d|T,I]$, determinadas para las clases de vulnerabilidad (A, B, C, D), los grados de intensidad (de V a X) y los grados de daño (de GD0 a GD5) de la escala EMS, donde GD0 corresponde a una estructura sin daño y GD5 está asociado al colapso estructural (Chávez, 1998).

Para cada tipología estructural, definida como una combinación de clases de vulnerabilidad, la probabilidad que se observe un grado de daño $P[GD=d]$, puede ser obtenida a través de la aplicación del teorema de probabilidad total (Benjamin y Cornell, 1970), según el cual:

$$P[GD = d] = \sum_T \sum_I P[GD = d|T, I] P[T] P[I] \quad (10.1)$$

donde

$P[GD = d|T, I]$ Probabilidad condicionada que se observe un grado de daño $GD=d$, dada la intensidad I y la tipología T .

$P[T]$ Probabilidad de que el edificio pertenezca a la clase de vulnerabilidad T .

$P[I]$ Probabilidad ocurrencia sismo de intensidad I .

Asumiendo la intensidad macrosísmica de manera determinista, esto es $P[I]=1$, los resultados quedarán asociados al mismo período de retorno utilizado en la estimación de I ;

$$P[GD = d] = \sum_T P[GD = d|T] P[T] \quad (10.2)$$

Utilizando la ecuación 10.2., es posible determinar la distribución de la probabilidad que se observe un grado de daño GD , para una intensidad I . La probabilidad acumulada de obtener un grado de daño $D \geq d_j, j=1...5$, será:

$$P[GD = D \geq d_j] = 1 - \sum_{i=0}^{j-1} P[GD = d_i] \quad (10.3)$$

Utilizando como base los valores de probabilidad de pertenencia a cada clase de vulnerabilidad $P[T]$ definidas de acuerdo con el criterio adoptado, descritos en la Tabla 10.3., y las matrices de probabilidad de daño $P[GD = d|T, I]$ adaptadas por Chávez (1998) descritas en la Tabla 10.4., se determina a través de las expresiones 10.2, la distribución de la probabilidad que se observe un grado de daño $P[GD=d]$ en cada hospital, para el valor de intensidad sísmica máxima prescrito en el mapa de zonificación sísmica de Cataluña (Fig. 9.13). Asimismo, se determina a través de las expresiones 10.3, la probabilidad acumulada de obtener un grado de daño $D \geq d_j, j=1...5, P[GD=D \geq d_j]$ que permite la definición de la curva de fragilidad del hospital.

Tabla 10.4. Matrices de probabilidad de daño $P[GD = d|T, I]$
s/ Chávez (1998)

V	GD0	GD1	GD2	GD3	GD4	GD5
A	0.4410	0.3920	0.1400	0.0250	0.0020	0.0000
B	0.6700	0.2790	0.0470	0.0040	0.0000	0.0000
C	0.7550	0.2180	0.0250	0.0010	0.0000	0.0000
D	0.8590	0.1330	0.0080	0.0000	0.0000	0.0000
V-VI						
A	0.3250	0.3880	0.2115	0.0645	0.0105	0.0005
B	0.5555	0.3355	0.0935	0.0145	0.0010	0.0000
C	0.7125	0.2485	0.0360	0.0025	0.0000	0.0000
D	0.8070	0.1755	0.0165	0.0010	0.0000	0.0000
VI						
A	0.2090	0.3840	0.2830	0.1040	0.0190	0.0010
B	0.4410	0.3920	0.1400	0.0250	0.0020	0.0000
C	0.6700	0.2790	0.0470	0.0040	0.0000	0.0000
D	0.7550	0.2180	0.0250	0.0020	0.0000	0.0000
VI-VII						
A	0.1450	0.3240	0.3140	0.1650	0.0470	0.0050
B	0.3250	0.3880	0.2110	0.0640	0.0110	0.0010
C	0.5560	0.3360	0.0930	0.0140	0.0010	0.0000
D	0.7120	0.2490	0.0360	0.0030	0.0000	0.0000
VII						
A	0.0800	0.2630	0.3460	0.2270	0.0740	0.0100
B	0.2090	0.3840	0.2830	0.1040	0.0190	0.0010
C	0.4410	0.3920	0.1400	0.0250	0.0020	0.0000
D	0.6700	0.2790	0.0470	0.0040	0.0000	0.0000
VII-VIII						
A	0.0450	0.1690	0.2870	0.2860	0.1680	0.0450
B	0.1450	0.3230	0.3140	0.1650	0.0470	0.0060
C	0.3250	0.3880	0.2110	0.0640	0.0110	0.0010
D	0.5560	0.3360	0.0930	0.0140	0.0010	0.0000
VIII						
A	0.0100	0.0750	0.2270	0.3460	0.2620	0.0800
B	0.0800	0.2630	0.3460	0.2270	0.0740	0.0100
C	0.2090	0.3840	0.2830	0.1040	0.0190	0.0010
D	0.4410	0.3920	0.1400	0.0250	0.0020	0.0000
VIII-IX						
A	0.0050	0.0400	0.1360	0.2680	0.3360	0.2150
B	0.0450	0.1690	0.2870	0.2860	0.1680	0.0450
C	0.1440	0.3240	0.3140	0.1650	0.0470	0.0060
D	0.3250	0.3880	0.2110	0.0640	0.0110	0.0010
IX						
A	0.0000	0.0050	0.0440	0.1910	0.4090	0.3510
B	0.0100	0.0750	0.2270	0.3460	0.2620	0.0800
C	0.0800	0.2630	0.3460	0.2270	0.0740	0.0100
D	0.2090	0.3840	0.2830	0.1040	0.0190	0.0010
IX-X						
A	0.0000	0.0030	0.0230	0.1030	0.2960	0.5750
B	0.0050	0.0400	0.1360	0.2680	0.3360	0.2150
C	0.0450	0.1690	0.2870	0.2860	0.1680	0.0450
D	0.1440	0.3240	0.3140	0.1650	0.0470	0.0060
X						
A	0.0000	0.0000	0.0010	0.0170	0.1840	0.7980
B	0.0000	0.0050	0.0440	0.1910	0.4090	0.3510
C	0.0100	0.0750	0.2270	0.3460	0.2620	0.0800
D	0.0800	0.2630	0.3460	0.2270	0.0740	0.0100

10.2.3. Resultados de la evaluación: Método de Categorización

El Anexo II, presentan a título de ejemplo, las *fichas técnicas* de tres hospitales perteneciente a la XHUP. Se dispone de una ficha técnica por cada hospital, para un total de 64 fichas técnicas que se anexan en formato digital y que forman parte de la base de datos centralizada, que representa un importante esfuerzo de síntesis de información recopilada y calificada, la cual debe ser objeto de permanente actualización y ampliación.

Cada ficha técnica consta de cuatro partes; los datos generales de la edificación y los resultados de la aplicación de los métodos de categorización de acuerdo con los tres criterios de clasificación de la tipología estructural utilizados, designados como; ICC, EMS-98 y el criterio adoptado en el presente estudio, en los siguientes términos:

- La distribución de probabilidades de daño $P[GD]$ obtenida para la intensidad máxima (I_{max}) definida en el mapa de peligrosidad sísmica de Cataluña, considerando los efectos locales, que se muestra en la Fig. 9.13.¹
- La distribución de probabilidad acumulada de daño $P[GD = D \geq d_j]$, $j=1...5$, para cada valor de intensidad macrosísmica I , entre los grados V y X. Estos resultados se representan gráficamente para caracterizar la curva de fragilidad de la edificación.

La curva de fragilidad, expresa la predisposición que tiene la edificación de alcanzar diferentes estados de daño, debido a la acción de un evento sísmico de determinada intensidad, de manera que, sintetiza la vulnerabilidad sísmica de la edificación, que es una propiedad intrínseca de la estructura y constituye el fundamento para cualquier evaluación del riesgo sísmico asociado.

A título de ejemplo, la primera ficha técnica del Anexo II corresponde al Hospital General Vall d'Hebron, ubicado en la ciudad de Barcelona, construido entre los años 1947 y 1952. Se trata de una edificación aislada de hormigón armado, de 12 plantas y 2 sótanos, con una altura estimada de 36.00 metros. Calificado como un centro de alta tecnología, con una capacidad de 762 camas, presenta una planta en forma de U, con salientes importantes sin juntas, propios de una planta irregular. Su estructura principal consta de pórticos ortogonales, con vigas planas y forjados en base a viguetas de hormigón prefabricado. Se ubica en un suelo consolidado por pendiente intermedia entre 10-30% y mantiene un estado regular de conservación. De acuerdo a la fecha de su construcción (antes de 1.963), se presume que su diseño no incorpora ninguna prescripción sismorresistente y que el mismo obedece básicamente a las exigencias de las acciones gravitacionales. Para este caso, la intensidad máxima asignada es VI-VII (Fig. 9.12.), debido a que su emplazamiento sobre los materiales compactos ubicados al norte de la ciudad de Barcelona limitan los posibles efectos de amplificación (Cid, 1998).

La aplicación del criterios de clasificación del ICC y EMS-98 la ubica como una edificación de la tipología estructural 6 y 8 respectivamente. De acuerdo con el criterio adoptado en el presente estudio, se reconoce que la calificación según el criterio del ICC es bastante pesimista, al desconocer la capacidad intrínseca de las estructuras de hormigón armado y el nivel de control de calidad propio de la construcción de una instalación

¹ Excepto en la ciudad de Barcelona, donde se consideró la distribución de suelos propuesta por Cid (1998)

hospitalaria de tal magnitud. Asimismo, el criterio del EMS-98 tiende a ser un tanto optimista, pues debe reconocer la limitación impuesta por la falta de detalles sismorresistentes, la irregularidad en planta y la presencia de vigas planas que tienden a flexibilizar excesivamente la estructura. Sobre la base de este razonamiento, se han redistribuido las proporciones de las clases de vulnerabilidad adjudicando: 15.0% de la clase de vulnerabilidad A, 45.0% de la clase de vulnerabilidad B, 35.0% de la clase de vulnerabilidad C y 5.0% de la clase de vulnerabilidad D de la escala EMS.

Para una intensidad macrosísmica VI-VII, la Tabla 10.5., reproduce a título de ejemplo, los resultados numéricos obtenidos utilizando el criterio de clasificación adoptado. La Fig. 10.1., reproduce la curva de fragilidad del Hospital Vall d’Hebron (ver Anexo II), donde se destacan los valores de probabilidad acumulada de excedencia asociados a la intensidad I_{max}.

Tabla 10.5. Distribución de probabilidades de daño esperadas en el Hospital Vall d’Hebron para la intensidad VI-VII

	<i>GD0</i>	<i>GD1</i>	<i>GD2</i>	<i>GD3</i>	<i>GD4</i>	<i>GD5</i>
A	0.022	0.049	0.047	0.025	0.007	0.001
B	0.146	0.175	0.095	0.029	0.005	0.000
C	0.195	0.118	0.033	0.005	0.000	0.000
D	0.036	0.012	0.002	0.000	0.000	0.000
P[D=d]	0.398	0.353	0.176	0.059	0.012	0.001
PA[D≤d]	0.398	0.751	0.928	0.986	0.999	1.000
PA[D>d]	0.602	0.249	0.072	0.014	0.001	0.000

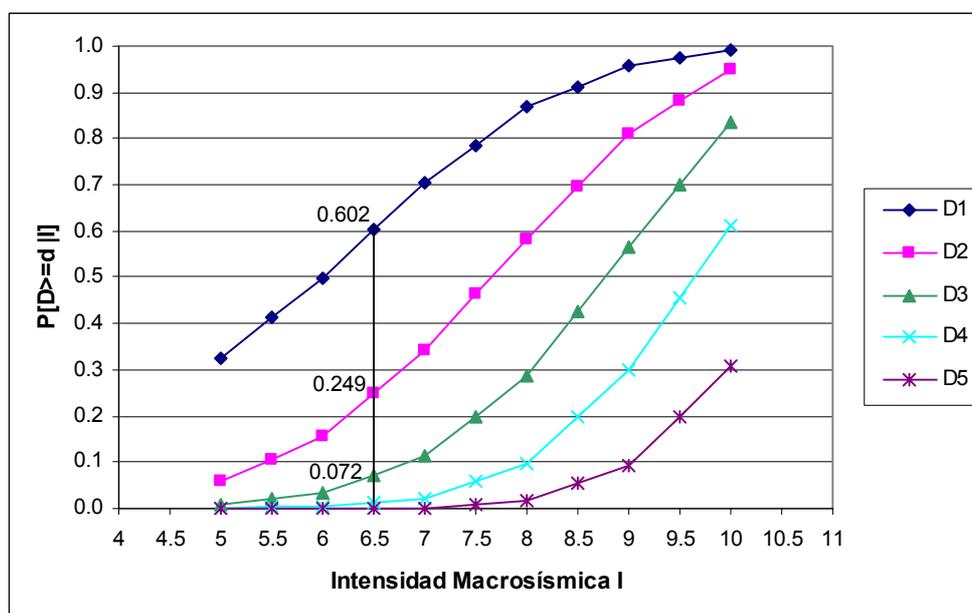


Fig. 10.1. Curva de fragilidad del Hospital Vall d’Hebron

De estos resultados se concluye que para una intensidad sísmica entre VI-VII, asociado a un sismo con período medio de retorno de 500 años, equivalente a un evento con una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, se espera que en términos medios el Hospital General Vall d’Hebron tenga (ver Tabla 5.1.): 39.80% de no sufrir ningún tipo de daño, 35.3% de sufrir un daño leve a despreciable (*GD1*), 17,6% de sufrir un daño moderado (*GD2*), 5.90% de sufrir un daño sustancial a severo (*GD3*) y menos de 1.50% de alcanzar un grado de daño igual o superior que *GD4*.

10.2.4. Comportamiento sísmico esperado de los hospitales de Cataluña

Una aplicación de los resultados obtenidos en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los hospitales de Cataluña, consiste en estimar la distribución del estado de daño esperado en dichas instalaciones como consecuencia de la ocurrencia de un evento sísmico que permita alcanzar en su emplazamiento, la máxima intensidad macrosísmica (I_{max}) establecida en el mapa de peligrosidad sísmica mostrado en la Fig. 9.13., con excepción de los hospitales de Barcelona donde se considera la distribución de suelos obtenidos del estudio de microzonificación sísmica realizado por Cid (1998).

Utilizando como base los resultados obtenidos, es posible definir un criterio de clasificación del comportamiento sísmico esperado de estas instalaciones, con miras a calificar su desempeño de manera individual. Estos estados de daño se corresponden con los daños máximos esperados, asociados a un período de retorno de 500 años, para el cual se ha especificado I_{max} . Siguiendo este planteamiento, se presenta la definición de un esquema de clasificación del comportamiento post-terremoto de los edificios esenciales, similar al propuesto por González et al. (2000), según el cual:

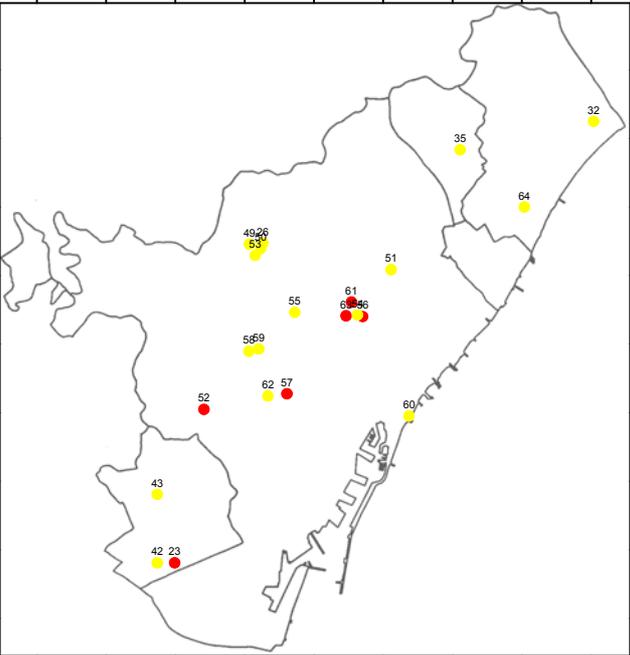
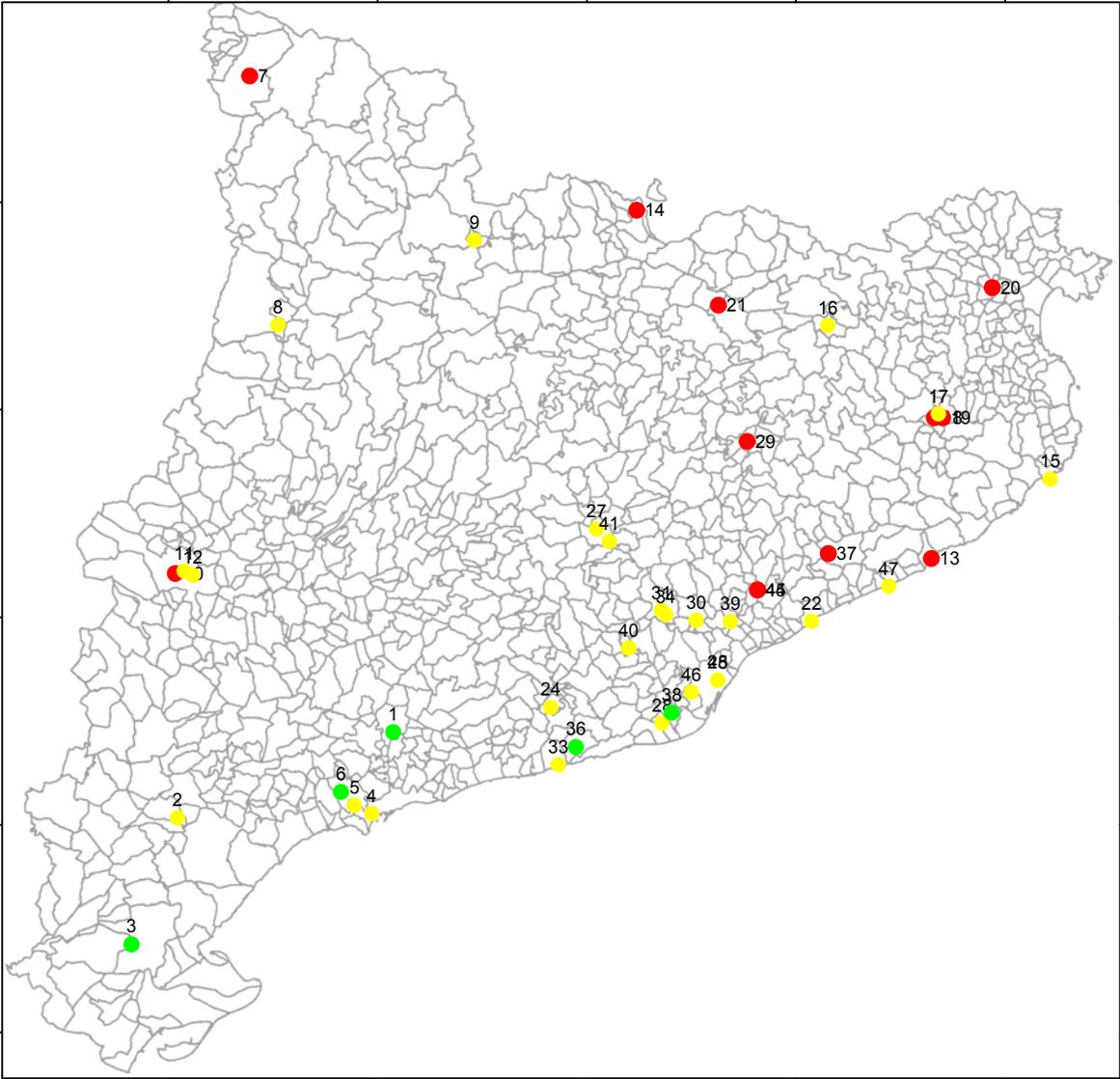
Tabla 10.6. Criterio de clasificación del comportamiento de los sísmico hospitales Cataluña

<i>Comportamiento</i>	<i>Calificación Desempeño</i>	<i>Criterios</i>
C1	Indemne	Menos 10% de daño D2
C2	Operativo	Entre 10-40% de daño D2 Menos 10% de daño D3
C3	No Operativo/Habitable	Más 40% de daño D2 Entre 10-40% de daño D3 Menos 10% de daño D4
C4	No Operativo/No Habitable	Más 40% de daño D3 Más 10% de daño D4

Utilizando como base el esquema de clasificación del comportamiento post-terremoto indicado en la Tabla 10.6., y los resultados de la distribución de probabilidades de daño P[GD] obtenida para la intensidad máxima (I_{max}) con los diferentes criterios clasificación empleados (designados como ICC, EMS-98 y el criterio adoptado), el comportamiento sísmico esperado del conjunto de los 64 hospitales que conforman la XHUP puede resumirse en la Tabla 10.7. Como ejemplo, se espera que el Hospital General Vall d'Hebron tenga un comportamiento C2, manteniéndose operativo, pues la probabilidades de daño se distribuyen de manera que, el GD2 (17.60%) está entre 10-40% y el GD3 (5.90%) es menor del 10%.

Tabla 10.7. Distribución esperada del comportamiento sísmico de los hospitales pertenecientes a la XHUP.

<i>Comport. Sísmico</i>	<i>ICC</i>		<i>EMS-98</i>		<i>Adoptado</i>	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
C1	4	6.25	7	10.74	5	7.81
C2	32	50.00	36	56.25	41	64.06
C3	28	43.75	20	31.25	18	28.13
C4	--	--	1	1.56	--	--



Comportamiento Sísmico:
● C1
● C2
● C3

Fig. 10.2. Clasificación de los hospitales, de acuerdo con su comportamiento sísmica

Estableciendo como criterio de aceptación, la condición del mantenimiento de las funciones del hospital luego del evento sísmico (instalación operativa), se espera que en términos de valores medios, entre 36 a 46 hospitales (~56-72%), experimenten un comportamiento sísmico aceptable (comportamiento C1 y C2), mientras que el resto, entre 18 a 28 hospitales (~28-44%), experimenten un comportamiento sísmico inaceptable (comportamiento C3 y C4). La Figura 10.2., ilustra la distribución de hospitales clasificados de acuerdo con el comportamiento sísmico esperado para la intensidad máxima obtenida para el criterio de clasificación adoptado.

10.3. MODELO DE FRAGILIDAD DE LOS HOSPITALES

Para definir un modelo de fragilidad de los hospitales, se adopta de manera preliminar, las mismas matrices de probabilidad de daño utilizadas para describir la fragilidad de las edificaciones, resumidas en la Tabla 10.4. De acuerdo con el modelo de fragilidad de los hospitales descrito en el apartado 8.3.2.2., del capítulo 8., la fragilidad de los hospitales puede ser obtenida a partir de la curva de fragilidad asociada al grado de daño GD2 según la escala macrosísmica EMS-98 (Grünthal, 1998), correspondiente a un nivel de daño moderado (con daño estructural ligero y daño no estructural moderado, que requiere reparaciones menores) por considerarse que este estado de daño compromete la funcionalidad de la instalación.

La fragilidad de cada hospital se expresa a través del índice de daño – ID, que varía entre 0 (sin daño) y 1 (colapso total). Este índice representa la relación entre el número de camas perdidas y el número de camas existentes. De manera que el número de camas perdidas, será el producto del índice de daño por la capacidad instalada del hospital. A cada una de estas condiciones está asociada una I_{min} , por debajo de la cual no hay daño y una I_{max} , por encima de la cual se espera un colapso funcional². Para valores intermedios de I se supone una variación lineal del índice de daño. El criterio empleado para relacionar el indicador de daño con la probabilidad de falla sigue la propuesta de Nuti y Vanzi (1999), según la cual, se supone que no hay daño (indicador de daño, $ID = 0$) para una probabilidad de falla $P_f < 0.2$ y que existe un colapso funcional (indicador de daño, $ID = 1$) para una probabilidad de falla $P_f > 0.6$.

Sobre la base de este criterio, la descripción de la fragilidad de cada hospital puede ser hecha en término de los valores de intensidad I_{min} e I_{max} . La Tabla 10.8., resume para cada hospital que conforma la XHUP, su número del identificador, su designación o nombre del centro, así como los valores de I_{min} e I_{max} , adoptados de manera preliminar, luego de la implementación sistemática sobre cada uno de los hospitales, del llamado “criterio adoptado”, descrito en el apartado 10.2.1.3., del capítulo 10. Así por ejemplo, los valores de $I_{min}=6$ (VI)³ e $I_{max}=8$ (VIII) adoptados para el Hospital General Vall d’Hebron, se obtienen a partir de la curva de fragilidad (Fig.10.1.) asociada al grado de daño GD2 (D2), aproximando por defecto la intensidad macrosísmica I al valor discreto de medio grado inmediato inferior correspondiente a las probabilidades de 0.2 y 0.6, respectivamente del eje de las ordenadas.

² El *colapso funcional* no implica necesariamente un colapso estructural. Se refiere a aquella condición de perturbación y/o daño, que impide al centro hospitalario mantener sus funciones como consecuencia del sismo.

³ Para facilitar la designación de los valores de intensidad se ha empleado la siguiente convención: V=5, V-VI=5.5, VI=6, VI-VII=6.5, VII=7, VII-VIII=7.5, VIII=8, VIII-IX=8.5, IX=9, IX-X=9.5, X=10.

Tabla 10.8. Valores de intensidad representativos de la fragilidad de los hospitales XHUP

No.	Nombre Centro	I _{min}	I _{max}
1	Pius Hospital de Valls	6.5	8.5
2	Hospital Comarcal Móra d'Ebre	6.5	8.5
3	Hospital Tortosa Verge de la Cinta	6.5	8.5
4	H. Univ. de Tarragona Joan XXIII	6	8
5	Hospital de Sant Pau i Santa Tecla	5.5	7.5
6	H. Universitari Sant Joan de Reus	6.5	8.5
7	Espitau Val d'Aran	6.5	8.5
8	Hospital Comarcal del Pallars	6.5	8.5
9	Fundació Sant Hospital	6.5	8.5
10	Quinta de Salut L'Aliança	6	7.5
11	Hospital de Santa Maria	6	7.5
12	H.Univ. Arnau de Vilanova de Lleida	6	7.5
13	Hospital Comarcal de la Selva	6.5	8
14	Hospital de Puigcerdà	5.5	7.5
15	Hospital de Palamós	6	8
16	Hospital de Sant Jaume	7	9
17	Hospital Provincial Santa Caterina	6.5	8.5
18	Clínica Girona, S.A.	6	8
19	H.Univ. de Girona Dr.Josep Trueta	6	8
20	Hospital de Figueres	6	8
21	Hospital de Campdevàrol	6.5	8.5
22	Hospital de Mataró	6	8
23	Institut Català d'Oncologia	6	7.5
24	Hospital Comarcal de l'Alt Penedès	6	8
25	Fundació Sanitària d'Igualada F.P.	5.5	7.5
26	H. Materno-Infantil Vall d'Hebron	6.5	8
27	Hospital General de Manresa	5.5	7.5
28	Hospital de Viladecans	6	8
29	Hospital General de Vic	6.5	8
30	Corporació Sanitària Parc Taulí	6.5	8.5
31	Hospital de Terrassa	6	8
32	H.Universitari Germans Trias i Pujol	6	8
33	Fundació H.Comarcal Sant Antoni Abat	6	7.5
34	Hospital Mútua de Terrassa	6	8
35	Hospital de l'Esperit Sant	6	7.5
36	Hospital Residència Sant Camil	6	8
37	Hospital de St.Celoni, Fund. Privada	6	7.5
38	Hospital de Sant Boi	7	8.5
39	Fundació privada Hospital de Mollet	6.5	8.5
40	Hospital de Sant Joan de Déu (Martorel)	6	8
41	C.Hospitalari-Unit.Coronària Manresa	6.5	8.5
42	Hospital Prínceps d'Espanya	6.5	8
43	Consorci Hospital de la Creu Roja	6.5	8
44	Policlínica del Vallès, S.A.	6.5	8
45	Hospital General de Granollers	6	8
46	Hospital de Sant Joan de Déu (Llobregat)	6.5	8.5
47	Hospital de Sant Jaume	7	8.5
48	Hospital de Sant Bernabé	6	8
49	H.de Trauma-Rehabilit. Vall d'Hebron	6	8
50	Hospital General Vall d'Hebron	6	8
51	Institut Guttmann	6	7.5
52	Hospital Casa de Maternitat	5.5	7.5
53	Hospital Sant Rafael	6	8
54	Fundació Puigvert, I.U.N.A.	6	8
55	Hospital de l'Esperança	6	8
56	Hospital Creu Roja de Barcelona	6	7.5
57	Hospital Clínic i Provincial Barna.	5.5	7.5
58	Clínica Quirúrgica Adrià	6	7.5
59	Clínica Plató, Fundació Privada	5.5	7.5
60	Hospital del Mar	6	8
61	Fund.Gest.San.Hosp.Sta.Creu i St.Pau	6	7.5
62	Hospital Sagrat Cor - L'Aliança	6	8
63	Hospital Central - L'Aliança	6	7.5
64	Hospital Municipal de Badalona, S.A.	6.5	8

Para ilustrar la utilización de estos valores y del simplificado modelo de fragilidad de los hospitales adoptado, conviene revisar el caso del Hospital "Espitau Val d'Aran", identificado con el número 7, cuyos valores de intensidad representativos de la fragilidad son respectivamente, $I_{min} = 6.5$ e $I_{max} = 8.5$. De acuerdo con la Tabla 9.3., este hospital cuenta con una capacidad de 31 camas y un índice medio de ocupación del 62%, equivalente a 20 camas ocupadas y 11 camas disponibles en condiciones ordinarias.

En caso de un evento sísmico, la capacidad de actuación del hospital dependerá de la severidad del movimiento sísmico en su emplazamiento. Si los valores de intensidad macrosísmica se mantienen por debajo de 6.5, no producirá sobre el hospital ningún daño, ni se verá limitada su capacidad operativa, manteniéndose totalmente disponibles las 11 camas desocupadas. Valores de intensidad igual o superior de 8.5, inducen un nivel de perturbación o daño tal que impide al centro hospitalario el mantenimiento de sus funciones, propiciando un colapso funcional, sin que implique necesariamente un colapso estructural. En este caso, los heridos que ocupan las 20 camas pasarán a engrosar la lista de heridos sin atención médica y que deben necesariamente ser trasladados a los centros de referencia del colapsado hospital. Finalmente para valores intermedios de intensidad, se espera una distribución proporcional del daño, de manera que por ejemplo, para una intensidad de 7.0, se espera una degradación del 25% de la capacidad del hospital, equivalente a 8 camas, con lo cual el hospital podrá seguir ofreciendo servicios a sus heridos y admitirá sólo 3 heridos adicionales como consecuencia del sismo. Por el contrario, si la intensidad es de 8.0, se espera una degradación del 75% de la capacidad del hospital, equivalente a 24 camas, con lo cual el hospital no sólo se verá incapacitado de prestar servicio a los heridos del sismo, sino que tendrá que trasladar a 4 de sus heridos al próximo centro de referencia, así como a todos los heridos de la zona que de manera espontánea se trasladen al centro parcialmente colapsado en busca de atención médica.

10.4. RESUMEN Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta la implementación de algunos de los métodos descritos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de hospitales. Se presenta la aplicación realizada con los *métodos empíricos de categorización*, sobre los 64 hospitales que conforman la red de hospitales de utilización pública de Cataluña (XHUP). En particular, se reseña el procesamiento de información de los hospitales, recopilada desde las diferentes fuentes de información consultadas y las encuestas, que ha permitido conformar una *base de datos centralizada* que resume los aspectos más relevantes de los hospitales estudiados.

Para cada hospital se ha elaborado una *ficha técnica* que cuenta entre otras cosas, con una descripción general de la edificación, entre los que destacan: nombre, ubicación, año de construcción, altura, material predominantes, remodelaciones y ampliaciones efectuadas, existencia de planos, capacidad de camas y nivel del centro (hospital general, de referencia, de alta tecnología). Tomando como base el año de construcción se indica la norma sísmica, zonificación, intensidad y requerimiento sísmico, que presuntamente fue aplicado en el diseño original. Finalmente, se incluye la zonificación sísmica actual, conforme al mapa de zonificación sísmica de Cataluña considerando los efectos de suelo (Fig. 9.13). También se incluye un apartado de comentarios, donde se describen los aspectos relevantes de la configuración estructural, estado de conservación, servicios

complementarios, señalización de emergencia, entre otros., e incluso se incluyen fotos con vistas generales de las edificaciones.

Sobre la base de esta información, se establece una clasificación de la tipología estructural de acuerdo con tres criterios preestablecidos, designados como ICC, EMS-98 y finalmente, el criterio adoptado en el presente estudio, que integra la información disponible para cada hospital con los dos criterios anteriores. Para cada criterio de clasificación se estimar la distribución del estado de daño esperado en dichas instalaciones como consecuencia de la ocurrencia de un evento sísmico que permita alcanzar en su emplazamiento, la máxima intensidad macrosísmica (I_{max}). Asimismo, se determina la curva de fragilidad que expresa la predisposición que tiene la edificación de alcanzar los diferentes estados de daño debido a la acción de un movimiento del terreno con una intensidad determinada y que sintetiza la vulnerabilidad sísmica de cada hospital.

Estableciendo un criterio de clasificación del comportamiento sísmico esperado en función de la distribución del daño probable para la intensidad máxima esperada, de conformidad con el mapa de peligrosidad sísmica de Cataluña, propuesto por el ICC considerando los efectos locales (Goula et al., 1999; Cid, 1998), ha sido posible calificar el desempeño sísmico de los hospitales de Cataluña en cuatro categorías: indemne, operativo, no operativo-habitable, no operativo-no habitable. Estos resultados han permitido discriminar, en primera aproximación, el comportamiento sísmico de los hospitales de Cataluña. Estableciendo como criterio de aceptación la condición del mantenimiento de las operaciones del hospital luego del evento sísmico, para el criterio adoptado se espera que en términos de valores medios, 72% de los hospitales experimenten un comportamiento sísmico aceptable, mientras que el 28% restante experimenten un comportamiento sísmico inaceptable.

Adicionalmente, los resultados obtenidos con la aplicación del criterio adoptado en el presente estudio, han servido de base para la definición del modelo de fragilidad de los hospitales, necesaria para la aplicación del enfoque de vulnerabilidad sistémica desarrollado sobre el sistema sanitario de Cataluña, presentado en el Capítulo 11.

Para cada hospital se determinan los valores de I_{min} e I_{max} asociados respectivamente al índice de daño, $ID = 0$ (sin daño) e $ID = 1$ (colapso total). Este índice representa la relación entre el número de camas perdidas y el número de camas existentes. Estos valores se obtienen a partir de la curva de fragilidad asociada al grado de daño GD2 según la escala macrosísmica EMS-98, correspondiente a un nivel de daño moderado (con daño estructural ligero y daño no estructural moderado, que requiere reparaciones menores) por considerarse que este estado de daño compromete la funcionalidad de la instalación. El criterio empleado para relacionar el indicador de daño con la probabilidad de falla supone que no hay daño (indicador de daño, $ID = 0$) para una probabilidad de falla $P_f < 0.2$ y que existe un colapso funcional, con pérdida de la totalidad de camas (indicador de daño, $ID = 1$) para una probabilidad de falla $P_f > 0.6$.