

# Correlación daño sísmico período de vida de los edificios históricos

JOSÉ RAMON ARANGO GONZALEZ (\*)

**RESUMEN** Los estudios de Vulnerabilidad determinan el daño esperado en una estructura, en un grupo de estructuras o en toda una área urbana provocado por un terremoto determinado. Conocido el daño se pueden buscar soluciones para reducirlo. Tales soluciones tendrán un coste, el cual se podrá contrastar con las pérdidas en vidas y económicas esperadas, para decidir las inversiones de refuerzo de los edificios. Para ello, en el ámbito de las construcciones monumentales es necesario el desarrollo de una metodología de vulnerabilidad para edificios de mampostería no reforzada y su aplicación a casos concretos. En este trabajo se presenta un resumen del estudio de vulnerabilidad de un sector monumental representativo del centro de Granada. Como resultado final se han deducido diversas correlaciones daño-período de vida del edificio en función de la probabilidad del terremoto.

## CORRELATION BETWEEN SEISMIC DAMAGE AND SPAN OF LIFE OF HISTORIC BUILDINGS

**ABSTRACT** Vulnerability studies determine the damage expected in a structure, group of structures or in a whole urban area caused by a particular earthquake. Once the damage is assessed solutions can be found to reduce it. The cost of these solutions will be contrasted with the loss of life and economic damage to take decisions about investments in building reinforcement. For this, in the field of unreinforced monuments, a vulnerability methodology for masonry is needed to be applied to particular cases. Here we present a summary of a vulnerability study of some significant monuments in the centre of Granada. As a final result, some correlations between the damage - span of life of the building have been drawn with regard to the earthquake probability.

**Palabras clave:** Vulnerabilidad; Terremoto; Riesgo sísmico; Edificios históricos.

## 1. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

El método del índice de vulnerabilidad desarrollado en Italia y adoptado oficialmente (12) contiene once parámetros, siete son puramente subjetivos, mientras que los cuatro restantes se obtienen a partir de cálculos. Cada parámetro es calificado en una escala decreciente de la A a la D en función de su calidad. Los parámetros son los siguientes:

### 1.1. TIPO Y ORGANIZACIÓN DEL SISTEMA RESISTENTE

Evalúa el grado de organización de los elementos de la estructura vertical. No se considera el material utilizado. Se hace hincapié en la presencia y eficacia de las conexiones entre los elementos resistentes verticales ortogonales comparando el comportamiento de la estructura con el comportamiento de una estructura de tipo cajón.

### 1.2. CALIDAD DEL SISTEMA RESISTENTE

Este parámetro evalúa el tipo de mampostería utilizada, diferenciándola por su resistencia. La calificación tiene en cuenta: la regularidad de las propiedades del muro, la homogeneidad

de sus comportamiento, la uniformidad de la distribución de los esfuerzos o por el contrario las posibles zonas de concentración de esfuerzos y los puntos débiles. Se considera además la calidad del edificio y del material de construcción.

### 1.3. RESISTENCIA CONVENCIONAL

Suponiendo un comportamiento de estructura cerrada de tipo caja, es posible evaluar la resistencia de un edificio ante fuerzas horizontales. Para ello se utiliza el coeficiente C definido por la relación entre la fuerza máxima resistente horizontal y el peso del edificio. La siguiente expresión permite deducir C

$$C = [a_0 \tau_k / qN] \sqrt{1 + qN / (1,5 a_0 \tau_k (1 + \gamma))}$$

N es el número de pisos del edificio,  $\tau_k$  es la resistencia a cortante de los paneles de mampostería.

$$A = \min [A_x, A_y]$$

$$B = \max [A_x, A_y]$$

$$a_0 = A/A_t$$

$$\gamma = B/A$$

$$q = h P_m (A+B)/A_t + P_s$$

(\*) Dr. Ingeniero de Caminos. Departamento de Mecánica de Estructuras. Universidad de Granada.

$A_t$  es el área total cubierta en planta,  $A_x$ ,  $A_y$  son las áreas totales resistente de muros en la dirección  $x$  e  $y$  respectivamente,  $h$  es la altura promedio de entrepisos,  $P_m$  es el peso específico de la mampostería y  $P_s$  el peso por unidad de área de forjado;  $q$  representa el peso promedio de un piso por unidad de superficie cubierta (incluye el peso de muros y forjados).  $C$  indica la resistencia al esfuerzo cortante en la base del edificio en la dirección más desfavorable. La norma italiana compara  $C$  con un valor que se puede considerar como mínimo indispensable para regiones con sismicidad leve o moderada deduciendo un valor normalizado de esa resistencia al dividir  $C$  por 0,4:

$$\alpha = C/0,4$$

#### 1.4. POSICIÓN DEL EDIFICIO Y DE LA CIMENTACIÓN

Se estudia la consistencia y la pendiente del terreno, así como la diferencia de cotas de la cimentación así como los terraplenes no equilibrados simétricamente.

#### 1.5. FORJADOS HORIZONTALES

El esquema resistente de los forjados tiene gran importancia en el funcionamiento de los elementos resistentes verticales. Es muy importante que el forjado se encuentre bien conectado al sistema resistente vertical para obtener la transmisión de las cargas verticales y horizontales hacia los muros y de estos a la cimentación. Cuando dichas conexiones no funcionan el movimiento de las paredes resistentes tiende a separarlas de los forjados provocando la caída de estos con posible efecto dominó sobre el resto de forjados. La deficiencia de estas conexiones genera, por tanto, inestabilidad en la estructura, perdiendo los forjados su capacidad de arriostrar los muros y la consiguiente disminución de su capacidad de carga. Este efecto podría causar el colapso de todo el edificio. Los forjados con insuficiente rigidez en su plano dan un comportamiento débil de la estructura. La pérdida de conexión entre forjado y muros provoca fallos fuera del plano de los muros, con pérdida del comportamiento monolítico de tipo cajón. Todo ello impide la distribución racional del cortante en los muros, y genera deformaciones y distorsiones superiores a las obtenidas con forjados rígidos. Los planos con desnivel producen ante cargas horizontales concentración de esfuerzos (especialmente de cortante) en las secciones de los muros a la altura de los desniveles, provocando la disminución de su longitud libre y fallos frágiles en los elementos.

#### 1.6. CONFIGURACIÓN EN PLANTA

La forma y disposición en planta de la estructura son decisivas. El método valora favorablemente la simetría en planta. Se penalizan las secciones excesivamente alargadas o con salientes demasiado grandes, que pueden provocar torsión en planta y concentración de esfuerzos en las esquinas y en los elementos más alejados del centro de torsión.

#### 1.7. CONFIGURACIÓN EN ALTURA

La irregularidad se determina por la presencia de torretas y porches. Se pueden considerar factores como la variación de la masa entre pisos sucesivos (%), o también la variación entre las superficies de pisos consecutivos (en particular para evaluar porches). Se considera para la calificación el factor más desfavorable. El método valora favorablemente la ausencia de variaciones excesivas en la masa de dos pisos consecutivos o en la superficie del porche.

#### 1.8. MÁXIMA SEPARACIÓN ENTRE MUROS

Este parámetro tiene en cuenta la separación entre los muros transversales en su intersección con los muros maestros.

#### 1.9. CUBIERTA

La tipología y el peso de la cubierta determinan su comportamiento.

#### 1.10. ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES

Se tiene en cuenta el efecto de los elementos que no forman parte del esquema estructural tales como cornisas, parapetos, balcones o cualquier elemento que sobresalga de la estructura y cuya caída pueda provocar víctimas.

#### 1.11. ESTADO DE CONSERVACIÓN

Se distingue muros de mampostería en buenas condiciones sin daño visible, muros con agrietamiento capilar no extendido en todo el paño (se exceptúan los casos en los cuales dicho agrietamiento ha sido provocado por terremotos). Muros con grietas de 2 a 3 mm de espesor o agrietamiento capilar de origen sísmico. Estructuras sin agrietamientos con un estado mediocre de conservación de los muros. Muros con grave deterioro en las características físicas de los materiales de construcción o con agrietamiento de espesor superior a 3 mm.

### 2. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

Conocida la calificación de cada parámetro se obtiene el índice de vulnerabilidad (1), (5) y (12):

$$I_v = \sum K_i W_i$$

Los valores numéricos de  $K_i$  y de  $W_i$  para cada calificación A,B,C y D se obtienen de la tabla I. A mayor vulnerabilidad le corresponde un índice de vulnerabilidad mayor. El valor máximo del índice es 382,5.

### 3. CORRELACIÓN ÍNDICE DE VULNERABILIDAD Y DAÑO

La figura 1 establece la correlación entre el índice de vulnerabilidad y el daño global del edificio afectado por un terremoto (2), (4) y (6). En general estas funciones tienen la expresión siguiente:

$$D = 100[\rho + kI_v + (I_v)^2 / ((I_v)^2 + A^2)]$$

Los parámetros  $\rho$ ,  $k$  y  $A$  dependen de la intensidad sísmica y  $D$  es el daño en %.

### 4. APLICACION DEL MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD A NUEVE EDIFICIOS HISTÓRICOS DE GRANADA

#### 4.1. PALACIO DE BIBATAUBIN

##### *Tipo y organización del sistema resistente*

Por tratarse de un edificio de la época de dominación árabe reformado posteriormente se ha elegido la calificación «D».

##### *Calidad del sistema resistente.*

La situación actual del edificio, no deja ver el tamaño y forma de los bloques, si son o no homogéneos, se ha supuesto que no lo son: calificación «B».

##### *Resistencia convencional*

$$\begin{aligned} N &= 2 \\ \tau_k &= 8 T_n/m^2 \\ A_x &= 236 m^2 \\ A_y &= 136 m^2 \\ A_t &= 1400 m^2 \\ a_0 &= A_y / A_t = 136/1400 = 0,097 \\ \gamma &= 236/136 = 1,735 \\ P_m &= 2,6 T_n/m^3 \\ P_s &= 0,35 T_n/m^2 \end{aligned}$$

I	Parámetro	K <sub>A</sub>	K <sub>B</sub>	K <sub>C</sub>	K <sub>D</sub>	W <sub>i</sub>
1	Organización del sistema resistente	0	5	20	45	1,00
2	Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0,25
3	Resistencia convencional	0	5	25	45	1,5
4	Posición edificio y cimentación	0	5	25	45	0,75
5	Diafragmas horizontales	0	5	15	45	1,0
6	Configuración en planta	0	5	25	45	0,5
7	Configuración en elevación	0	5	25	45	1,0
8	Separación máxima entre muros	0	5	25	45	0,25
9	Tipo de cubierta	0	15	25	45	1,0
10	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0,25
11	Estado de conservación	0	5	25	45	1,0

TABLA 1.

$$q = (A+B) \cdot h / A_s \cdot P_m + P_s =$$

$$= (136 + 236) \cdot 5,2,6 / 1400 + 0,35 = 3,8$$

$$C = 0,18$$

$$\alpha = 0,18 / 0,4 = 0,46$$

La resistencia convencional tiene la calificación «C».

**Posición del edificio y cimentación**

La zona en la que se sitúa el edificio no supera la pendiente del 10%. La calificación es «A».

**Forjados horizontales**

Calificación «A».

**Configuración en planta**

$$L = 60m$$

$$a = 20,5m$$

$$b = 6m$$

$$\beta_1 = a/L = 0,34$$

$$\beta_2 = b/L = 0,10$$

Por tanto calificación «D».

**Configuración en elevación**

T/H = 1/3 < 2/3, por tanto, la solución es «C».

**Espaciamiento máximo entre muros**

$$S = 0,70 m$$

$$L = 18 m$$

$$L/S = 25$$

Calificación «D».

**Tipo de cubierta**

Calificación «A».

**Elementos no estructurales**

Calificación «A».

**Estado de conservación**

El edificio se encuentra en buenas condiciones. Por tanto, la calificación es «A».

**Índice de Vulnerabilidad**

$$I_v = 20 \cdot 1 + 5 \cdot 0,25 + 25 \cdot 1,5 + 0 \cdot 0,75 + 0 \cdot 1 + 45 \cdot 0,5 + 25 \cdot 1 + 45 \cdot 0,25 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 0,25 + 0 \cdot 1 = 117,5$$

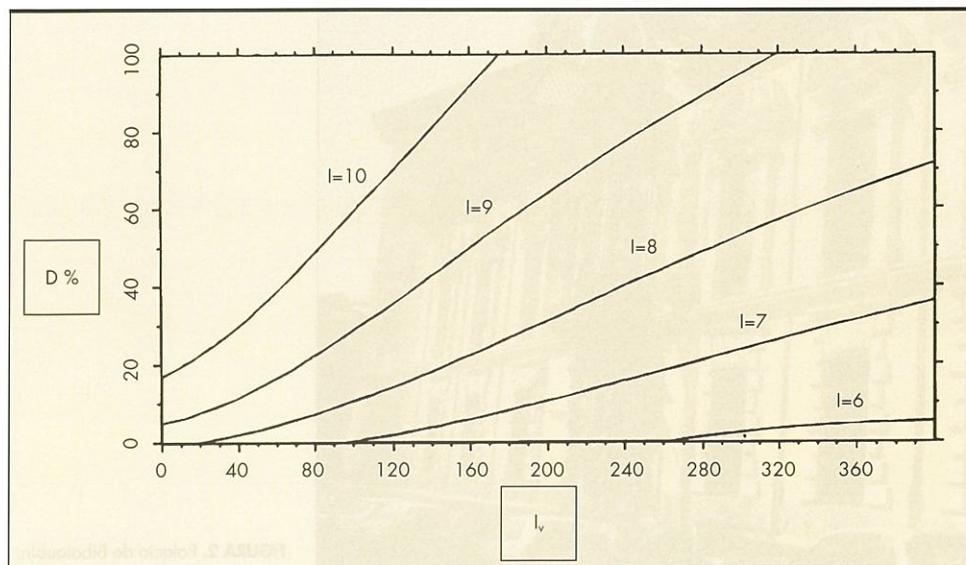


FIGURA 1. Correlación Daño - Índice de vulnerabilidad.

EDIFICIO	I <sub>v</sub>	INDICE DE DAÑO D%			
		INTENSIDAD			
		VI	VII	VIII	IX
Palacio de Bibataubín	117.5	0	2	4	34
Iglesia Santos Justo y Pastor	150	0	6	21	45
San Jerónimo - Iglesia	211.2	0	12	31	61
San Jerónimo - Monasterio	182.2	0	9	28	46
San Jerónimo - Torre	146.2	0	4	17	41
San Jerónimo – media edificios	179.6	0	9	27	45
Audiencia	117.5	0	2	14	34
Nuestra Señora de las Angustias	159.2	0	7	22	49
San Juan de Dios	177.5	0	8	23	52
Santa Isabel la Real	175	0	8	22	45
Hospital Real	65	0	4	8	40
Monasterio de la Cartuja	132	0	4	8	40
<b>Valor Medio</b>	<b>151</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>20</b>	<b>47</b>

TABLA 2.

#### 4.2. RESTO DE LOS EDIFICIOS

De manera similar se ha calculado el índice de vulnerabilidad de los ocho edificios restantes. El valor de I<sub>v</sub> obtenido para cada edificio se encuentra en la segunda columna de la tabla II.

#### 5. RELACIÓN DAÑO-PELIGROSIDAD

Aplicando figura 1 a los edificios en estudio se deducen los valores del índice de daño, tabla II, en función de la intensidad del terremoto para cada edificio.



FIGURA 2. Palacio de Bibataubín.

DAÑO %	PROBABILIDAD %	PERIODO DE VIDA
		años
6	$p(ac \geq 0.08g)$	
	5	1.25
	10	2.5
	20	5
	50	12.5
21	$p(ac \geq 0.15g)$	
	5	7
	10	14
	20	28
	50	70
45	$p(ac \geq 0.31g)$	
	5	45.5
	10	91
	20	182
	50	455

TABLA 3.

De acuerdo con estos datos un terremoto de intensidad VI no produciría ningún daño en los edificios estudiados. Con intensidad VII el índice de daño varía entre el 2 y el 12%, siendo la media del 5%. Con intensidad VIII el daño varía entre el 4% y el 31%, siendo la media del 20%. Con intensidad IX los daños están comprendidos entre el 34 y el 61%, con un valor medio del 47%.

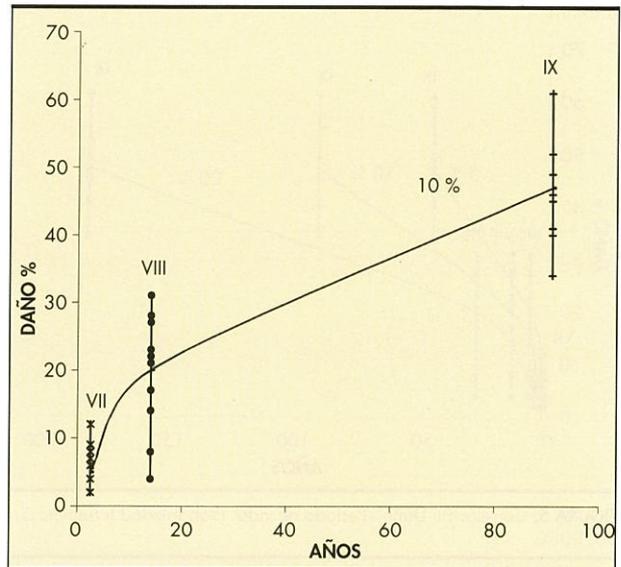


FIGURA 4. Correlación Daño - Periodo de vida. Probabilidad terremoto 10%.

Adoptando la correlación intensidad-aceleración que recomienda la norma española NCSE-94,  $\log_{10} a = 0.30103 I - 0.2321$ , se deducen los valores de la aceleración del suelo para cada intensidad: 0.08g para intensidad VII, 0.15g para intensidad VIII y 0.31g para intensidad IX. Si aplicamos el coeficiente de riesgo del artículo 2.2 se deduce en función de la probabilidad de alcanzar o superar un terremoto el periodo de vida en años para cada edificio en función del daño esperado. Por ejemplo para la Iglesia de los Santos Justo y Pastor se deduce la tabla III.

Con los datos deducidos en este trabajo se han preparado las figuras 4, 5 y 6. Estos gráficos relacionan el daño espe-

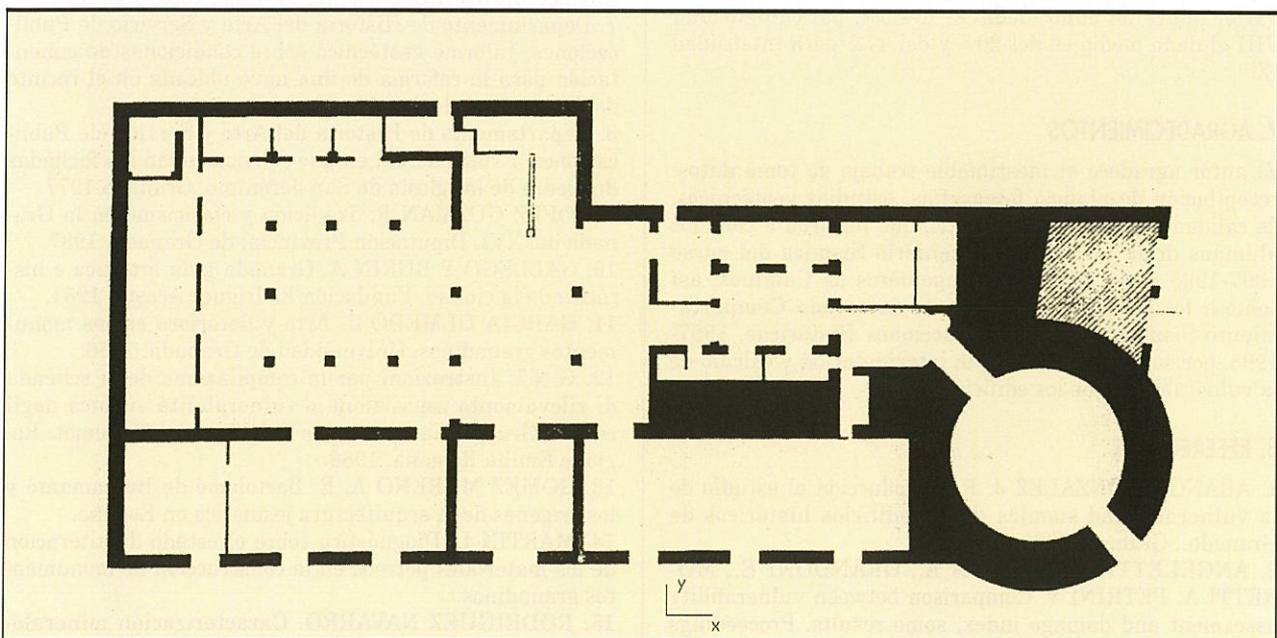


FIGURA 3. Planta baja Palacio de Bibataubin.

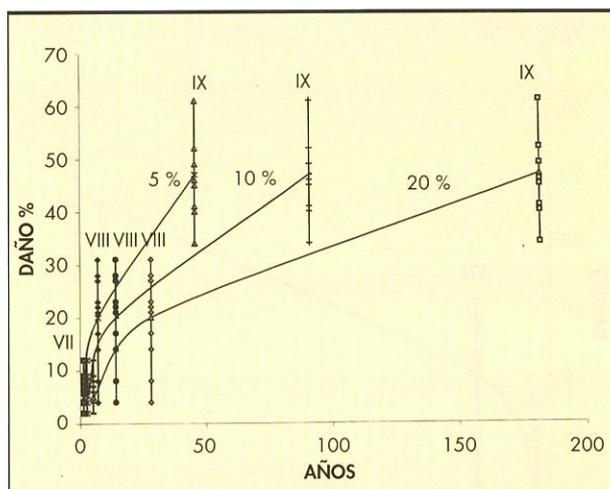


FIGURA 5. Correlación Daño - Período de vida. Probabilidad terremoto 5, 10, 20 %.

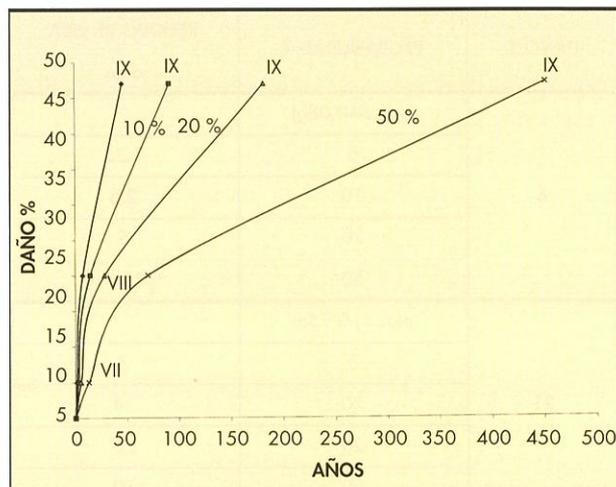


FIGURA 6. Correlación Daño - Período de vida. Probabilidad terremoto 5, 10, 20, 50 %.

rado en un periodo de tiempo provocado por un terremoto definido por su intensidad o aceleración y la probabilidad de presentarse en un intervalo de tiempo elegido.

## 6. CONCLUSIONES

Se ha aplicado el método del índice de vulnerabilidad a nueve edificios históricos de Granada, obteniendo las curvas que relacionan el daño esperado (en un periodo de tiempo previamente determinado) en función de la probabilidad del terremoto. Por tanto, estas curvas permiten valorar el daño que causaría en un edificio histórico el terremoto mas probable, así como el periodo de tiempo asociado a esa probabilidad.

Para el conjunto de los edificios estudiados y de acuerdo con los resultados obtenidos un terremoto de intensidad VI no produciría ningún daño, para intensidad VII el índice de daño medio es del 5%, para intensidad VIII el daño medio es del 20% y del 47% para intensidad IX.

## 7. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el inestimable trabajo de toma datos: recopilación de planos, fotografías, estudios geotécnicos, de calidad de los materiales, etc., que llevaron a cabo los alumnos de la asignatura Ingeniería Sísmica del curso 1997-1998 de la Escuela de Ingenieros de Caminos, así como a los alumnos del curso de doctorado Comportamiento Sísmico de las Construcciones Históricas, 1997-1998, por su contribución en la interpretación y cálculo de la vulnerabilidad de los edificios.

## 8. REFERENCIAS

1. ARANGO GONZALEZ J. R. Introducción al estudio de la vulnerabilidad sísmica de los edificios históricos de Granada. Granada 2000. Inédito.
2. ANGELETTI P., BELLINA A., GRANDONI E., MORETTI A. PETRINI V. Comparison between vulnerability assesment and damage index, some results. Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering 9WCEE Tokyo, 1988. Vol. 7, pp 181-186.

3. BENEDETTI D. y PETRINI V. Sulla vulnerabilità sísmica di edifici in muratura: proposte di un metodo di valutazione. L'industria delle Costruzioni. Roma 1984. No. 149. Pp. 66-74.

4. BENEDETTI D., CHERUBINI A. y ZINGALI A. Seismic vulnerability index versus damage for unreinforced masonry buildings. Proceedings of the International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planing of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje 1985.

5. CAICEDO C., BARBAT A., CANAS J. Y AGUIAR R. Vulnerabilidad sísmica de edificios. Monografía CIMNE IS-6. Barcelona, 1994.

6. CARTAPATI E., CHERUBINI A. y ZINGALI A. Vulnerability-damage correlations in a masonry building sample after november 1980 earthquake in Irpinia, Italy. Proceedings of the Eight European Conference on Earthquake Engineering 8ECEE. Lisbon 1986. Vol.2, Topic 4, pp 15-22.

7. Departamento de Historia del Arte y Servicio de Publicaciones. Informe geotécnico sobre condiciones de cimentación para la reforma de una nave ubicada en el recinto del Monasterio de San Jerónimo.

8. Departamento de Historia del Arte y Servicio de Publicaciones. Estado actual en que se encuentran las fachadas de piedra de la Iglesia de San Jerónimo. Granada 1977.

9. LOPEZ GUZMAN R. Tradición y clasicismo en la Granada del XVI. Diputación Provincial de Granada, 1987.

10. GALLEGO Y BURIN A. Granada guía artística e histórica de la ciudad. Fundación Rodríguez Acosta, 1961.

11. GARCIA OLMEDO J. Arte y deterioro en los monumentos granadinos. Universidad de Granada, 1986.

12. G.N.T. Istruzioni per la compilazione della schenda di rilevamento esposizione e vulnerabilità sísmica degli edifici. Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremot. Regione Emilia Romana. 1986.

13. GOMEZ MORENO A. R. Bartolomé de Bustamante y los orígenes de la arquitectura jesuística en España.

14. MARTIN L. Diagnóstico sobre el estado de alteración de los materiales pétreos en la construcción de monumentos granadinos.

15. RODRIGUEZ NAVARRO. Caracterización mineralógica y petrofísicas de los materiales biocalcarenícos utilizados en los monumentos granadinos.