

ANÁLISIS DE DAÑOS Y DE PARÁMETROS DEL MOVIMIENTO DEL SUELO CORRESPONDIENTES AL TERREMOTO DE IRPINIA (ITALIA) DE 1980

J. Chávez^{1,2}, X. Goula¹, A. Roca¹, L. Cabañas³, B. Benito³, D. Rinaldis⁴, F. Sabetta⁵

¹ Servei Geològic de Catalunya/Institut Cartogràfic de Catalunya

² Departamento de Ingeniería del Terreno - Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

³ Universidad Politécnica de Madrid

⁴ ENEA (Italia)

⁵ Servizio Sismico Nazionale (Italia)

RESUMEN: Se presenta un análisis estadístico de los datos de daños observados en 32548 edificaciones de 41 municipios italianos, afectados por el terremoto de Irpinia de 1980. Se establece un parámetro único para representar el grado de daño en las edificaciones, por tipología estructural y por municipio. Con éste se relacionan algunos parámetros del movimiento del suelo como Pico de Aceleración (PGA), Pico de Velocidad (PGV) e Intensidad de Arias. Se lleva a cabo la estimación de las intensidades en los diferentes municipios de acuerdo a los criterios de la European Macroseismic Scale (EMS-92). Por último, se determinan unas matrices de probabilidad de daño para las clases de vulnerabilidad A, B, C y D de la mencionada escala y para el rango de intensidades de VI a IX, que pueden ser utilizadas en estudios de riesgo sísmico en zonas donde no se disponga de suficientes datos de daños observados.

ABSTRACT: In the present investigation, data on observed damage in 32537 buildings belonging to 41 towns in Italy, affected by the 1980 Irpinia earthquake are studied. An unidimensional parameter has been defined to characterize the damage in buildings and towns. The relationship between this parameter in each town and the corresponding Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity and Arias Intensity is analyzed. The estimation of the intensities in each town according to EMS-92 criteria is carried out. Damage probability matrices for A, B, C and D vulnerability classes stated in for intensities VI to IX (EMS-92) are obtained. This matrices could be used in seismic risk studies in those sites where observed damage data are not available.

1. INTRODUCCIÓN

La no existencia en España de suficientes datos detallados de daños que permitan construir matrices de probabilidad de daños necesarias para realizar escenarios de daños para terremotos futuros y la falta de correlaciones de daños con valores del movimiento del suelo conducen a la necesaria utilización de datos de otras zonas con algunas características semejantes.

Entre las diferentes zonas sísmicas del planeta en las que se dispone de datos exhaustivos de daños, Italia es seguramente una de las que más se asemeja, en cuanto a tipologías constructivas, a nuestro país. Es por esto que en este estudio se analizan los daños observados en el terremoto de Irpinia de 1980 para el cual se dispone de gran cantidad de observaciones detalladas.

2. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE DAÑOS

Grado de Daño MSK-76	Grado de Daño Encuestas
0	1
1	2,3
2	4,5
3	6
4	7
5	8

Tabla 1. Relación entre los grados de daños de las escalas MSK-76 y la adoptada en las encuestas.

El levantamiento de los datos de daños en los 32537 edificios de 41 municipios situados cerca de la zona epicentral del terremoto de Irpinia de 1980 fue hecho en base a una escala de ocho grados de daños (Braga et al., 1982), la cual se generalizó poniéndola en correspondencia con los niveles de daños de la escala MSK-76 (tabla 1). La distribución geográfica de estos

daños puede verse en Cabañas et al., (1998) -en este mismo volumen-. De los datos recogidos relativos a las edificaciones se dedujeron 15 tipologías estructurales, basándose principalmente en los elementos horizontales y verticales de las mismas. Estas características estructurales son presentadas en la tabla 2 conjuntamente con el número de edificios pertenecientes a cada tipología.

Estructuras Horizontales	Estructuras Verticales							
	Piedra		Sillar		Mampostería de Ladrillos		Hormigón Armado	
	Tipo	Nº. Edificios	Tipo	Nº. Edificios	Tipo	Nº. Edificios	Tipo	Nº. Edificios
Bóvedas	1	1540	5	618	9	17	-	
Madera	2	8996	6	3322	10	137	-	
Acero	3	5375	7	2584	11	535	-	
H.A. (1-3 niveles)	4	945	8	3555	12	829	13	3186
H.A. (4-6 niveles)	-	-	-	-	-	-	14	869
H.A. (> 6 niveles)	-	-	-	-	-	-	15	40

Tabla 2. Tipologías estructurales deducidas de los edificios encuestados y número de edificios de cada una.

Para poder realizar un análisis de los datos se define un parámetro único que nos va a permitir representar de manera sencilla el daño en los diferentes municipios y tipologías. El parámetro empleado es el grado de daño medio, \bar{X} , el cual se determina mediante la expresión

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=0}^n e_i * x_i}{N}$$

donde e_i = número de edificios, por municipio o tipología estructural, que han experimentado un determinado grado de daño x_i ; n = número de grados de la escala de daño utilizada; N = número total de edificios por municipio o tipología estructural.

Tipología Estructural	Daño Medio	Desviación Estándar
1	1.45	1.16
2	2.27	2.10
3	1.44	0.60
4	0.97	0.89
5	1.33	1.08
6	1.75	1.41
7	0.93	0.65
8	0.43	0.36
9	1.35	1.30
10	0.85	0.44
11	0.79	0.75
12	0.52	0.30
13	0.37	0.33
14	0.59	0.53
15	0.68	0.56

Tabla 3. Daño medio y desviación estándar de las tipologías estructurales deducidas a partir de las encuestas.

las tipologías que verdaderamente presentan un daño medio menor o igual que uno son las 8, 12 y 13. Las tipologías 10, 11, 14 y 15 se encuentran entre 1.0 y 1.5. Por su parte las

En el análisis de los daños realizado por municipios se observó que un 27% de ellos presentaron grado de daño medio menor que 1; 68% se encontraban entre 1 y 2 y el restante 5% tuvieron un grado de daño medio mayor que 2.

En cuanto al análisis por tipologías, las que mostraron un mejor comportamiento fueron las 4, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14 y 15, que presentaron un daño medio menor o igual que 1.0 (ver tabla 3). Luego se encuentran las tipologías 1, 3, 5, 6 y 9, cuyo daño medio se sitúa entre 1.1 y 2.0; y por último la tipología 2, que presenta el valor más elevado de daño medio (2.27).

Por otra parte, si consideramos la dispersión de los daños en las tipologías estructurales a través del parámetro desviación estándar podemos observar que

tipologías 3, 4 y 7 se encuentra entre 1.6 y 2.0, mientras que las 1, 2, 5, 6 y 9 presentan los más altos valores, superando ampliamente el grado de daño medio 2, destacándose el caso de la tipología 2 que alcanza un valor de 4.37.

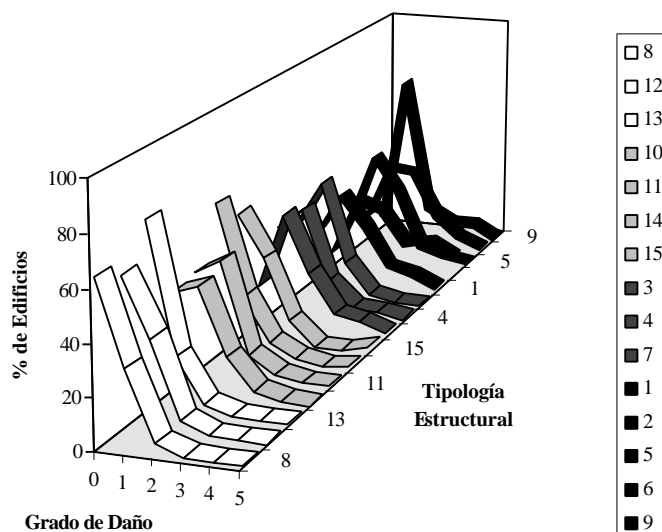


Figura 1. Distribuciones de los daños observados en las tipologías estructurales deducidas de las encuestas, organizadas por clases de vulnerabilidad A - D, según EMS-92.

A partir de la observación del comportamiento de estas tipologías estructurales frente al terremoto así como del análisis de los criterios establecidos en la EMS-92, en la que el elemento vertical del edificio es determinante para la asignación de la clase de vulnerabilidad, se ha hecho una aproximación de las mismas a las clases de vulnerabilidad A, B, C y D de la escala antes indicada. En la figura 1 se observa el comportamiento en cada una de estas clases a las que se le han asignado colores indicativos del mismo. Así, de izquierda a derecha las tipologías agrupadas en el color más claro representan la clase D, las cuatro siguientes de tono más oscuro que el anterior representan la clase C, la clase B la constituyen las tres tipologías siguientes y las últimas cinco con el color más oscuro

representan la clase A.

Similar análisis se lleva a cabo por municipio y en la generalidad de ellos se observa un comportamiento muy semejante.

CORRELACIÓN DEL DAÑO MEDIO CON PARÁMETROS DEL MOVIMIENTO DEL SUELO

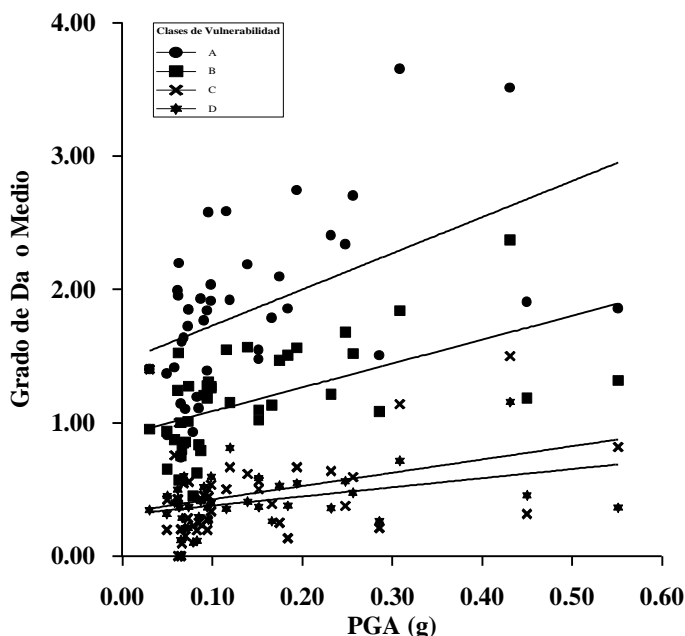


Figura 2. Relación entre el grado de daño medio y el PGA, para las clases de vulnerabilidad A, B, C y D de la EMS-92.

Se ha relacionado el parámetro de daño medio de las clases de vulnerabilidad A, B, C y D en cada uno de los municipios estudiados con sus correspondientes valores de PGA, PGV e Intensidad de Arias. Alguno de ellos fueron deducidos directamente de registros de aceleración en el mismo municipio, mientras que la mayoría fueron obtenidos a partir de registros en otras localidades, aplicándoles una ley de atenuación (Sabetta y Pugliese, 1996) En todos los casos se observó una importante dispersión. El caso del PGA se muestra en la figura 2; en este caso la dispersión es atribuida a que los valores pico de aceleración corresponden a la

parte del espectro de altas frecuencias los cuales no siempre son representativos para caracterizar el daño en las estructuras y a que en la deducción de dichos valores no se tuvieron en cuenta posibles efectos locales. Para el caso del PGV, los resultados son bastante parecidos a los que se obtienen para el PGA debido a una relación casi lineal existente entre los valores de estos dos parámetros según fueron deducidos (Sabetta et Pugliese, 1996). Semejantes relaciones se obtiene al relacionar el grado de daño medio con la Intensidad de Arias.

No obstante, en todos los casos se nota un claro aumento del grado de daño medio al aumentar el parámetro del movimiento del suelo para todas las clases de vulnerabilidad. Además se observa, como era también de esperar, que para un mismo valor del parámetro del suelo se obtienen mayores daños en los edificios de clase A, significativamente menores en los de clase B y aún más pequeños en los de clases C y D. En el comportamiento de los edificios de clases de vulnerabilidad C y D se advierte que no hay casi diferencias, lo cual puede ser atribuido al grado de daño medio pequeño observado en estas clases, ya que a medida que aumenta el parámetro del movimiento del suelo, los valores entre una y otra tienden a separarse más.

Es bueno indicar que se han tratado varios tipos de curvas en las correlaciones desde la lineal mostrada en la figura, hasta la exponencial, logarítmica, potencial y polinomial, siendo las diferencias entre los diferentes ajustes no significativas.

DETERMINACIÓN DE VALORES DE INTENSIDAD

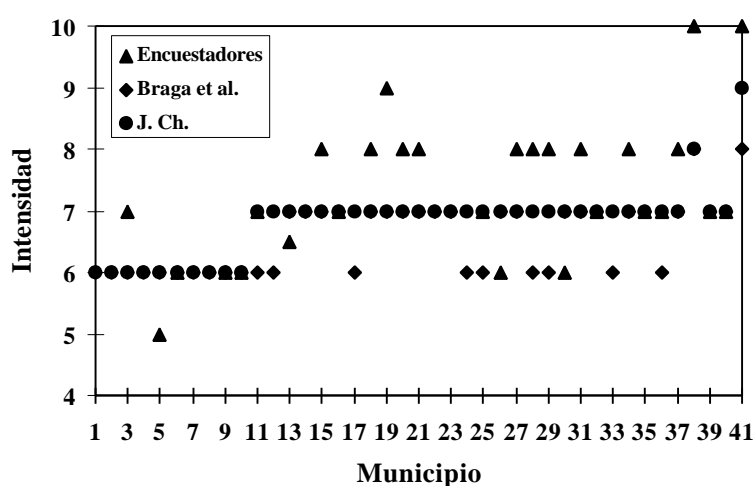


Figura 3. Diferentes valores de intensidad asignados a los 41 municipios en estudio.

Una vez distribuidas las edificaciones en clases de vulnerabilidad acorde con la escala EMS-92, el siguiente paso es ordenar los datos de daños de cada uno de los municipios por clase de vulnerabilidad y grado de daño, determinando los porcentajes de edificios en cada caso. A continuación se asignan los valores de intensidad correspondientes de acuerdo a los parámetros *pocos*, *muchos*, *la mayoría* cuyos rangos porcentuales son establecidos en la escala. Los valores de intensidad resultantes son presentados en la figura 3 junto con aquellos obtenidos por investigadores italianos utilizando la escala MSK-76 y los que se asignaron a partir de las encuestas a los pueblos afectados. Las diferencias entre las intensidades asignadas usando la EMS-92 y las determinadas con la MSK-76 pueden ser atribuidas a las diferencias contenidas entre ambas escalas en los rangos de daños en las edificaciones, lo cual es determinante para la asignación de la intensidad y en los que subyace una cierta subjetividad, sobre todo en el caso de la MSK-76. Por otra parte, es bueno indicar que el análisis estadístico de los datos de daños permite obtener mejores aproximaciones a los valores reales de intensidad que en el caso de darle un mayor peso a los daños más graves como se supone ocurrió en las intensidades asignadas por los encuestadores.

MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO

Las matrices de probabilidad de daño expresan la probabilidad discreta de que se produzca un determinado grado de daño en una tipología o clase de vulnerabilidad dado un parámetro del movimiento del suelo. Éstas se determinan frecuentemente a partir del análisis estadístico de los datos de daños observados en las edificaciones después de la ocurrencia del terremoto (Caicedo, 1993). El empleo actual de la EMS-92 para la determinación de escenarios de daños presenta algunos inconvenientes. Por una parte, por la falta de información en la definición de los diferentes grados de intensidad sobre sus efectos en algunos tipos de edificios (característica común a todas las escalas) y por otra por la inexistencia, al día de hoy, de matrices de probabilidad de daños definidas para esta escala en la bibliografía. Así, una vez agrupadas las edificaciones de todos los municipios con igual grado de intensidad por grado de daño y clases de vulnerabilidad se han calculado las distribuciones de daños correspondientes que representan las matrices de probabilidad de daño de las clases de vulnerabilidad A, B, C y D para las intensidades VI a IX. Dichas matrices han sido ajustadas a las distribuciones estadísticas teóricas Binomial, de Poisson y Normal obteniéndose los mejores resultados para la primera de ella. En la figura 4 se presentan los ajustes para las intensidades VI y VII de la clase de vulnerabilidad A.

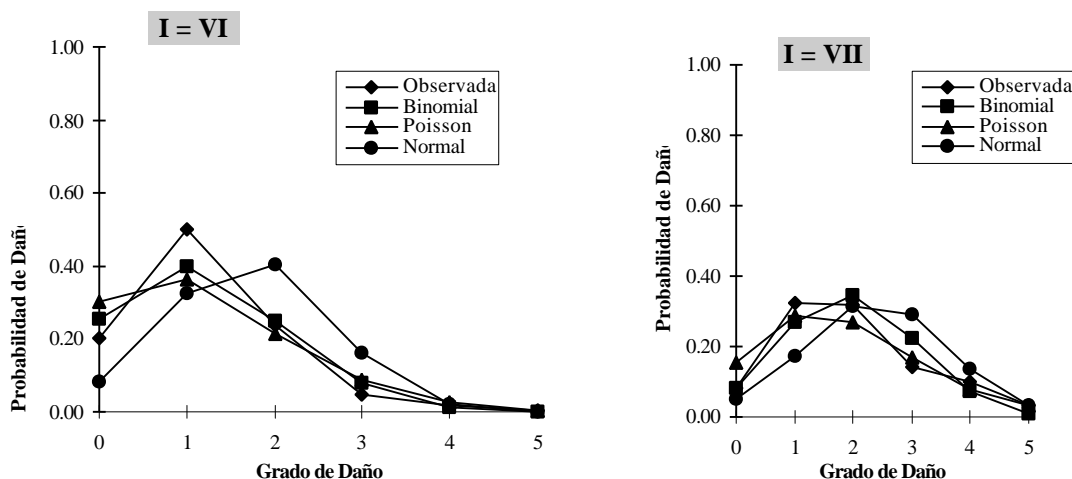


Figura 4. Comparación entre las distribuciones de daño observada y ajustadas a las Normal, Binomial y Poisson, para la clase de vulnerabilidad A y las intensidades VI y VII.

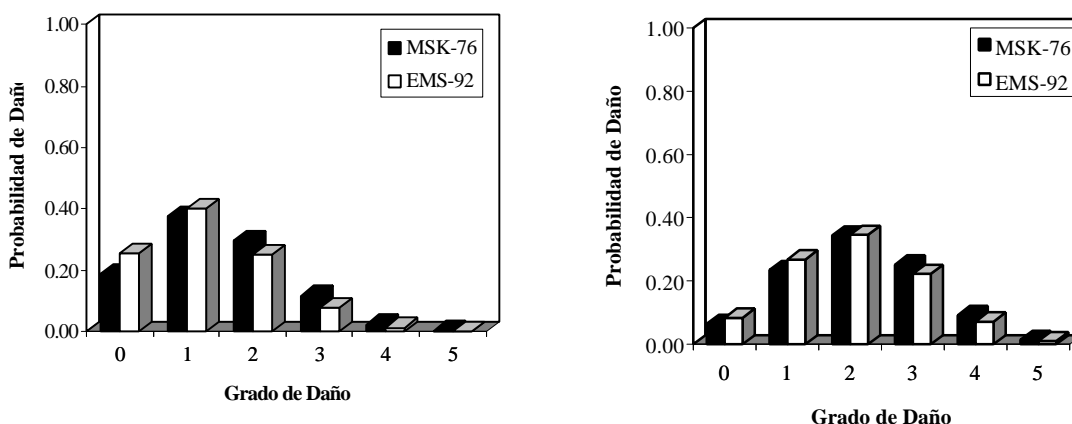


Figura 5. Comparación entre las matrices de probabilidad obtenidas según la EMS-92 y las obtenidas según la MSK-76 para la clase de vulnerabilidad A y las intensidades VI y VII.

Estas matrices de probabilidad de daño que proponemos son también comparadas con las obtenidas por investigadores italianos (Braga et al., 1982; Brammerini et al., 1995) con los mismos datos basándose en la escala MSK-76. Como ejemplo se muestran, en la figura 5, las comparaciones para la clase de vulnerabilidad A y para los valores de intensidad VI y VII.

CONCLUSIONES

Se ha hecho un análisis estadístico de los datos de daños recogidos en 32548 edificios italianos localizados entre los 41 municipios más afectados por el terremoto de Irpinia de 1980, se ha determinado un parámetro único para representar el daño en las tipologías estructurales así como en los municipios. Este parámetro, grado de daño medio, es puesto en correlación con los valores deducidos de PGA y PGV de los distintos municipios a partir de leyes de atenuación de la región. Las correlaciones obtenidas no han sido del todo satisfactorias debido, entre otras causas a que no fueron considerados los efectos locales en su deducción.

La asignación de las clases de vulnerabilidad A, B, C y D definidas en la EMS-92 a las tipologías estructurales de las encuestas italianas se realiza con miras a obtener matrices de probabilidad de daños para las mismas. Un paso previo a esto es la estimación de los valores de intensidad en cada uno de los municipios. Las matrices son obtenidas para las indicadas clases de vulnerabilidad y los valores de intensidad de VI a IX. En este orden se han propuesto unas matrices que han sido ajustadas a una distribución Binomial y las cuales pueden ser utilizadas para realizar estudios de riesgo sísmico principalmente en aquellos lugares en donde no se disponga de datos de daños de anteriores terremotos.

REFERENCIAS

- Braga, F., Dolce, M. y Liberatore, D.** 1982. A Statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scale. *Proceedings of the 7ECEE*. Athens.
- Brammerini, F., Di Pasquale, G., Orsini, G., Pugliese, A., Romeo, R. y Sabetta, F.** 1995. Rischio sismico del territorio italiano. Proposta di una metodologia e resultati preliminari. Rapporto tecnico SSN/RT/95/1. Roma.
- Caicedo, C.** 1993. Vulnerabilidad sísmica en zonas urbanas. Aplicación a un sector del "Eixample" de Barcelona. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Cabañas, L., Benito, B., Chávez, J., Goula, X., Roca, T., Sabetta, F. y Rinaldis, D.** 1998. Observaciones de daño correspondientes al terremoto de Irpinia (Italia) de 1980. Parte I: Distribución de daños y estudio de parámetros de daño potencial. *Proceedings of the I asamblea hispano-portuguesa de geodesia y geofísica y IX asamblea española de geodesia y geofísica*. Almería, 9-13 febrero.
- European Seismological Commission.** 1992. *European Macroseismic Scale 1992*. G. Grünthal (ed.). Luxembourg.
- Sabetta, F. y Pugliese, A.** 1996. Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86, 337-352.