



UTILIZACIÓN DE SHAKEMAPS Y EFECTOS GEOLÓGICOS COMO ESCENARIOS PARA SIMULACROS EN GESTIÓN DE DESASTRES POR TERREMOTO

ShakeMaps and Geological Environmental Effects as Scenarios for Exercises in Earthquake Disaster Management

R. Pérez-López (1), J. Élez (2), P. G. Silva (2), J. L. Giner-Robles (3), M. A. Rodríguez-Pascua (1), E. Roquero (4), T. Bardaji (5)

(1) Área de Riesgos Geológicos. IGME-URGE- Instituto Geológico y Minero de España, Unidad de Respuesta Geológica de Emergencia. C/Ríos Rosas 23, Madrid 28003. SPAIN. r.perez@igme.es, ma.rodriquez@igme.es

(2) Dpto. Geología, Universidad de Salamanca. Ávila – Salamanca, SPAIN. j.elez@usal.es, pgsilva@usal.es.

(3) Dpto. Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. SPAIN. jorge.giner@uam.es

(4) Dpto. Edafología, Universidad Politécnica de Madrid. 28040 Madrid. SPAIN. elvira.roquero@upm.es

(5) Dpto. Geología, Geografía y Medio, Universidad de Alcalá de Henares. 28801-Madrid. SPAIN. teresa.bardaji@uah.es

Resumen: Se ha realizado un mapa de intensidad macrosísmica y aceleración del terreno (*ShakeMap*) de un terremoto SIMULADO, dentro de un macro ejercicio de emergencias Nivel III, propuesto por la Unidad Militar de Emergencias (UME), junto con Protección Civil y demás autoridades. El terremoto SIMULADO se localiza en la región de Murcia, con una magnitud de Mw 6.5, a 11 km de profundidad y asociado a un segmento activo de la Falla de Alhama de Murcia (FAM). El principal objetivo en este trabajo, es la génesis de mapas científicos útiles para las autoridades durante la gestión de la emergencia, mostrando las capacidades reales de gestión de un desastre natural de esta magnitud.

Palabras clave: ShakeMap, intensidad macrosísmica, ESI07, simulacro emergencias.

Abstract: We have developed a *ShakeMap* (macroseismic intensity map and ground acceleration) for a SIMULATED earthquake, to be used into a large Emergency exercise of the highest level (Level III), and proposed by the Spanish Military Emergency Unit (UME), plus the Spanish Civil Protection and other local organisms. The SIMULATED earthquake is located within the Murcia province (SE of Spain), with a magnitude Mw 6.5 and 11 km depth. Moreover, this SIMULATED earthquake was assigned to the Alhama de Murcia Fault. The main goal of this work is the generation of scientific maps to be used by civil and military authorities during the management of great natural disasters as earthquakes, giving a real vision about what we can expect in a large earthquake affecting a wide area of Spain.

Key words: ShakeMap, Macroseismic scale, ESI07, Emergency exercise.

INTRODUCCION:

Los terremotos destructivos que afectan a entornos urbanos e infraestructuras críticas requieren de la intervención de los equipos de emergencias de forma inmediata y durante un periodo de tiempo elevado, así como del uso de muchos recursos humanos y económicos. Teniendo en cuenta que un terremoto destructivo suele estar acompañado de efectos geológicos importantes, que al fin y al cabo dificultan la labor de rescate y restablecimiento de los servicios esenciales, así como de la ocurrencia de réplicas fuertes (Bath, 1965), la capacidad de elaborar mapas en tiempo real de la sacudida del terremoto ayuda en la toma de decisiones durante la gestión de la emergencia (Wald et al., 2008).

En este sentido, la intensidad máxima sufrida, la cual puede expresarse como intensidad macrosísmica y/o aceleración horizontal máxima del terreno (PGA en unidades "% g", siendo g la aceleración de la gravedad terrestre), es un valor cuya estimación ayuda a la evaluación rápida del daño, al igual que los efectos geológicos de los terremotos (escala macrosísmica ESI07, Michetti et al., 2007), ayudan al restablecimiento de los servicios esenciales y la detección de potenciales problemas secundarios asociados (deslizamientos, caídas de rocas, basculamientos y hundimientos del terreno, etc.).

Aquí en España, gracias a la labor del proyecto del Plan Nacional *QTecSpain* (ref. CGL2015-67169-P), liderado por la Universidad de Salamanca, y en colaboración con el IGME, la Universidad Autónoma de Madrid, la Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad de Alcalá de Henares, se ha desarrollado un algoritmo de aplicación rápida y obtención de los *ShakeMaps* en la Península Ibérica y zonas adyacentes (Elez et al., 2015, Silva et al., 2017a y b), introduciendo algunas mejoras al algoritmo inicial de libre acceso proporcionado por el USGS.

En este trabajo, presentamos el *ShakeMap* de un terremoto SIMULADO de magnitud M 6,5, a 11 km de profundidad, asignado a la Falla de Alhama de Murcia, y su uso para la gestión de emergencias con la combinación con los potenciales efectos geológicos (Escala Macrosísmica ESI07) y aceleraciones máximas. Este mapa se utilizará en el ejercicio GAMMA de la Unidad Militar de Emergencias, UME, (Emergencia de Nivel III, según la escala de Protección Civil descrita en la ley 17/2015 de Protección Civil).

El mayor reto al que nos enfrentamos durante la elaboración de este tipo de mapas es el tiempo de respuesta desde que se produce el terremoto. Sobre este *ShakeMap*, se obtiene una primera estimación

de daño por áreas y localidades afectadas, así como posibles zonas de efectos geológicos secundarios que necesiten intervención o provoquen daño. El objetivo final es la producción de mapas a tiempo real de sacudida sísmica (*real-time earthquake-shake map*).

ELABORACIÓN DEL SHAKEMAP:

Los denominados *ShakeMaps* (USGS, 2000, Worden y Wald, 2016), desarrollados por el servicio Geológico de los Estados Unidos de Norteamérica (USGS), reproducen el mapa de intensidades macrosísmicas y aceleraciones PGA para un terremoto fuerte (Magnitud superior a M 5,0), el cual se reconstruye a partir de información telesísmica y remota obtenidos originalmente de la red sísmica norteamericana y posteriormente de la red sísmica mundial. Su primer uso se remonta al año 1994 (terremoto de *Northridge*, EEUU), donde se generó un *ShakeMap* sin incluir la información de la magnitud ni del epicentro, sino simplemente mediante un código de colores se incluyó la intensidad macrosísmica y el potencial daño estimado (USGS, 2000, Worden y Wald, 2016). Originalmente, estos mapas se implementaron en California (EEUU), con el fin de apoyar en las labores de gestión de emergencias mediante la cuantificación “rápida” de la zona dañada y la zona libre de daño, para así poder estimar la movilización de recursos (Wald et al., 2008). Originalmente el mapa se realizaba horas después del sismo, actualmente el USGS lo realiza de forma automática a los 5 minutos después del sismo principal en el territorio estadounidense.

La elaboración de los *ShakeMaps*, según la metodología propuesta por Elez et al. (2015), consiste en la integración de diferentes modelos espaciales (modelos digitales a escala de 25 m de pixel), mapa de pendientes, etc.), a diferentes escalas. Mediante la iteración en un entorno SIG de estos modelos se obtiene una primera aproximación según el algoritmo de Boore et al. (1997) que define las ecuaciones de vibración del terreno.

Los datos de partida necesarios para la elaboración de los diferentes modelos-iterables son los parámetros del foco sísmico: magnitud (Mw), epicentro, profundidad, geometría del área fuente (geometría de la falla responsable del terremoto, longitud de ruptura y área de ruptura), tipo de terremoto (normal, inverso, desgarre), así como el efecto sitio definido por la denominada V_s^{30} y el parámetro de atenuación con la distancia introducido por la denominada “*Joyner-Boore distance*” (Boore et al., 1997; Boore y Atkinson 2008; Elez, 2015).

Los trabajos de Elez et al. (2015), Giner et al. (2015), Silva et al. (2017a) muestran una aplicación directa del algoritmo implementado por el equipo de trabajo de Elez et al. (2015) para terremotos instrumentales, Lorca 2011, Mw 5,2 (Silva et al, 2014), profundidad 4 km, terremoto en desgarre con componente inversa, ruptura de 16 km², los terremotos históricos de Tavernes (1396 AD, EMS98 IX) y Estubeny (1748 AD, EM98 VIII), e incluso modelizaciones de fuentes tsunamigénicas en relación al terremoto de Lisboa 1755 AD (Silva et al., 2017b).

SIMULACRO MURCIA 2018:

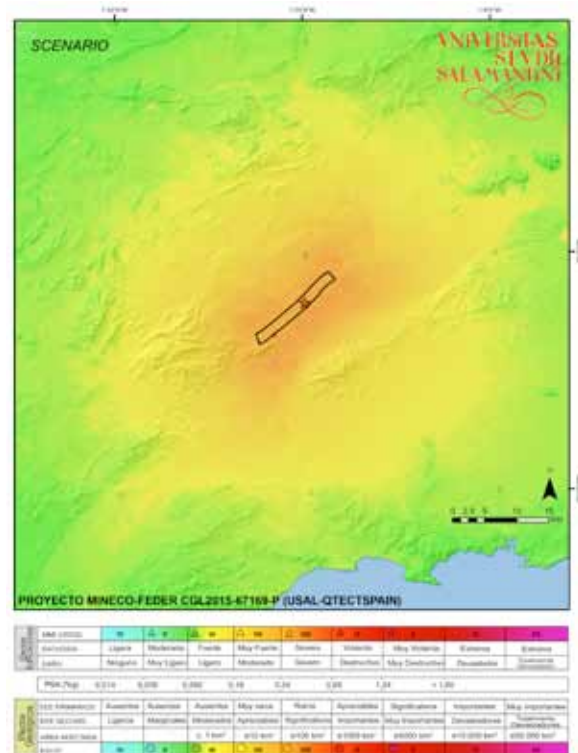


Figura 1: *ShakeMap* de un terremoto SIMULADO de magnitud Mw 6.5, asociado al segmento Totana-Alcantarilla de la Falla de Alhama de Murcia (Martínez-Díaz et al., 2012), a partir de la metodología de Elez et al. (2015). La paleta de colores coincide con la propuesta por el USGS para los *ShakeMaps*. Como novedad, se incluye en la leyenda la estimación de los principales efectos geológicos asociados a terremoto según la escala ESI07 (Michetti et al., 2007).

Figure 1: *ShakeMap* of a SIMULATED earthquake of magnitude Mw 6.5, corresponding to the Totana-Alcantarilla active segment of the Alhama de Murcia Fault (Martínez-Díaz et al., 2012). This map has been obtained by applying the methodology proposed by Elez et al. (2015), and the scale bar colors are in agreement with the color proposed by the USGS. Moreover, we have included the type of the earthquake-induced geological effect from the ESI07 macroseismic scale (Michetti et al., 2007).

Todos los años la Unidad Militar de Emergencias (UME), junto con Protección Civil y demás agencias españolas que trabajan en emergencias, organiza un ejercicio de simulacro de emergencia de Nivel III, que equivale a un desastre natural de grandes proporciones, que obliga a que el Ministerio de Defensa, a solicitud del Ministerio de Interior, ceda la Dirección Operativa de la Emergencia al General en Jefe de la UME. Como terremoto modelo para el simulacro de emergencia, se pretende modelizar un terremoto de magnitud M 6,5 en la Región de Murcia, en las coordenadas LAT 37,9350° N, LON -1,3373° W, a 11 km de profundidad, siendo la responsable la falla de Alhama de Murcia, segmento Alcantarilla Murcia (Martínez-Díaz et al., 2012), con un terremoto inverso con componente en dirección. Según los datos, la longitud de ruptura con el modelo de empírico de Wells y Coppersmith (1994) serían 15 km.

Sobre el modelo digital del terreno del IGN (www.ign.es) se ha realizado el *ShakeMap* (Fig. 1), se ha aplicado la metodología del USGS para la elaboración de *ShakeMaps* según el modelo propuesto por Elez et al., (2015) y Silva et al. (2017b). Se ha utilizado el segmento de la FAM con una rotura de 15 km de longitud, un área de rotura de 165 km² y se ha representado en la figura 1 con la escala de colores propuesta por el USGS.

Para este modelo se llegan a obtener intensidades máximas de IX en algunos sitios de forma puntual, aunque la zona de VIII es bastante amplia y con aceleraciones generalizadas de algo más de 0,40 g en toda la zona cercana a la fuente. Las aceleraciones más altas, entre 0,50 g y 0,83 g de máxima se dan en valles muy encajados o zonas con pendientes altas dentro o muy cerca de la fuente y son zonas pequeñas.



Figura 2: Mapa derivado para la gestión de la emergencia obtenido a partir del *ShakeMap* de la figura 1. Se incluyen las isosistas VII y VIII, localidades afectadas, carreteras afectadas, así como estructuras críticas. También se diseña la colocación de campamentos, zona de posible réplica fuerte, etc.

Figure 2: Derived Tactical Map for Emergency Management. Isosists for intensity VII and VIII are included, and an example of emergency made-decision is also shown. Strong aftershocks center likelihood zone appeared at the bottom of the figure, left-side.

La tabla 1 (datos demográficos 2016) resume los principales datos que se utilizarán durante el simulacro con fines de gestión de la emergencia. Según este modelo, casi 92.000 personas estarían dentro de la zona de intensidad VIII (daño severo) y unas 680.000 en zona de daño moderado. Además, el área que sufriría daño severo sería de 360 km², mientras que el área de daño moderado sería de 1350 km².

Con estos datos, es posible reproducir un mapa táctico de gestión de la emergencia para las autoridades encargadas de la misma (Protección Civil, UME, etc.), mostrando los principales puntos de apoyo, zonas conflictivas, zonas de ocurrencia de

réplicas fuertes, etc. (Fig. 2). En este mapa, se han incluido diferentes niveles de información. Por un lado, se ha incluido la zona de intensidad macrosísmica VII y VIII, que probablemente sufrirá el mayor daño, atendiendo a las aceleraciones entre 0,35 y 0,66 g obtenidas. Además, se ha incluido la zona de mayor probabilidad de réplicas, si bien esta estimación depende más de información adicional como el estado de esfuerzos de Coulomb y la cartografía de fallas activas en la zona. También incluye información sobre los grandes núcleos de población dentro de las zonas de daño moderado y severo, carreteras, infraestructuras críticas. Finalmente, se incluye información propia de la gestión de la emergencia, ubicación del MOPi (Módulo de Operaciones Integrado, desplegado por la UME en nivel III), Puesto de Mando Avanzado (PMA), campamentos de personal desplazado, puestos médicos, campamentos de atención a damnificados, etc.

CONCLUSIONES:

A partir de la información geológica y sísmológica derivada de estudios en zonas tectónicamente activas, es posible diseñar escenarios de movimiento fuerte del terreno que ayuden a la gestión de la emergencia y al diseño de ejercicios lo más realistas posibles, permitiendo así valorar a la sociedad los recursos de los que dispone para poder afrontar un desastre natural de estas características.

También permite identificar los puntos débiles durante la gestión de la emergencia y aquellos aspectos que pudiera no haberse teniendo en cuenta.

Una de las claves para que este tipo de mapas sean útiles es su inmediatez, la posibilidad de obtenerlos a tiempo real. El USGS los obtiene a los 5 minutos de un gran terremoto. Este mapa se ha generado en horas, debido a la mayor cantidad de información que maneja, MDT de mayor resolución, e información geológica sobre materiales de superficie.

Finalmente, desde el IGME se está implementando la Unidad de Respuesta Geológica de Emergencia (URGE), con el fin de generar información de este tipo para casos reales de desastres naturales y que ayuden a coordinar la mejor respuesta posible por parte de las autoridades civiles y militares.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el proyecto QTECT CGL2015-67169-P y el proyecto 3GEOFAM CGL2017-83931-C3-2-P, ambos del MINECO-FEDER, Plan Nacional de I+D+i, convocatoria de EXCELENCIA.

Referencias bibliográficas

- Bath, M. (1965). Lateral inhomogeneity's in the upper mantle, *Tectonophysics* 2, 483-514.
- Boore, D.M. y G. Atkinson, (2008). Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods Between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra* 24, 99-138.
- Boore, D.M., W. Joyner, T. Fumal, (1997). Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from Western North American earthquakes: A Summary of recent Work. *Seismological Research Letters* 68 (1), 128-153.

- Elez, J., Silva, P.G., Giner-Robles, J.L., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Roquero, E., Bardají, T., Huerta, P., Martínez-Graña, A. (2015). ESI-07 ShakeMaps for Instrumental and historical events in the Betic Cordillera (SE Spain): a preliminary approach applied to seismic hazard based on geological data. *Miscellanea INGV* 27, 132-135.
- Giner-Robles, J.L., Silva, P.G., Elez, J., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Rodríguez-Escudero, E. (2015). Relationships between the ESI-07 scale and expected PGA values from the analysis of historical earthquakes (\geq VIII EMS) in East Spain: Tavernes 1396 AD and Estubeny 1748 AD earthquakes. *Miscellanea INGV* 27.
- Martínez-Díaz, J.J., Masana, E., Ortuño, M., (2012). Active tectonics of the Alhama de Murcia fault, Betic Cordillera, Spain. *J. Iber. Geol.* 38 (1), 269–286.
- Michetti, A.M., E. Esposito, L. Guerrieri, et al., (2007). Environmental Seismic Intensity scale – ESI 2007. In: *Intensity Scale ESI-07 (Guerrieri, L., Vittori, E. Eds.) Mem. Descr. Carta Geologica d'Italia 74*. APAT, Rome. Italy. 41 pp.
- Silva, P.G., R. Pérez-López, M.A. Rodríguez-Pascua, E. Roquero, J.L. Giner Robles, P. Huerta, A. Martínez-Graña, T. Bardají, (2014). Macroseismic analysis of slope movements triggered by the 2011 Lorca Earthquake (Mw 5.1): Application of the ESI-07 scale. *Geogaceta*. 55.
- Silva, P.G., Elez, J., Giner-Robles, J.L., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Roquero, E., Bardají, T. and Martínez-Graña, A. (2017a). ESI-07 ShakeMaps for Instrumental and historical events in the Betic Cordillera (SE Spain): an approach based on geological data and applied to seismic hazard. *Quaternary International* 451C, 185-208.
- Silva, J. Elez, J.L. Giner-Robles, P.V. Gómez-Diego, M.A. Rodríguez-Pascua, E. Roquero, A. Martínez-Graña, T. Bardají. (2017b). The AD 1755 Lisbon Earthquake-Tsunami: Modelling the seismic source from the analysis of environmental and building macroseismic data. *Miscellanea INGV* 27, In: *8th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology (PATA)*, 13 – 16 November, 2017, New Zealand
- USGS. (2000). USGS Fact Sheet 103–00 2000. <http://www.trinet.org/shake>.
- Wald, D., Kuo-Wan Lin, Keith Porter, y Loren Turner. (2008). ShakeCast: Automating and Improving the Use of ShakeMap for Post-Earthquake Decision-Making and Response. *Earthquake Spectra* 24(2), 533–553.
- Worden, C.B. and D.J. Wald (2016). *ShakeMap Manual Online: technical manual, user's guide, and software guide*. U. S. Geological Survey. usgs.github.io/shakemap. DOI: 10.5066/F7D21VPQ.
- Wells, D. L. y K.J. Coppersmith. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length,

Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bull. Seismol. Soc. of Am.* (84(4), 974-1002.

Int. ShakeMap	PGA %g	Area km2	Localidades	Habitantes (2016)
V	0.09	>10.000	>200	
VI	0.18	6361	>20	>300,000
VII	0.34	1350	9	680,213
VIII	0.65	360	4	91,911
IX	0.83	3	-	

Tabla 1: Principales parámetros obtenidos del ShakeMap ESCENARIO de intensidad macrosísmica, aceleración fuerte del terreno, área afectada de cada isosista y habitantes expuestos.

Table 1: Big numbers obtained from the SCENARIO ShakeMaps designed to the exercise, macroseismic maximum intensity, peak ground acceleration, affected cities and exposed inhabitants.