

CURVAS PREDICTIVAS DEL MOVIMIENTO DEL SUELO EN EL OESTE DEL MEDITERRANEO

Mar TAPIA, Teresa SUSAGNA, Xavier GOULA

mtapia@igc.cat, tsusagna@igc.cat, xgoula@igc.cat Institut Geològic de Catalunya, Barcelona, Spain

RESUMEN

Es conocida la importancia de la inclusión de curvas predictivas del movimiento del suelo en función de la magnitud y la distancia en el análisis de la peligrosidad sísmica, así como su uso en el cálculo de escenarios. También lo es su principal problema: la disponibilidad de datos suficientes para su obtención.

Recientemente, en países situados al Oeste del Mediterráneo se han podido recopilar registros con suficiente calidad cedidos por varias redes acelerométricas en el área (IGC/ICC, IGN, RAP, SSN-ENEL, CRECIT), teniendo una selección de sismos final con magnitudes entre 3.8 y 6.0 y con una cobertura en distancias entre 10 y 500 km aproximadamente. De su análisis se observan atenuaciones superiores a las predichas por curvas europeas recientes.

Finalmente, como resultado de un ajuste de los datos seleccionados, se proponen curvas predictivas del valor máximo de aceleración (PGA) y del espectro de aceleraciones para el Oeste del Mediterráneo. Estas curvas ofrecen una descripción completa del comportamiento de la atenuación sísmica en aceleración con una validez en magnitudes entre 3.8 y 5.2, y entre distancias desde 6 a 542 km.

Predicciones europeas recientes que tienen en cuenta distintos patrones de atenuación sísmica según el rango de magnitudes, siguiendo las tendencias actuales en la investigación de esta temática, se comparan con las curvas propuestas para la atenuación sísmica en el Oeste Mediterráneo. De igual modo, sismos recientes que ofrecen nuevos datos no incluidos en la propuesta de curvas predictivas, se comparan para la extracción de conclusiones.

SUMMARY

The use of ground motion predictive curves is of high importance in the seismic hazard assessment and in the computation of earthquake scenarios. The main problem in adjusting these curves is also well-known: the availability of accelerometric data.

Recently, in the W Mediterranean area it has been possible to collect a set of data with enough quality from different networks (IGC/ICC, IGN, RAP, SSN-ENEL and CRECIT). A set of records from earthquakes with magnitudes between 3.8 and 6.0 and coverage in distance from 10 to 500 km, approximately, has been compiled. After an analysis of the data, higher attenuation rates are observed in comparison with older European predictive ground motion curves.

Then, ground motion predictive curves for the peak ground acceleration (PGA) and the acceleration spectrum (SA) for the W Mediterranean area are proposed as result of fitting procedures using the selected data. These curves offer a complete description of the seismic attenuation in terms of acceleration with validity for a magnitude range from 3.8 to 5.2, and from 6 to 542 km in distance.

Recent European predictive curves taking into account different seismic attenuation behaviours depending on the magnitude are compared with the new set of predictive ground motion curves for the W. Mediterranean area. On the other hand, the new proposed ground motion predictive curves are compared with data from very recent earthquakes to obtain more conclusions.

1. Introducción

La evaluación de la peligrosidad sísmica depende del área de estudio, la representación del parámetro que describe el movimiento del suelo y la metodología usada. Un punto crucial en esta evaluación es el uso de ecuaciones predictivas del movimiento del suelo ajustadas al comportamiento del movimiento del suelo en función de la distancia y magnitud de los eventos sísmicos. La opción óptima siempre es la introducción de relaciones formuladas con datos de la región en estudio.

En este estudio se proponen ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para los países al Oeste del Mediterráneo (Tapia, 2006). Sismos de magnitudes moderadas ($M < 6.0$) ocurren con cierta frecuencia en esta región y pueden ser causantes de daños considerables a tenor del desarrollo urbanístico de algunas de las zonas consideradas. La importancia en la obtención de estas relaciones radica en la existencia de una serie de datos para la región adecuados en magnitud, distancia, cantidad y calidad para el ajuste de este tipo de relaciones. Estos datos hasta ahora no habían sido muy abundantes debido a la falta de instrumentación en el área, cosa que ha sido mejorada sensiblemente en los últimos tiempos y por tanto, ha contribuido a la obtención de más datos acelerométricos. En la Figura 1 se muestran las estaciones de movimiento fuerte que han aportado datos a este estudio junto con los eventos considerados.

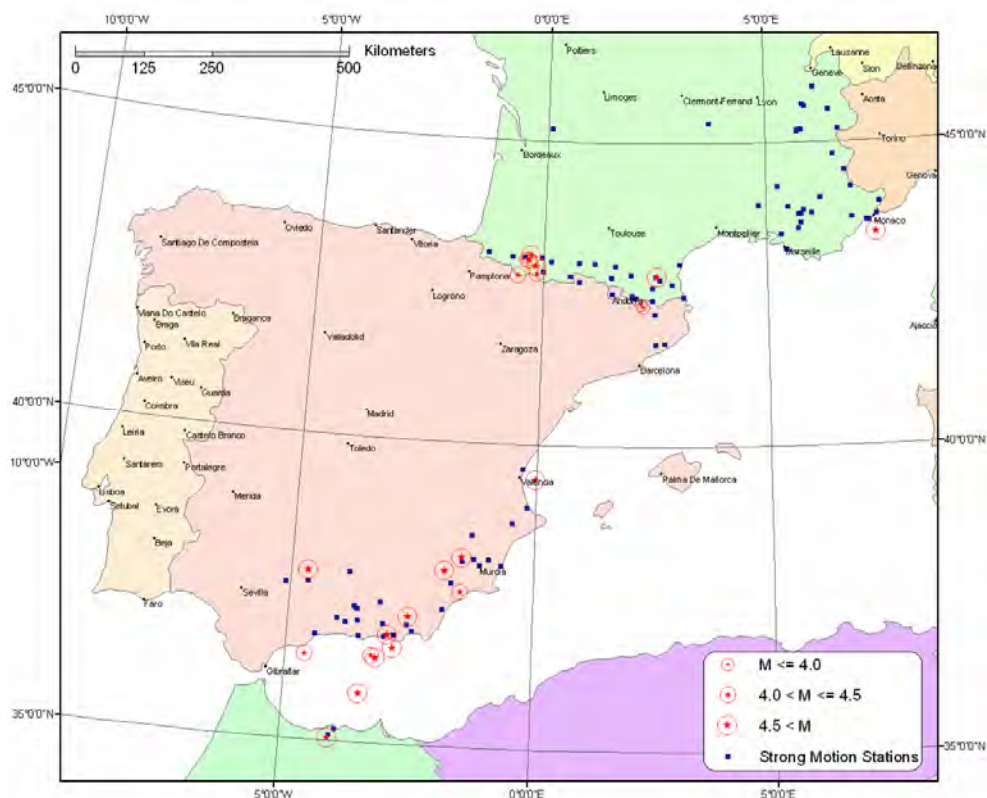


Figura 1. Mapa con las estaciones de movimiento fuerte usadas junto con los epicentros de los sismos con datos disponibles.

El análisis de los datos junto con relaciones predictivas existentes muestra que la realización de un ajuste usando estos datos para la obtención de relaciones predictivas del movimiento del suelo es de utilidad.

2. Los datos de movimientos fuertes

La región geográfica definida en este estudio viene dada por una serie de datos provenientes de terremotos con magnitudes moderadas en el Oeste de la vertiente Mediterránea. En primera instancia se recopilan registros a los que se ha tenido acceso de sismos de España, Marruecos, Francia, Argel e Italia. En la Tabla I se especifican estos registros junto con sus respectivos sismos. La distribución de epicentros se muestra en la Figura 2, donde se observa que los datos provienen básicamente de tres regiones: región sureste de la península ibérica, región pirenaica y sur de Francia y la región italiana. En la Figura 3 se muestra la cobertura en distancias y magnitudes que ofrecen los registros recopilados correspondientes a las componentes horizontales. Cabe comentar que no se dispone de suficiente información fiable para incluir clases de suelo.

Estos datos han sido obtenidos gracias a la colaboración de varios organismos: Réseau Accélérométrique Permanent (GIS-RAP, Francia), Instituto Geográfico Nacional (IGN, España), Institut Cartogràfic/Geològic de Catalunya (ICC-IGC, España), Centre de Recerca en Ciències de la Terra, Institut d'Estudis Andorrans (CRECIT, IEA, Andorra) and Servizio Sismico Nazionale and ENEL (SSN-ENEL, Italia)

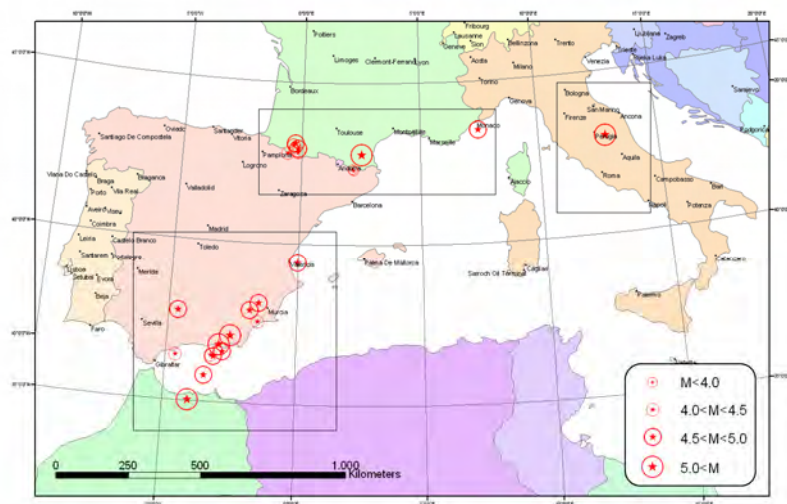


Figura 2. Mapa de epicentros de los terremotos seleccionados.

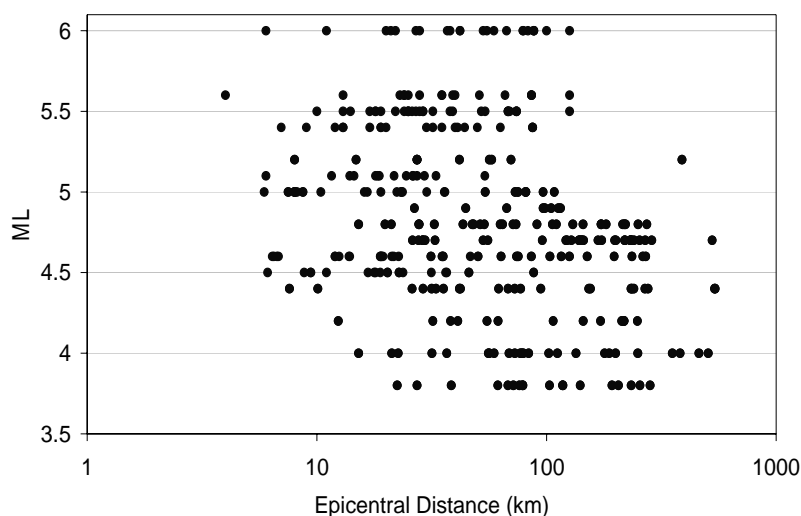


Figura 3 Cobertura de los datos seleccionados en función de la magnitud y la distancia.

Tabla I. Listado de los terremotos seleccionados especificando localización, magnitud y el rango de distancias epicentrales que cubren los registros recopilados por evento.

Año	Mesh	Día	Hora origen (UTC)	Lat	Long	Area epicentral	M	Rango de distancias epicentrales (km)
1993	12	23	14:22	36.78N	2.94W	Adra (S. Spain)	5.0(mb)	7-108
1994	01	04	08:03	36.57N	2.82W	Adra (S. Spain)	4.9(mb)	27-115
1996	02	18	01:45	42.79 N	2.53E	Sant Pau de Fenollet (Pyrénées Orientales, France)	5.2(MI)	8-389
1996	09	02	19 :07	37.54N	1.51W	Mazarrón (S.Spain)	4.5(mb)	23-46
1997	07	02	09:38	36.40N	3.15W	Adra (S.Spain)	4.6(mb)	63-86
1997	07	02	12:53	36.43N	3.25W	Adra (S.Spain)	4.4(mb)	42-77
1997	09	26	00:33	43.02N	12.88E	Umbria-Marche (Italy)	5.6(MI)	4-126
1997	09	26	09:40	43.03N	12.85E	Umbria-Marche (Italy)	6.0(MI)	6-126
1997	10	06	23:24	43.00N	12.82E	Umbria-Marche (Italy)	5.4(MI)	7-87
1997	10	12	11:08	42.91"N	12.94E	Umbria-Marche (Italy)	5.1(MI)	6-54
1997	10	14	15:23	42.91N	12.93E	Umbria-Marche (Italy)	5.5(MI)	10-126
1998	03	21	16:45	42.95N	12.92E	Umbria-Marche (Italy)	4.5(MI)	6-23
1998	04	03	07:26	43.19N	12.74E	Umbria-Marche (Italy)	5.0(MI)	6-36
1998	04	05	15:52	43.20N	12.76E	Umbria-Marche (Italy)	4.5(MI)	6-37
1999	02	02	13:45	38.11N	1.49W	Mula (S.Spain)	4.8(mb)	21-110
1999	10	04	18:14	42.79N	0.58W	B de Luchon (S. France)	4.5(mb)	20
2001	02	25	18:34	43.49 N	7.47E	Nice (France)	4.7(MI)	26-527
2002	02	04	20:09	37.09N	2.54W	Gergal (AL)	5.2(mb)	15-58
2002	05	16	14:56	42.94N	0.16W	Aucun (France)	4.8(MI)	15-274
2002	05	16	15:14	42.82N	0.15W	Aucun (France)	4.2(MI)	12-249
2002	08	06	06:16	37.88N	1.83W	Bullas (S. Spain)	4.8(mb)	28-173
2002	08	24	10:08	36.39N	4.60W	Málaga (S. Spain)	4.2(mb)	41
2002	12	11	20:09	43.04N	0.33W	Pau (France)	4.4(MI)	10-153
2002	12	12	17:59	43.11N	0.28W	Pau (France)	4.6(MI)	12-270
2003	01	21	18:00	43.05N	0.36W	Pau (France)	4.4(MI)	8-542
2003	01	24	20:35	37.76N	4.63W	Espejo (S. Spain)	4.6(mb)	19-74
2003	02	18	13:09	35.80N	3.46W	Alborán (S. Spain)	4.6(mb)	104-126
2003	02	26	03:32	42.30N	2.22E	Ripolles (Spain)	3.8(MI)	22-283
2003	09	21	10:34	39.42N	0.01W	Valencia (Spain)	4.6(mbLg)	31-50
2004	03	07	06:37	35.04N	4.02W	Alhucemas	5.0(mbLg)	8
2004	09	21	15:48	42.34N	2.17E	Ripollés (Spain)	4.0(MI)	12- 506

2.1. La selección de registros de movimiento fuerte

Como se ha explicado en el apartado anterior, los primeros criterios en la selección de registros son su localización geográfica. Después, se han seleccionado registros correspondientes a sismos con una magnitud mínima. En este caso el límite se sitúa en una magnitud cercana a M4.0. La magnitud máxima viene dada por el evento con la magnitud máxima disponible.

Respecto a los registros, se han desechado aquellos que no han sobrepasado la resolución del sistema de registro, los que tienen gaps y los que la señal no sobrepasó el ruido de fondo suficientemente.

La selección final de registros alcanza los 334 registros de movimiento fuerte

pertencientes a 30 terremotos con magnitudes entre M3.8 y M6.0, y con distancias epicentrales entre 6 y 542 km. Los registros italianos, 144, pertenecen a 8 terremotos de la crisis de Umbria-Marche (1997-1998). Los registros del sureste de la Península Ibérica y Marruecos son 56 pertenecientes a 13 terremotos. Del sur de Francia se seleccionan 32 registros del sismo de Niza (M4.7) y la región pirenaica se seleccionan 102 registros pertenecientes a 9 eventos.

2.2. Proceso aplicado a los registros

Todos los registros seleccionados han sido sometidos a un tratamiento homogéneo. Primeramente, se les aplica una corrección de línea de base y un filtro Butterworth pasabanda con frecuencias entre 0.25 y 25Hz. Con el registro resultante se extrae el valor máximo de la aceleración y el espectro de aceleraciones al 5% de amortiguamiento. En la Figura 4 se muestran los valores máximos de aceleración obtenidos (Figura 4, izq.) y sus espectros de aceleración (Figura 4, dcha.) representados conjuntamente. Los valores máximos de aceleración están representados en función de la distancia y diferenciados por tramos de valores en la escala de magnitudes. Se observa una clara dependencia en distancia de los datos así como en magnitudes, aunque esta última dependencia muestra más dispersión.

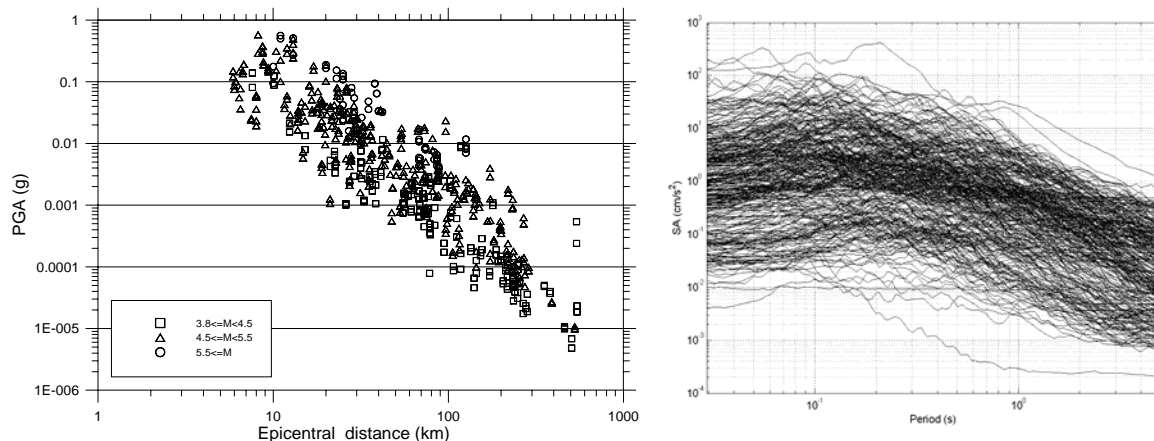


Figura 4. (Izq) Valores máximos de aceleración, PGA, en unidades de gravedad de los registros seleccionados diferenciados por rangos de magnitud. (Dcha) Espectros de aceleración, SA, expresados en cm/s² en función del periodo.

3. Curvas de atenuación sísmica preestablecidas

Existen relaciones predictivas del movimiento del suelo o predictivas de la atenuación sísmica que podrían ser aplicables a la región de estudio de donde provienen los registros de la selección. Existen algunas que extienden su dominio de validez a Europa y otras que se prescriben para áreas más restringidas como por ejemplo, la Península Ibérica.

En el caso de relaciones válidas para todo el territorio Europeo cabe destacar las contribuciones de Ambraseys et al. (1996) y su reciente actualización, Ambraseys et al. (2005) donde se proponen relaciones para Europa y Oriente Medio. Ambraseys et al. (1996) ha sido una relación de referencia hasta el momento, ampliamente utilizada en numerosos estudios de peligrosidad sísmica como por ejemplo en el proyecto GSHAP (1999), proyecto para el estudio de la peligrosidad sísmica mundial.

Por otro lado, existen algunos trabajos para la Península Ibérica que también proponen relaciones predictivas del movimiento. Una de ellas es Cabañas et al. (1999) en la cual se predice el valor máximo de aceleración (PGA) para la Península habiendo usado

para su ajuste datos de movimiento fuerte principalmente del sureste de la Península. Otro trabajo más reciente es el de Cantavella et al. (2004) en donde la relación que se propone es para el sureste de la Península Ibérica y se ajusta usando datos de los registros de la red sísmica nacional.

Específicamente para la región de Pirineos y Francia encontramos trabajos como el de Marin et al. (2004) y Drouet et al. (2005). En Marin et al. (2004) se propone una relación para áreas metropolitanas francesas ajustada con datos de sismos de magnitudes muy moderadas. Drouet et al. (2005) es un trabajo centrado en registros que cubren el territorio pirenaico. Con ellos no ajustan relaciones predictivas, sino que se realizan inversiones de los datos para encontrar características sismológicas de la fuente, propagación y efectos de suelo. Como principales resultados encuentran valores para la extensión geométrica superiores a la correspondiente a ondas esféricas y magnitudes locales sobreestimadas medio grado o un grado respecto a la magnitud momento, Mw. Theodulidis (1998), Theodulidis et Papazachos (1992), Skarlatoudis et al. (2003) son trabajos que proponen relaciones para Grecia. Sabetta et Pugliese (1996) es una relación predictiva para Italia que usó datos de la red italiana de movimiento fuerte.

En la Tabla II se sintetizan los resultados de las relaciones comentadas en este apartado.

Tabla II. Selección de relaciones existentes para la predicción del movimiento del suelo. Se especifica el tipo de distancia (r) y escala de magnitud usadas (M), las variables dependiente (Y) e independiente (X). El coeficiente A es el término independiente, B el término de magnitud, C el término de extensión geométrica y D el término de atenuación anaelástica. Los coeficientes de tipo de suelo no se muestran. Se muestran el rango de validez en magnitud y distancia.

Relación general de atenuación sísmica $Y = A + B \cdot M + C \cdot X + D \cdot r$									
Artículo	r	M	Y	A	B	C	D	Rango de r (km)	Rango de M
			X						
Ambraseys et al., 1996.	$r = \sqrt{D_{epicentral}^2 + 3.5^2}$	Ms	$\log_{10} \text{PGA/SA, g}$ $\log_{10} r$	-1.48	0.266	-0.922	--	1- 200	4.0-7.5
Sabetta and Pugliese, 1996.	$r = D_{epicentral}$	M=MI si MI<=5.5	$\log_{10} \text{PGA/SA, g}$ $\log_{10} r$	1.845	0.363	-1.0	--	1-200	4.6-6.8
Cabañas et al., 1999. (Mediterranean)	$r = D_{epicentral} + 20$	MI	$\ln \text{PGA, cm/s}^2$ $\ln r$	8.463	0.699	-2.262	0.011	1-200	3.5-6.5
Cabañas et al., 1999. (Iberian Peninsula)	$r = D_{epicentral} + 10$	MbLg	$\ln \text{PGA, cm/s}^2$ $\ln r$	0.003	1.611	-1.543	--	1-200	2.0-5.0
Skarlatoudis et al., 2003.	$r = D_{epicentral}$	M, magnitud momento	$\log_{10} \text{PGA, cm/s}^2$ $\log_{10} r$	0.86	0.45	-1.27	--	1-160	4.5-7.0
Cantavella et al., 2004.	$r = \sqrt{D_{epicentral}^2 + 6^2}$	MbLg	$\ln \text{PGA, cm/s}^2$ $\ln r$	-2.25	1.95	-1.65	--	4-284	2.5-5.1
Marin et al., 2004	$r = r_{hipocentral}$	MI	$\log_{10} \text{PGA, g}$ $\ln r$	-3.93	0.78	-1.5	--	3-50	2.5-5.6
Ambraseys et al., 2005a	$r = \sqrt{D_{fault}^2 + 7.6^2}$	Mw	$\log_{10} \text{PGA/SA, m/s}^2$ $\log_{10} r$	2.522	-0.142	-3.184 + 0.314Mw	--	1-100	>5.0
Este estudio	$r = \sqrt{D_{epicentral}^2 + 10^2}$	MI	$\log_{10} \text{PGA, g}$ $\log_{10} \text{SA, cm/s}^2$ $\log_{10} r$	-1.8	0.45	-1.6	-0.0013	7.5-542	3.8-5.2

4. Análisis entre datos y curvas predictivas de la atenuación sísmica

Los datos seleccionados se comparan con las relaciones comentadas en el apartado anterior con el propósito de observar la validez de las ecuaciones que predicen la atenuación sísmica para Europa y el Oeste del Mediterráneo. El análisis comparativo se lleva a cabo con el valor de aceleración máximo debido a que la mayoría de los estudios comentados en la sección anterior sólo se centran en el ajuste de relaciones para este valor de la aceleración.

Ambraseys et al. (1996) presenta una escala de magnitudes (M_s) que difiere significativamente con la magnitud local para el rango de magnitud tratado (M_4 - M_6) con los datos disponibles. Usando la relación que propone Dufumier (2002) se transforma la escala de magnitud M_s en escala de magnitudes locales, M_l , para propiciar una comparación realista entre datos y relaciones predictivas. Las escalas de magnitudes del resto de leyes son comparables directamente con las magnitudes locales de los datos experimentales.

La Figura 5 es un compendio de las comparaciones realizadas entre datos y relaciones predictivas. Las curvas presentadas en la Figura 5 son Ambraseys et al. (1996, 2005) para validez en Europa y Oriente Medio; Sabetta y Pugliese (1996) para Italia; Cabañas et al. (1999) con dos propuestas, una para el Mediterráneo y otra para la Península Ibérica; Cantavella et al. (2004) para el sureste de la Península Ibérica y Skarlatoudis et al. (2003) para la región Egea.

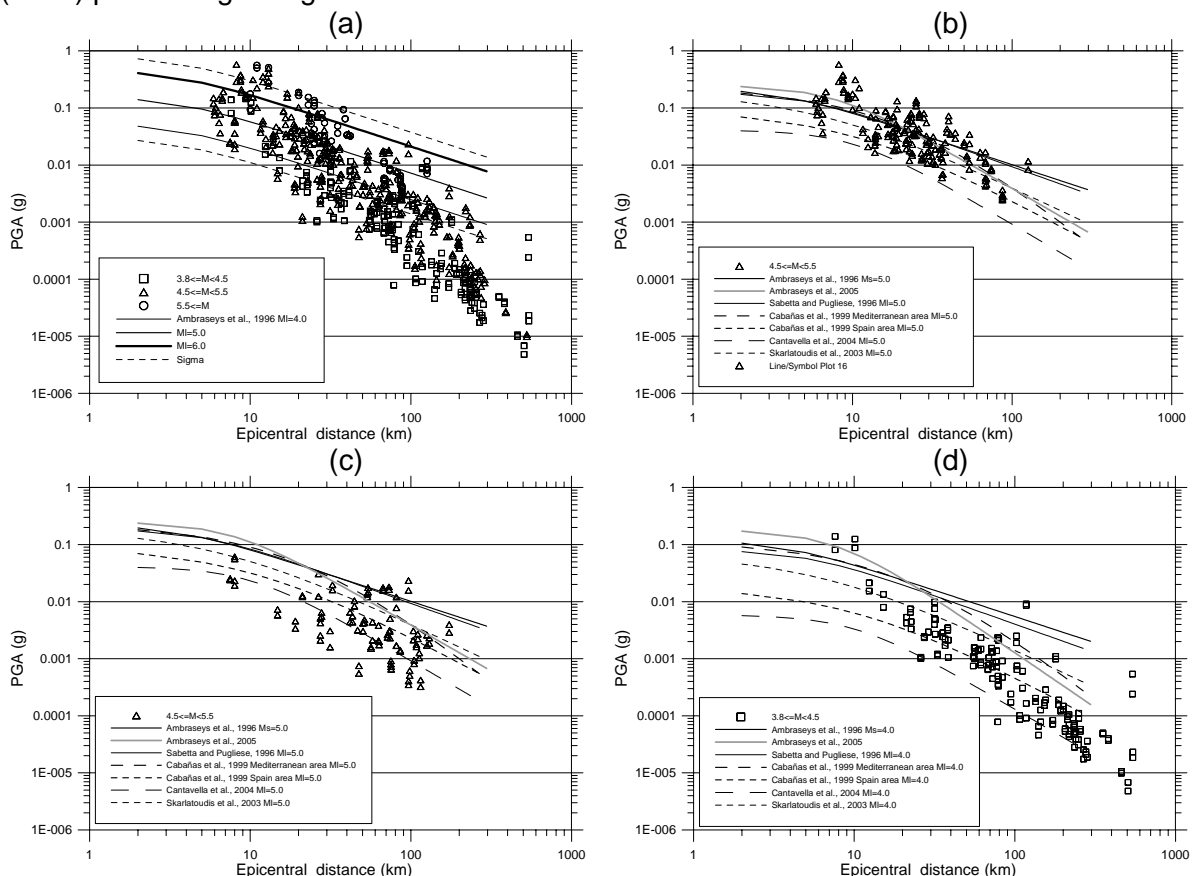


Figura 5. (a) Valores máximos de aceleración de componentes horizontales junto con Ambraseys et al. (1996) expresada en M_l . (b) Valores máximos de aceleración de los datos de la región italiana junto con varias relaciones. (c) Valores máximos de aceleración de la región del sureste de la Península Ibérica para magnitudes entre $M_{4.5}$ y $M_{5.5}$ junto con varias relaciones. (d) Valores máximos de aceleración de la región pirenaica para magnitudes entre $M_{4.5}$ y $M_{5.5}$ junto con varias relaciones.

En la Figura 5a se representan todos los datos seleccionados primeramente junto con Ambraseys et al. (1996). En este caso, cabe destacar el gran porcentaje de datos que quedan fuera de los márgenes de error y la diferencia en la pendiente de la curva predictiva y la pendiente que forman los datos. En cambio, si en vez de representar todos los datos conjuntamente, se representan los datos italianos conjuntamente con otras curvas como se muestra en la Figura 5b, se observa un buen acuerdo entre los datos italianos y las curvas de Ambraseys et al. (1996, 2005) y Sabetta y Pugliese (1996).

En la Figura 5c se representan los datos pertenecientes al área del sureste de la Península Ibérica para magnitudes entre M4.5 y M5.5 conjuntamente con las relaciones seleccionadas. En la Figura 5c a pesar de la dispersión que muestran este grupo de datos se puede observar como un gran porcentaje de puntos quedan por debajo de las curvas de Ambraseys et al. (1996), Sabetta y Pugliese (1996), Cabañas et al. (1999) para el área Mediterránea y Ambraseys et al. (2005a), siendo estas dos últimas curvas prácticamente idénticas. Cabañas et al. (1999) para la Península Ibérica y Cantavella et al. (2004) son las curvas predictivas con valores más bajos. En la Figura 5d se muestran los datos para magnitudes entre M3.5 y M4.5 para la región Pirenaica y sur de Francia junto con el conjunto de curvas predictivas ya mencionadas. La primera observación es la gran diferencia en pendiente entre los datos y curvas como la de Ambraseys et al. (1996) y Sabetta y Pugliese (1996). Por otro lado Cabañas et al (1999) y Ambraseys et al. (2005a) predicen valores de aceleración similares pero mayores que los que muestran los datos. Los datos entre 10 y 100 km se sitúan junto con las curvas de Cabañas et al (1999) para la Península Ibérica y la de Skarlatoudis et al. (2003). Los datos con distancias superiores a 100 km se sitúan entre Cabañas et al (1999) para la península ibérica y Cantavella et al. (2004).

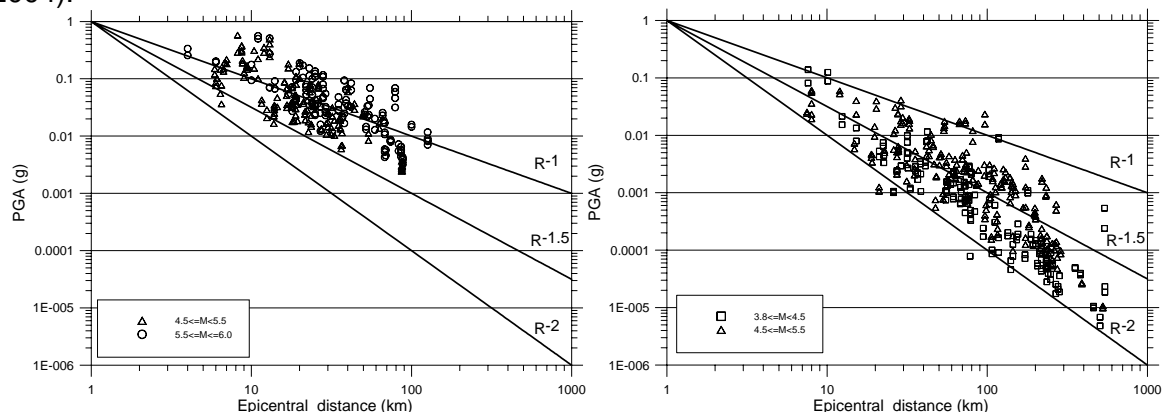


Figura 6. Representación de los valores máximos de aceleración junto con rectas que representan diferentes rangos de extensión geométrica desde la propagación cilíndrica ($1/R$) a la propagación esférica ($1/R^2$). Izquierda: datos italianos, Derecha: datos de la Península Ibérica y región pirenaica.

De las observaciones de la Figura 5 cabe comentar como los datos italianos (Figura 5b) responden a un comportamiento diferente para un rango de magnitudes similar que los datos de la Península Ibérica, pirenaicos y sur de Francia (Figura 5 c y d). En la Figura 6 se representan los datos por rangos de magnitud junto con rectas que marcan diferentes valores de extensión geométrica, desde la propagación esférica de los frentes de onda hasta la propagación cilíndrica. En esta figura (Figura 6) también se observan las características que hacen diferentes ambos grupos de datos.

Debido a que ninguna relación preestablecida que se ha comparado describe bien la totalidad del comportamiento de los datos y que los datos italianos seleccionados difieren en comportamiento del resto, se decide que el ajuste de una relación predictiva con los datos disponibles excluyendo los datos italianos es conveniente.

5. Propuesta de una nueva curva de atenuación sísmica.

La metodología que se usa para ajustar nuevas curvas predictivas del movimiento con los datos disponibles es fijar un formulismo matemático o modelo que relacione la magnitud y la distancia con el nivel de movimiento. El ajuste de este modelo con los datos experimentales se realiza usando el método matemático de los mínimos cuadrados. Finalmente, se analiza la validez estadística de los ajustes.

5.1. Formulismo matemático de la curva predictiva.

Las expresiones matemáticas escogidas para describir el movimiento del suelo de acuerdo con la teoría elástica de ondas se describen en las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\log_{10} PGA_H = C_1 + C_2 \cdot M_L + C_3 \cdot \log_{10} r + C_4 \cdot r \pm \sigma \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\log_{10} SA_H(f) = C_1(f) + C_2(f) \cdot M_L + C_3(f) \cdot \log_{10} r + C_4(f) \cdot r \pm \sigma \quad \text{Ecuación 2}$$

$$r = \sqrt{D_{epi}^2 + h_o^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

La información sismológica que acompaña a los registros usados es la que se ha recopilado de los diferentes organismos. De este conjunto de datos la escala de magnitudes mayoritariamente usada es la magnitud local, MI. Respecto a las distancias a las cuales se registra el movimiento respecto a la fuente, hay completitud de información en las distancias epicentrales. Hay incompletitud sobre las profundidades y las que están disponibles para estos sismos no son precisas lo cual imposibilita trabajar con distancias hipocentrales por el momento. Por tanto, se escoge como variable relativa a la distancia la distancia epicentral más un término correctivo h_o (Ecuación 3) que corregirá parte del error cometido a cortas distancias. Los eventos seleccionados en este estudio la mayoría son eventos superficiales, los cuales tienen sus profundidades situadas los primeros 15 km de la corteza.

5.2. Ecuaciones predictivas del movimiento para el Oeste del Mediterraneo

5.2.1. Ajuste de las ecuaciones y resultados

En las Tabla III y Tabla IV se muestran los resultados obtenidos tras la aplicación de varios procesos de ajuste estadístico usando la metodología de mínimos cuadrados.

Primeramente, con el volumen de datos se escogen los valores máximos de aceleración (PGA) y las ordenadas espectrales de la aceleración (SA) a periodos de 0.1, 0.3, 0.6, 1.0 y 2.0 segundos. Con estos valores, sus distancias epicentrales y sus magnitudes se realiza el ajuste de las ecuaciones 1 y 2 para distintos valores de h_o . La Tabla III presenta los coeficientes encontrados para distintos valores del parámetro h_o . Se observa como la significación estadística de los resultados no ayuda a escoger cual es el mejor ajuste según el valor h_o . Si bien, parecería adecuado por las características sísmicas y tectónicas del área dar validez a un valor de $h_o = 10$ km. También se observa como los coeficientes de extensión geométrica ($C_3(f)$) para los valores máximos de aceleración son superiores a la unidad, cosa que se observaba en la Figura 6(dcha). En cambio para frecuencias menores, el valor de este coeficiente disminuye. En media, se puede considerar que la expansión del frente de ondas toma un valor alrededor de la unidad al tener en cuenta todo el espectro de aceleración. Para la aplicación de un método de ajuste de todo el espectro de forma simultánea se aprovecha esta observación y se toma $C_3(f)=1.0$. Los resultados de este ajuste para $h_o = 10$ km se muestran en la Tabla IV. Se muestran valores entre 0.3 y 25 Hz debido a que frecuencias fuera de este rango no tienen significado debido a los filtrajes aplicados a todos los registros.

Tabla III. Coeficientes resultantes del ajuste de la ecuación 1 y la ecuación 2 para periodos seleccionados variando el valor de h_0 . Las relaciones resultantes están expresadas en unidades de g. También se muestran los valores de la desviación estándar, σ y el coeficiente de correlación, R^2

$h_0=0 \text{ km}$						
T(s)	$C_1(f)$	$C_2(f)$	$C_3(f)$	$C_4(f)$	σ	R^2
0.0 (PGA)	-2.2 ± 0.3	0.44 ± 0.06	-1.4 ± 0.1	-0.0017 ± 0.0004	0.426	77%
0.1	-1.3 ± 0.3	0.31 ± 0.06	-1.3 ± 0.1	-0.0020 ± 0.0004	0.433	76%
0.3	-4.4 ± 0.4	0.72 ± 0.06	-0.7 ± 0.1	-0.0032 ± 0.0004	0.470	70%
0.6	-6.5 ± 0.4	1.00 ± 0.07	-0.4 ± 0.1	-0.0034 ± 0.0005	0.538	63%
1.0	-7.1 ± 0.4	1.07 ± 0.08	-0.5 ± 0.1	-0.0029 ± 0.0005	0.578	59%
2.0	-7.6 ± 0.4	1.05 ± 0.08	-0.6 ± 0.1	-0.0021 ± 0.0005	0.579	56%

$h_0=10 \text{ km}$						
T(s)	$C_1(f)$	$C_2(f)$	$C_3(f)$	$C_4(f)$	σ	R^2
0.0 (PGA)	-1.8 ± 0.3	0.45 ± 0.06	-1.6 ± 0.1	-0.0013 ± 0.0004	0.426	77%
0.1	-1.0 ± 0.3	0.31 ± 0.06	-1.5 ± 0.1	-0.0015 ± 0.0004	0.431	77%
0.3	-4.2 ± 0.4	0.73 ± 0.06	-0.8 ± 0.1	-0.0030 ± 0.0004	0.470	70%
0.6	-6.3 ± 0.4	1.00 ± 0.07	-0.5 ± 0.1	-0.0032 ± 0.0005	0.538	63%
1.0	-7.0 ± 0.5	1.08 ± 0.08	-0.6 ± 0.2	-0.0027 ± 0.0005	0.577	59%
2.0	-7.4 ± 0.5	1.05 ± 0.08	-0.7 ± 0.2	-0.0019 ± 0.0005	0.578	56%

$h_0=20 \text{ km}$						
T(s)	$C_1(f)$	$C_2(f)$	$C_3(f)$	$C_4(f)$	σ	R^2
0.0 (PGA)	-1.2 ± 0.4	0.45 ± 0.06	-1.9 ± 0.1	-0.0006 ± 0.0004	0.428	77%
0.1	-0.4 ± 0.4	0.32 ± 0.06	-1.8 ± 0.1	-0.0009 ± 0.0004	0.432	77%
0.3	-3.8 ± 0.4	0.73 ± 0.06	-1.0 ± 0.1	-0.0026 ± 0.0005	0.471	70%
0.6	-6.1 ± 0.5	1.01 ± 0.07	-0.7 ± 0.2	-0.0029 ± 0.0005	0.537	63%
1.0	-6.7 ± 0.5	1.08 ± 0.08	-0.7 ± 0.2	-0.0024 ± 0.0006	0.576	59%
2.0	-7.0 ± 0.5	1.05 ± 0.08	-0.9 ± 0.2	-0.0015 ± 0.0006	0.577	56%

$h_0=30 \text{ km}$						
T(s)	$C_1(f)$	$C_2(f)$	$C_3(f)$	$C_4(f)$	σ	R^2
0.0 (PGA)	-0.5 ± 0.4	0.46 ± 0.06	-2.3 ± 0.2	-0.0001 ± 0.0005	0.430	77%
0.1	0.4 ± 0.4	0.32 ± 0.06	-2.2 ± 0.2	-0.0003 ± 0.0005	0.432	76%
0.3	-3.4 ± 0.4	0.73 ± 0.06	-1.2 ± 0.2	-0.0022 ± 0.0005	0.471	70%
0.6	-5.7 ± 0.5	1.01 ± 0.07	-0.8 ± 0.2	-0.0026 ± 0.0006	0.537	63%
1.0	-6.3 ± 0.5	1.08 ± 0.08	-0.9 ± 0.2	-0.0020 ± 0.0006	0.575	60%
2.0	-6.6 ± 0.5	1.05 ± 0.08	-1.1 ± 0.2	-0.0012 ± 0.0006	0.576	56%

Tabla IV. Coeficientes resultantes del ajuste del espectro de aceleraciones considerando $C_3=1$. Las relaciones resultantes se expresan en cm/s^2 .

$h_0 = 10 \text{ m}$					
T(s)	Freq (Hz)	$C_1(\text{freq})$	$C_2(\text{freq})$	$C_4(\text{freq})$	Sigma
3.33	0.3	-4.1	0.98	0	0.602
2.50	0.4	-4.1	1.04	-0.0002	0.586
2.00	0.5	-3.9	1.05	-0.0004	0.577
1.67	0.6	-3.9	1.08	-0.0006	0.582
1.25	0.8	-3.6	1.10	-0.0009	0.59
1.11	0.9	-3.4	1.08	-0.0010	0.581
1.00	1.0	-3.3	1.06	-0.0011	0.576
0.83	1.2	-3.2	1.07	-0.0012	0.567
0.67	1.5	-2.7	1.01	-0.0015	0.544
0.60	1.7	-2.5	0.99	-0.0015	0.532
0.53	1.9	-2.4	0.97	-0.0017	0.518
0.42	2.4	-1.7	0.87	-0.0019	0.491
0.33	3.0	-1.1	0.77	-0.0021	0.468
0.30	3.3	-0.9	0.73	-0.0023	0.457
0.26	3.8	-0.7	0.7	-0.0025	0.449
0.21	4.8	-0.2	0.62	-0.0027	0.435
0.17	6.0	0.4	0.50	-0.0029	0.427
0.13	7.5	0.9	0.40	-0.0031	0.428
0.10	9.5	1.1	0.35	-0.0033	0.433
0.08	12.0	1.1	0.34	-0.0034	0.441
0.07	15.0	1.1	0.36	-0.0037	0.447
0.05	20.0	1.0	0.36	-0.0037	0.461
0.04	25.0	0.9	0.37	-0.0036	0.477

5.2.2. Significación estadística de los ajustes. Análisis de residuos.

La validación estadística de los ajustes se debe realizar a través de un análisis de la varianza (ANOVA) y el análisis de residuos.

Del análisis ANOVA se concluye que las variables escogidas para describir el movimiento del suelo muestran una dependencia con el movimiento del suelo a un nivel de confianza aceptable. Del análisis de cada término del modelo ajustado (ecuación 1 y 2) se concluye que ningún término debe ser eliminado, y en concreto, el análisis del término dependiente de r o de atenuación anelástica, a pesar de su valor bajo y su error, no deben eliminarse.

Del análisis de residuos (Figura 7) no se observa ninguna tendencia en su graficación respecto a las variables del modelo, magnitud y distancia, y los residuos se sitúan simétricamente alrededor de cero (ver regresiones en la Figura 7) lo cual confirma la simetría de los datos.

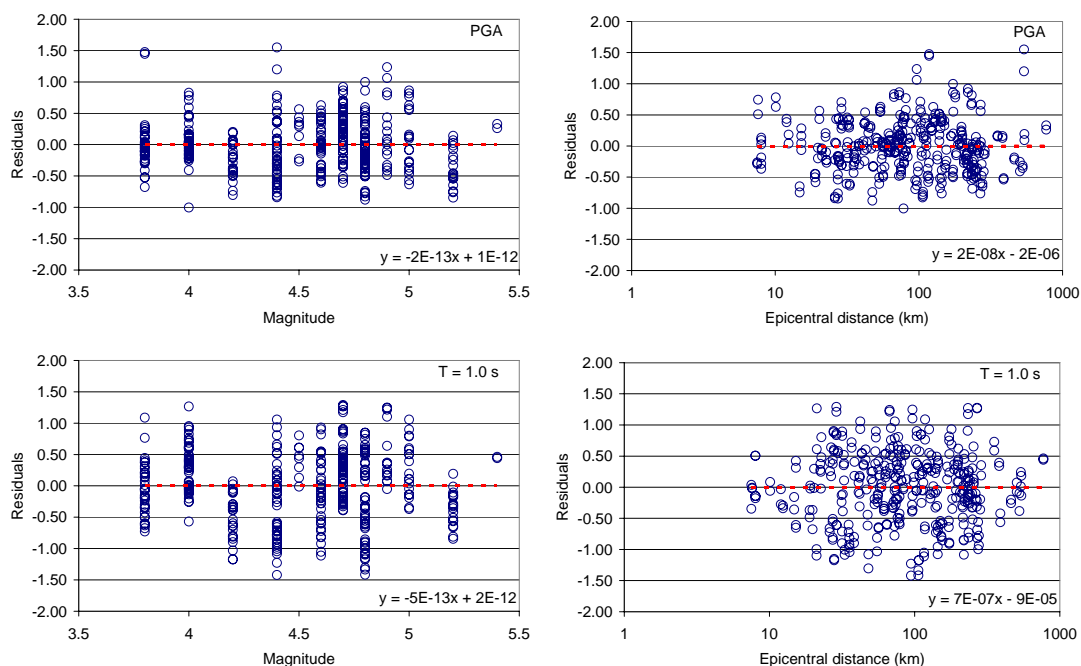


Figura 7. Representación de los residuos en función de la distancia y la magnitud para el PGA y una ordenada espectral correspondiente a un periodo de 1.0 s.

5.3. Análisis de las ecuaciones predictivas del movimiento para el Oeste Mediterráneo

La predicción del movimiento del suelo para el Oeste Mediterráneo propuesto en el apartado anterior se ha hecho depender solamente de dos variables, la distancia y la magnitud; ya que como se ha comentado en la sección 2 no se ha dispuesto de suficiente información para la inclusión de tipos de suelo en el estudio.

Respecto a la dependencia en distancia es interesante comentar los valores de los coeficientes de extensión geométrica, (coeficiente C_3) y atenuación anelástica (coeficiente C_4) obtenidos (Tabla III). Para los valores máximos de aceleración (PGA) se encuentra un valor de 1.6, que era lo que se observaba en la Figura 6(dcha) y lo que se deducía de la comparación de los datos con curvas preestablecidas. Por otro lado, la componente de atenuación anelástica parece mostrar poca contribución a la predicción del movimiento ya que sus coeficientes son en general muy pequeños (Tabla III y Tabla IV). Pero, a distancias mayores que 100 km (la validez de las ecuaciones propuestas llegan a 500 km) este término

contribuye significativamente. Por ejemplo, para una distancia de 100 km contribuye con el 13% del valor predicho, y si la distancia es de 500 km contribuye con el 45% del valor predicho. La Figura 8 ejemplifica este hecho. En ella se representa solamente la parte dependiente de la distancia de una de las curvas predictivas (curva predictiva del PGA para $h_0=10$ km, Tabla III) prescindiendo de la dependencia en magnitud. Para un rango de distancias entre 10 y 100 km se observa como la contribución del término de atenuación anaelástica es mínima, ya que al ajustar una recta de regresión reencontramos un coeficiente próximo a los coeficientes encontrados en el ajuste estadístico (~ 1.6). Pero, para el rango entre 100-1000 km esta recta ajustada ya no recupera el coeficiente de extensión geométrica poniendo de manifiesto que la contribución a la predicción en ese rango de distancias depende de la extensión geométrica y de la atenuación anaelástica.

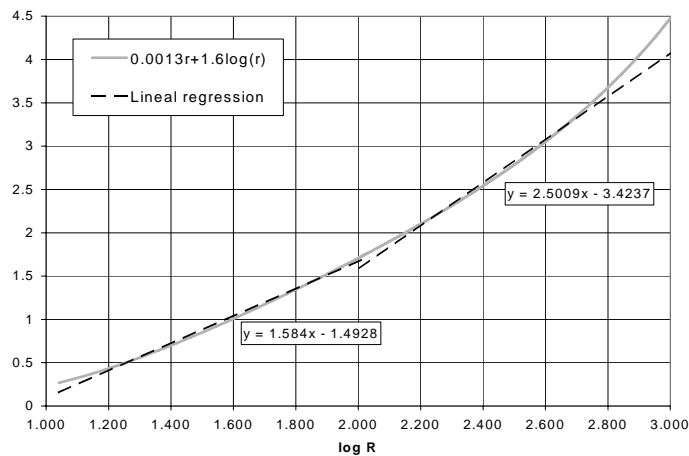


Figura 8. Representación de la dependencia en distancia de una de las curvas predictivas propuestas.

En la Figura 9 se muestra la curva predictiva del movimiento del obtenida para distintos valores de h_0 . En la gráfica se representa la curva para la magnitud $M=4.5$ y se hace variar el parámetro h_0 para ejemplificar la variabilidad del movimiento a distancias próximas a la fuente. La diferencia en la predicción es muy grande hay un cambio de más de dos órdenes de magnitud en la predicción al pasar de 0 km de profundidad a 30 km. Ello indica el grado de estos valores para campo cercano.

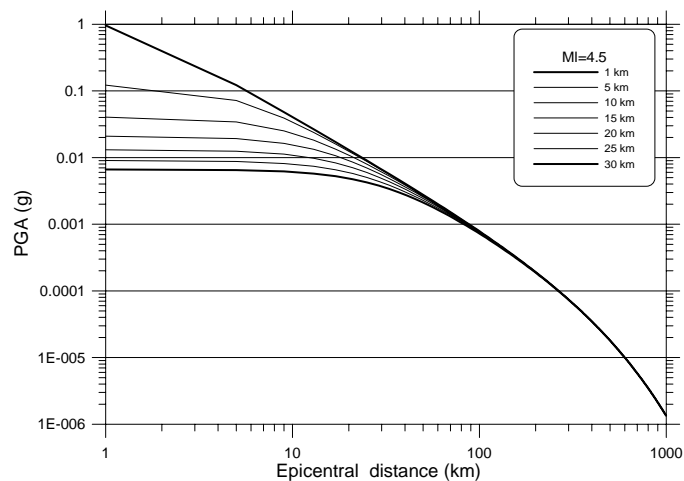


Figura 9. Representación de la variabilidad en la predicción del movimiento a distancias próximas a la fuente al variar h_0 .

En la Figura 10 se muestran las curvas obtenidas para el PGA y en la Figura 11 las curvas obtenidas ($h_o=10$ km) para el espectro de aceleraciones. Ambas figuras muestran las curvas obtenidas en este trabajo y curvas preestablecidas, donde se pueden observar algunas diferencias. Las predicciones europeas e italianas sobreestiman el movimiento del suelo en comparación con la propuesta en este estudio. Predicciones realizadas para Grecia y para la Península Ibérica muestran algún acuerdo con la nueva curva, pero para distancias superiores a 100 km difieren debido al término de atenuación anelástica que las otras curvas no tienen en cuenta. En la Figura 11 se han representado los valores del pseudoespectro de velocidades, PSV, al 5% de amortiguamiento se observan diferencias de hasta un grado de magnitud en las predicciones.

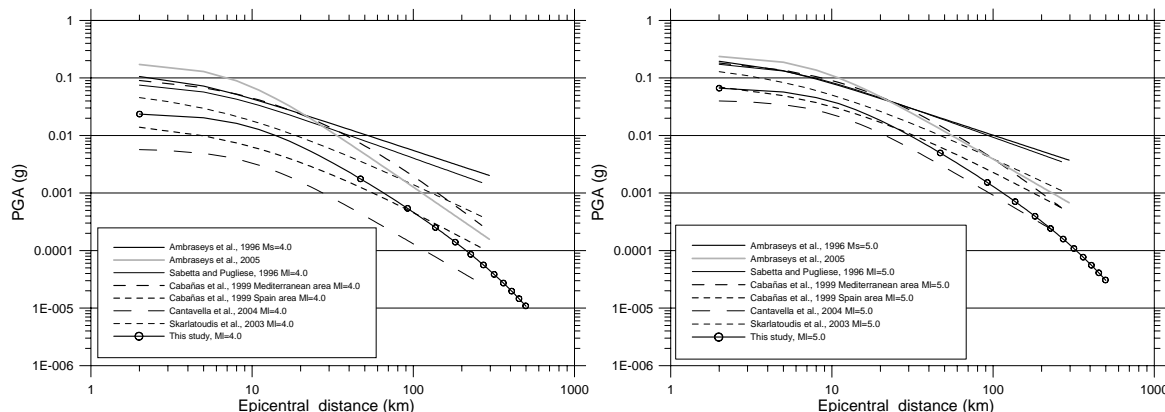


Figura 10. Representación de las ecuaciones obtenidas para el valor máximo de aceleración ($h_o=10$ km) junto con curvas preestablecidas.

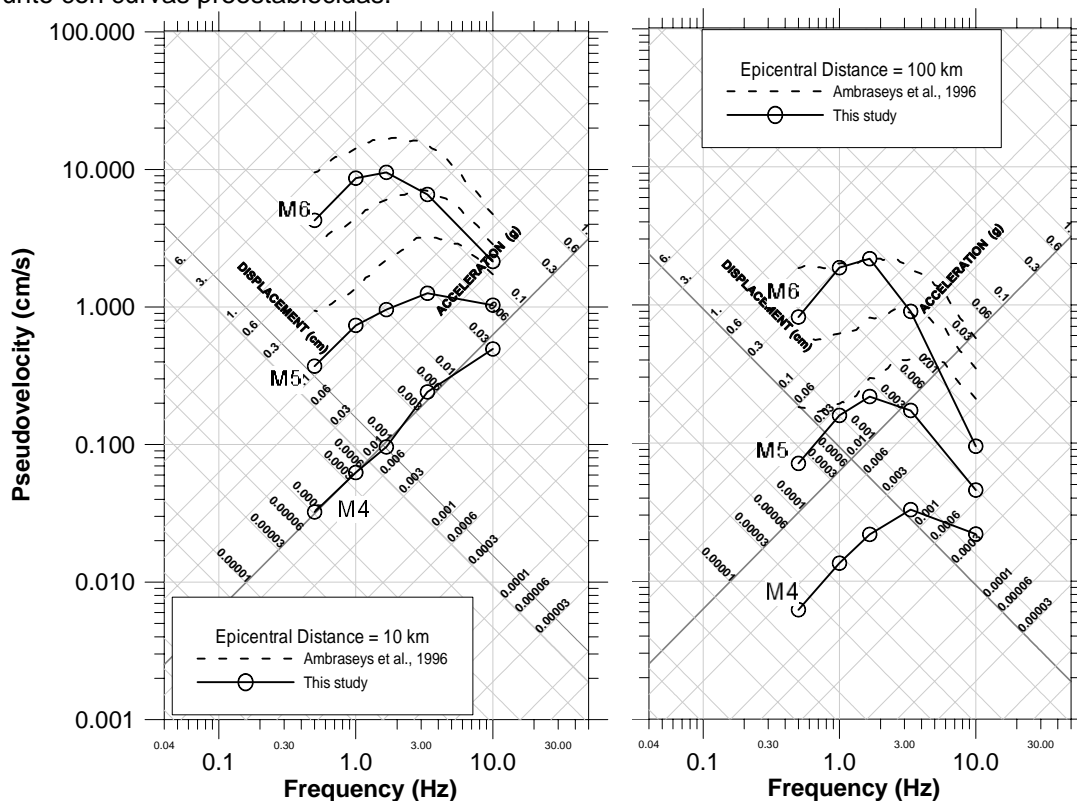


Figura 11. Representación de las ecuaciones obtenidas para el espectro de aceleraciones ($h_o=10$ km) transformadas al pseudoespectro de velocidades (5% amortiguamiento) junto con curvas predictivas del espectro de aceleraciones.

6. Datos de sismos recientes no incluidos en la curva predictiva

En este apartado se comparan datos de sismos recientes en áreas coincidentes con el área de los datos seleccionados para este estudio (Lourdes, 17/11/2007, $M_I=5.1$) y sismos de áreas adyacentes próximas con magnitudes superiores al rango de validez de la curva propuesta (Alhucemas, 24/02/2004, $M_6.5$; Cabo S. Vicente, 12/02/2007, $M_6.3$).

6.1. El sismo de Alhucemas

El sismo de Alhucemas tuvo lugar el 24 de Febrero de 2004. Las magnitudes reportadas para este sismo son : $M_{WIGN} = 6.2$, $m_{bIGN} = 6.1$ y $M_{ICSEM} = 6.5$. En la Figura 12 se muestran los datos acelerométricos del IGN representados junto con la curva predictiva de este estudio y la curva predictiva más actual (Ambraseys et al., 2005). En este caso los datos para una magnitud $M_w = 6.2$ quedan sobreestimados por la predicción de Ambraseys et al., 2005. Para la magnitud local $M_I = 6.5$, la predicción de la curva propuesta en este estudio los datos quedan bien descritos, aunque cabe tener en cuenta que esta magnitud es una extrapolación de los márgenes de validez de la curva ($M_{3.8-5.2}$).

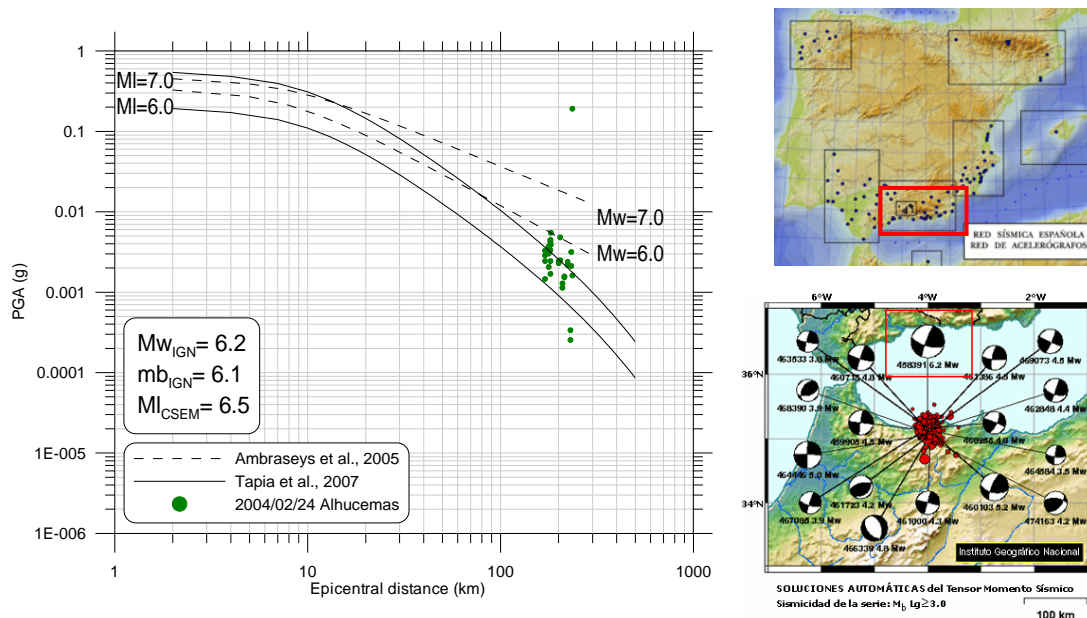


Figura 12. Sismo de Alhucemas. (Izq) Datos de aceleración del IGN (comp. horizontales) junto con la curva predictiva propuesta en este estudio y la curva predictiva de Ambraseys et al. (2005). (Dcha, arriba) En rojo, las estaciones que registran los datos del gráfico. (Dcha, abajo) Resolución del mecanismo del sismo provisto por IGN.

6.2. El sismo de Lourdes

Este sismo ocurrió el 17 de noviembre de 2006 en el área de Lourdes. Este evento tuvo una magnitud de $M_{WIGN} = 4.5$, $m_{bIGN} = 4.8$ y $M_{IGC} = 5.1$. En este caso se recopilan datos acelerométricos del IGN, del IGC y del RAP. Las estaciones acelerométricas que registran este sismo están mayoritariamente situadas al este del epicentro, en los Pirineos. Se han extraído también valores de aceleración del tratamiento de las señales sísmicas de la red sísmica broadband del IGC. Todos estos datos junto con la curva propuesta en este estudio y Ambraseys et al. (2005a) se presentan en la Figura 13. Se observa que los datos presentan cierta dispersión. Los datos en campo cercano no se decantan por ninguna de las predicciones. Para distancias superiores a 100 km los datos se alinean mejor con la curva propuesta en este trabajo.

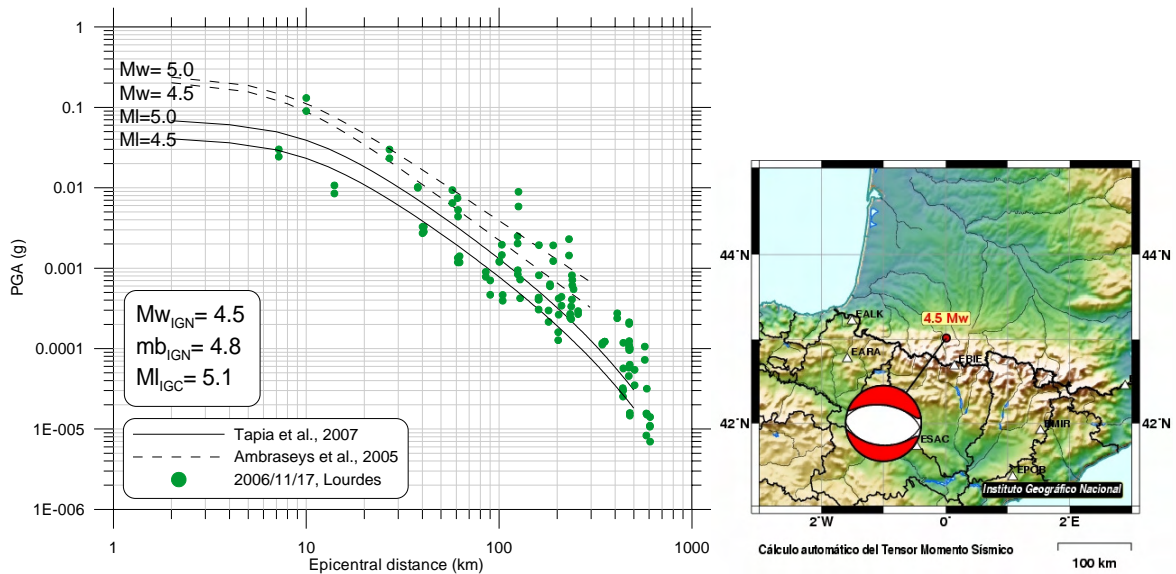


Figura 13. Sismo de Lourdes. (Izq) Aceleraciones máximas horizontales pertenecientes a estaciones del IGN, RAP e IGC, junto con la curva predictiva propuesta en este estudio y la curva predictiva de Ambraseys et al. (2005). (Dcha) Resolución del mecanismo del sismo provisto por IGN.

6.3. El sismo de cabo San Vicente.

El sismo de cabo San Vicente ocurrió el 12 de febrero de 2007 y es excepcional por su magnitud, $Mw_{IGN} = 6.1$, $mb_{IGN} = 6.3$, ya que en la región no se producía un sismo de esas características desde 1969.

Los datos acelerométricos recopilados por IGN se muestran junto a curvas predictivas en la Figura 14. En este caso los datos están mejor predichos por las curvas Ambraseys et al. (2005).

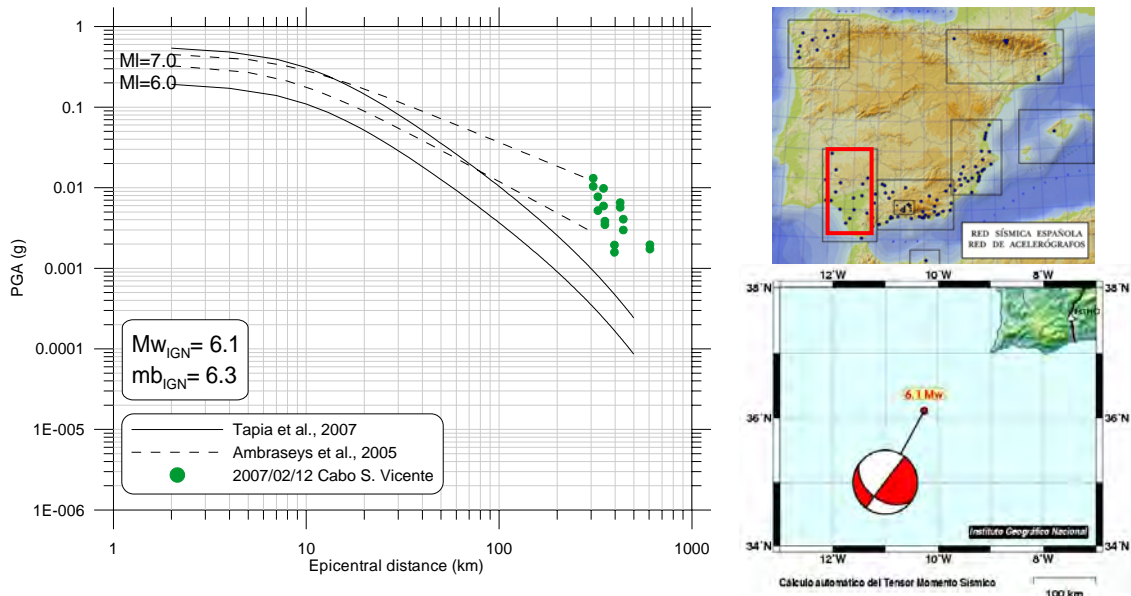


Figura 14. Sismo de cabo San Vicente. (Izq) Datos aceleración de IGN junto con la curva predictiva propuesta en este estudio y la curva predictiva de Ambraseys et al. (2005). (Dcha,arriba) En rojo, las estaciones que registran los datos del gráfico. (Dcha,abajo) Resolución del mecanismo del sismo provisto por IGN.

7. Conclusiones

En este trabajo se ha aprovechado la existencia de registros de aceleración en el área del Oeste del Mediterráneo con magnitudes moderadas entre M4 y M6 para la observación de la atenuación sísmica y el posterior uso de estos datos (componentes horizontales) para el ajuste de curvas predictivas del movimiento sísmico.

Los registros se preprocesan homogéneamente, se les corrige de línea de base y se filtran entre 0.25 y 25Hz. Los registros que se analizan y no tienen suficiente calidad se desechan. De los registros pretratados se extrae posteriormente el valor máximo de aceleración y se les calcula los respectivos espectros de aceleración al 5% de amortiguamiento.

La representación de estos datos permite observar que presentan una atenuación marcada con la distancia y una dependencia con la magnitud como era de esperar. Su comparación con curvas predictivas de la atenuación sísmica preestablecidas (Ambraseys et al., 1996 y 2005, Sabetta y Pugliese, 1996; Cabañas et al., 1999; Cantavella et al., 2004, Skarlatoudis et al., 2003) muestra atenuaciones superiores que algunas de las curvas europeas y otras no describen al completo el régimen de atenuación sísmica que los datos presentan en distancia y magnitud. En concreto, como resultado de este análisis comparativo se observa como los datos italianos muestran un comportamiento diferenciado del resto lo cual determina su exclusión para el posterior ajuste de curvas predictivas del movimiento sísmico.

Con los datos de las regiones del sureste de la Península Ibérica, la región pirenaica y el sur de Francia (sismo de Niza), que en definitiva cubren el Oeste del Mediterráneo, se ajustan diferentes curvas predictivas para el valor máximo de aceleración (PGA) y para el espectro de aceleraciones (SA). Estas curvas están expresadas en magnitudes locales y distancias epicentrales, con una validez en magnitud ente 3.8 y 5.2 y entre 6 y 542 km en distancia. El rango de validez en magnitudes no es muy amplio, pero la validez en distancias es mayor que las curvas predictivas preestablecidas comentadas. Esta curva predictiva que tiene en cuenta registros pertenecientes a los sismos más importantes del Oeste Mediterráneo pretende ser una alternativa a curvas preestablecidas para la región.

En los resultados se da valor al término de atenuación anelástica que jugaría un papel importante para distancias mayores de 100 km. Las curvas predictivas para el espectro de aceleraciones representan una propuesta completa de predicción del movimiento sísmico para la región y para los rangos de validez considerados.

La comparación de los resultados con nuevos datos provenientes de sismos recientes (no incluidos en la obtención de las curvas predictivas) muestra varias conclusiones. El sismo de Alhucemas del 2004 y el sismo de Cabo San Vicente del 2007 son dos sismos de magnitudes similares que han sido registrados por estaciones acelerométricas del sur de la Península. El sismo de Alhucemas se registra mayoritariamente por estaciones del sureste de la Península y el sismo de Cabo S. Vicente por estaciones del suroeste de la Península. La representación de sus aceleraciones muestra comportamientos diferentes, una atenuación menor para el trayecto correspondiente al sismo del Cabo S. Vicente. En el caso de Alhucemas la curva aquí propuesta ajustaría bien los datos y en cambio, para el sismo de Cabo S. Vicente los infravaloraría. Para el sismo de Lourdes se observan ciertas dispersiones que no permiten discernir qué curva predictiva es más adecuada. Si bien, a distancias mayores que 100 km se intuyen atenuaciones más acordes con la curva propuesta en este trabajo.

Como propuestas de trabajo futuro se pretende incluir las clases de suelos en la formulación de la ecuación predictiva del movimiento sísmico, de forma que en nuevos ajustes con datos de calidad sobre suelos haría disminuir los márgenes de error y se reduciría la dispersión observada en los datos acelerométricos.

8. Referencias:

- Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sarma, S. K. and Smit, P. M. (2005). Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 3, 1, Jan 2005, 1–53pp.
- Ambraseys, N. N., Simpson, K. A., and Bommer, J. J. (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 371-400pp.
- Bragato, P.L. and Slejko, D. (2005). Empirical ground-motion attenuation relations for the Eastern Alps in the magnitude range 2.5-6.3. *Bull. Seism.Soc. Am.*, 95,1, 252-276 pp.
- Cabañas, L., Benito, B., Cabañas, C., López, M., Gómez, P., Jiménez, M. E. and Álvarez, S. (1999). Banco de Datos de Movimiento Fuerte del Suelo. *Aplicaciones. Física de la Tierra*, 11, 113-139pp.
- Cantavella, J.V., Herraiz, M., Jiménez, M.J., García, M. (2004). Seismic attenuation in the SE of the Iberian Peninsula. *Proceedings of the Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica (S07.23)*.
- Drouet, S., Souriau, A. and Cotton, F. (2005). Attenuation, Seismic moments and site effects for weak motion events. Application to the Pyrenees. *Bull.Seism.Soc.Am.* 95, 5, 1731 - 1748 pp
- Dufumier, H. (2002). Synthesis of magnitude and focal mechanism computations for the M 4.5 earthquakes in France for the period 1995-2000. *Journal of Seismology*, 6, 163-181 pp.
- GSHAP. (1999). The Global Seismic Hazard Program, 1992-1999. *Annali di Geofisica*, Vol.42, n.2
- Marin, S., Avouac, J-P., Nicolas, M. and Schlupp, A. (2004). A probabilistic approach to seismic hazard in metropolitan France. *Bull. Seism.Soc. Am.*, 94,6, 2137-2163 pp.
- Sabetta, F. and Pugliese, A. (1996). Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, n°2, 337-352 pp.
- Skarlatoudis, A.A., Papazachos, C.B., Margaris, B.N., Theodulidis, N., Papaioiannou, Ch., Kalogeras, I. And Karacostas, V. (2003). Empirical peak ground motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece. *Bull.Seism.Soc.Am.* 93, 2591-2603 pp.
- Tapia, M (2006). Desarrollo y aplicación de métodos avanzados para la caracterización de la respuesta sísmica del suelo a escala regional y local. Tesis Doctoral por la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). (<http://www.tesisenxarxa.net/TDX-1109106-121030/>)
- Theodulidis, N. (1998). Peak Ground acceleration of small earthquakes: Analysis of Euroseistest, Greece, data. In: Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (Editors). *The effects of surface geology on seismic motion*. 1998 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 5809 030 2.
- Theodulidis, N. and Papazachos, (1992). Dependence of strong motion on magnitude-distance, site geology and macroseismic intensity for shallow earthquakes in Greece: I, Peak horizontal acceleration, velocity and displacement. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 11, 387-402pp.

Agradecimientos

Los autores agradecen la difusión de datos acelerométricos al Instituto Geográfico Nacional (IGN), a la Réseau Accélérométrique Permanent (RAP) y al Centre d'Estudis de la Neu i de la Muntanya/Centre de Recerca en Ciències de la Terra (CENMA/CRECIT).

Efectos locales.

S. ÁLVAREZ-RUBIO, H.B. HAVENITH Y D. FÄH “Seismic ground motion estimation in Alpine Valleys (Valais, Switzerland): modelling and response spectra”

L. CABAÑAS, J.B. BRAVO, J. V. CANTAVELLA Y J.M. ALCALDE “Caracterización de los emplazamientos de la red de aceleración del IGN en el S.E. de España, mediante la técnica HVSR”

D. CLAVERO TOLEDO “Microzonación sísmica del término municipal de Málaga, basada en el coeficiente del terreno c”

J.L. CLAVERO Y C. MORA “Riesgo de licuefacción en Torre del Mar”

M. FERICHE, F. VIDAL, G. ALGUACIL, J.M. AZAÑÓN, M. NAVARRO, E. OCAÑA, A. GARCÍA Y A. ONTIVEROS “Factores de amplificación sísmica en granada usando acelerogramas reales y sintéticos”

A. GARCÍA-JEREZ, F. LUZÓN, M. NAVARRO, T. ENOMOTO Y J. A. PÉREZ-RUIZ “Un método alternativo para la determinación experimental de velocidades de onda Rayleigh y Love a partir de registros de microtemores en una *array* circular”

A. GARCÍA-JEREZ, M. NAVARRO, F. LUZÓN Y J. A. PÉREZ-RUIZ “Obtención de modelos de velocidad de onda s a partir de las características de las ondas superficiales mediante combinación de inversión linealizada y métodos de búsqueda aleatoria”

J. GARCÍA-MAYORDOMO, J.M. INSUA Y L.I. GONZÁLEZ DE VALLEJO “Análisis preliminar del efecto sitio en La Laguna (Tenerife)”

M.J. GARCÍA RODRÍGUEZ, B. BENITO, J.A. MALPICA Y M.C. MORILLO “Evaluación de la peligrosidad a los deslizamientos en un SIG empleando técnicas de regresión logística”

C. LÓPEZ CASADO, J. HENARES Y J.A. PELÁEZ “Evaluación de la dependencia azimutal y del ángulo de incidencia en el cálculo de efectos locales de sitio”

A. MACAU, S. FIGUERAS, T. SUSAGNA, B. COLAS, B. LE BRUN, A. BITRI, J. CIRÉS, M. GONZÁLEZ Y A. ROULLÉ “Microzonación sísmica en el Pirineo Oriental en términos de aceleración y intensidad macrosísmica”

J. MULAS, D. PONCE DE LEÓN Y F. FRESNO “Cartografía de peligrosidad sísmica a escala 1:50.000, considerando las condiciones locales del suelo. Recomendaciones para la elaboración de directrices de ordenación territorial”

J.A. PÉREZ RUIZ, F. LUZÓN Y A. GARCÍA-JEREZ “Mecanismo de paralelización de un método de diferencias finitas para la estimación de la respuesta sísmica de modelos geológicos realistas”

A. RIBÓ, M.J. JIMÉNEZ, M. GARCÍA-FERNÁNDEZ, F. MERONI Y S. MOLINA “Desarrollo SIG para la caracterización geotécnica de la Vega Baja (SE de la Península Ibérica) y su aplicación a estudios de microzonificación sísmica”

V. SCHMIDT, A. MOYA, Á. CLIMENT, I. BOSCHINI Y W. ROJAS “Microzonificación sísmica de San José, Costa Rica”

M. TAPIA, A. MACAU, S. FIGUERAS, P. FRANEK “Modelización 1D Y 2D de la propagación de las ondas sísmicas en el valle de la Cerdaña (Cataluña)”