

Propuesta de clasificación geotécnica del "Efecto Sitio" (Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia

Proposed Geotechnical-amplification classification of geological materials in Murcia.

M. Tsige e I. García Flórez

Departamento Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas Universidad Complutense de Madrid. meaza@geo.ucm.es

ABSTRACT

In this paper a geotechnical-siesmic amplification classification based on geological data is proposed for the Murcia region, (SE Spain). The structural damages caused during earthquake are controlled by local geological condition especially surface geology conditions and topography. The presence of some kind of soil type could produce increase in the intensity as a consequence of seismic wave amplification. The factor of amplification which can duplicate or triplicate the seismic waves is directly related to the geotechnical (dynamic) properties of geological materials. Regarding this fact, we have carried out geotechnical classification of the geological materials, in order to see their possible contribution to this local ground amplification. According to this classification the amplification effect in the earthquake area varies from nil, where bedrock is exposed to high where Plio-Quaternary fluvial and alluvial sediments are present.

Key words: Geotechnical classification, siesmic amplification, Región de Murcia.

Geogaceta, 40 (2006), 39-42
ISSN: 0213683X

Introducción

La naturaleza y la distribución de los daños que se pueden producir en las infraestructuras con la ocurrencia de un terremoto, está muy influenciada por la respuesta del terreno frente a cargas cíclicas, como consecuencia de lo cual se produce una modificación de la señal sísmica (Aki, 1988, Seed *et al.*, 1997). La modificación de esta señal sísmica debida a la influencia de las condiciones geológicas y topográficas, se conoce como *efecto de sitio* y consiste en la amplificación de dicha señal en varios ordenes de magnitud. El estudio de la respuesta sísmica del suelo es un campo de interés en el análisis de riesgo sísmico y en el diseño sismorresistente y está siendo objeto de numerosos trabajos sobre todo tras los desastres de recientes terremotos clasificados como de muy destructivos (Northrig, 1994, Kobe, 1995, Turquía, 1999, El Salvador, 2001 entre otras).

Un estudio completo del *efecto de sitio* requiere considerar todos los aspectos además de las características de la señal sísmica (composición, dirección de la radiación incidente etc.). Sin embargo, dada la complejidad del fenómeno, en muchas ocasiones los estudios se realizan asumiendo simplificaciones y considerando solamente alguno de los aspectos anteriormente mencionados. En el presente trabajo se estudia únicamente el *efecto sitio* en lo que se refiere a la amplificación de la señal

sísmica, debido a las características geológicas y la composición litológica de las formaciones superficiales.

La presencia de terrenos, considerados geotécnicamente como blandos, próximos a la superficie del terreno produce un aumento considerable de los daños generados por terremotos en las infraestructuras situadas sobre ellos, al condicionar la amplificación de las ondas sísmicas en un rango de periodos de vibración (períodos altos) de los materiales, que coincide con el periodo de vibración de las estructuras. La respuesta y la magnitud de esa amplificación de la señal está controlada principalmente por las propiedades geotécnicas de los materiales geológicos, especialmente

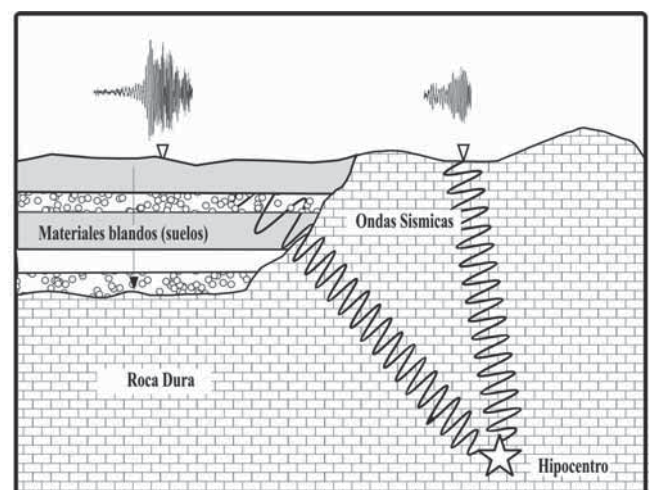
por sus características dinámicas, así como el espesor de las capas y la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso, (Aki, 1988, Borchardt, 1994, Seed *et al.*, 1997).

Estos fenómenos también suelen provocar grandes movimientos de masas de tierras (terremoto de El Salvador, 1985 y 2001).

Cuando se produce una sacudida sísmica se libera una gran energía de deformación almacenada. Esta energía se transmite por el interior de la tierra (rocas) en forma de ondas sísmicas que normalmente se atenúan con la distancia al foco emisor y con el tiempo. Sin embargo, cuando las ondas atraviesan determinados tipos de terrenos (por ejemplo suelos blandos, no conso-

Fig. 1.- Esquema de paso de las ondas sísmicas en terrenos con distinta competencia

Fig. 1.- Seismic wave pass through terrains of different hardness



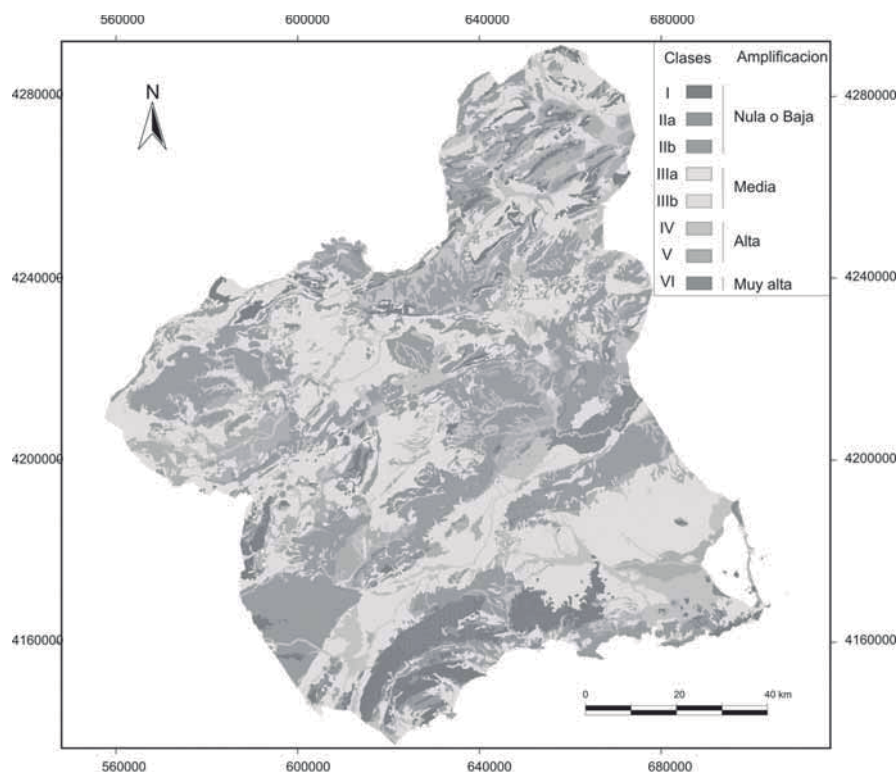


Fig. 2.- Mapa Geotécnico-amplificación de la Región murciana basado en datos geológicos y geotécnicos 1:200.000

Fig. 2.- Geotechnical-amplification map of Murcia based on geological and geotechnical data 1:200.000

lidad) el movimiento o la señal de entrada se amplifica de forma muy relevante. En la figura 1 se esquematiza un ejemplo del paso de las ondas sísmicas en terrenos de distintas competencias. Este fenómeno no solo produce un aumento de la amplitud de las ondas sino también se prolonga la duración de la sacudida sísmica y se modifica su contenido frecuencial.

Desde el punto de vista de la actividad sísmica la Región Murciana es un área con actividad sísmica clasificada de *importante a moderada*, con la existencia de varias fallas activas recientes (Martínez-Díaz, 1999, ITGE y Consejería de Política Territorial y Obras públicas, 1995) y es también considerada como tal por la Norma Sísmica Española (NCSE-02, 2002), para un período de retorno de 500 años.

A esta problemática hay que sumar el rápido crecimiento de poblaciones situadas mayoritariamente sobre depósitos litorales en los que se pueden dar fenómenos *efecto sitio*, no solo de amplificación de la señal, sino también de licuefacción de terrenos.

En algunos trabajos anteriores ya se señala la posibilidad de amplificación sísmica de estos terrenos (Ibargüen y Rodríguez Estrella, 1996). Como ejemplo cabe destacar el caso del reciente terremoto de La Paca (Murcia) de Enero de 2005, en el que se produjeron importantes daños en las edificaciones a pesar de la escasa

magnitud del sismo (m_{blg} 4.7), debido en parte, a la existencia en la zona de depósitos recientes (Benito *et al.*, en prensa). Hay que señalar también, que en otras localidades próximas (Adra en Almería), Alcalá-García *et al.*, (2002), señalan la existencia de materiales geológicos con una posibilidad de amplificación muy elevada.

Clasificación geotécnica-amplificación

Para la estimación de los efectos de amplificación debido a las condiciones geológicas (litológicas) se emplean generalmente varios métodos tanto empíricos, como de modelización numérica (en casos en los que se conoce con gran detalle los comportamientos dinámicos, el espesor y la profundidad del sustrato rocoso, además del espectro inicial). Dentro de los métodos numéricos empleados para estimar el efecto del suelo frente a un movimiento sísmico se emplean programas informáticos conocidos como SHAKE, QUAD y SIREPO /4/.

Sin embargo, antes de la aplicación de los efectos de la amplificación a los estudios empíricos y de modelización numérica de los efectos del suelo en las señales sísmicas, es necesario la realización de una clasificación o agrupación de los materiales geológicos superficiales en categorías de respuesta sísmica similar. A este respecto se

han establecido diversas normativas y recomendaciones en varios países, que establecen varios tipos de suelos con respuestas sísmicas similares (NCSE-02, Eurocódigo 8, BUC (Building Code), NHERP, 2003).

Dada la complejidad de la obtención de los parámetros "in situ", tanto mediante ensayos de campo como de ensayos de laboratorio, debido especialmente a las variaciones bruscas de los materiales geológicos tanto en la vertical como en la horizontal, así como de las dificultades de interpretación mediante las correlaciones empíricas, los estudios, en muchas ocasiones, se realizan asumiendo parámetros de respuesta sísmica genéricos (como es la Velocidad de corte, V_s), en función de la situación, la edad, la composición y el origen de las formaciones geológicas.

En este trabajo se ha realizado la Clasificación Geotécnica-Amplificación del terreno de la Región de Murcia teniendo como base fundamental los datos geológicos recogidos en el Mapa Geológico de la Región de Murcia (IGME, 1993). Para ello se han empleado un conjunto de datos tales como: litología, grado de fracturación, génesis, textura, ambiente deposicional, grado de saturación y espesor de los depósitos blandos. También se han consultado los datos referentes a comportamientos geotécnicos de los materiales. (IGME y Consejería de Política Territorial y Obras Públicas, 1995 y BORM, 2001).

La Región de Murcia presenta una gran variedad litológica como resultado de su compleja historia geológica, donde aparecen varios dominios de diferente génesis y edad. Afloran desde materiales metamórficos del Paleozoico, sedimentos del Triásico y Mesozoico, hasta materiales de los dominios Subbético y Bético del complejo Nevado Filábride, Complejo Alpujárride y Complejo Maláguide (IGME, 1994). Junto a ellos y como resultado de la actividad sedimentaria y tectónica se han desarrollado grandes cuencas y depresiones en las que se han depositados sedimentos Neógenos de origen marino y continental. El espesor de estos materiales es muy variable a lo largo de la región, oscilando entre los 200 metros en la zona Meridional (cuencas de Cartagena), hasta escasos metros en la parte Central. También aparecen rocas volcánicas recientes (Tortonense-Cuaternario) de consistencia dura, representadas por basaltos, andesitas, jumillitas, fortunitas, etc.

Los depósitos recientes de edad Cuaternaria adquieren gran importancia desde el punto de vista de respuesta sísmica. Estos materiales se encuentran ampliamente desarrollados en toda la Comunidad Autónoma y están representados

Clases (categoría de terreno)	Descripción geotécnica	Descripciones geológicas	Vs (m/s)	Amplificación relativa / numérica
I	Rocas muy duras y poco fracturadas.	Rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias de edad paleozoica, jurásica y triásica: Andesitas, Dacitas, Basaltos, Fortunitas, Jumillitas, Veritas, Lamproitas; Esquistos, Mármoles; Dolomías con sílex.	>1500	NULA / 0.8
IIa	Roca dura y fracturada. Intercalación de rocas muy duras y duras.	Rocas metamórficas y sedimentarias: Filitas y Cuarcitas, intercalación de Dolomías y Calizas, Areniscas, Grauvacas y Calcareniticas.	1500-800	MUY BAJA / 1.0
IIb	Roca dura-media muy fracturada. Intercalada con algunas capas de rocas blandas.	Rocas fundamentalmente sedimentarias de distinta edad y origen: Calizas, Calizas oolíticas y Calizas margosas, Dolomías y Conglomerados.	750-450	BAJA / 1.0
IIIa	Roca de resistencia media muy fracturada y con abundantes intercalaciones de rocas más blandas (margas y arcillas).	Rocas sedimentarias, fundamentalmente Margas (edades: Jurásico, Cretácico y Terciario): Margas, Margo-calizas y Margas calcáreas.	450-350	MEDIA / 1.2
IIIb	Roca blanda con arcillas expansivas. H > a 30 mts. Suelos no cohesivos poco cementados. H > a 10 mts.	Rocas fundamentalmente triásicas del Keuper: Arcillas abigarradas y Yesos. Sedimentos terciarios: Arcillas margosas, Areniscas turbidíticas y Arcillas verdes oscuras/ Cantos y Costras. Conglomerados del Cuaternario.	350-250	MEDIA / 1.8
IV	Suelos no cohesivos inestables.	Sedimentos cuaternarios de origen fluvial y coluvial, piedemonte: Gravas, Arenas, Cantos y Costras.	250-180	ALTA / 2.0
V	Suelos cohesivos blandos; Arcillas (Ip > 40). No Cohesivos: Limos y Arenas, poco compactos. H > 10 metros.	Sedimentos cuaternarios de origen fluvial, dunas sedimentos eólicos. Depósitos expansivos de margas diatomíticas. Arenas y Limos, Arenas y Conchas.	180-150	ALTA / 2.5**
VI	Suelos muy blandos, H > 3 metros. Suelos saturados y zonas con nivel freático a < de 10 mts.	Depósitos de playa, cauces de ríos y marismas: Fangos, Limos y Arcillas.	<150	MUY ALTA / 2.5** Suelos especiales

Tabla I.- Clasificación Geotécnica-Amplificación de lo materiales geológicos de la Región murciana.

Table I.- Geotechnical-Amplification classification of geological materials in Murcia.

por varios dominios morfoestructurales que tienen un control neotectónico importante tanto en lo que se refiere a su morfología como en su distribución (IGME, 1994, Goy *et al.*, 1993, Silva, *et al.*, 1992 y Martínez Díaz, 1999, Manteca-Martínez *et al.*, 2004). En general pertenecen a grandes abanicos aluviales, glaciares, sedimentos coluviales y depósitos de piedemonte. También aparecen depósitos fluviales, fluvio-palustres, suelos residuales y arcillas de carstificación (IGME, 1993). Existen depósitos de dunas litorales y de marismas con sedimentos saturados o semi-saturados, así como terrenos ganados al mar de tipo antrópico, que por lo general tienen consistencias bajas a muy bajas. Todos estos materiales presentan una gran variedad litológica desde el punto de vista composicional y textural.

Esta variabilidad litológica da lugar a una gama muy amplia de comportamientos geotécnicos de los materiales que van desde rocas muy duras y competentes (que no suelen amplificar la señal sísmica), hasta terrenos blandos y muy blandos que pueden amplificar dicha señal de forma relevante.

En la tabla I, se presenta la **Clasificación Geotécnica-Amplificación** de los materiales geológicos de la Región de Murcia donde se ha diferenciado ocho ca-

tegorías de terrenos en función de su respuesta sísmica. Como se observa en dicha tabla, en los materiales recientes que presentan una gran variabilidad en cuanto a su consistencia, ha sido necesario realizar una división más amplia que la que se recomienda en la Norma, NCSE-02. Para ello se han empleado los criterios y recomendaciones de (Seed *et al.*, 1997 y Borcherdt, 1994) debido a su gran aceptación en el ámbito internacional. Éstas, aparte de ser clasificaciones empleadas para regiones con una gran variedad litológica, consideran además otras características que influyen en la respuesta sísmica del terreno como por ejemplo, la composición, el grado de saturación y espesor del sustrato, etc.

Tipo de terreno / Clase	Formula empleada (Imai, 1981)	Valores medios de N _{spt} (Skempton, 1984, Meyerhof, 1956)	Valores de Vs
Fangos, Arcillas y Limos blandos/ VI	Vs = 102N ^{0.292}	<10	<130
Arenas, dunas y Arenas con Arcilla/ V	Vs = 80.6N ^{0.331}	15-25	150-200
Arenas y Gravav/VI	Vs = 114N ^{0.294}	25-30	180-250

Tabla II.- Valores de Vs para los suelos Tipo IV, V y VI de la CARM calculadas mediante el valor de N_{spt}.

Table II.- Vs value obtained using the N_{spt} for the IV, V and VI soil classes.

Una vez obtenida la clasificación en las ocho categorías consideradas, se ha estimado el grado de amplificación mediante el valor de la Velocidad de Corte media (Vs) del terreno. La asignación de los valores de velocidades de corte (Vs) para cada categoría, se ha realizado en función de las características geológico-geotécnicas de las distintas formaciones geológicas.

En las clases IV, V y VI el valor de la Vs ha sido calculado mediante la fórmula empírica de Imai (1981) en función del valor de N_{spt} y la naturaleza de los materiales (Tabla II).

Por último, en cada una de las categorías, se ha estimado el factor de amplificación según la fórmula empírica de (Borcherdt, 1994) empleando los valores mínimos de la Velocidad de corte de cada una de las clases de terreno y un *input* sísmico general de 0.1 para toda la Región.

La función base para el cálculo de la amplificación viene dada por:

$$F_u = \left(\frac{v_o}{v} \right)^{m_u}$$

Para periodos cortos.

$$F_v = \left(\frac{v_o}{v} \right)^{m_v}$$

Para periodo medio.

Donde: F_u factor amplificación para periodos cortos; F_v factor amplificación para periodo medio; v velocidad de corte del sitio para 30m en m/s (en su ausencia Vs de los materiales superficies); v_o velocidad media de corte de sustrato en m/s; m_u, m_v = factores implícitos en el factor de amplificación del suelo para periodos cortos y medios que dependen del *input* sísmico.

Del estudio de esta clasificación se puede resumir que en la Región de Murcia aparecen terrenos con muy diferentes comportamientos en relación a la respuesta sísmica. Aparecen rocas que van de duras a muy duras en superficie donde el *efecto sitio* por condiciones litológicas apenas tendrá relevancia, y por otra parte existen materiales recientes distribuidos por toda la región que presentan diferentes grados de importancia con respecto a la amplificación (ver Tabla I).

La representación espacial de estas clases de materiales con respuesta sísmica similar se ha plasmado en un mapa a escala 1:200.000 donde quedan delimitadas las áreas con menor y mayor grado de amplificación (Fig. 2). Como base para la realización de este plano se ha empleado el Mapa Geológico Digital de la zona de Murcia escala 1:200.000.

En base a dicho mapa e implicaciones prácticas de la Clasificación Geotécnica-Amplificación propuestos en este trabajo, la Región de Murcia puede ser dividida en varias zonas con diferentes grados de amplificación.

- ZONAS CON AMPLIFICACIÓN NULA O BAJA: Corresponde a áreas ocupadas por rocas duras a muy duras de distinta edad y origen (incluye las clases I y II de la Tabla I), cuyos efectos en la amplificación de las ondas sísmicas son mínimos o nulos. Aunque aparecen por toda la región, ocupan grandes extensiones al Oeste, Sur y Suroeste principalmente.

- ZONAS CON AMPLIFICACIÓN MODERADA: En esta segunda zona (clases IIIa y IIIb, de la Tabla I), afloran terrenos que presentan un comportamiento mecánico mixto entre roca blanda y suelo duro a muy duro. Se encuentran fundamentalmente en el tercio Septentrional de la región, en las depresiones intramontañosas, en las cuencas terciarias (Mula, Fortuna, Lorca, Calasparra, Moratalla) y en la parte Este. En estas zonas se espera una amplificación moderada, aunque las respuestas pueden variar notablemente en algunos puntos determinados, en función de su composición litológica, de la presencia de materiales blandos y de su grado de alteración.

- ZONAS CON AMPLIFICACIÓN ALTA: Se distribuyen por toda la región aunque adquieren más importancia hacia el Este y Centro de la misma. Está constituida por los depósitos de arenas flojas con restos orgánicos y caparzones calcáreos que forman el cordón litoral de La Manga del Mar Menor, el Campo de Cartagena y la cuenca del río Guadalentín.

- ZONA ESPECIAL O CON AMPLIFICACIÓN MUY ALTA: Corresponde al área ocupada por suelos muy blandos tipo fango, arcillas y limos sueltos. Se localizan fundamentalmente en el centro de la Región (la vega baja del río Segura), en parte de la Ciudad de Murcia, la zona Norte de la Manga del Mar Menor, y áreas distales de los abanicos aluviales con cauces mal definidos y charcas. Esta zona resulta especialmente problemática desde un punto de vista de respuesta sísmica, no sólo debido a los efectos de amplificación sísmica (que pueden resultar muy altos), sino también, por el posible desarrollo de fenómenos de

licuefacción debido a la posición de la superficie del nivel freático, que por lo general es muy alto (<10 mts).

Conclusiones

La Región de Murcia presenta una geología muy compleja que da lugar a una gran variabilidad litológica y por tanto a comportamientos geotécnicos-sísmicos de los materiales muy diferentes.

La **Clasificación Geotécnica-Amplificación** realizada aporta una información muy relevante debido a que permite la agrupación de la diversidad de los materiales geológicos en categorías limitadas con comportamiento sísmico similar y, que se pueden emplear como información básica inicial para los estudios de planificación territorial, dando una idea general de la situación de las áreas donde el valor de la amplificación por *efecto sitio* tiene que estimarse de forma más detallada.

A pesar del aspecto regional de este estudio (escala 1:200.000), y de la metodología empleada que se considera algo conservadora, lo cierto es que en la CARM existen áreas donde aparecen terrenos que pueden duplicar y en ocasiones triplicar la señal sísmica produciendo una modificación en la amplitud, frecuencia y duración de la vibración.

Estas áreas coinciden con municipios de gran explosión demográfica y que se corresponden con áreas urbanizadas con densidad de población importante (Murcia, Alcantarilla, algunas zonas de Cartagena, Mar Menor, La Manga y Molina de Segura).

Por último, es recomendable para estudios posteriores, analizar la influencia de las variaciones del nivel freático en la amplificación sísmica, especialmente en el área de la ciudad de Murcia y las regiones costeras, ya que continuamente introducen variaciones en las tensiones actuales del suelo. Así mismo, es interesante cartografiar las zonas con posible carstificación, zonas con terrenos ganados al mar y terrenos ocupados por rellenos antrópicos, pues todos ellos son susceptibles de producir grandes amplificaciones en la ocurrencia de terremotos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el IGN de España al que agradecemos su interés y colaboración especialmente a Dº Emilio Carreño.

Referencias

Aki, K. (1988). *American Society of Civil Engineering. Geotechnical Special Publication*, 20, 103-155.
Alcalá-García, F.J., Espinosa, J., Navarro,

M., y Sánchez, F.J. (2002). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 2002, 15, 55-66.
Alfaro, P., Delgado, J., Estévez, A. y López-Casado, C. (2001). *Acta Geologica Hispanica*, 36, 233-244.
Baena, J. (Coor), (1994). Mapa Geológico de la Región de Murcia, 1:200.000. ITGE
Boore, D. M., W. B. Joyner, y T. E. Fumal (1993). *U.S. Geological Survey. Open-File Report*, 93-509.
BORM. NUM 255 (2001). *Guía de planificación de Estudios Geotécnicos en la Región de Murcia*. Consejería de Obras Públicas y Ordenación territorial.
Borcherdt, R. D. (1994). *Earthquake Spectra*, 10, 617-653.
Eurocode (1989). No. 8: *Part 1. Commission of the European Communities*.
Goy J.L., Zazo, C., Bardaji, T. y Somoza. (1993). *Geodinámica Acta*, 6,103-119.
Ibargüen S., J. y Rodríguez Estrella, T. (1996). En: *VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, 2, 407-423
Imai, T. (1981). En: *Proceedings 9th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokio, 2, 257-260.
ITGE, y Consejería de Política Territorial y Obras Públicas de la Región de Murcia, (1995). *Atlas Inventario de Riesgos Naturales de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia*, 138 pp.
Martínez-Díaz, J. (1999). *Neotectónica y tectónica activa del sector Centro-Occidental de la Región de Murcia y sur de Almería (Cordillera Bética-España)*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid. 466 p.
Manteca-Martínez, I. J., Rodríguez Martínez-Conde, J.A., Puga, E., y Díaz de Federico, A. (2004). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 17, 1-2.
Meyerhof, G.G. (1956). *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 82 1-19.
NCSE-02 (2002). *Norma de construcción sismorresistente*. Real Decreto 997/2002, 27 de septiembre. 244 p.
NEHRP (2003). En: *Building Seismic Safety Council*, Washington, D. C. Federal Emergency. FEMA.
Schmidt, H.-G., y Cigan, F. (1990). *European Conference on Structural Dynamics*. Bochum, 113-120.
Seed, H.B., Ugas, C. y Lysmer, J. (1997). *Bulletin Seismological. Society of America*, 66, 221-243.
Silva, P. Hervey, A. M. Zazo y C. Goy, J. L. (1992). *Geomorphology*, 36, 661-673.
Skempton, A. W. (1986). *Gotechnique*, 36, 3, 425-447.