

ANÁLISIS PRELIMINAR DEL EFECTO SITIO EN LA LAGUNA (TENERIFE)

Autores: J. García-Mayordomo¹, J.M. Insua² y L.I. González de Vallejo²

*(1) Laboratorio de Geotecnia. CEDEX. C/Alfonso XII, 3 Madrid 28014
julian.g.mayordomo@cedex.es*

*(2) Dpto. de Geodinámica. Fac. de CC. Geológicas. UCM
insuarev@geo.ucm.es, vallejo@geo.ucm.es*

RESUMEN

Gran parte de la población de San Cristóbal de La Laguna (Tenerife) se emplaza sobre una potente serie de depósitos volcano-sedimentarios de origen fundamentalmente lacustre. Las propiedades geotécnicas de estos depósitos, en general blandos, deben estar relacionadas con la mayor duración e intensidad del movimiento del suelo que perciben los habitantes del valle de La Laguna cuando tiene lugar un terremoto. En este trabajo, partiendo de estudios geológicos y geotécnicos previos, se evalúa el factor de amplificación y la respuesta espectral elástica de tres emplazamientos representativos de acuerdo con las normativas española (NCSE-02) y europea (Eurocódigo-8) y para dos escenarios sísmicos diferentes. Los resultados obtenidos siguiendo ambas normativas presentan importantes diferencias, tanto en la metodología de clasificación de terrenos y asignación de factores de amplificación, como en la forma y amplitud de los espectros de respuesta resultantes. Se puede admitir, en general, que la zona del valle que mayor amplificación del movimiento presentaría durante un terremoto es la central, seguida por la zona suroeste, según la NCSE-02, o la zona noreste según el Eurocódigo-8.

Palabras clave: *amplificación sísmica, efecto sitio, La Laguna, suelos volcánicos, Eurocódigo-8, NCSE-02, Tenerife*

SUMMARY

A major part of San Cristóbal de La Laguna city (Tenerife) is founded on a thick series of volcano-sedimentary deposits of a lacustrine origin mainly. The longer duration and higher intensity of strong ground motion that the dwellers of La Laguna valley feel whenever and earthquake strikes the area is thought to be related to the particular properties of these soft soils. Based on previous geological and geotechnical field work, we assess the amplification factor and construct the elastic response spectra at three representative sites of the valley following NCSE-02 Spanish code and Eurocode-8 provisions and for two different seismic scenarios. Results show significant discrepancies due to differences in the soil classification scheme, designation of amplification factors, and the shape and amplitude of response spectra, in both codes. Both codes predict that the central part of the valley would experience the higher amplification during an earthquake, followed by the southwest part according to NCSE-02, or the northeast part according to Eurocode-8.

Key words: *seismic amplification, site effects, La Laguna, volcanic soils, Eurocode-8, NCSE-02, Tenerife*

Introducción

Los fenómenos de amplificación del movimiento fuerte del suelo durante un terremoto como consecuencia de la respuesta del terreno ante la aplicación de cargas cíclicas, depende estrechamente de sus características geológicas y propiedades

geotécnicas. Esto es lo que se conoce coloquialmente como “efecto sitio”. El efecto sitio es, frecuentemente, el responsable principal de la distribución de los daños más importantes tras un sismo. De modo muy general y simplificado, cuanto menos consolidado sea un suelo mayor amplificación experimentará el movimiento del terreno, y con mayor probabilidad los daños serán mayores. El caso paradigmático y más conocido mundialmente es el del terremoto que asoló México D.F. en 1985. Entre otros factores, como la importante magnitud del evento y su localización lejana que favoreció contenidos frecuenciales bajos, destaca la localización de la ciudad sobre una potente serie de depósitos de origen lacustre.

El valle de La Laguna se localiza en la parte nororiental de la isla de Tenerife (Fig. 1), sobre el que se asienta, en gran parte, la ciudad de San Cristóbal de La Laguna. La naturaleza lacustre y la potencia de los materiales volcano-sedimentarios que rellenan este valle, favorece, a priori, la ocurrencia de fenómenos de amplificación y duración del movimiento del terreno durante la ocurrencia de un terremoto. Estos efectos son sentidos por la población incluso con terremotos de baja magnitud, aunque en la actualidad no hay acelerógrafos emplazados en el valle que registren los movimientos sísmicos.

En este trabajo se analiza la respuesta sísmica del suelo en tres emplazamientos representativos del valle de La Laguna. En primer lugar se describen las características geológicas más significativas de La Laguna y, partiendo de trabajos previos, se establecen las unidades geológico-geotécnicas que componen el relleno de la cuenca. Posteriormente se realiza un breve resumen de la metodología para la clasificación de terrenos y asignación de factores de amplificación en las normativas española (NCSE-02) y europea (Eurocódigo-8), para pasar a caracterizar sísmicamente los tres emplazamientos objeto del análisis. Para ello se establecen dos escenarios sísmicos diferentes, probabilista de periodo de retorno 475 años, y determinista, y se calculan los espectros de respuesta en cada emplazamiento de acuerdo con ambas normativas. Los resultados obtenidos son discutidos de acuerdo con la diferente concepción de las formas espectrales y metodología de asignación de factores de amplificación en ambas normativas.

Marco geológico

Geológicamente, el valle de La Laguna se encuentra situado entre los materiales volcánicos de edad Miocena del Macizo de Anaga en la parte noreste, y las series volcánicas recientes, de edad Plio-Pleistocena situadas en la parte suroeste. Los materiales que forman el Macizo de Anaga son principalmente coladas de lavas basálticas y piroclastos atravesados por una intensa red de diques. Las series volcánicas más recientes situadas al suroeste están formadas por lavas y coladas piroclásticas también basálticas.

Estas dos zonas presentan una clara diferenciación morfológica, siendo la parte nororiental más abrupta y con fuertes relieves formados por valles escarpados, que muestran las huellas de un proceso de desmantelamiento erosivo muy prolongado e ininterrumpido. Por el contrario, la parte meridional presenta una pendiente alta aunque más uniforme orientada hacia el ESE.

El valle de La Laguna presenta una morfología de dirección NE-SO en el que se deposita una serie sedimentaria lacustre que colmató un gran barranco excavado en el macizo de Anaga. La composición principal de esta serie es de arcillas y limos con espesores variables y fuertes cambios laterales de facies. Este depósito fue la consecuencia de la formación de un lago generado por el cierre del barranco originado por una colada volcánica cuaternaria procedente del suroeste (IGME, 1978). La colmatación del valle

genera una amplia superficie de unos 7 km² con un morfología prácticamente plana a una altura de unos 550 m.s.n.m.. La potencia de esta formación sedimentaria está condicionada por la morfología heredada del barranco, llegándose a encontrar espesores superiores a los 40 metros en el centro de la cuenca.

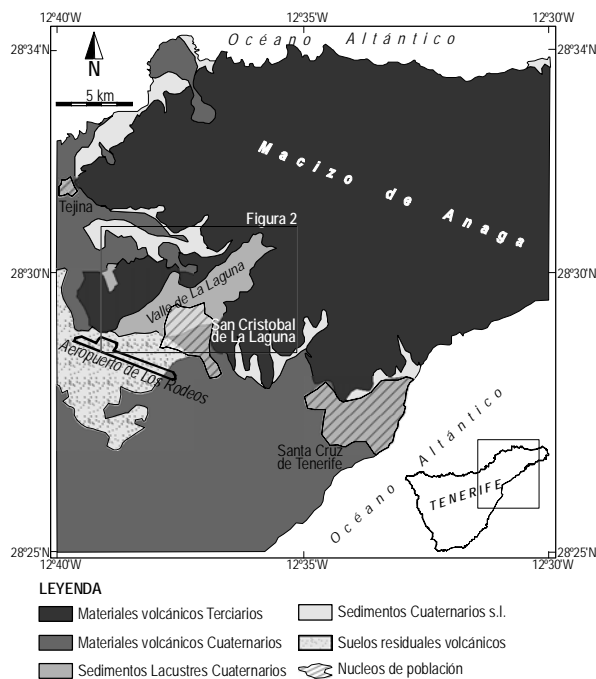


Figura 1. Localización y marco geológico del Valle de La Laguna

Unidades geológico-geotécnicas

González de Vallejo (1979) establece una división de unidades dentro de los depósitos del valle de La Laguna en base a un amplio número de datos del subsuelo, procedentes de sondeos mecánicos, prospección geofísica (SEV), ensayos de laboratorio, ensayos de penetración dinámica (SPT). La distribución en planta de estas unidades se representa en la Figura 2, mientras que en la Figura 3 se muestra, en dos perfiles representativos del valle, su distribución en profundidad y su interrelación. Las unidades que se definen son tres (Fig. 2)

- Formación Las Mercedes (LMF). Ocupa la zona noroeste del valle y está formada por una secuencia de niveles limosos y arcillo-limosos que puede llegar a alcanzar un espesor de hasta 40 m. Esta formación representaría los depósitos de un ambiente fluvio-lacustre que integra los materiales volcánicos erosionados de las laderas circundantes.
- Formación Pozo Cabildo (PCF). Ocupa la zona central de la cuenca y es la formación más representativa de las condiciones lacustres del depósito. Está formada por arcillas y limos, con claro predominio de la fracción arcillosa. La potencia de esta formación puede alcanzar los 30 m en la parte central del valle.
- Formación San Diego (SDF). Esta formación incluye los materiales procedentes del arrastre por arroyada de los suelos meteorizados *in situ* de las laderas circundantes de la zona suroccidental (ver Fig. 1). Está formada por limos y arcillas con un espesor máximo de 7 m depositado sobre el sustrato basáltico.

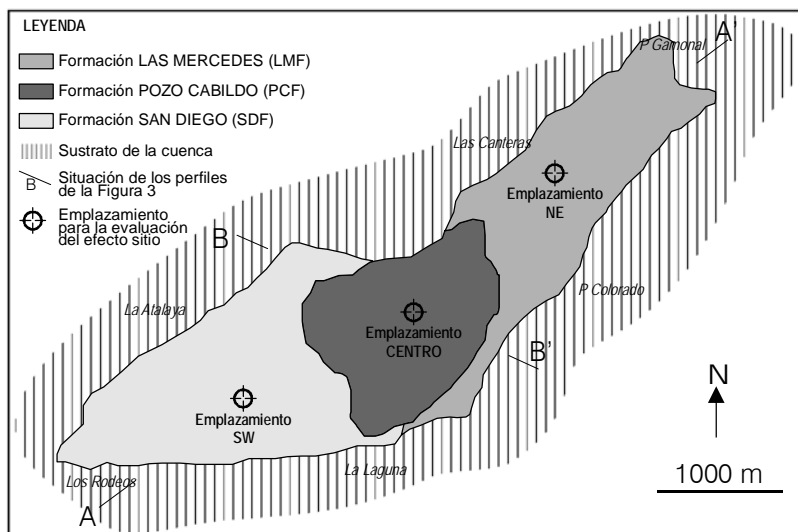


Figura 2. Cartografía de las formaciones geotécnicas definidas en el Valle de La Laguna (González de Vallejo, 1979) sobre la que se sitúan los emplazamientos seleccionados en este trabajo para realizar la evaluación del efecto sitio.

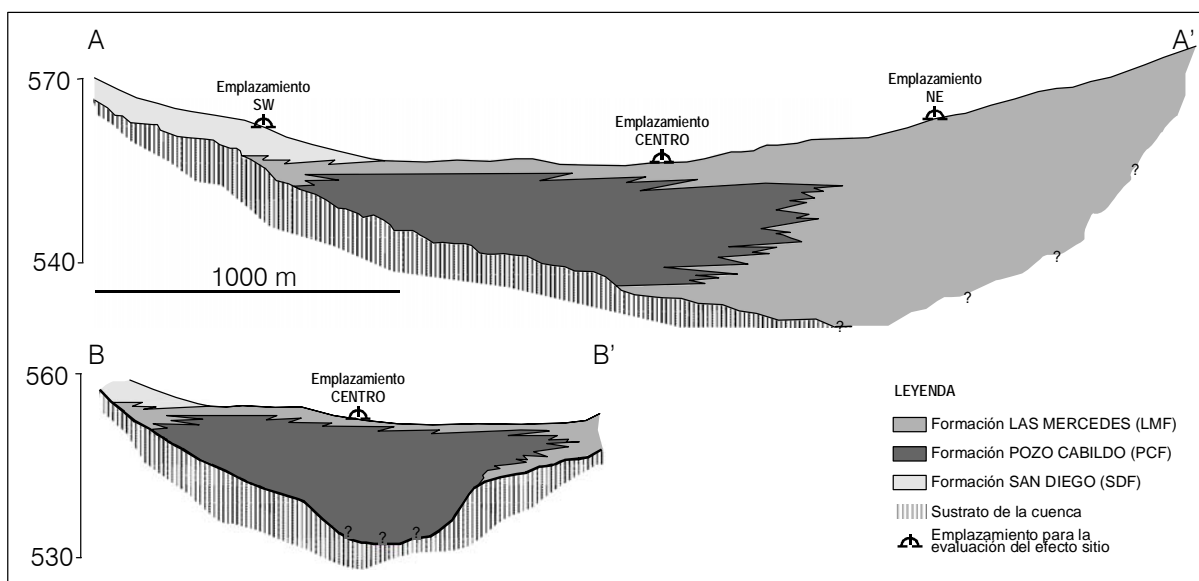


Figura 3. Perfiles geotécnicos representativos del Valle de La Laguna (González de Vallejo, 1979) sobre los que se sitúan los emplazamientos seleccionados en este trabajo para realizar la evaluación del efecto sitio.

Un resumen de las propiedades geotécnicas de las tres unidades definidas en el valle de La Laguna se muestra en la Tabla 1. Estas unidades geológico-geotécnicas presentan variaciones apreciables en sus propiedades geotécnicas, cuestión que obedece a la distinta mineralogía y fábrica de las arcillas que las forman (González de Vallejo *et al.*, 1981).

Uno de los parámetros más representativos de la capacidad de amplificación de un suelo es el de la velocidad de transmisión de ondas de corte (V_s). Dado que no se dispone de este dato medido *in situ*, se ha realizado una estimación por métodos empíricos. Para ello se han utilizado los valores de SPT (Standard Penetration Test) de cada una de las formaciones. Los ensayos SPT son unos ensayos de amplia aplicación en geotecnia, por lo que numerosos autores han aprovechado el gran volumen de datos disponible para hacer correlaciones con los valores de V_s . Es importante señalar que no tenemos constancia de que exista una correlación específica aplicada al tipo de suelos que rellenan el valle de La Laguna, y que las correlaciones existentes se han realizado para materiales generalmente arenosos y de edad muy reciente (Holoceno), orientadas en su mayoría a determinar su potencial de licuefacción (Imai, 1977; Imai y Tonouchi, 1982; Piratheepan y Andrus, 2002; Andrus *et al.*, 2004; Inazaki, 2006). No obstante, y conscientes de la importante incertidumbre que presenta la determinación empírica de la V_s , hemos realizado una estimación del valor medio de V_s representativo para cada formación estudiada (Tabla 1). En la estimación hemos dado mayor peso a los valores procedentes de correlaciones obtenidas para materiales con propiedades geotécnicas más similares a los suelos de La Laguna. Así, estimamos como representativos de la formación LMF valores de V_s entre 228 y 298 m/s; para la formación PCF valores entre 165 y 192 m/s; y para la formación SDF valores superiores a 180 m/s. Estos valores se ajustan bastante bien a los intervalos propuestos por Borchardt (1994) para estimar el efecto sitio en función de la descripción geológica-geotécnica de los suelos.

Tabla 1. Propiedades geotécnicas de las diferentes formaciones del Valle de La Laguna y clasificación del terreno para la evaluación del efecto sitio sísmico. LMF Formación Las Mercedes, PCF Formación Pozo Cabildo, SDF Formación San Diego. G_s densidad de las partículas, S_u resistencia al corte sin drenaje, SPT (N_{30}) valor del golpeo del ensayo de penetración estándar, V_s velocidad media de ondas de corte estimadas en este trabajo empíricamente a partir del SPT (ver texto para más detalles).

Propiedades del terreno	LMF	PCF	SDF
Humedad (%)	30-36	36-41	30-36
Densidad seca (kg/m^3)	1450	1050-1370	1300
G_s (kg/m^3)	2880	2800	-
Fracción Limo (%)	60	42	50
Fracción Arcilla (%)	38	57	49
Límite Líquido	60	78	71
Índice de Plasticidad	32	44	42
S_u (kg/cm^2)	13,0	9,0	5,2
Clasificación USCS	MH	CH	CH-MH
SPT (N_{30})	18-45	10-30	>14
V_s estimada a partir del SPT			
V_s (m/s)	228-298	165-192	>180

Evaluación de la amplificación según NCSE-02 y Eurocódigo-8

Dada la información geotécnica y sísmica disponible la evaluación de la amplificación sísmica por las condiciones geológicas locales de La Laguna se ha realizado de acuerdo a los procedimientos regulados en las normas sismorresistentes española (NCSE-02, 2002) y europea (CEN, 2001). Resulta importante resumir, en primer lugar, los procedimientos propuestos en ambas normas, puesto que presentan diferencias importantes que controlan los resultados obtenidos en este trabajo.

En el Eurocódigo-8 la amplificación por las condiciones locales del emplazamiento se considera de acuerdo al parámetro S (*soil parameter*), cuyo valor depende de la clase de terreno que se considere de acuerdo con la velocidad media de las ondas de corte en los primeros 30 metros de espesor bajo rasante ($V_{s,30}$). A falta de este dato, se pueden considerar otros criterios, como el perfil estratigráfico del emplazamiento, litología predominante, resistencia al corte sin drenaje,... y, fundamentalmente el valor N del golpeo del SPT (cf. Tabla 3.1, Parte 1, Eurocódigo-8). Conocido $V_{s,30}$ se clasifica el emplazamiento en una de las clases tipificadas: A, B, C, D ó E.

El parámetro S representa el factor de amplificación para la ordenada espectral cero –i.e., la aceleración máxima para periodo cero, y se obtiene directamente de dos tablas (cf. Tablas 3.2 y 3.3, Parte 1, Eurocódigo-8) que, además, establecen los periodos que definen la forma del espectro de respuesta elástico. Es muy importante señalar que el Eurocódigo-8 define dos formas espectrales, Tipo I y Tipo II, de acuerdo con el nivel de peligrosidad sísmica que afecte al emplazamiento en cuestión. Para emplazamientos donde se estime que la contribución a la peligrosidad sísmica procede mayoritariamente del aporte de terremotos de magnitud $M_s < 5,5$, se recomienda el espectro Tipo II. En caso contrario el Tipo I.

En la NCSE-02 el efecto de amplificación por condiciones geotécnicas locales se considera de acuerdo al *coeficiente de amplificación* S , cuyo valor depende del valor de la acción sísmica básica preceptiva, el nivel de peligrosidad considerado (o coeficiente r_0), y, fundamentalmente, del *coeficiente de terreno* C . A efectos de comparación, es el coeficiente C el que debe ser comparado con el *soil parameter* S del Eurocódigo-8. El coeficiente C adquiere valores crecientes, de 1,0 a 2,0, según cuatro tipos de terreno: I, II, III y IV, respectivamente. Es importante advertir que el valor real de C se determina calculando la media ponderada según el espesor de los diferentes tipos de terreno localizados hasta 30 metros bajo rasante. Conocido C y $S_{NCSE-02}$, puede obtenerse el espectro de respuesta elástico del emplazamiento. El coeficiente C controla la forma del espectro, mientras que el coeficiente S controla su amplitud.

La principal diferencia entre ambas normativas radica en el diferente modo de clasificación de los emplazamientos y en el modo de obtener el factor de amplificación. Mientras que en el Eurocódigo-8, dado un valor de $V_{s,30}$ se obtiene un tipo de terreno y un coeficiente de amplificación predeterminado; en la NCSE-02 se calcula un C medio ponderado (C_{30}) función del espesor de los diferentes tipos de terreno, que hace que el valor del factor de amplificación sea variable. Esta diferencia determina que la metodología para clasificar con datos de campo un emplazamiento difiera de una norma a otra. Aplicando la NCSE-02 se perseguirá determinar el espesor de las capas de suelo (I, II, III y IV) que puedan constituir el perfil del emplazamiento. En el Eurocódigo-8, por otro lado, se perseguirá determinar un valor medio de V_s atribuible a todo el espesor de 30 metros. El Eurocódigo-8, además, diferencia un terreno clase E, que es un C ó D de espesores entre 5 y 20 m sobre basamento rocoso. Estas diferencias son una de las causas que explican que

los espectros de respuesta obtenidos por ambas normativas puedan diferir considerablemente.

Caracterización del terreno en tres emplazamientos característicos

Se ha realizado una caracterización sísmica del terreno en tres emplazamientos representativos del valle de La Laguna (Fig. 2 y Fig. 3). En la Tabla 2 se muestran las principales características de estos emplazamientos y los factores de amplificación calculados.

Centro del Valle

Este emplazamiento se localiza en la zona más céntrica de la depresión de La Laguna. Desde un punto de vista urbano sería representativo del terreno donde se apoyan las edificaciones del cuadrante nororiental de la ciudad de San Cristóbal de La Laguna. Esta zona está ocupada fundamentalmente por materiales de la PCF, aunque en profundidad pueden presentarse interdigitaciones de materiales de la LMF. El basamento rocoso se localiza a profundidades crecientes, desde unos 10 hasta 30 metros, desde el SW hacia el NE, siguiendo la dirección de elongación de la cuenca. Para la caracterización de este emplazamiento admitiremos una profundidad característica de 25 m. De acuerdo con el Eurocódigo-8 este emplazamiento queda clasificado como terreno de clase D. Por otra parte, considerando que Pozo Cabildo es un terreno Tipo IV según la NCSE-02, y que tiene un espesor de 25 m hasta el basamento rocoso, se calcula un coeficiente de terreno C de 1,83.

Área Noreste

En esta zona, sujeta actualmente a un importante proceso de expansión urbanística, se localiza el depocentro de la cuenca de La Laguna, cuya profundidad se estima en más de 30 metros de espesor. El relleno sedimentario está formado fundamentalmente por materiales de la LMF. De acuerdo con el Eurocódigo-8 este emplazamiento queda clasificado como de clase C. Considerando una profundidad hasta el basamento rocoso de más de 30 m, y que la LMF es un terreno Tipo III según la NCSE-02, el coeficiente de terreno C que se obtiene es 1,6.

Área Suroeste

El área suroeste comprende el cuadrante noroccidental de la ciudad de San Cristóbal de La Laguna, y se corresponde con la parte más superficial de la cuenca de La Laguna. El espesor de sedimentos hasta el basamento rocoso varía desde los 5 m en la parte más suroccidental hasta unos 10 m hacia el interior de la cuenca. Los materiales que forman la serie sedimentaria están representados principalmente por la SDF, aunque en profundidad tienen lugar cambios laterales a facies propias de la LMF. La profundidad al basamento rocoso en este emplazamiento se ha asumido en 7 metros. Siguiendo el Eurocódigo-8, este emplazamiento se clasifica en la clase E, dado que el espesor de recubrimientos es menor de 20 m, y que, tanto la SDF como la LMF son de clase C. De acuerdo con la NCSE-02, y considerando un espesor de terreno Tipo III de 7 m sobre basamento rocoso el coeficiente de terreno C que se obtiene es 1,14.

Tabla 2. Clasificación sísmica del terreno en tres emplazamientos característicos del valle de La Laguna. El factor de amplificación de la tabla hace referencia a los coeficientes del terreno S y C del Eurocódigo-8 y NCSE-02, respectivamente. Tipo I y II son los espectros de respuesta que define el Eurocódigo-8 para diferentes niveles de peligrosidad sísmica. C_{30} representa la media ponderada del coeficiente del terreno C para los espesores de suelos en metros indicados con subíndice en la columna adyacente.

Emplazamiento	EUROCÓDIGO-8			NCSE-02	
	Clase	Factor de Amplificación		Clase	Factor de Amplificación
		Tipo I	Tipo II		C_{30}
Centro del Valle	D	1,35	1,80	IV ₂₅ +I ₅	1,83
Área Noreste	C	1,15	1,50	III ₃₀	1,60
Área Suroeste	E	1,40	1,60	III ₇ +I ₂₃	1,14

Respuesta del suelo para diferentes escenarios sísmicos

La respuesta sísmica en los tres emplazamientos característicos de La Laguna se ha evaluado para dos escenarios sísmicos diferentes: probabilista de periodo de retorno 475 años y determinista.

Escenario probabilista para periodo de retorno 475 años

Este escenario sísmico persigue simular la respuesta del suelo para una sacudida sísmica, en términos de aceleración máxima del terreno (o *peak ground acceleration*), asociada a un periodo de retorno de 475 años (o con una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años). En la mayor parte de las normativas sismorresistentes europeas (cf. García-Mayordomo *et al.*, 2004) se admite que este nivel de probabilidad es suficiente para garantizar que estructuras habitacionales convencionales no sufrirán daños estructurales que pudieran poner en peligro evidente la vida de las personas (e.g., colapso). La respuesta del suelo, en forma de espectro de respuesta elástico, se obtiene, tanto en el Eurocódigo-8 como en la NCSE-02, aplicando el factor de amplificación calculado a la aceleración máxima del terreno en roca o aceleración básica, respectivamente. En este trabajo hemos empleado el valor de aceleración máxima del terreno en roca para periodo de retorno de 475 años obtenido por González de Vallejo *et al.* (2006) en un estudio probabilista de la peligrosidad sísmica del archipiélago canario. Para la zona de La Laguna, este valor es 0,06 g. Es importante observar que la NCSE-02, para este mismo punto, establece un valor de aceleración básica de 0,04 g. Preferimos en este trabajo emplear el valor obtenido en González de Vallejo *et al.* (2006), dado que se trata de un estudio actualizado y específico para las Canarias.

La figura 4 muestra los espectros calculados para los tres emplazamientos analizados. Los espectros de la NCSE-02 y Eurocódigo-8 (Tipo II) presentan diferencias muy significativas en cualquiera de los tres emplazamientos. En los emplazamientos *Centro* y *Noreste* el Eurocódigo-8 predice aceleraciones espectrales significativamente más altas que la NCSE-02 para periodos de vibración de 0,37 y 0,30 s, respectivamente. Esta situación se invierte para periodos superiores, observándose entonces, la diferencia más importante: los techos de los espectros de la NCSE-02 son particularmente alargados, dando lugar a valores de aceleración espectral del orden del doble que el Eurocódigo-8. Por otra parte, según la NCSE-02 el segundo emplazamiento que mayor amplificación presenta

es el *Noreste*, mientras que según el Eurocódigo-8 sería el *Suroeste*. Precisamente para este emplazamiento, la amplitud del techo del espectro del Eurocódigo-8 es muy superior, del orden del doble, al de la NCSE-02.

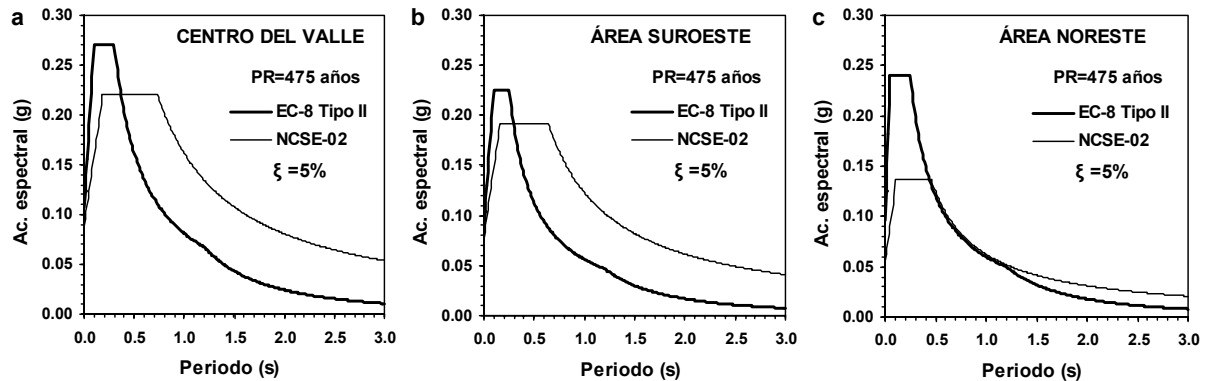


Figura 4. Espectros de respuesta obtenidos para el escenario sísmico de periodo de retorno 475 años (ver texto), a: Emplazamiento del centro del valle, b: Emplazamiento Suroeste, c: Emplazamiento Noreste. Discusión en el texto.

Escenario determinista: Falla submarina de Gran Canaria-Tenerife

Este escenario supone la ocurrencia de un gran terremoto producido por la falla submarina localizada entre las islas de Gran Canaria y Tenerife (cf. González de Vallejo *et al.*, 2006). De acuerdo con este trabajo, y sobre la base de recientes estudios paleosísmicos (González de Vallejo *et al.*, 2003), esta falla sería capaz de generar un terremoto de magnitud momento (M_w) de 6,8. Se denomina este escenario determinista dado que no se asocia la ocurrencia de este terremoto a ningún nivel de probabilidad. Sin embargo, dado que se estima que la recurrencia media de este tipo de eventos en esta gran falla es del orden de los 3.500 a 10.000 años (González de Vallejo *et al.*, 2003), debe notarse que la acción sísmica producida por este evento debería contemplarse en el proyecto sismorresistente de estructuras críticas (e.g., grandes presas, grandes puentes, centrales energéticas,...). Para obtener la aceleración máxima en roca que produciría este evento se ha calculado, en primer lugar, la distancia más corta desde la proyección en superficie de la falla hasta La Laguna (30 km) y, posteriormente, considerando una $M_w=6,8$, se ha estimado la aceleración máxima en roca en La Laguna usando el modelo estadístico de atenuación hawaiano de Munson y Thurber (1997). El valor obtenido, 0,17 g, se corresponde con la estimación media.

La figura 5 muestra los espectros calculados para los tres emplazamientos analizados. Debe de tenerse en cuenta que en este caso hemos empleado el espectro Tipo I del Eurocódigo-8 (cf. aptdo. de evaluación de la amplificación). En contraste con el escenario probabilista, analizado anteriormente, destaca ahora la fuerte similitud que presentan los espectros de ambas normativas. La única excepción la representa el emplazamiento *Suroeste*, donde, nuevamente, se observan importantísimas diferencias: el techo del espectro del Eurocódigo-8 predice la máxima amplificación, superior incluso a la del emplazamiento *Centro*.

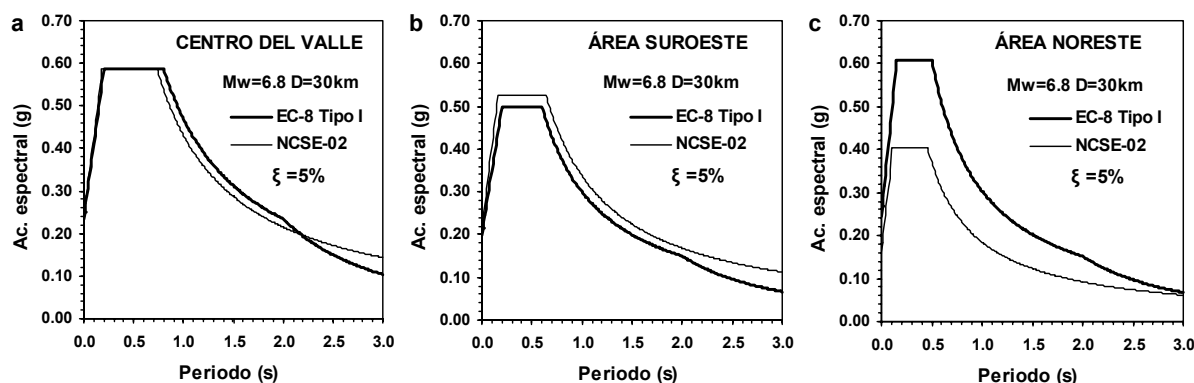


Figura 5. Espectros de respuesta obtenidos para el escenario sísmico determinista (ver texto), a: Emplazamiento del centro del valle, b: Emplazamiento Suroeste, c: Emplazamiento Noreste.

Discusión

Las principales diferencias encontradas entre los espectros del Eurocódigo-8 y NCSE-02 son fundamentalmente dos:

- 1) Los techos espectrales de la NCSE-02 son mucho más largos que los del Eurocódigo-8 (Tipo II), y, sin embargo, muy similares a los del Eurocódigo-8 (Tipo I).
- 2) El Eurocódigo-8 predice mayor amplificación para emplazamientos de clase E (e.g., *Suroeste*) que la NCSE-02 para terrenos compuestos por suelos clase I (e.g., basamento rocoso) y tipo III (e.g., depósitos relativamente consolidados).

Los espectros de la NCSE-02, en comparación con los Tipo II del Eurocódigo-8, son poco conservadores para periodos cortos (e.g., $T < 0,3$ s) y excesivamente conservadores para periodos más largos. Una situación similar ha sido observada en estudios recientes desarrollados en la Región de Murcia, tanto cuando se comparan espectros de respuesta obtenidos de registros simulados de terremotos reales ($m_{BLG}=4,8-4,7$) con los espectros resultado de aplicar la NCSE-02 (Gaspar-Escribano y Benito, 2007), como comparando con espectros de probabilidad uniforme para periodo de retorno 475 años (Gaspar-Escribano *et al.*, 2007).

Sin embargo, para el escenario determinista analizado en este trabajo ($M_w=6,8$, $D_r=30$ km), los espectros de la NCSE-02 son muy similares al Tipo I del Eurocódigo-8. Con las formas espectrales Tipo I y Tipo II se pretende destacar, entre otras cosas, las diferentes características que presenta el movimiento del terreno para una liberación de energía sísmica potente-moderada ($M_s > 5,5$) y moderada-baja ($M_s < 5,5$), respectivamente. Precisamente, una de las diferencias fundamentales es el mayor contenido en frecuencias bajas que presenta el movimiento del terreno en el primer caso respecto al segundo, favoreciendo amplificaciones mayores en el rango de los periodos altos. Esta cuestión se traduce en las formas espectrales, presentando los Tipo I mesetas más largas (cf. Figs. 3.2 y 3.3, Part 1, Eurocode-8). Estudios recientes desarrollados en la Región de Murcia, indican que para periodos de retorno de 475 años la respuesta sísmica del suelo está controlada fundamentalmente por la ocurrencia de terremotos de $M_w < 5,5$ a distancias cortas (< 20 km) (Benito *et al.*, 2006), lo cual sugiere, a priori, la idoneidad del empleo en España de los espectros Tipo II del Eurocódigo-8, que precisamente son los que más difieren del establecido en la NCSE-02.

La razón de que el Eurocódigo-8 estime amplificaciones mucho mayores en el rango de periodos cortos en el emplazamiento *Noreste*, respecto a la NCSE-02, se encuentra en las diferencias metodológicas que presentan ambas normativas en relación con la clasificación de terrenos. Según el Eurocódigo-8 el emplazamiento *Noreste* es de clase E, o lo que es lo mismo, se trata genéricamente de un terreno donde se localizan espesores entre 5 y 20 m de suelos clase C ó D, apoyados sobre un basamento rocoso (clase A). Esta situación se valora de forma muy diferente en la NCSE-02 (Fig. 6), obteniéndose coeficientes de terreno C inferiores hasta una situación III₂₀/II₁₀ (20 m de suelo clase III sobre 10 m de clase I). Para espesores superiores el Eurocódigo-8 clasificaría el emplazamiento *Noreste* como clase C, y resultarían factores amplificación menores que los de la NCSE-02. La distinción de la clase E en el Eurocódigo-8 persigue diferenciar situaciones en las que, dada la existencia de un fuerte contraste de impedancias, pueden darse amplificaciones superiores a situaciones en las que existen espesores potentes de suelos C ó D (espectros Tipo I), ó C (espectros Tipo II) (cf. Figs. 3.2 y 3.3, Part 1, Eurocode-8). Estas diferencias metodológicas en la clasificación de suelos entre ambas normativas deben ser tenidas en cuenta en la realización de estudios de zonación o microzonación sísmica, ya que pueden controlar totalmente la estimación de la amplificación.

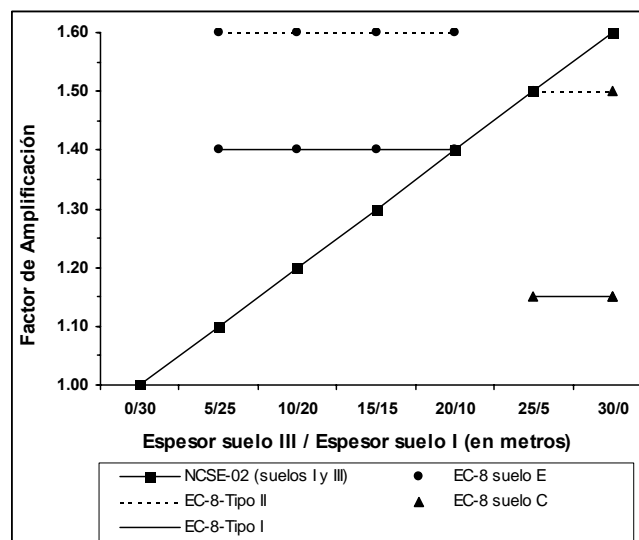


Figura 6. Representación de la variación del factor de amplificación en la NCSE-02 y Eurocódigo-8, para diferentes espesores de suelo compuestos por clases III y I, y suelos clase E y C, respectivamente. En el caso del Eurocódigo-8 se diferencian los factores correspondientes según se considere el espectro Tipo I ó Tipo II. El factor de amplificación en el eje de ordenadas representa el valor del *coeficiente de terreno* (C), o el *soil parameter* (S), respectivamente de la NCSE-02 o Eurocódigo-8.

Conclusiones

La evaluación de la respuesta sísmica del suelo en el valle de La Laguna difiere de modo muy importante según se considere la normativa española (NCSE-02) o la europea (Eurocódigo-8). Estas diferencias son manifiestas tanto en la estimación del factor de amplificación, como en la forma y amplitud de los espectros de respuesta resultantes. En el primer caso, las diferencias encontradas se atribuyen a la diferente metodología en la clasificación de terrenos y asignación de factores de amplificación que presentan ambas normativas. Esta situación es particularmente evidente cuando se consideran terrenos

compuestos por suelos tipo I y II según NCSE-02, en contraste con suelos clase E del Eurocódigo-8. En relación con la respuesta del suelo, se ha observado que el espectro de la NCSE-02 presenta importantes diferencias con el Tipo II del Eurocódigo-8, que es el tipo más idóneo dadas las condiciones de sismicidad de España, y del Archipiélago Canario en concreto, para periodo de retorno 475 años. Sin embargo, para condiciones de peligrosidad sísmica muy superiores (escenario determinista) el espectro de la NCSE-02 se asemeja mucho al Tipo I del Eurocódigo-8.

A pesar de las importantes diferencias que presentan ambas normativas, se puede afirmar, en términos generales, que la zona del valle de La Laguna que mayor amplificación presentaría en caso de terremoto sería el área central. La siguiente zona con mayor amplificación sería el área suroeste, según la NCSE-02, o el área noreste, según el Eurocódigo-8. Para realizar una estimación más precisa y fiable de la capacidad de amplificación de los suelos del valle de La Laguna, y de su respuesta sísmica, sería necesario contar con una campaña de estudios geofísicos y geotécnicos. De particular interés sería la realización de perfiles de prospección geofísica mediante la técnica Re-mi (sísmica pasiva) (Louie, 2001). De este modo se podría obtener, de un modo relativamente rápido, numerosos cortes transversales de la variación de la velocidad de las ondas de cizalla con la profundidad.

Por otra parte, también tendría mucho interés la instalación de acelerómetros, aprovechando que en la actualidad se está implementado una red acelerográfica en Tenerife (M.J. Blanco, 2007, com. personal). La instalación de varios acelerómetros en condiciones del terreno representativas y, además, contrastadas, es fundamental para conocer mejor la respuesta de los suelos del valle de La Laguna y, en particular, de la ciudad de San Cristóbal, declarada en 1999 bien cultural patrimonio de la humanidad.

Referencias:

- Andrus, R.D., Piratheepan, P., Ellis, B.S., Zhang, J. y Juang, H. (2004), "Comparing liquefaction evaluation methods using penetration- V_s relationship", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 24, pp. 713-721.
- Benito, M.B., Gaspar-Escribano, J.M., García-Mayordomo, J., Jiménez, M.E. y García Rodríguez, M.J. (2006), "Proyecto RISMUR: Evaluación de la Peligrosidad Sísmica", Instituto Geográfico Nacional y Protección Civil de Murcia, Madrid, 126 pp.
- Brocherdt, R.D. (1994), "Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)", *Earthq. Spectra*, 10, pp. 617-653.
- CEN (2003), "PrEN1998-1 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings", Final Draft, December 2003, Brussels.
- García-Mayordomo, J., Faccioli, E. y Paolucci, R. (2004), "Comparative study of the seismic hazard assessments in European national seismic codes", *Bull. Earthq. Eng.*, 2, 51-73.
- Gaspar-Escribano, J.M. y Benito, B. (2007), "Ground-Motion Characterization of Low-to-Moderate Seismicity Zones and Implications for Seismic Design: Lessons from Recent Mw 4.8 Damaging Earthquakes in Southeast Spain", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97(2) (en prensa).
- Gaspar-Escribano, J.M., Benito, B. y García-Mayordomo, J. (2007), "Hazard-Consistent Response Spectra in the Region of Murcia (SE Spain)", *Bull. Earthq. Eng.*, (enviado).
- González de Vallejo, L.I. (1979), "Influencia de la génesis, mineralogía y fábrica en

- las propiedades geotécnicas de los suelos volcánicos de La Laguna (Tenerife)", Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid. 267pp.
- González de Vallejo, L.I., Jiménez Salas, J.A. y Leguey Jiménez, S. (1981), "Engineering geology of the tropical volcanic soils of La Laguna, Tenerife", Eng. Geol., 17, pp.1-17.
 - González de Vallejo, L.I., Capote, R., Cabrera, L., Insua, J.M. y Acosta, J. (2003), "Paleoliquefaction evidence in Tenerife (Canary Islands) and possible seismotectonic sources", Mar. Geophys. Res., 24, 149-160.
 - González de Vallejo, L.I., García-Mayordomo, J. y Insua, J.M. (2006), "Probabilistic Seismic Hazard Assessment of the Canary Islands", Bull. Seism. Soc. Am., 96(6), 2040-2049.
 - IGME (1978) "Mapa Geológico de Santa Cruz de Tenerife". Hoja 1104-I. Escala 1:25.000. Serie MAGNA.
 - Imai, T. (1977), "P- and S-wave velocities of the ground in Japan", Proceedings of 9th ICSMFE, vol. 2, pp. 257-260.
 - Imai, T. y Tonouchi, K (1982), "Correlation of N-value with s-wave velocity and shear modulus", Proc. of 2nd European Symp. on Penetration Testing, pp. 67-72.
 - Inazaki, T. (2006), "Relationship between S-wave velocities and geotechnical properties of alluvial sediments". Public Works Research Institute, Tsukuba, JAPAN En internet <http://www.pwri.go.jp/eng/kokusai/reports/inazaki%20060401.pdf>
 - Louie, J.N. (2001), "Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays", Bull. Seism. Soc. Am., 91(2), 347-364.
 - Munson, C.G. y Thurber, C.H. (1997), Analysis of the attenuation of ground motion on the island of Hawaii. Bull. Seism. Soc. Am., 87, 845-960.
 - NCSE-02 (2002), "Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02. Parte General y Edificación", Real Decreto 997/2002. BOE núm. 244, 35898-35967.
 - Piratheepan, P. y Andrus, R. D. (2002), "Estimating Shear-Wave Velocity from SPT and CPT Data," final report to U.S. Geological Survey, Award Number 01HQR0007. Clemson University, Clemson, SC.