

ESTUDIO DE LOS EFECTOS LOCALES EN EL EMPLAZAMIENTO DEL ACELERÓGRAFO DE OLOT

Autores: U. Mena¹, S. Figueras², J. Fleta² y T. Susagna²

¹Universidad Politécnica de Cataluña, ²Institut Cartogràfic de Catalunya
ulises.mena@upc.es

RESUMEN

En este trabajo se estudian los posibles efectos locales que pueden presentarse en el emplazamiento donde se encuentra localizado el acelerógrafo de la ciudad de Olot (Girona). Como primer paso, se realiza una caracterización del subsuelo en el emplazamiento del acelerógrafo, basándose en estudios geotécnicos, pozos de agua y mapas geológicos existentes del lugar. En el siguiente paso, se evalúa la función de amplificación del emplazamiento, analizándose la columna de suelo, mediante un método de modelización 1D lineal-equivalente, utilizando como señal de entrada un pulso de Ricker. La función obtenida se compara con el resultado obtenido en un estudio experimental realizado con registros de ruido ambiental. Finalmente se analiza la señal del sismo de Sant Pau de Fenolhet ocurrido en 1996 y registrada en el acelerógrafo situado en este emplazamiento.

Palabras claves: Riesgo sísmico, función de amplificación, análisis dinámico.

SUMMARY

This work studies the possible local effects in the site of an accelerometer in the city of Olot (Girona). A characterization of the subsoil of the site was performed based on geotechnical studies, lithology of water wells, and available geological maps. The transfer function is evaluated for the site using a soil column and modelizing it with an 1D equivalent-linear method and a Ricker pulse as an input signal. The resulting transfer function is compared with results from a study of seismic noise. Finally, the signal from the 1996 Sant Pau de Fenolhet earthquake recorded in this site is analyzed using the soil column.

Key words: Seismic risk, amplification function, dynamic analysis.

Introducción

Uno de los pasos más importantes en los estudios de Ingeniería Sísmica es evaluar el movimiento del terreno tomando en cuenta los efectos de sitio. Los parámetros principales que se requieren conocer son el potencial de amplificación del suelo, así como el periodo natural del mismo.

Las técnicas de microzonificación sísmica permiten estudiar o caracterizar el comportamiento dinámico del terreno, involucrando para ello estudios de geotecnia, características geológicas, topográficas así como la sismicidad del lugar, permitiendo evaluar con esto los efectos de sitio y de esta manera completar la evaluación de la peligrosidad que existe en dicho lugar.

En el año 1995 el Institut Cartogràfic de Catalunya, en colaboración con el Instituto Geográfico Nacional, inició la instalación de una red acelerométrica (Observatorio Fabra, Olot y Vielha) para el registro de movimientos fuertes que ha permitido obtener los primeros registros de aceleración en Cataluña. Para su correcta utilización en los estudios de

Ingeniería Sísmica, es necesario conocer de la manera más detallada posible las condiciones del subsuelo en donde se encuentran emplazados los acelerógrafos, para saber si el registro obtenido puede estar o no amplificado y de qué manera.

En este trabajo se caracterizan, a partir de la información geológica disponible, los parámetros dinámicos de una columna representativa del suelo del emplazamiento del acelerógrafo instalado en Olot. Se calcula la correspondiente función de transferencia y se compara con análisis experimentales realizados en el emplazamiento.

Objetivos

El objetivo principal es la caracterización del emplazamiento del acelerógrafo de la ciudad de Olot, basándose en los estudios geológicos existentes, así como en 10 estudios geotécnicos disponibles de la zona (Capdevila, 2000) y de las características litológicas de 33 pozos de agua proporcionados (ACA, 2000). En base a esta caracterización se define una columna de suelo, que permita estudiar la amplificación del movimiento del suelo en el punto dónde se encuentra ubicado el acelerógrafo de Olot, instalado en las dependencias del Museo Comarcal de la Garrotxa, a partir de su función de transferencia.

La función de amplificación calculada mediante el programa 1D lineal-equivalente SHAKE91, utilizando como señal de entrada un pulso de Ricker se compara con el análisis experimental de registros de ruido ambiental. La señal registrada en el acelerógrafo del emplazamiento, correspondiente al sismo de Sant Pau de Fenolhet del 18 de Febrero de 1996, se utiliza para verificar los cálculos anteriores.

Localización, sismicidad y geología de la ciudad Olot

La ciudad de Olot se encuentra localizada a $42^{\circ} 10' 54.8''$ Norte y $2^{\circ} 29' 36.3''$ (Figura 1). Este, a una altitud de 443 m sobre el nivel del mar, en la comarca de la Garrotxa, provincia de Girona. La población de Olot es de 27.482 hab., de acuerdo con el censo de 1996 y tiene una superficie de 29,71 Km². De acuerdo con el mapa de peligrosidad sísmica de Cataluña (Secanell, 1999 et al.) la ciudad de Olot se encuentra localizada en la zona de mayor peligrosidad sísmica de Catalunya con una intensidad máxima esperada de VII-VIII para un período de retorno de 500 años.

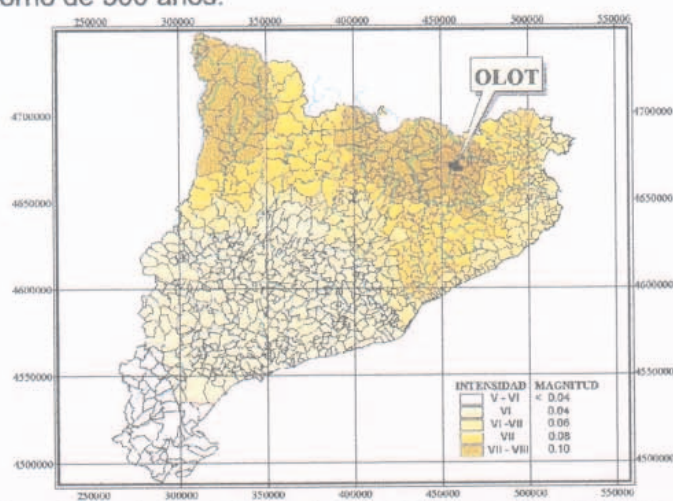


Figura 1. Mapade peligrosidad sísmica (Secanell et al, 1999) y localización de la ciudad de Olot.

Olot es además, una zona volcánica, con su consecuente variedad en las características de la geología del subsuelo. Las diversas erupciones volcánicas han propiciado el desarrollo de diferentes estratos de relleno, depositados en los lagos de la zona de esclusa volcánica (depósitos lacustres y palustres). En muchos de los casos el tamaño de estos depósitos asociados al vulcanismo supera el espesor de los materiales volcánicos (Mallarach, 1998). Las erupciones volcánicas crearon condiciones idóneas para la acumulación de sedimentos al obstruir los valles y crear pequeñas cuencas encerradas por conos o dentro de los cráteres cerrados. Estos sedimentos lacustres y palustres se han intercalado con los materiales volcánicos y con otros sedimentos de origen fluvial o torrencial en depósitos acumulados durante miles de años.

La realización del estudio del subsuelo de Olot se ha hecho a partir de diferentes fuentes de información: mapas geológicos, Figura 2, (Mallarach, 1982; ITGE, 1994), mapas topográficos (ICC, 1993), otros estudios (Fleta *et al* 1998), extracción de la base de datos del inventario de pozos de Catalunya (ACA, 2000) y estudios geotécnicos de la ciudad de Olot (Capdevila, 2000).

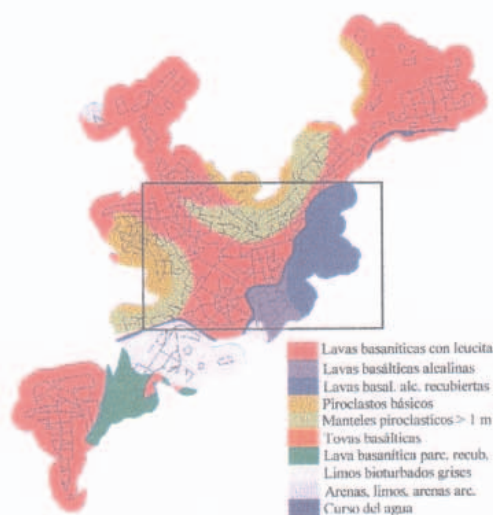


Figura 2. Mapa geológico de la ciudad de Olot(Mallarach, 1982, Fleta et al, 1998).

Caracterización del emplazamiento del acelerógrafo

Se ha realizado una interpretación del subsuelo de Olot a partir de dos cortes geológicos, representados en las Figuras 3 y 4, que se intersectan en la vertical del emplazamiento del acelerógrafo. En estos cortes se pueden observar la presencia de varias coladas basálticas con potencias de varios metros, varias fallas subverticales y el reconocimiento de un aparato volcánico fosilizado no descrito anteriormente.

La Tabla 1, muestra las características de la columna propuesta con el material asignado a cada estrato de la columna, el espesor, la profundidad, el amortiguamiento (D %), el peso específico del material (γ_s) y la velocidad de las ondas de corte (V_s), asignados a cada uno de los estratos. Estas características obtenidas en Mena, *et al* 2000 son las necesarias para el análisis con el programa lineal – equivalente SHAKE91 (Idris and Sun, 1992)

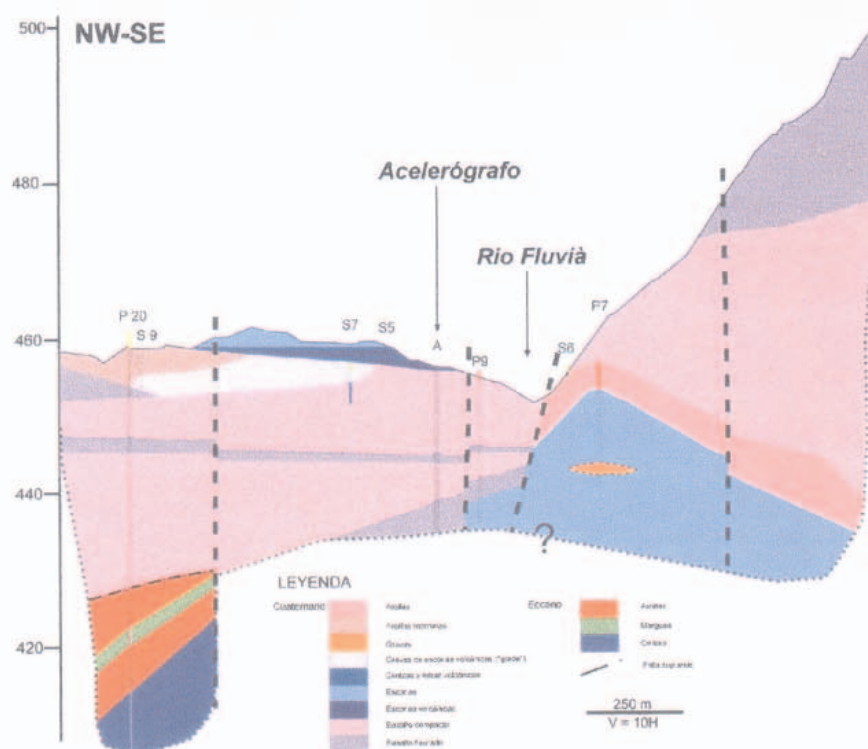


Figura 3. Perfil A, dirección NW-SE

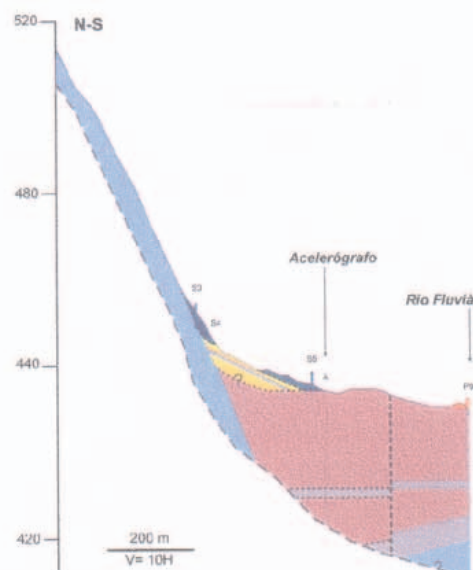


Figura 4. Perfil B, dirección N-S

Capa	Espesor (m)	Prof. (m)	D (%)	γ_s (Ton/m ³)	V_s (m/s)
1	2.50	2.50	0.05	1.43	150.00
2	21.50	24.00	0.05	2.40	900.00
3	3.00	27.00	0.05	2.30	550.00
4	11.00	38.00	0.05	2.40	900.00
5	10.00	48.00	0.05	2.30	700.00
6	52.00	100.00	0.05	2.30	700.00
7	BASE		0.05	2.60	1000.0

Tabla 1. Litología de la columna propuesta para el emplazamiento del acelerógrafo de la ciudad de Olot.

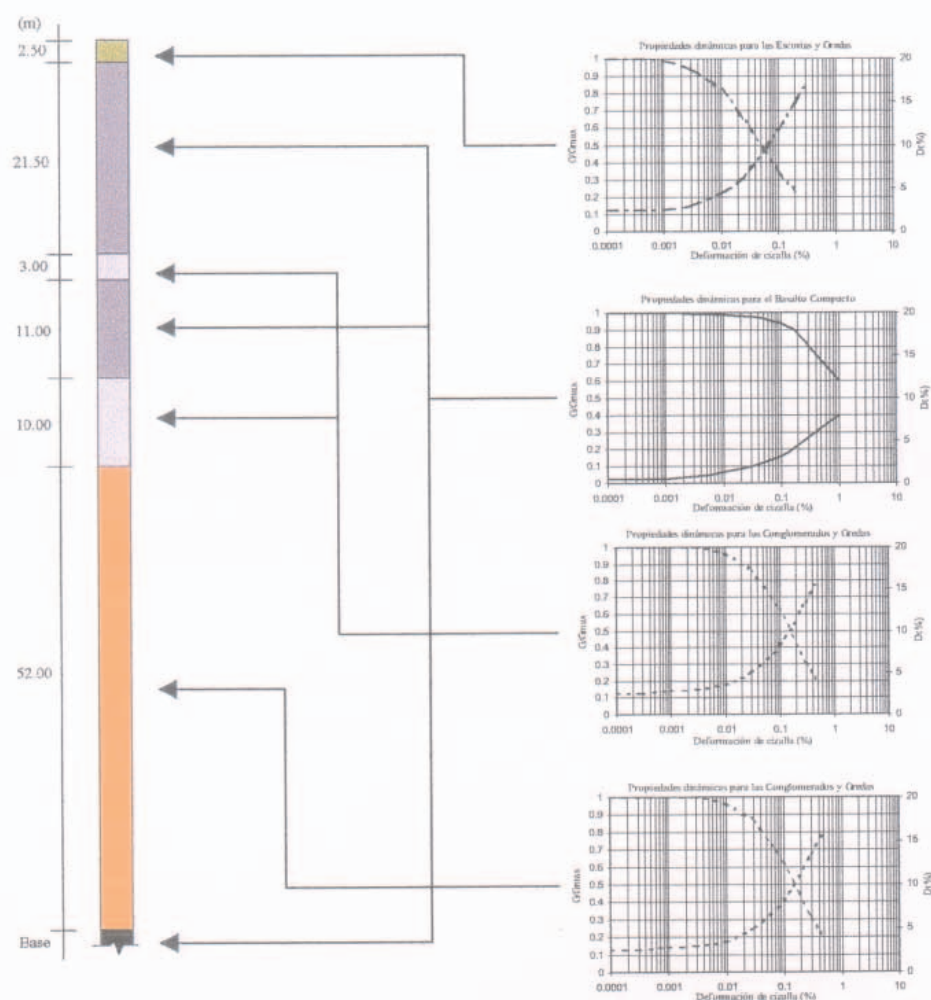


Figura 5. Columna de suelo obtenida a partir de la caracterización del emplazamiento del acelerógrafo junto con las curvas de variación de los parámetros G/G_{max} y $D(\%)$ en función de la deformación utilizados en el análisis.

La columna definida para el emplazamiento del acelerógrafo consta de 6 capas hasta 100 m de profundidad y el basamento rocoso (Figura 5) (Mena et al., 2000). La primera capa

tiene un espesor de 2.5 m, compuesta con escorias y gredas como material principal. A esta capa se le asignó una velocidad de onda de corte de 150 m/s ($N-SPT < 10$). En los siguientes 35 metros se encontró la presencia de dos coladas basálticas. La primera colada es un basalto compacto con una potencia de 21.5 metros, continuando con un basalto alterado o fisurado con una potencia de 3.0 m y por debajo de estas dos capas hasta llegar a los 38 metros se vuelve a tener basalto masivo. A los basaltos compactos se les asignó una velocidad de onda de corte de 900 m/s, mientras que al basalto alterado o fisurado se le asignó una velocidad de 550 m/s. La siguiente capa entre los 38 y 48 metros corresponde a un basalto fisurado, asignándole en este caso una velocidad de corte de 700 m/s. La última capa corresponde a conglomerados, margas y gredas (capa 6), con una potencia de 52 metros (de acuerdo con ITGE, 1994) y que llega hasta los 100 m de profundidad, a esta capa se le asignó una velocidad de 700 m/s. Todas estas capas se sitúan sobre un basamento rocoso, con velocidad de corte de 1000 m/s.

Para utilizar el programa SHAKE91 (Idris et al, 1992), además de usar los datos anteriores es necesario definir las curvas dinámicas de los materiales que forman la columna de suelo. Estas curvas definen la variación del módulo de cizalla dinámico (G) y del coeficiente de amortiguamiento (D) con respecto a la deformación de cizalla (Figura 5). Las curvas utilizadas en este trabajo han sido escogidas de Cid (1998) y de las propuestas en el mismo programa SHAKE91. Es importante señalar que existen curvas dinámicas en la literatura de una gran variedad de tipos de suelo, por lo que es necesario utilizar la que mejor se aproxime al material elegido para la columna que se analizará. Esto es útil, cuando no existen o no se pueden realizar pruebas experimentales para su obtención.

Cálculo de la respuesta del suelo en el emplazamiento del acelerógrafo de Olot mediante el programa SHAKE 91

Para la aplicación del programa SHAKE91 la señal utilizada como registro de entrada es un pulso de Ricker con una amplitud máxima de 0.1 g, frecuencia predominante de 3 Hz y duración de 16 seg. Se ha considerado como valor máximo de la señal el valor de 0.1 g, de acuerdo al valor asignado a la zona de Olot en el mapa de peligrosidad sísmica de Cataluña (Figura 1) y la norma sismorresistente de española (NCSE-94). Se considera que la señal o pulso de Ricker, entra por la base de la columna litológica considerada como basamento rocoso aflorante (rock outcrop) y se calculan los espectros de respuesta y funciones de amplificación.

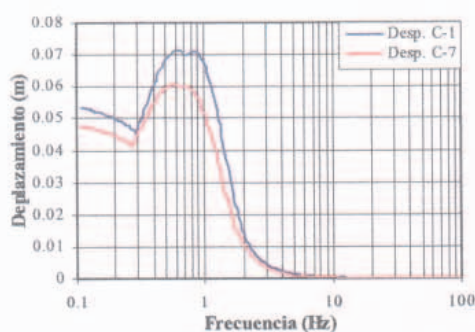


Figura 6. Comparación de los espectros de desplazamiento entre las capas 1 y 7.

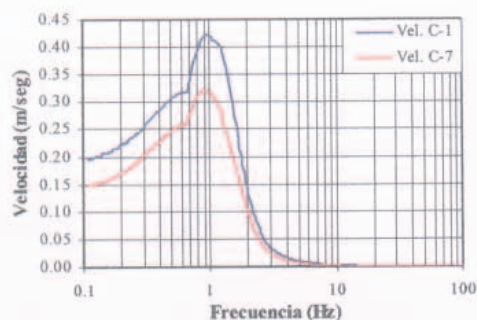


Figura 7. Comparación de los espectros de velocidad entre las capas 1 y 7.

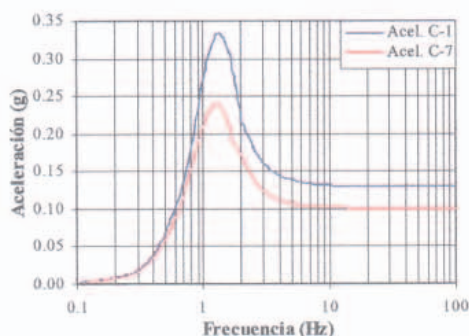


Figura 8. Comparación de los espectros de aceleración entre las capas 1 y 7.

En las figuras 6, 7 y 8 se muestran los espectros de respuesta en desplazamiento, velocidad y aceleración respectivamente, obtenidos entre el basamento rocoso (capa 7) y la superficie (capa 1). En estas tres figuras se puede observar claramente como se incrementan los valores de las respuestas entre el basamento y la superficie, indicando que existe una amplificación de la señal.

En la Figura 9, se muestran las funciones de amplificación en cada capa con respecto al basamento rocoso. Se puede observar que la máxima amplificación, en las frecuencias inferiores a 5 Hz, corresponde a la capa 6 con un valor de 1.77, esto se debe probablemente a las características dinámicas de este material y por supuesto al espesor de la capa de 50 metros. Por otro lado, se puede observar que la función de amplificación se reduce en las capas superiores, con lo que se puede pensar que la capa 6, responde como si fuera un disipador de energía. La amplificación máxima ocurre en la capa superficial (factor 5) para frecuencias mayores de 10 Hz.

La función de amplificación obtenida no muestra valores de amplificación significativos en las frecuencias de mayor interés en ingeniería, es decir entre 0.1 y 10 Hz.

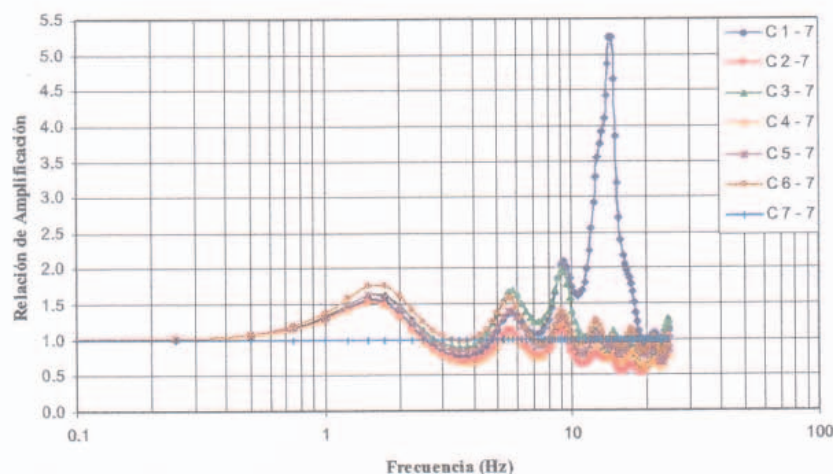


Figura 9. Espectros de amplificación de los estratos con respecto a la base de la columna.

Comparación con el análisis experimental de registros de ruido ambiental

A partir de registros de ruido se puede analizar el período predominante de la función de transferencia del suelo en el emplazamiento, es decir el período en que aparecería una mayor amplificación del movimiento del suelo en caso de sismo, utilizando con los cocientes espectrales de las componentes horizontales sobre la vertical. Así podrá compararse con los

resultados obtenidos con los cálculos realizados en la columna de suelo propuesta para el emplazamiento del acelerógrafo mostrada en el apartado anterior.

En la figura 10 se muestran los análisis espectrales realizados. En la valoración no se considera los ruidos espúreos que aparecen a frecuencias superiores a los 50 Hz que son debidos a las condiciones de la medida experimental (como por ejemplo la falta de suficiente aislamiento eléctrico del equipo). Se observa que para frecuencias inferiores a los 10 Hz la relación espectral se mantiene prácticamente uniforme sobre un valor de 1. Para frecuencias superiores aparece un pico en el cociente a una frecuencia alrededor de los 14 Hz lo que indicaría una posible amplificación a dicha frecuencia. Estos resultados están de acuerdo con la función de amplificación (Figura 9) obtenida a partir de la modelización del apartado anterior en la que no aparecen valores significativos de amplificación para frecuencias inferiores a 10 Hz y sólo aparece un pico cercano a 14 Hz, efecto de la capa delgada más superficial.

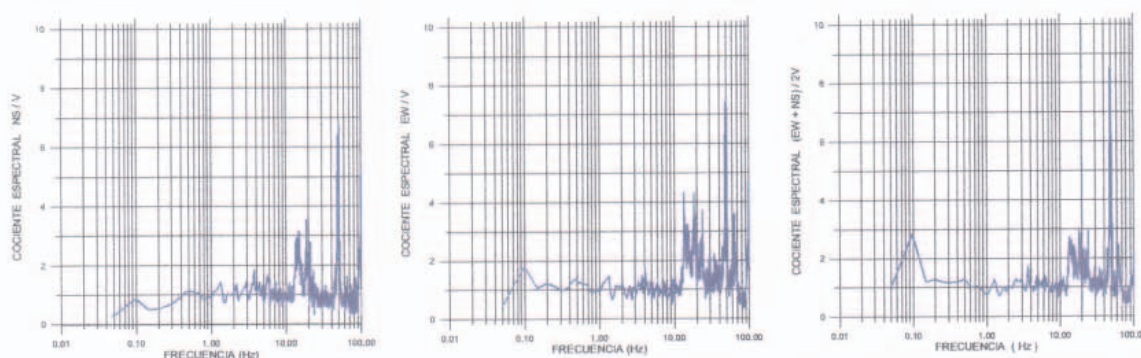


Figura 10. Cocientes espectrales de las componentes horizontales sobre la vertical.

Análisis del registro de Olot del sismo de Sant Pau de Fenolhet de 1996

El día 18 de febrero de 1996 se registró un terremoto de magnitud 5.0 a las 02 h 45 min, con epicentro en el Pirineo oriental francés, siendo percibido en toda Cataluña (Butletí Sismològic, 1996). La intensidad epicentral asignada fue VI (MSK) y fue registrado en la ciudad de Olot, a unos 70 km, dónde fue percibido por la población con una intensidad de IV (MSK). El terremoto registró una aceleración máxima en el emplazamiento de 4.55 cm/s^2 (0.00473 g), correspondiente a la componente horizontal N – S (figura 11).

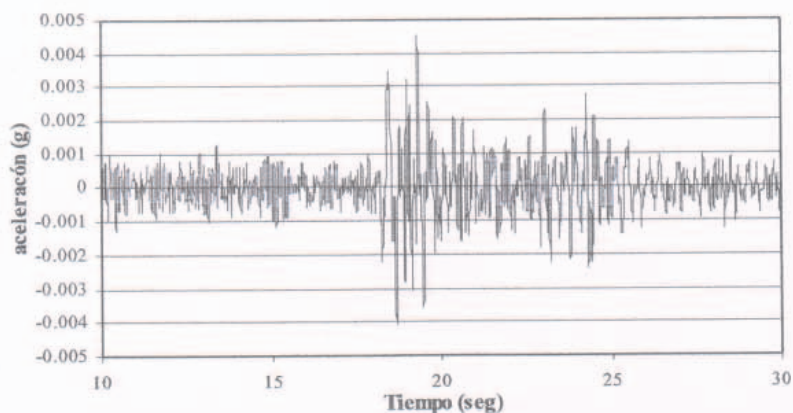


Figura 11. Registro de aceleración en la componente N-S, de la señal de Sant Pau de Fenolhet.

El registro obtenido en superficie se ha deconvuelto para obtener la señal que, en teoría, entraría en basamento rocoso (Mena, *et al* 2000).

En la figura 12 se muestran los espectros de aceleración en la capa 1 (superficial) y en la capa 7 (basamento rocoso). Se observan dos picos a períodos de 0.11 seg y 0.29 seg, el primero se obtendría en superficie y el segundo en la capa rocosa.

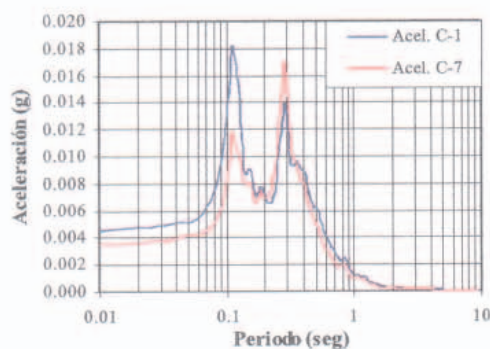


Figura 12. Comparación de los espectros de aceleración entre la capa superficial (capa 1) y el basamento rocoso (capa 7).

De los resultados obtenidos los valores de los espectros en el basamento rocoso son menores en general a los obtenidos en la superficie. Se obtiene un valor máximo en el basamento de 0.00395g, menor en un 25 %, que el de la señal en superficie de 0.00473g.

Esto también ocurre con la función de amplificación calculada entre la superficie y el basamento rocoso. El valor máximo obtenido para frecuencias mayores a 10 Hz, se alcanzó en la capa superficial con una amplificación de 7 a una frecuencia de 15 Hz. Este valor es mayor que el obtenido en el ejemplo con el pulso de Ricker que fue de 5 a una frecuencia de 14 Hz.

Conclusiones

A partir de la información geológica, de estudios geotécnicos y de las columnas litológicas de los pozos de agua, se ha caracterizado la columna del emplazamiento del acelerógrafo. La profundidad obtenida para esta columna fue de 100m hasta el basamento rocoso, dividida en 6 capas, con diferentes materiales entre ellos: escorias y gredas, basalto compacto, basalto fisurado, conglomerados y margas. En esta caracterización se constata la presencia de dos coladas de basalto compacto intercaladas entre conglomerados y basalto fisurado.

La función de transferencia de la columna considerada no presenta amplificaciones significativas para frecuencias inferiores a 10 Hz. Se obtuvieron amplificaciones sólo en frecuencias mayores de 10 Hz, debido a una pequeña capa de escorias y gredas de 2.5 m.

Para una señal de entrada en roca (pulso de Ricker) se pudo observar que los espectros en el basamento rocoso son menores que los obtenidos en superficie, lo cual corrobora que efectivamente existe una amplificación de la señal producida por la capa de suelo. A partir de un registro en superficie del sismo de Sant Pau de Fenolhet fue posible determinar la señal en el basamento rocoso, utilizando la columna de suelo definida para el emplazamiento del acelerógrafo. La aceleración máxima en el basamento rocoso fue un 25% menor que el registro en superficie. Finalmente, en la comparación de los resultados

determinados mediante el análisis numérico con los obtenidos en el análisis experimental con registros de ruido ambiente, se pudo comprobar, en ambos casos, que para frecuencias inferiores a 10 Hz, no aparecen valores significativos de amplificación, mientras que los valores máximos de amplificación se localizan en ambos casos entre las frecuencias de 10 y 20 Hz, debido al efecto de la capa delgada más superficial.

Referencias:

- ACA (2000). "Agència Catalana de l'Aigua". Base de dades d'inventari de pous.
- Butlletí Sismològic (1996). Servei Geològic de Catalunya, Institut Cartogràfic de Catalunya.
- Capdevila, M. (2000) "Estudis geotècnics". Taller d'Arquitectura. Olot.
- Cid, J. (1998). "Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en la simulación numérica de efectos locales". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Fleta, J., Estruch, I. & Goula, X. (1998). "Geotechnical characterization for the Regional assessment of seismic Risk in Catalonia". *Proceeding of the IV meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society (European Section)*, Barcelona. p.p. 699-702.
- ICC (1993). "Mapa Comarcal de Catalunya: Garrotxa – 19", *Generalitat de Catalunya. Departament de Política Territorial i Obres Públiques*, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona. E: 1:50.000.
- Idriss, I. M. and Sun J. I. (1992). "A computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits SHAKE91", Center for Geotechnical Modeling Department of Civil & Environmental Engineering. University of California.
- ITGE (1994). "Mapa Geológico de España". *Manlleu*. E: 1:50.000, hoja 294.
- Mallarach, J. M. (1982). "Carta geològica de la regió volcànica d'Olot: Litologia i geomorfologia". *Ajuntament d'Olot*, E: 1:20.000.
- Mallarach, J. M. (1998). "El Vulcanisme Prehistòric de Catalunya", Olot, 322pp.
- Mena, U., Figueras, S., Fleta, J., i Susagna, T. (2000). "Estudio de los efectos locales en el emplazamiento del acelerógrafo de Olot", Informe núm.: GS-140/00. Institut Cartogràfic de Catalunya.
- Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J. y Roca, A. (1999) " Mapa de zonas sísmicas de Cataluña". 1er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Murcia, 251 – 259.