

El Efecto Local sobre el Movimiento Sísmico del Suelo: Fenomenología y Resultados Recientes

Sonia ÁLVAREZ RUBIO

E.U.I.T. Industrial, Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN

En la propagación de las ondas sísmicas hay tres factores fundamentales que contribuyen al movimiento: la fuente, el medio por el cual se transmiten las ondas y el efecto local o del emplazamiento. Este último aspecto, de importante repercusión en el diseño antisísmico de estructuras, está siendo objeto de numerosos trabajos sobre todo después de la evaluación de los desastres de recientes terremotos muy destructivos como pueden ser los de Guerrero-Michoacan (1985), Northridge (1994), Kobe (1995)..., donde se ha comprobado una importante variación del movimiento sísmico registrado, que en algunos casos no se puede explicar en función de la fuente o de la trayectoria intermedia recorrida por las ondas.

El objetivo de este trabajo es presentar un marco general del estudio del efecto local, donde se describan los dos aspectos fundamentales del mismo, la contribución de la geología y topografía local al movimiento del suelo; desde el punto de vista de la naturaleza del fenómeno y de la metodología empleada. Para ello, se citan algunos de los resultados más recientemente aparecidos sin olvidar por ello otros no tan recientes que constituyen una importante referencia en este tipo de estudios.

ABSTRACT

There are three fundamental factors that contribute to seismic wave travelling: the source, the medium through which the waves are transmitted, and

the site or local effect. This last aspect, of utmost importance in the design of seismic structures, is the theme of numerous works, above all the disaster assessments of recent destructive earthquakes such as Guerrero-Michoacan (1985), Northridge (1994), Kobe (1995), where it has been proven that a relevant seismic movement variation in some cases cannot be explained in terms of the source or the intermediate wave path.

The aim of this work is to present the site effect studies within a general frame and describe its two basic aspects: its local geology, and its topographic contribution to the soil movement, both discussed from a phenomenological and methodological point of view. Thus, this work cites some of the latest results, together with those that although not so recent, are considered significant references for this kind of study.

1. INTRODUCCIÓN

En la propagación de las ondas a través de la capa más superficial del terreno, se producen distintos fenómenos físicos que dan lugar a una composición final del movimiento formado por: ondas directas y reflejadas P y S, un grupo de ondas que son el producto de la dispersión y difracción de las anteriores donde se incluye la coda, y, las ondas superficiales. A todas estas modificaciones al movimiento ondulatorio que llega a la base rocosa, contribuyen muchos aspectos del terreno, que vamos a clasificar en tres grupos:

- Propiedades geológicas y dinámicas del material en el emplazamiento.
- Topografía superficial.
- Composición y dirección de la radiación incidente en la base rocosa.

Un estudio completo del efecto local o de emplazamiento supone considerar todos los aspectos descritos. Sin embargo, dada la complejidad del problema, en muchas ocasiones los estudios se realizan considerando solamente alguno de los apartados anteriores, o una combinación de ellos. Así, el efecto local se puede enfocar abordándose sólo desde el punto de vista de la geología superficial (en muchas ocasiones se denomina el problema 1D). En otros trabajos se analiza exclusivamente el efecto debido a irregularidades sobre la superficie libre de un medio homogéneo. Por último, en cualquiera de los dos casos anteriores se pueden considerar las características de la radiación incidente. Los efectos de todas estas condiciones locales que se acaban de exponer se manifiestan en el movimiento sísmico registrado de formas distintas:

- Se producen amplificaciones, deamplificaciones del movimiento ondulatorio.
- El contenido frecuencial se ve afectado.
- Varían los parámetros característicos del movimiento del suelo, como pueden ser: las amplitudes máximas, la duración,...
- En ciertas condiciones puede haber un comportamiento no lineal del suelo.
- Puede haber una gran variabilidad del movimiento en lugares muy próximos entre sí.

Es difícil delimitar hasta qué punto estos comportamientos son debidos a una determinada estratigrafía geológica o a una topografía del terreno. En algunos trabajos se infieren resultados debidos, a distintos tipos de suelo y a la geometría de la superficie, por separado. Estos análisis se realizan a partir de modelos de suelos y de accidentes topográficos que reflejen, en la medida de lo posible, las situaciones reales más interesantes. El desarrollo de éstos se realiza sobre la base de distintas clasificaciones, de tipo de suelos e irregularidades topográficas, a las que posteriormente se hará referencia. Mientras la obtención de datos para el establecimiento de estas clasificaciones resulta relativamente asequible en el caso de la topografía, el conocimiento de la geología superficial es un objetivo difícil en la mayoría de los casos, debido a que el coste del conocimiento de la misma, en general es elevado. En los siguientes apartados se presentan algunos de estos modelos.

Los fenómenos físicos que contribuyen al movimiento del suelo a través del efecto de emplazamiento son de muy diversa índole, la raíz de los mismos está íntimamente relacionada con las características geológicas, geométricas, y dinámicas del terreno. Se presentarán más adelante algunos de los resultados más relevantes en función de las distintas situaciones estudiadas.

1.1. Efecto de la Topografía Superficial

Los estudios relacionados con el efecto local debido a las irregularidades topográficas del terreno se han desarrollado posteriormente a los dedicados al estudio de la geología superficial. En parte este desfase puede ser debido a que una de las líneas de estudio importante de este problema, como es la de la simulación numérica, se ha desarrollado paralelamente a la evolución de la capacidad de cálculo de los ordenadores.

Existen algunos resultados hasta la fecha que estiman, cualitativa y cuantitativamente, el efecto local de las irregularidades topográficas más intere-

santes que se pueden encontrar en la naturaleza. Para obtener estos resultados se han realizado estudios sobre distintos modelos que intentan reflejar estos accidentes del terreno. En la actualidad, estos modelos se pueden clasificar en:

- *Topografías convexas*: cualquier elevación sobre la superficie libre como dorsales y montañas.
- *Topografías cóncavas*: como valles y cañones.

Dentro de las distintas topografías, la situación del emplazamiento es importante, destacando por las peculiaridades del efecto que se produce: *los bordes y el fondo de los cañones o valles, las cimas y los pies de las montañas*.

Las distintas geometrías que se han aplicado para estos estudios están caracterizadas por algunos parámetros. Por ejemplo, en el caso de las topografías convexas, el contorno de la superficie libre sobre un medio homogéneo, ha sido descrita frecuentemente mediante el modelo de Sills (1978) (figura 1):

$$f(x) = h(l - c^2) \exp(-c^2) \quad \text{donde} \quad c = x/l \quad [1]$$

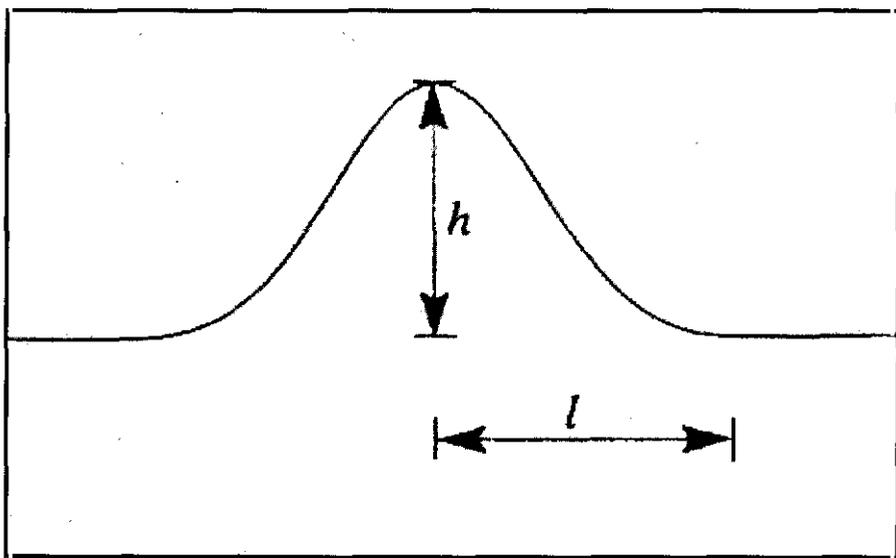


Figura 1. Modelo 2D de elevación sobre la superficie libre, Sills (1978). Los parámetros característicos son la semianchura l , y la altura h . X es la coordenada en la dirección de l .

Por otro lado, en la figura 2 se ilustra la geometría de algunos estudios realizados en topografías cóncavas, como es el caso de los cañones semielípticos sobre un medio homogéneo.

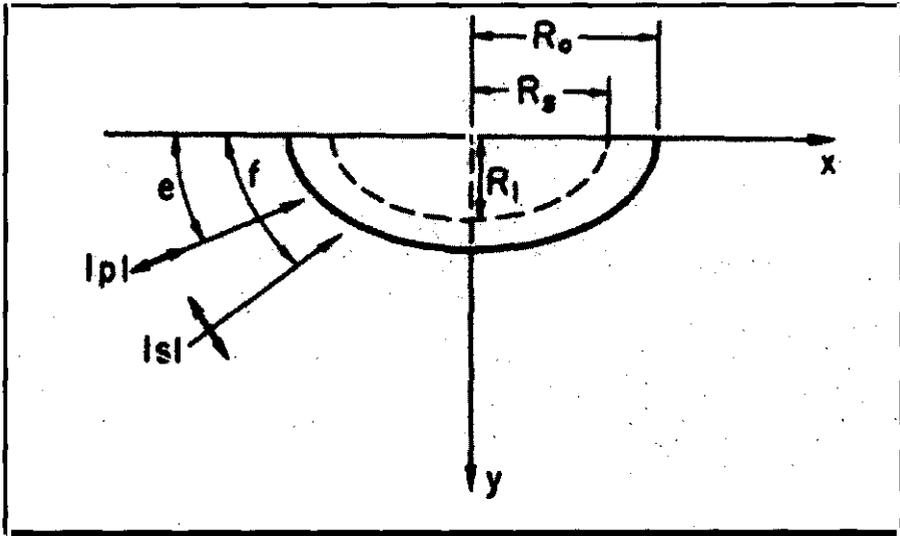


Figura 2. Modelo 2D de cañón semielíptico. La geometría del problema viene definida en función de los radios R_o , R_s .

Pero no sólo afecta la forma de la irregularidad de la superficie a la hora de evaluar el efecto local. Se ha comprobado que el efecto de la topografía es sensible a la radiación incidente en cuanto a: *tipo de onda, ángulo de incidencia y azimut de la misma*. Esta nueva componente del problema suele estar contemplada en los estudios, realizando los análisis para distintos tipos de onda: P, SV, SH y ondas superficiales, así como, para distintos ángulos de incidencia, y azimut. En la figura 3 se describe un modelo de irregularidad topográfica y el movimiento ondulatorio implicado en el estudio.

Los fenómenos físicos que se han detectado en la incidencia del movimiento de las ondas sobre irregularidades topográficas se pueden clasificar, según su naturaleza, en tres tipos:

- *Difracción* de las ondas de volumen y superficiales, produciéndose interferencias entre las ondas directa y difractada. Las amplitudes de estas últimas son inferiores a las primeras, por lo menos en el caso de topografías de pendiente suave.

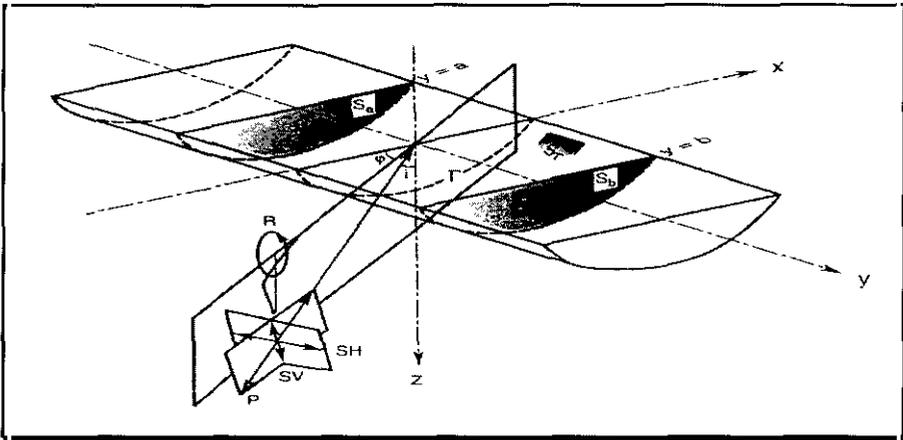


Figura 3. Ilustración de la geometría y las características de la radiación incidente, en el análisis del efecto local sobre el contorno de un cañón semicircular, (Zhang 1998).

- *Focalización o desfocalización (focusing o defocusing)* de las ondas sísmicas reflejadas a lo largo de la superficie topográfica.
- *Variaciones del movimiento* en función de la pendiente de la topografía, debido a la anteriormente mencionada sensibilidad del mismo, respecto del ángulo de incidencia. Este fenómeno es especialmente importante en el caso de las ondas SV cuando inciden con un ángulo cercano al crítico.

Aunque los trabajos dedicados a este problema, presentan un panorama muy complejo y disperso debido, por un lado, a las muchas variables que toman parte en el fenómeno, (desde las distintas geometrías y representaciones en los dominios temporal y espectral, hasta los diversos parámetros característicos de la radiación implicada) y por otro, a la variedad de la metodología empleada, se pueden destacar algunos resultados cualitativos de tipo general donde la observación y la teoría presentan una cierta convergencia. En la revisión que realizan Geli et al. (1988) y Bard (1995) sobre el estudio del efecto de la topografía, se resaltan algunos de los rasgos característicos que han sido analizados por distintos autores como son:

- Se produce una amplificación del movimiento en las cimas de las montañas (en general, de las topografías convexas), y una deamplificación en el fondo de los valles, (en general de las topografías cóncavas). Estas amplificaciones se ven afectadas por el tipo de onda, sien-

do mayor el efecto para las ondas S que para las ondas P. Es más, en general, cuando la componente horizontal del movimiento es perpendicular al eje de las dorsales, la amplificación es mayor que en el caso de ser paralelo al mismo. Las amplificaciones son sensibles a la pendiente de la topografía en una relación directa.

- Se observa que la máxima amplificación es sensible a la razón entre la semianchura y altura de la elevación; cuanto mayor es la pendiente mayor es la amplificación.
- El fenómeno depende del contenido frecuencial de la onda, produciéndose las mayores amplificaciones para las longitudes de onda del movimiento comparables con las dimensiones horizontales de la topografía.
- En general, existe un acuerdo entre la frecuencia correspondiente a la máxima amplificación predicha teórica y experimentalmente.
- Existe discrepancia entre la cuantificación de la amplitud teórica y observada. Con frecuencia las amplificaciones observadas son superiores a las predicciones teóricas.

En Geli et al. (1988) se analizan algunos estudios teóricos en los que se consideran modelos topográficos 2D más complejos para intentar explicar las discrepancias entre los resultados cuantitativos teóricos y observados. En estos modelos se contemplan irregularidades topográficas cercanas al accidente en estudio y/o estratificaciones irregulares subsuperficiales, bajo la incidencia de ondas SH (figura 4).

Algunas de las conclusiones destacadas son:

- En el caso de modelos con estratigrafía subsuperficial (figura 4), se observa una sistemática amplificación en bajas frecuencias, independientemente de la estructura geológica y los valores de velocidad superficiales, así como, una tendencia general a la deamplificación en altas frecuencias. Las comparaciones entre los resultados de los modelos b) y c), ponen de relieve que la estructura subsuperficial profunda, que en general no corresponde a fuertes discontinuidades, no juega un papel relevante en este tipo de modelos.
- La presencia de irregularidades próximas entre sí, induce a un aumento en las amplificaciones y deamplificaciones, que es superior en la elevación central que en las laterales. En presencia además de una estratificación geológica subsuperficial, estas amplificaciones son mayores que en caso de considerar un medio homogéneo.

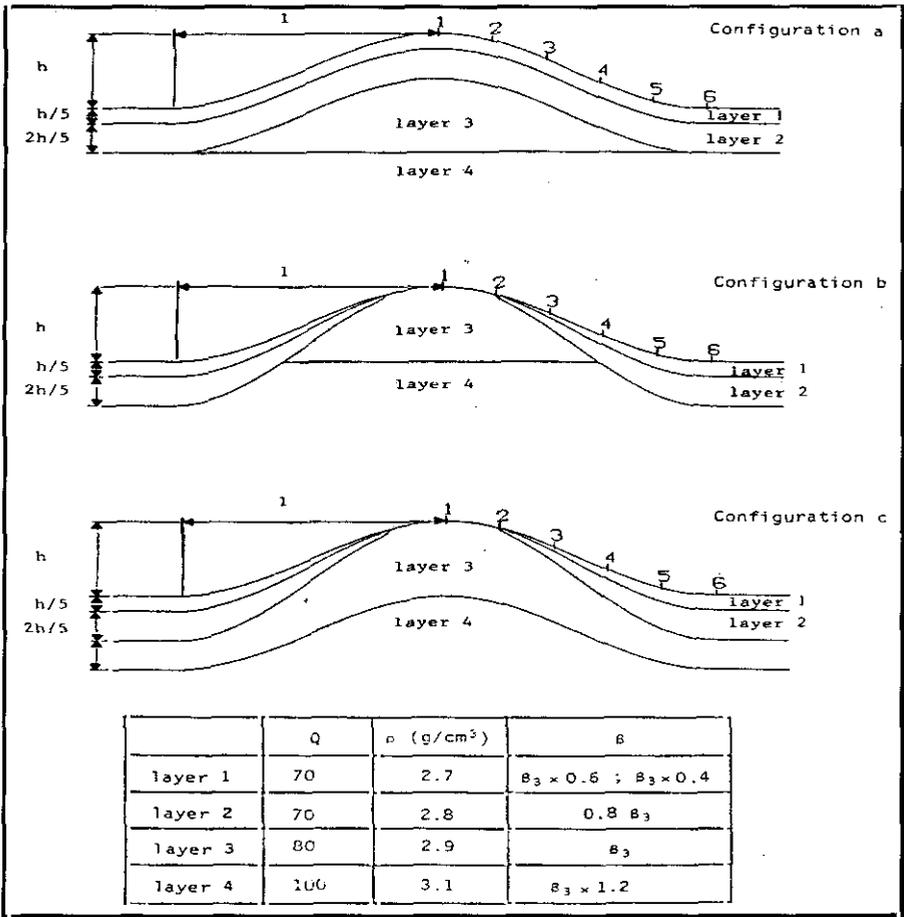


Figura 4. Secciones de las tres configuraciones (a, b y c) seleccionadas para el estudio del efecto de la estratificación subsuperficial en elevaciones (Geli et al., 1988).

1.1.1. Algunos resultados sobre la cuantificación del efecto de la topografía

En los estudios teóricos y basados en la observación, de estimación del efecto de la topografía, se han obtenido resultados cuantitativos del mismo para distintas irregularidades del terreno y distintos campos incidentes. Como ejemplo de algunos estudios recientes, a continuación se presentan resultados obtenidos mediante distintas técnicas, en modelos que responden a geometrías básicas: cóncavas o convexas.

Una de las topografías cóncavas más estudiadas es el cañón semielíptico. Zhang et al. (1998), corrobora algunos de los resultados conocidos en otros trabajos, pero con geometría semicircular. El estudio se realiza mediante un método híbrido numérico desarrollado para resolver el denominado problema 2.5 en elastodinámica, y, bajo la incidencia de las ondas SH, SV, P o Rayleigh (figura 3).

En el caso de incidencia de ondas SH, se validan los resultados obtenidos en Trifunac (1973), donde se resuelve analíticamente el estudio de las amplitudes en la superficie de un cañón semicircular de radio a en función de la frecuencia adimensional:

$$\eta = \frac{\omega a}{\pi c} = \frac{2 a}{\lambda} \quad [2]$$

Este parámetro, que combina la geometría del problema mediante el radio a , con algunas de las propiedades dinámicas de la radiación como es la frecuencia angular, ω , y la velocidad de las ondas sísmicas, c , representa la razón entre la anchura del cañón y la longitud de onda, λ , del campo ondulatorio. Este tipo de frecuencias adimensionales suelen formar parte de los estudios de efecto de emplazamiento. Algunos de los resultados inferidos son:

- El mayor valor del factor de amplificación para los distintos ángulos de incidencia se aproxima a 2.
- A medida que el ángulo de incidencia aumenta, el patrón de las amplitudes de los desplazamientos se complica. En la incidencia normal existe simetría respecto del centro del cañón, mientras que al aumentar el ángulo, se produce un efecto de barrera o escudo sobre el margen del cañón expuesto a la llegada de la onda, generando una zona de sombra en la vertiente opuesta (figura 5).

En este mismo trabajo se comprueban los resultados obtenidos por Luco et al. (1990) en la estimación del efecto local para el caso de ondas incidentes SV y P, así como, el realizado por Wong (1982) mediante un procedimiento basado en un método inverso generalizado (figura 6).

Los rasgos más sobresalientes se resumen en:

- La amplificación de las amplitudes es menor que dos veces las amplitudes en la superficie libre sin topografía.
- Las amplitudes en la vertiente sobre la que incide el movimiento ondulatorio pueden llegar a ser inferiores a las registradas en la ver-

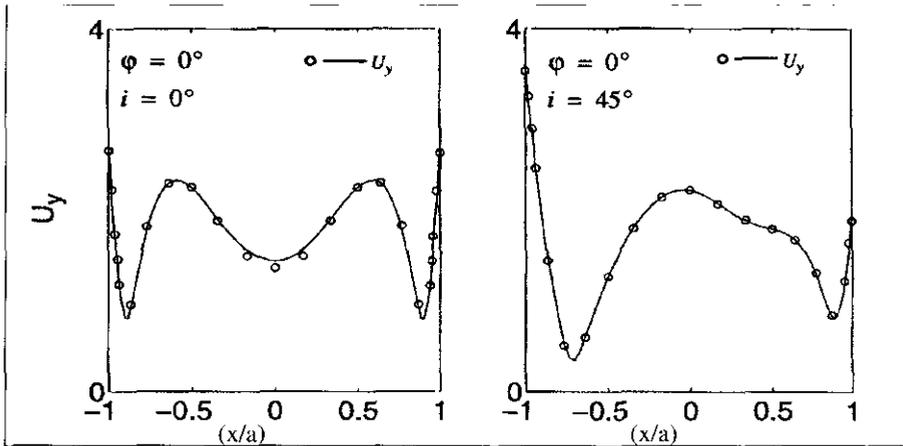


Figura 5. Desplazamientos (U_y) registrados en un cañón semicircular de radio a (Zhang, 1998), según el modelo de la figura 3, bajo la incidencia de ondas SH de amplitud unidad. La frecuencia adimensional es $\eta = 1$.

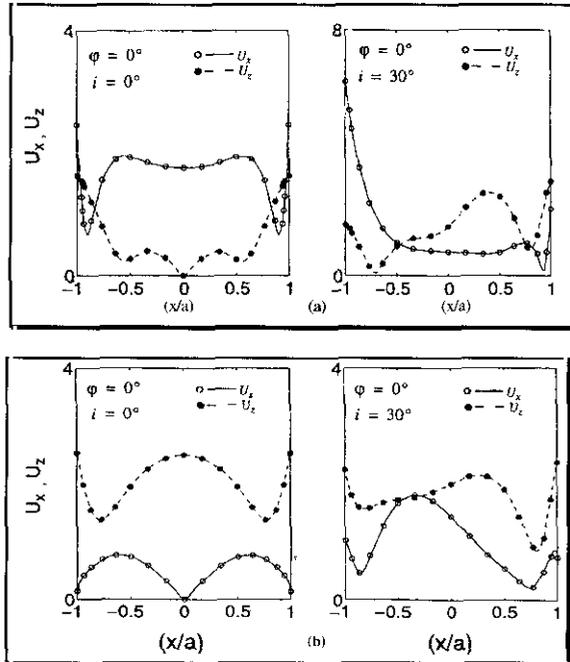


Figura 6. Desplazamientos (U_x , U_z) registradas en un cañón semicircular de radio a (Zhang 1998), según el modelo de la figura 3. La frecuencia adimensional $\eta = 1$ y amplitud de incidencia la unidad. (a) Incidencia de ondas SV. (b) Incidencia de ondas P.

tiende opuesta. Este fenómeno puede ser debido a conversiones de las ondas originales. En el caso de las ondas SV, este efecto es más importante.

- Respecto de los resultados del efecto de la incidencia de ondas Rayleigh, las amplitudes en algunos casos son prácticamente el doble de las incidentes en el contorno del cañón. Además se observa un efecto escudo muy pronunciado (figura 7).

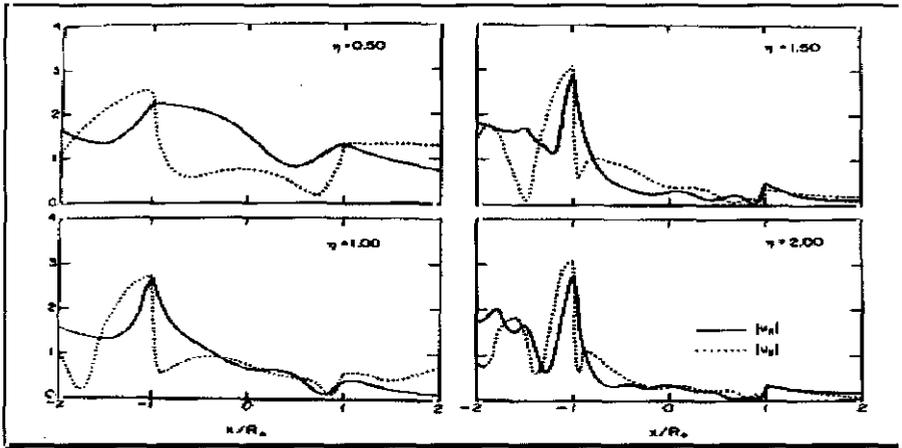


Figura 7. Patrón de amplificación de la incidencia de las ondas Rayleigh sobre un cañón semi-circular de radio R_0 (Wong 1982).

Además del efecto de amplificación debido a la geometría de la superficie, se producen otros fenómenos, descritos anteriormente, que condicionan el movimiento del suelo registrado en el emplazamiento. En los trabajos de Spudich et al. (1996), y, Bouchon y Barker (1996), se realizan estudios experimentales y simulaciones teóricas de la respuesta al sismo de Northridge de 1994 y sus replicas, sobre la elevación denominada Tarzana (California), que se encuentra a 6 Km. al sur del hipocentro y a 17 Km. por encima del mismo. El emplazamiento es de gran interés debido a que, a pesar de ser una topografía suave, de sólo 15 m. de elevación por 500 m. de longitud y 130 m. de anchura (figura 8), se han llegado a registrar aceleraciones pico con valor 1.78 g. Estas importantes aceleraciones se registraron con anterioridad en el terremoto de Whittier Narrows de 1987 localizado bajo Los Angeles. En ese evento las aceleraciones en el emplazamiento de Tarzana fueron las segundas aceleraciones pico observadas, en importancia, a pesar de la distancia epicen-

tral de 44 Km. Del contraste entre los resultados observados y teóricos, los autores concluyen que a pesar de la suavidad del relieve en cuestión, éste es en parte responsable de los siguientes rasgos del efecto local:

- Amplificación sobre la cima y su entorno.
- Respuesta sísmica direccionada; se produce una mayor amplificación del movimiento del suelo en la dirección transversal a la dirección de elongación de la montaña, que en la dirección paralela a la misma (figura 9).
- Existencia de un modo fundamental de resonancia transversal de la elevación, sobre una banda de frecuencias 3-5 Hz.
- Como consecuencia de la respuesta direccionada de la montaña, se produce una rotación de la polarización del movimiento del suelo hacia una dirección más transversal al relieve, a medida que se evoluciona desde la base hasta la cima de la montaña.
- Se observa una variación espacial de la amplificación sobre la elevación en el modo fundamental de resonancia.
- La rápida variación espacial puesta de manifiesto en una topografía tan suave, es un reto en los estudio de microzonación.

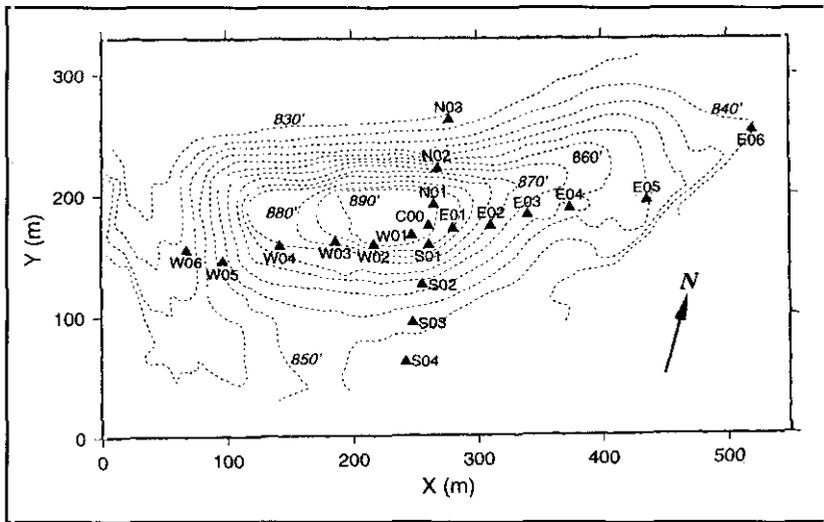


Figura 8. Mapa topográfico del emplazamiento de Tarzana. La distancia entre líneas de contorno es de cinco pies. En la ilustración aparece la localización: del acelerógrafo CMDG, denominado COO, el cual registró las aceleraciones altas del sismo, y de la red desplegada para el estudio de las replicas (Bouchon y Barker, 1996).

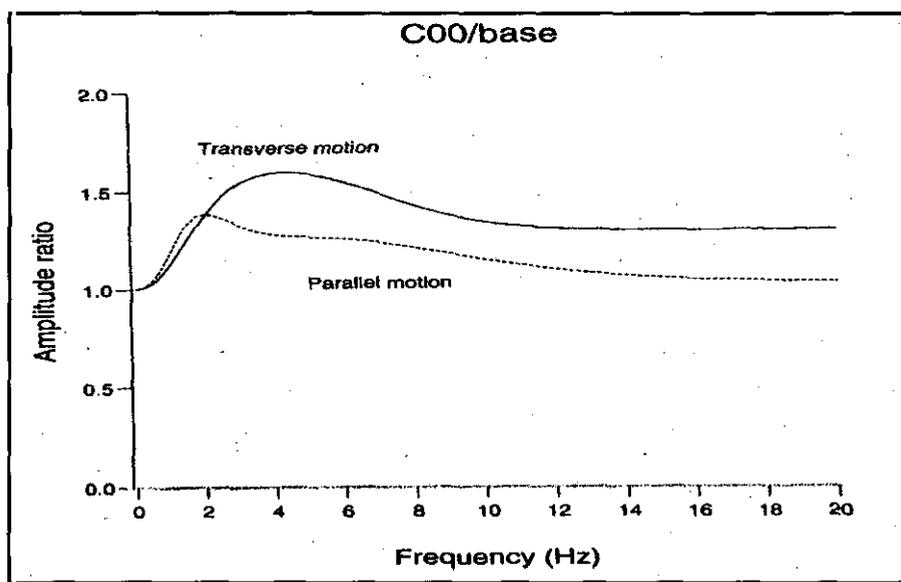


Figura 9. Razones entre el movimiento pico del suelo registrado en la cima de Tarzana (COO) y en la base (NO3), ver figura 8. Dichas razones se representan en función de la frecuencia, y corresponden a movimientos transversales y paralelos a la dirección de elongación de la montaña (Bouchon y Barker, 1996).

Otras muchas geometrías 2D y 3D (cañones triangulares, montañas triangulares y semielípticas), han servido para inferir funciones de transferencia referentes a la topografía. En algunos casos estos resultados han ayudado a validar métodos posteriormente desarrollados.

La representación de las amplitudes totales sobre el contorno de la irregularidad se suele realizar en el dominio de la frecuencia, pero también en el dominio del tiempo. La representación temporal, proporciona una buena posibilidad de conocer el origen de las amplificaciones o atenuaciones de los desplazamientos en la superficie. En Luzón et al. (1997) se realiza, entre otros estudios, la estimación de los desplazamientos generados sobre una cavidad cilíndrica y en una montaña en tres dimensiones (figura 10), debido a la incidencia de ondas P, S y Rayleigh.

En los sismogramas sintéticos generados, los autores resaltan, en el caso de la cavidad cilíndrica (figura 10a), que las paredes de las mismas actúan como buenos difractores produciendo emisión de energía en todas las direcciones, la mayor parte de ella identificada como ondas Rayleigh. En el caso de la elevación (figura 10b), se observa una emisión de ondas que se propa-

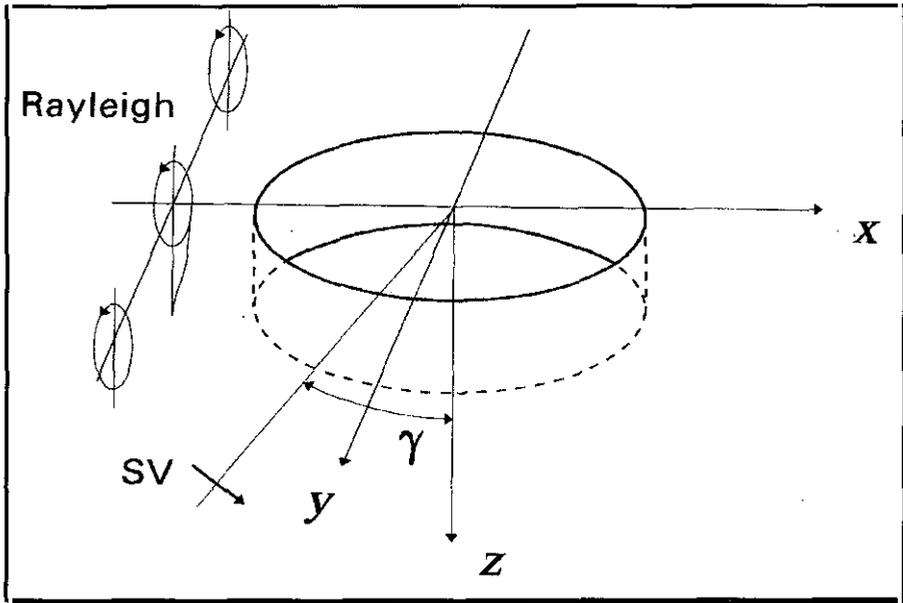


Figura 10.a) Modelo de cavidad cilíndrica en un semiespacio, bajo la incidencia de ondas SV y Rayleigh (Luzón et al. 1997).

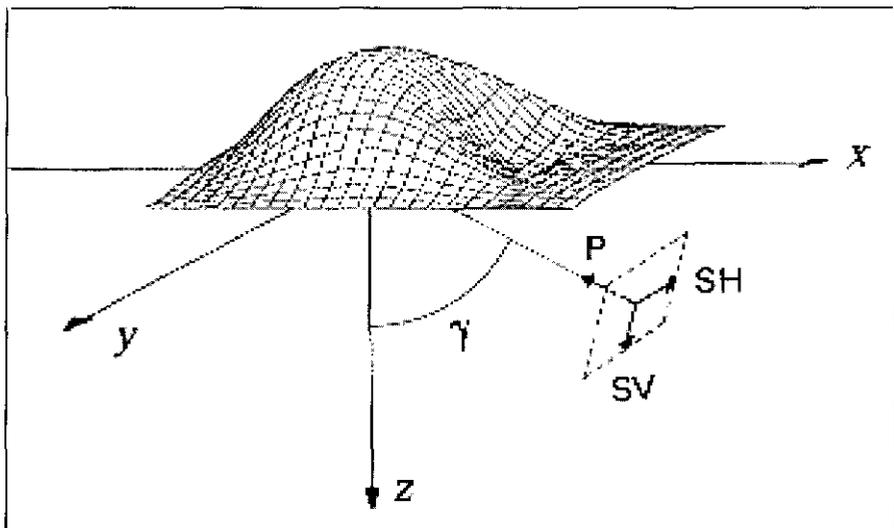


Figura 10.b) Perspectiva de la montaña 3D aplicada al estudio del efecto de la topografía en Luzón et al. (1997). Las ondas P y S inciden con ángulo de incidencia y azimuth π .

gan con mayor energía en el plano perpendicular al de incidencia. La interferencia entre estas ondas difractadas y otros modos de conversión producen complicados patrones de amplitudes de los desplazamientos (figura 11). Los autores consideran que la emisión de ondas generadas por conversiones de otras y, como consecuencia de ello, la variabilidad del movimiento del suelo registrado en la topografía, es un fenómeno a tener en cuenta.

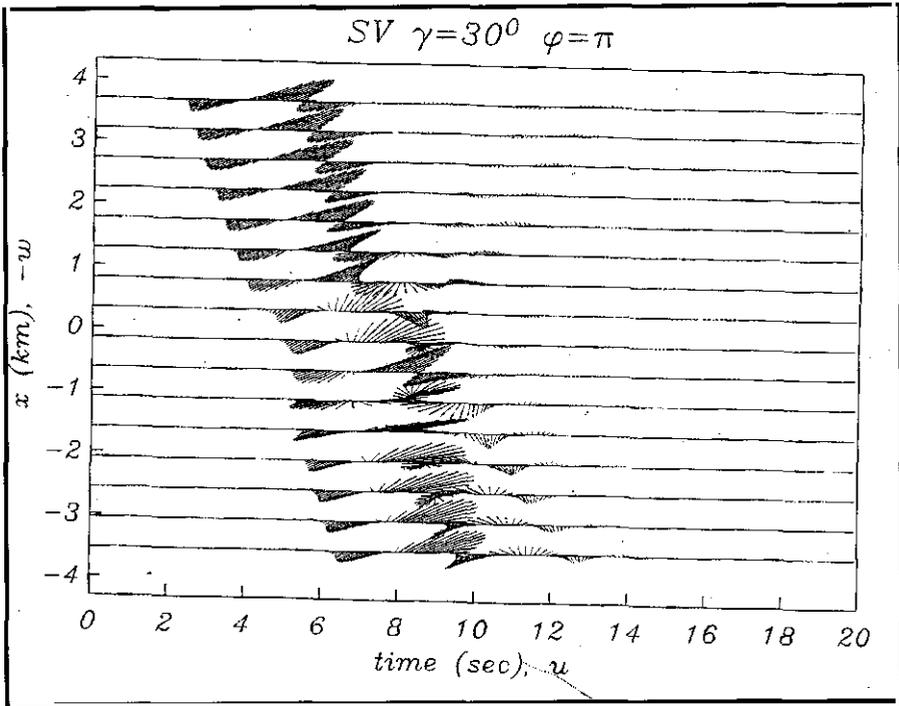


Figura 11. Polarigramas en 16 receptores equiespaciados a lo largo del eje x . En el eje de abscisas se representa el tiempo y el desplazamiento horizontal u , en función de la posición sobre la superficie libre del modelo (fig. 10b), y del desplazamiento vertical (Luzón et al. 1997).

De los distintos estudios sobre modelos de topografía se infiere, por tanto, una gran variabilidad del efecto local en función de las distintas variables a las que se ha hecho referencia. Además, se observa que la presencia de la irregularidad topográfica afecta, no sólo al movimiento sobre la propia estructura, sino también a los alrededores de la misma.

Para valorar los resultados obtenidos en los trabajos teóricos, se han realizado estudios en los que se comparan las estimaciones experimentales y teóri-

cas correspondientes a topografías del terreno. En la revisión realizada por Geli et al. (1988), ya se ha destacado que desde el punto de vista cualitativo, las dos aproximaciones convergen en los rasgos más característicos del efecto. Sin embargo, a la hora de cuantificarlos surgen algunas discrepancias. La raíz de estas divergencias puede, en parte, asociarse a la sencillez geométrica de los modelos teóricos comparados con las topografías reales. Además, en los modelos teóricos se supone un medio homogéneo bajo las irregularidades, que en algunos casos se aleja de la realidad. A la hora de caracterizar el efecto de topografía, se debe también escoger con cuidado la ventana de análisis sobre el registro, para evitar diferencias en la naturaleza de la radiación analizada.

Sin embargo, en recientes trabajos dicha discrepancia se ha visto reducida. En trabajos como el realizado por Pedersen et al. (1994), sobre elevaciones en la superficie de distinta pendiente, mediante el método estándar de razones espectrales experimentales y teóricas, se concluye que existe una cierta concordancia entre los resultados teóricos y los experimentales. Las estimaciones de amplificación observadas en dos elevaciones, una más suave que la otra, entran dentro del rango de las teóricas. En promedio, para el caso de la pendiente más suave, el valor de estas razones entre la cima y el pie de montaña tienen un valor por debajo de tres. Para la pendiente más pronunciada este valor entre la cima y la ladera llega hasta 4. En ambos casos los mayores valores se obtienen en las componentes horizontales.

En Chávez-García et al. (1996, 1997) se realiza una nueva comparación entre resultados teóricos y experimentales. En el plano teórico se utiliza, una técnica de inversión generalizada, y en el plano experimental el método de las razones observadas entre las componentes horizontales y la vertical (HVSZ). En dicho trabajo se evita la necesidad de una estación de referencia, que pueda contaminar el análisis con otros factores ajenos al mismo. La irregularidad estudiada es una elevación moderada de aproximadamente 200 m sobre la cual se despliegan 10 sismógrafos en un perfil E-O. Los autores observan una cierta concordancia entre los niveles de amplificación teóricos y observados, argumentando que la discrepancia hasta ese momento publicada, entre ambos niveles, pueda ser en parte resultado de efectos locales en la estación de referencia considerada en el estudio. Además, entre las conclusiones cabe destacar las amplificaciones máximas estimadas por debajo de 10 para el estudio individual de sismos, y, por debajo de 4 en el caso del estudio promediado para los distintos sismos. Estos resultados son consistentes con los resultados para el modelo utilizado. Los autores apoyan el método HVSZ para este tipo de estudios. Además se destaca la independencia del efecto estimado con respecto al azimut y a la distancia epicentral, y la estimación de máxima amplificación cerca de la base de la elevación en vez de en la cima.

1.2. Efecto de la Geología Superficial

La respuesta local, en la mayoría de las ocasiones, no se puede explicar a través de modelos basados en superficies con una geometría superficial concreta, sobre un medio homogéneo. En los registros sísmicos influye de forma muy importante la estructura geológica local, en cuanto a su composición, geometría, propiedades dinámicas, etc. . .

Los primeros estudios, donde se considera la composición y propiedades dinámicas de la geología local en el emplazamiento, apuntan hacia el fenómeno de la resonancia, como principal causa de la variabilidad del movimiento del suelo en función de los distintos emplazamientos.

En estos últimos años, algunos métodos numéricos han resaltado la importancia que tiene la denominada topografía subsuperficial en valles o cuencas sedimentarias, por la posible generación de ondas superficiales locales que son atrapadas en las capas más superficiales del suelo. Esta constituye un nuevo factor que añadido a los modelos topográficos anteriormente discutidos, puede ayudar a explicar algunos rasgos observados en el movimiento del suelo. En algunos estudios asociados a grandes estructuras de este tipo, se han observado ciertos efectos inducidos por la difracción de estas ondas localmente generadas, como: una duración más larga del movimiento, fases generadas en el borde de la cuenca con amplitudes mayores que las de la onda S directa, etc.

En el análisis del movimiento del suelo en función de la clasificación del mismo, son muchos los parámetros utilizados. Entre ellos están algunos directamente observables en el registro, como pueden ser: los valores pico de aceleración, velocidad o desplazamiento (tanto en el dominio del tiempo, como en el de la frecuencia), la frecuencia predominante del movimiento del suelo... En otros estudios se estiman parámetros característicos como la duración, la intensidad de Arias, etc. También se ha dedicado un gran esfuerzo a la deducción de modelos de atenuación del movimiento, donde se combinan las características del sismo, del movimiento del suelo, y, el tipo de suelo.

Para acometer, por tanto, el estudio del movimiento del suelo, considerando la influencia del tipo de suelo se requiere en primer lugar, una caracterización del mismo en los distintos emplazamientos. En el siguiente apartado se presentan algunas de las caracterizaciones más utilizadas en la literatura.

1.2.1. Caracterización local del suelo

A medida que se ha ido avanzando en el conocimiento geológico, geotécnico, geofísico, y en el estudio del efecto de emplazamiento, las clasificacio-

nes de los distintos tipos de suelo han evolucionado introduciendo nuevos parámetros cualitativos y cuantitativos.

Las primeras clasificaciones, se establecieron en función de la composición y espesores de los estratos. Así en general se distinguen tres tipos de suelo: *suelo duro o roca*, *suelo intermedio* y *suelo blando*. Por ejemplo en Seed et al. (1976a) se establece la clasificación:

- *Roca* - caracterizada por una velocidad de cizalla superior a 750 m/s.
- *Suelo medio* - compuesto por arcilla, arena o lava, de espesor aproximado de 45 m., yaciendo sobre roca similar a la anterior.
- *Deposito cohesional profundo* - de al menos 75 m. de espesor sobre roca.

Este tipo de clasificaciones se siguen usando a veces por motivos de falta de información más detallada que permita una clasificación más fina, o bien, porque la escala del problema no requiere un conocimiento más detallado.

La relación sistemática entre amplificación local y geología subyacente queda reflejada en la clasificación reseñada en el trabajo y establecida por Philips y Aki (1986) que consiste en cuatro tipo de suelos: *granítico*, *formaciones mesozoicas*, *sedimentos en zonas de fallas* y *fuera de ellas*.

Cuanto más fina sea la clasificación, más se podrá ahondar en el conocimiento del efecto de emplazamiento. Por ejemplo en el trabajo de Su et al. (1992) donde se analiza el efecto local a través del estudio de la coda de microterremotos, registrados por una red sísmica localizada en la región central de California, se establece una clasificación más detallada que la anterior debido a un mejor conocimiento de la geología del emplazamiento. En este trabajo se señala, de nuevo, la relación inversa entre amplificación local y edad geológica, que se ve afectada por el contenido frecuencial; en las condiciones en las que se desarrolla el trabajo se infiere que la razón de decrecimiento de la amplificación con el aumento de la edad geológica, en las frecuencias bajas es más rápida que en las altas (el análisis se realiza entre 1.5 y 12 Hz).

Otro ejemplo puede ser la descripción geotécnica del suelo de Ligorria y Atakan (1997), donde se realiza un estudio de estimación empírica de la respuesta local en la ciudad de Guatemala, ver tabla 1.

Sin embargo, en una misma unidad geológica se pueden observar variaciones en el efecto de emplazamiento. El comportamiento de distintos tipos de suelo no puede caracterizarse sólo por su composición o los espesores de los estratos. Se requieren otros parámetros de tipo geotécnico y geofísico, asociados a éstos, que nos permitan conocer mejor el problema, como son: la

velocidad de las ondas de compresión y de cizalla, el módulo de rigidez o de elasticidad transversal, el coeficiente de Poisson, la densidad, el amortiguamiento del medio, etc. El conocimiento de estos nuevos parámetros permite establecer nuevas clasificaciones sobre la base de ellos.

La clasificación publicada en el estudio de Borchardt (1994) es un buen ejemplo. En el trabajo propone un método empírico, estructurado en cuatro fases, para la estimación del espectro de respuesta en función del emplazamiento. La segunda de estas fases consiste en la caracterización de las condiciones locales del emplazamiento en función de las propiedades físicas del material, espesor mínimo de los estratos, y la velocidad media de las ondas de cizalla. Esta última definida como:

$$\bar{v} = 30 \text{ m/tiempo de llegada (seg) de la onda S a una profundidad de 30 m.}$$

Tabla 1. Clasificación del tipo de suelo presentada en Ligorria y Atakan (1997)

Tipo de perfil	Descripción
S ₁	<i>Terciario volcánico</i> : fundamentalmente compuesto por roca cristalina de origen volcánico, con una velocidad de cizalla superior a 750 m/s.
S ₂	<i>Cuaternario Purnice</i> : un perfil con depósitos consistentes profundos de piroclastos, en su mayoría compuestos de cenizas y purnice con profundidades que superan los 60 m.
S ₃	<i>Sedimentos de transición</i> : perfil sedimentario de 5 a 50 m de profundidad, conteniendo capas de arena con una consistencia de grado suave a intermedia, sobre depósitos de purnice o cenizas y grava gruesa, con o sin la intervención de capas de arcilla sin cohesión.
S ₄	<i>Depósito aluvial cuaternario</i> : un perfil caracterizado por una velocidad de cizalla inferior a 150 m/s, compuesto de depósito aluvial cuaternario con espesor de más de 15 m.

La clasificación propuesta se describe en la tabla 2. Para la realización de dicha tabla se ha recopilado la información existente en mapas o en perfiles locales en distintos emplazamientos, de las propiedades de los materiales más superficiales, la velocidad media y la amplificación del movimiento del suelo. El autor define las cuatro clases de suelo: *CS-I*, *CS-II*, *SC-III* y *SC-IV*, compatibles con otras clasificaciones existentes.

Tabla 2. Clasificación del suelo propuesta por Borcherdt (1994)

TIPO DE SUELO		CRITERIO DE CLASIFICACIÓN							
Nombre	Descripción general	Velocidad media de cizalla				Espesor			
		Mínima	Promedio	Máxima	Mínimo				
		ft/s	m/s	ft/s	m/s	ft	m		
<i>SC-I</i>		<i>ROCA FIRME Y DURA</i>							
<i>SC-Ia</i>	<i>A</i>	<i>Roca dura</i> (ej. roca metamórfica con fracturas muy extendidas)	4600	1400	5200	1320			
<i>SC-Ib</i>	<i>B</i>	<i>Roca firme y dura</i> (ej. granito, roca ígnea, conglomerados, areniscas y esquistos con fracturas cercanas y más espaciadas entre sí)	2300	700	3500	1050	4600	1400	
<i>SC-II</i>	<i>B</i>	<i>SUELOS PEDREGOSOS Y ROCA DE BLANDA A DURA</i> Roca blanda sedimentaria ígnea, areniscas y esquistos, gravilla, suelos con > 20% gravilla	1230	375	1800	540	2300	700	20 10
<i>SC-III</i>	<i>C</i>	<i>ARCILLAS CONSISTENTES Y SUELOS ARENOSOS</i> (ej. arenas de consistencia suave a densa, margas y arcilla arenosa, y arcillas de consistencia suave a dura, y arcillas sedimentarias (N < 50 blows/ft))	660	200	950	290	1230	375	20 5
<i>SC-IV</i>	<i>D</i>	<i>SUELOS BLANDOS</i>	330	100	500	150	660	200	
<i>SC-IVa</i>	<i>DI</i>	<i>SUELOS BLANDOS NO ESTUDIADOS ESPECÍFICAMENTE</i> (relleno suelto sumergido, arcillas muy blandas (N < 1 blows/ft) y arcillas sedimentarias de espesor < 37 m)							19 3
<i>SC-IVb</i>	<i>E</i>	<i>SUELOS BLANDOS ESPECÍFICAMENTE ESTUDIADOS</i> (suelos bajo licuefacción, arcillas altamente orgánicas, arcillas de un grado alto de plasticidad y suelos blandos con más de 37 m)							10 3

Respecto al proceso de caracterización local, se sugieren tres opciones según sea el estudio a realizar, o la información conocida. La primera se basa en el conocimiento de las propiedades físicas de los materiales más superficiales. Se asigna una clase determinada en función de esas propiedades según se describe en la tabla 2. Con este tipo de caracterización se puede sobresti-

mar la amplificación ya que, como es sabido, ésta en general disminuye con la profundidad.

Aumentando la información del emplazamiento obtendremos clasificaciones más detalladas, como es el caso de la segunda opción de caracterización que se propone. A partir del conocimiento de las propiedades físicas, espesores de las capas, y algún otro parámetro geotécnico más, se establecen clasificaciones en función de la información de las velocidades medias medidas en otros perfiles conocidos con materiales similares y profundidades comparables. La tercera técnica consiste en la medición de la velocidad media en el emplazamiento. Esta opción permite estimar la amplificación con menor incertidumbre.

Cuanto mayor sea el conocimiento cuantitativo de parámetros característicos del suelo, más se ajustará el modelo de suelo a la realidad. En esta línea cada vez son más los métodos geotécnicos, geofísicos y de laboratorio desarrollados con estos fines. En los trabajos de Raptakis et al. (1996), Pitilakis et al. (1998) y Cid (1998) se presentan resultados obtenidos en una valle sedimentario cerca de la ciudad de Thesaloniki (Grecia) con algunos de estos métodos. Una primera clasificación de estos ensayos de obtención de parámetros dinámicos, es:

— *Ensayos de campo* entre los que destacan:

- Las técnicas geofísicas de refracción y reflexión sísmica, la inversión de las ondas superficiales.
- Los métodos directos de Down-Hole (DH), Cross-Hole (CH), el cono sísmico de penetración,...
- Los métodos indirectos de ensayo de penetración estándar (SPT), ensayo de cono de penetración (CPT),...

— *Ensayos de laboratorio* como son la columna resonante, de torsión, el triaxial cíclico,...

1.2.2. Algunos resultados sobre la cuantificación del efecto de la geología superficial

En la extensa literatura desarrollada sobre el efecto de emplazamiento debido a la geología superficial, existen distintos enfoques de los análisis, en función de los aspectos del movimiento del suelo. Este apartado se centra fundamentalmente en la presentación de aquellos resultados que estén relacionados de forma más directa con la obtención de funciones de transferencia para

distintos tipos de suelo. Estas estimaciones pueden realizarse de forma empírica o numérica, basadas en una caracterización geológica y geométrica de la capa más superficial. Se persigue obtener unos rangos de frecuencia donde se produzca la máxima amplificación o deamplificación, localizando así la denominada frecuencia predominante del suelo. De esta forma, también se establecen rangos de amplificación del movimiento del suelo, para las distintas amplitudes espectrales (de Fourier o de respuesta).

Los trabajos de Ligorria y Atakan (1997), y, Atakan (1997), son una muestra de estudio empírico de la respuesta local, donde se produce continuas referencias a otros estudios en esta línea de trabajo. En ellos, los autores presentan los resultados obtenidos sobre la cuantificación de la frecuencia predominante y la amplificación en distintos emplazamientos, dada la incidencia de movimientos débiles y fuertes, para regiones todas ellas localizadas en América Central. Algunas observaciones de tipo general recogidas en estos trabajos, corroboran conclusiones de otros autores (Lermo y Chávez-García (1993), Hartzell (1992), Atakan y Torres (1997), Beresnev et al. (1995)...). Entre ellas cabe destacar:

- Las amplificaciones espectrales dependen de la frecuencia. En el caso de cuenca sedimentaria la frecuencia predominante esta muy relacionada con la geometría de la misma y con las características de los depósitos sedimentarios.
- El comportamiento no lineal de las razones espectrales en sedimentos, se puede observar, bien mediante la comparación de las amplificaciones espectrales de sismos de diferentes tamaños, o bien, a través de la respuesta del emplazamiento dependiente de la frecuencia y de las características de los sedimentos. En altas frecuencias, se ha observado que normalmente se producen deamplificaciones.

En Dimitriu et al. (1999) de nuevo se pone en evidencia la respuesta no lineal del emplazamiento. En el trabajo se emplea la técnica de razones espectrales HVSR para analizar los dos rasgos principales del efecto no lineal del suelo sobre el movimiento del mismo: la deamplificación del movimiento fuerte y el decrecimiento de la frecuencia predominante. En el estudio realizado sobre los datos de la red SMART1 (Taiwan), se ha estimado el grado de no linealidad en función de la banda de frecuencia, obteniéndose que por debajo de 1.5 Hz la respuesta no lineal excede a la lineal, por encima de 2 Hz la respuesta no lineal se reduce a la lineal, y, más allá de 4 ó 6 Hz ésta cae por debajo de la unidad, produciéndose la deamplificación. Entre 10 y 16 Hz las dos respuestas convergen. Además resaltan una disminución importante de la

frecuencia predominante de 3 a 1 Hz. Respecto a la fiabilidad de la técnica los autores consideran que ésta puede ser utilizada para detectar y estudiar la respuesta no lineal del emplazamiento.

Sin embargo, todavía muchos de los resultados que se obtienen en este tipo de trabajo son locales, aplicables a la región de estudio. Por ejemplo, en el caso de los trabajos citados anteriormente [Ligorria y Atakan (1997), Atakan (1997)], se observa que:

- Salvo en condiciones especiales, en promedio los factores de amplificación espectral no exceden un factor seis.
- En cualquier diseño sísmico en la región, es aconsejable considerar un factor mínimo de amplificación de dos a tres.
- Las frecuencias predominantes varían en los distintos emplazamientos, dependiendo del tipo de suelo. Sin embargo, la mayoría de la amplificación ocurre en una banda de frecuencias de 1 a 8 Hz.

Por tanto, a pesar de los muchos esfuerzos que se han dedicado al estudio de las características del movimiento del suelo debido a la geología local, existen muchos temas sin resolver, como pueden ser: la extrapolación de los resultados a otros emplazamientos, la fiabilidad de las estimaciones realizadas con algunas técnicas, la aplicabilidad de modelos unidimensionales de propagación de ondas, o por el contrario la necesidad de utilizar modelos bidimensionales o de grado superior, etc...

Para dar alguna respuesta a estos interrogantes, se han realizado experimentos en distintas áreas, seleccionadas específicamente como emplazamientos patrón para el estudio del efecto local. Un ejemplo, en esa línea de trabajo, es el proyecto EURO-SEISTEST [Jongmans et al. (1998), Riepl et al. (1998) y Dimitriu et al (1998)], llevado a cabo en el valle de Volvi, cerca de la ciudad de Thessaloniki (Grecia) (figura 11), dotado de instrumentos de alta resolución. Parte del proyecto se dedicó a un estudio geofísico y geotécnico de la cuenca, obteniéndose una exhaustiva información sobre la estructura superficial (composición y geometría), y de otras propiedades (velocidades de las ondas P y S, coeficientes de atenuación,...).

Se aplicaron técnicas empíricas (como la estimación de razones espectrales estándar, y, de razones entre las componentes horizontales y vertical, el método de Nakamura,..), y, técnicas teóricas analíticas (el método de la matriz de Thomson-Haskell, el método del coeficiente de reflectividad de Kennet,..). Entre las conclusiones, se encuentran algunas directamente relacionadas con el campo de aplicación de las distintas técnicas, así como, aspectos más relacionados con el diseño de una función de transferencia:

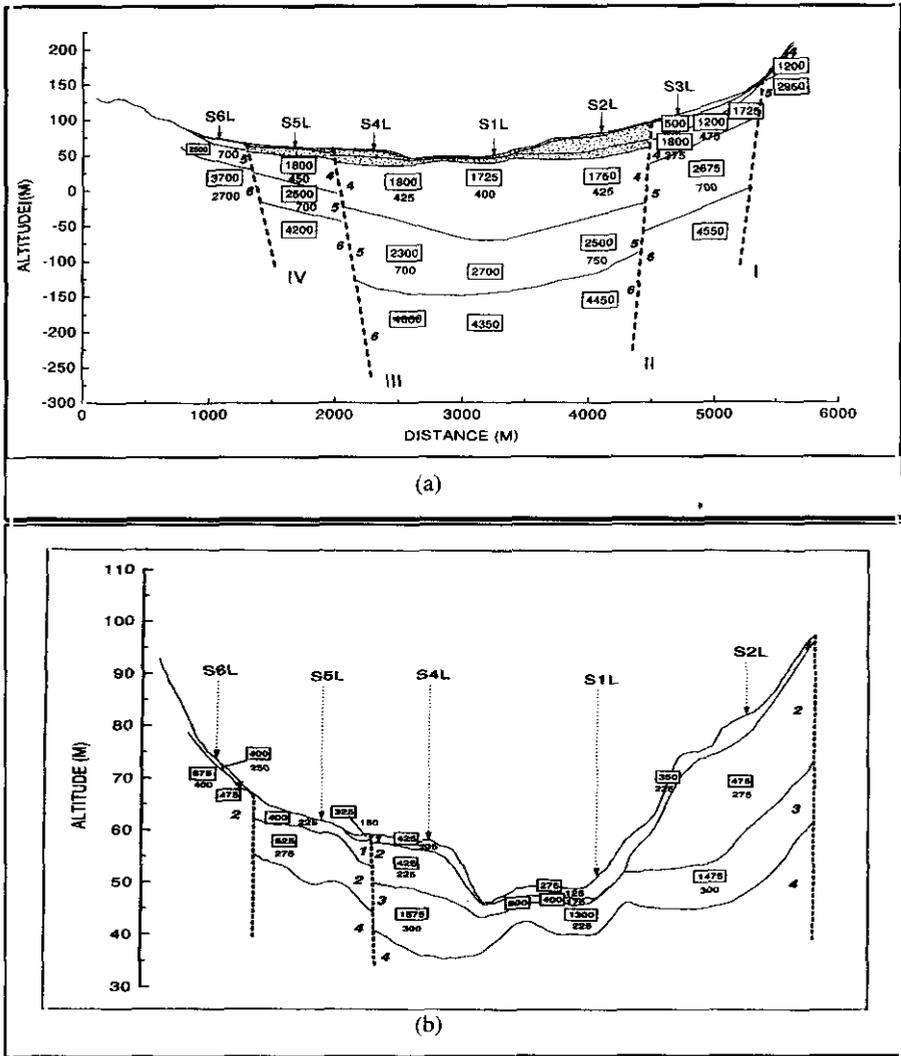


Figura 12. Perfil de la cuenca de Volvi, determinado mediante prospección geofísica. (a) Detalle de las tres capas más profundas (4,5,6). (b) Detalle de las tres capas más superficiales (1,2,3). Las velocidades de las ondas P y S aparecen reflejadas en ambas ilustraciones. Las primeras encuadradas, y las segundas debajo de éstas. (Jongmans et al. (1998)).

— Se encuentran importantes amplificaciones en el centro del valle. Hay cambios bruscos en la amplificación a través de las fallas que bordean al valle.

- Se encuentra una asimetría en las amplificaciones locales, a lo largo del perfil perpendicular al eje del valle. En el borde sur de la estructura, donde se encuentra una de las fallas principales, se estiman valores mayores en una banda de frecuencia de hasta 5 Hz.
- La compleja estructura más superficial suaviza las curvas de amplificación de tal manera, que dificulta enormemente la determinación de modos específicos de resonancia.
- Las variaciones a lo largo de la dirección paralela al eje del valle son pequeñas. Por tanto una primera aproximación a la geometría de la cuenca, puede realizarse mediante un modelo bidimensional.
- En una buena cobertura azimutal, los valores medios de amplificación calculados para 10 sismos locales son tan representativos como los obtenidos para un número mayor de eventos locales.
- El uso de telesismos mejora la resolución en bajas frecuencias.

2. METODOLOGÍA

Los principales métodos aplicados al estudio del efecto de emplazamiento se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- *Métodos experimentales y empíricos o también denominados "in situ"*. En la literatura se hace mención a estos métodos como la "*aproximación instrumental*" al estudio del efecto local. Tienen en común, la utilización de datos reales registrados en el emplazamiento.
- *Métodos teóricos y numéricos*. Entre ellos se encuentran los relacionados con la resolución analítica de las ecuaciones que describen el problema, y los métodos de simulación teórica y numérica. Constituyen la denominada "*aproximación teórica*". En la aplicación de estos métodos se parte de un modelo que se aproxime a la situación real.

Las dos aproximaciones están sufriendo grandes avances en estos recientes años, por distintos motivos. El desarrollo de las redes sísmicas, permite el registro de datos sobre zonas densamente instrumentalizadas, que abarcan un amplio abanico de posibilidades desde el punto de vista de las distintas características de los eventos: magnitudes, profundidades, ángulos de incidencia de la radiación, etc., así como de la geología y topografía en los emplazamientos. También, es la computación la que ofrece mayores posibilidades debido a la cada vez mayor potencia de cálculo de los ordenadores, pudiendo analizar modelos y situaciones cada vez más complejas.

En los siguientes apartados se presentan algunos de los métodos más significativos en el análisis del efecto de emplazamiento. La mayoría de ellos ya han sido mencionados en apartados anteriores.

2.1. Aproximación Teórica

Hasta la fecha, mediante los métodos teóricos y numéricos se pretende investigar, de una manera independiente, los distintos aspectos ya mencionados del efecto local como son: la complejidad del campo incidente, la geometría y naturaleza de la geología y distintos comportamientos dinámicos de los materiales.

En una primera clasificación, la aproximación teórica se pueden clasificar en: técnicas consistentes en la resolución analítica de la correspondiente ecuación de movimiento, técnicas basadas en la teoría de rayos, métodos de contorno, y los métodos sobre el dominio.

En Sanchez-Sesma et al. (1996) donde se realiza un resumen de los aspectos más relevantes relacionados con la valoración del movimiento fuerte del suelo, se subrayan algunos de los trabajos punteros que han supuesto un punto de partida para la mayoría de los trabajos teóricos y numéricos que se están realizando en la actualidad sobre el efecto local. Entre ellos cabe citar:

- El estudio de Lamb sobre los desplazamientos en el dominio del tiempo en un espacio semi-infinito debido a una carga puntual.
- El problema de Sommerfeld sobre la difracción de una onda escalar en una pantalla semi-infinita.
- La teoría de scattering sobre la topografía de Gilbert y Knopoff.
- Resolución analítica de Trifunac sobre cuencas sedimentarias y topografías semicirculares.
- Aplicación del método de diferencias finitas a la propagación de ondas sísmicas.
- Aplicación del método de elementos finitos a la propagación de ondas sísmicas.
- La aproximación al estudio del efecto de la topografía mediante las integrales de contorno.
- La teoría de Hartzell sobre la utilización de las replicas como funciones de Green.
- El libro de Brebbia "*The boundary element method for engineers*".

2.1.1. Métodos teóricos analíticos

La resolución analítica de problemas sencillos, permite conocer mejor el fenómeno físico causante del efecto observado en la superficie. Además, sirve como patrón para contrastar los resultados de otros métodos más sofisticados, como pueden ser los métodos numéricos.

En los estudios teóricos se obtienen las propiedades de la función de transferencia a lo largo de la superficie libre en un determinado emplazamiento, para geometrías simples de valles o cuencas sedimentarias o topografías superficiales, en función de: un modelo, las propiedades dinámicas del terreno y las características de la radiación incidente. Para obtener una única y exacta solución del problema elastodinámico o cualquier otro régimen del material, es necesario que se satisfaga tanto la ecuación que gobierna el movimiento, como las condiciones de contorno.

Los trabajos de Trifunac (1971, 1973) son una referencia clásica en el estudio del efecto local debido a la incidencia de ondas SH sobre valles aluviales y cañones semicilíndricos. En ellos, se obtiene la expresión de los desplazamientos totales que cumplen la ecuación de movimiento, sujeta a las condiciones de contorno sobre la superficie libre correspondiente, mediante las funciones de Bessel.

2.1.2. Métodos de simulación

Otra aproximación al análisis del efecto de emplazamiento se puede realizar mediante técnicas que acometen el problema 1D de manera sencilla: los modelos empleados consisten en medios estratificados de capas paralelas homogéneas. El método lineal unidimensional de reflectividad de Kennet, el método de la matriz de transferencia de Thomson-Haskell pertenecen a este tipo de técnicas. En algunos casos se ha comprobado que las estimaciones obtenidas son satisfactorias con relación a otras obtenidas con otro tipo de técnicas que manejan una información más sofisticada [Dimitriu et al. (1998), Cid (1998)].

El método lineal bidimensional denominado Aki-Larner (Aki y Larner, 1970), calcula el campo elástico resultante de la difracción de ondas planas en discontinuidades irregulares, mediante la resolución de un sistema de ecuaciones integrales en términos de las componentes de los números de onda incidentes.

2.1.3. Métodos numéricos: simulación numérica

Los efectos locales observados en los emplazamientos en general difieren de los predichos por los modelos teóricos. Esto sugiere la necesidad de mode-

los más complicados, donde se incorporen nuevos factores como estratificación no horizontal, variación en las velocidades de las ondas, etc. Los métodos numéricos permiten estimar el efecto del emplazamiento a través de estos modelos más complicados.

Obtienen una solución aproximada de la ecuación diferencial de gobierno, que satisfaga las condiciones de contorno en un número determinado de puntos del dominio o el contorno. Los modelos combinan la incidencia de la radiación y la geometría, en modelos bi o tridimensionales. Cuanto mayor es la dimensión del problema más completo es el mismo, pero más complicada es la ejecución de la técnica. Recientemente se han desarrollado estudios basados en el denominado problema 2.5-D (Zhang et al., 1998), donde se analiza la respuesta de una incidencia tridimensional sobre una irregularidad bidimensional, requiriendo un nivel de computación menos exigente que en el caso de un problema tridimensional puro. El planteamiento 2.5-D se basa en que, las irregularidades del terreno geológicas o topográficas pueden ser estructuras que normalmente se aproximan a estructuras bidimensionales con simetría cilíndrica, donde las variaciones del movimiento registrado fuera del plano son despreciables.

Entre los métodos más potentes se encuentran aquellos que están basados en el cumplimiento de las condiciones de contorno en determinados puntos del *dominio discretizado*, como pueden ser: el método de diferencias finitas o el método de elementos finitos, o en el *contorno discretizado*, como es el caso del método de elementos de contorno.

El primero de ellos sustituye el operador diferencial que define la ecuación de gobierno por uno aproximado, obteniéndose la ecuación en diferencias finitas. El método de elementos finitos (FEM) y de elementos de contorno (MEC) obtiene una solución aproximada del problema, construyendo primero una solución que satisfaga aproximadamente la ecuación de movimiento, para que luego verifique las condiciones de contorno en un número determinado de puntos del dominio o el contorno.

El método de elementos de contorno (MEC) aplicado al estudio del efecto local presenta una ventaja, frente a otras técnicas numéricas, que consiste en el tratamiento simple de dominios infinitos. Este método se puede clasificar en dos categorías en función de su formulación: *el método directo de elementos de contorno* [Bregbia, 1981; Alarcón et al., 1979; Álvarez Rubio y Alarcón (1999)], basado en los teoremas de representación y cuyas incógnitas son los valores de los desplazamientos y las tensiones sobre el contorno, y, *el método indirecto de elementos de contorno* (Sanchez-Sesma y Campillo, 1991, 1993; Yokoi y Sánchez-Sesma, 1998), donde se formula el problema en términos de la fuerza distribuida a lo largo del contorno.

Las técnicas basadas en la discretización del contorno reducen la dimensión del problema frente a las que realizan una discretización del dominio. Este hecho supone una mayor agilidad a la hora del cálculo, sin mermar el alto grado de precisión incluso, en puntos interiores del dominio.

2.2. Aproximación Instrumental

Las distintas técnicas denominadas “in situ”, se dividen en dos categorías: aquellas que requieren un emplazamiento de referencia y las que no. En todas ellas, uno de los objetivos es extraer del registro, el efecto debido a la fuente y al medio por donde se propaga la onda hasta llegar a la capa más superficial, pudiendo así estimar el tercer factor que afecta al movimiento en el suelo: el efecto de emplazamiento.

En el grupo de las técnicas basadas en la utilización de un emplazamiento de referencia cabe destacar el denominado *método estándar de las razones espectrales (SSR)*. Básicamente, consiste en hallar las razones espectrales suavizadas para los distintos sismos, entre los emplazamientos de estudio y el denominado emplazamiento de referencia. Este último debe cumplir que las amplitudes espectrales registradas no estén afectadas por amplificaciones debidas al efecto local. Generalmente, se escoge de manera que estén situadas sobre roca y que no se vea afectada por irregularidad topográfica alguna.

Las técnicas clasificadas dentro del segundo grupo son herramientas muy útiles, puesto que en algunos casos encontrar un emplazamiento que sirva de referencia no es fácil. Entre ellas cabe destacar el *método de las razones espectrales H/V o HVSR*, análogo a la técnica denominada función del receptor (receiver-function technique (Langston, 1979). Este consiste en hallar las razones espectrales suavizadas entre, las componentes horizontales y verticales correspondientes a un mismo emplazamiento. Otro muy parecido a éste último es el conocido por *método de Nakamura* (1989). La diferencia entre estas dos técnicas radica en el tipo de registro utilizado: en el primer caso son los registros de aceleración, velocidad o desplazamientos sobre los que se hallan las razones, sin embargo, la técnica de Nakamura se aplica sobre registros de ruido.

En la aplicación de las técnicas de cálculo de razones espectrales existen algunas dificultades. La elección del emplazamiento de referencia en función de los requisitos que debe cumplir mencionados anteriormente, es determinante en los resultados finales. A las técnicas de suavizado también se les debe prestar atención, ya que una incorrecta aplicación de éstas puede ocultar rasgos importantes de las razones. También existe gran controversia respecto

a la ventana del registro elegida; si ésta no es adecuada, puede que las amplitudes estimadas se contaminen con fases que estén fuera de los objetivos del trabajo.

Cuando todas las estaciones no registran todos los eventos, las *técnicas de inversión generalizada*, suponen un avance respecto a las razones espectrales [Boatwright et al 1991, Field y Jacob (1995), Riepl et al. (1998)]. Estas consisten en la estimación de las funciones espectrales de fuente, y, emplazamiento para todas las estaciones de registro y todos los eventos, mediante un proceso de inversión de mínimos cuadrados.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la ayuda prestada por la Dra. Dolores Muñoz y Esther Jiménez en la revisión de este trabajo, ya que ha supuesto sin duda una mejor terminación del mismo.

REFERENCIAS

- AKI, K.; LARNER, K. L. (1970): "Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 79.No. 5, pp. 933-954.
- AKI, Keiiti (1988): "Local site effects on strong ground motion in Earthquake Eng. Soil Dynamics II, recent advances in ground motion evaluation". *Am. Soc. Civil Eng/Geotechnical Special Publication* 20, 103-155.
- ALARCÓN, E.; MARTÍN, A.; PARÍS, F. (1979): "Boundary elements in potential and elasticity theory". *Computers & Structures*, Vol. 10, pp. 351-362.
- ÁLVAREZ RUBIO, S.; ALARCÓN, E. (1999): "El método de los elementos de contorno aplicado a la cuantificación del efecto local". *Memorias del Ier Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Abril 1999, Murcia, España.
- ATAKAN, K. (1997): "Empirical site response studies in Central America: present status". *Proceedings of the seminar on Assessment and mitigation of seismic risk in the Central American Area*, September, 1997, El Salvador.
- ATAKAN, K.; TORRES, R. (1997): "Local site response in San Salvador, El Salvador, based on the October 10, 1986 earthquake. Special Issue": *Engineering Geology*.
- BARD, P.-Y. (1995): "Effects of surface geology on ground motion: recent results and remaining issues". *Proc. 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, Austria.

- (1996): “Site effects and seismic microzonation: recent advances, knowledge gaps and perspectives for applications”. *6th Forum of Seismic Zonation, Ibero-Magrebian Region Conferene*. Barcelona, Spain.
- BERESNEV, I. A.; WEN, K.; YEK, Y. T. (1995): “Nonlinear soil amplification: its corroboration in Taiwan”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85, pp. 496-515.
- BOATWRIGHT, J.; FLETCHER, J. B.; FUMAL, T. E. (1991): “A general inversion scheme for source, site, and propagation characteristics using multiply recorded sets of moderate-sized earthquakes”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81, 1752-1782.
- BORCHERDT, R. D. (1994): “Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)”. *Earthquake Spectra*, 10, 617-673.
- BOUCHON, M.; BARKER, J. S. (1996): “Seismic response of a hill; the example of Tarzana, California”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86, 66-72.
- BREBBIA, Carlos A. (1981): *Progress in boundary element methods*. Vol. 1. Pentech Press, Plymouth.
- CHÁVEZ-GARCÍA, F. J.; RODRÍGUEZ, M.; HATZFELD, D. (1996): “Topographic site effects and HVSR. A comparison between observations and theory.” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86, 1559-1573.
- CHÁVEZ-GARCÍA, F. J.; RODRÍGUEZ, M.; FIELD, HATZFELD, D. (1997): “Topographic site effects. A comparison of two nonreference methods.” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87, 1667-1673.
- CID RAMOS, J. (1998): *Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales*. Tesis Doctoral, Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, noviembre 1998.
- DIMITRIU, P. P.; PAPAIOANNOU, CH. A.; THEODULIDIS, N. P. (1998): “EURO-SEISTEST strong motion array near Thessaloniki, Northern Greece: a study of site effects”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88, pp. 862-873.
- FIELD, E. H.; JACOB, K. H. (1995): “A comparison and test of various site-response estimation techniques. Including three that are not reference-site dependent”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85, pp. 1127-1143.
- GELI, L.; BARD, P-Y.; JULLIEN, B. (1988): “The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78, pp. 42-63.
- HARTZELL, S. H. (1992): “Site response estimation from earthquake data”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82, pp. 2308-2327.
- JONGMANS, D.; PITILAKIS, K.; DEMANET, D.; RAPTAKIS, D.; RIEPL, J.; HORRENT, C.; TSOKAS, G.; LONTZETIDIS, K; BARD, P-Y. (1998): “EURO-SEISTEST: determi-

- nation of the geological structure of the Volvi Basin and validation of the basin response". *Bulletin of the Seismological Society of America*, **88**, pp. 473-487.
- LANGSTON, C. A. (1979): "Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves". *J. Geophys. Res.*, **84**, pp. 4749-4762.
- LERMO, J. F.; CHÁVEZ-GARCÍA, F. J. (1993): "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station". *Bulletin of the Seismological Society of America*, **83**, pp. 1574-1594.
- LIGORRÍA, J. P.; ATAKAN, K. (1997): "Empirical site response estimation in Guatemala city". *Proceedings of the seminar on Assessment and mitigation of seismic risk in the Central American Area*, September, 1997, El Salvador.
- LUCO, WONG, DE BARROS (1990): "Three-dimensional response of a cylindrical canyon in a layered half-space". *Earthq. Engng. Struc. Dynam.* **19**, pp. 799-817.
- LUZÓN, F.; SÁNCHEZ-SESMA, F. J.; RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, J. L.; POSADAS, A. M.; GARCÍA, J. M.; MARTÍN, J.; ROMACHO, M. D.; NAVARRO, M. (1997): "Diffraction of P, S and Rayleigh waves by the three-dimensional topographies". *Geophys. J. Int.*, **129**, pp. 571-578.
- NAKAMURA, Y. (1989): "A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface". *Quarterly Rept. RTRI, Jpn*, **30**, pp. 25-33.
- PEDERSEN, B.; LE BRUN, B.; HATZFELD, M.; CAMPILLO, M.; BARD, P-Y. (1994): "Ground-motion amplitude across ridges". *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 1786-1800.
- PITILAKIS, K.; LONTZETIDIS, K.; RAPTAKIS, D.; TIKI, TH. (1998): "Geotechnical and seismic field surveys for the site characterization". *First International Conference on Site Characterization, ISC'98*, Atlanta, USA.
- PHILIPS, W. S.; AKI, K. (1986): "Site amplification of coda waves from local earthquakes in Central California". *Bulletin of the Seismological Society of America*, **76**, pp. 509-529.
- RAPTAKIS, D.; LONTZETIDIS, K.; PITILAKIS, K. (1996): "Surface waves inversion method: a reliable method for the in situ measurements of shear wave velocity". *Proc. 4eme Coll. Nat. De Genie Paras. et Aspects Vibratoires dans le Genie Civil*, **1**, 160-169. A.F.P.S. 10-12 Avril.
- RIEPL, J.; BARD, P-Y.; HATZFELD, D.; PAPAIOANNOU, C.; NECHTSCHHEIN, S. (1998): "Detailed evaluation of site-response estimation methods across and along the sedimentary valley of Volvi". *Bulletin of the Seismological Society of America*, **88**, pp. 488-502.
- SÁNCHEZ-SESMA, F. J.; CAMPILLO, M. (1991): "Diffraction of P, SV, and Rayleigh waves by topographic features: a boundary integral formulation". *Bulletin of the Seismological Society of America*, **81**, pp 2234-2253.

- SÁNCHEZ-SESMA, F. J.; CAMPILLO, M. (1993): "Topographic effects for incident P, SV and Rayleigh waves". *Tectonophysics*, **218**, 113-125.
- SÁNCHEZ-SESMA, F. J.; BENITES, R.; BIELAK, J. (1996): "The assesment of strong ground motion. What lies ahead?". *11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, México, 1996.
- SILLS, L. B. (1978): "Scattering of horizontally polarized shear waves by surface irregularities". *Geophys. F. R. Astr. Soc.*, **54**, pp. 319-348.
- SEED, H. B.; MURARKA, R.; LYSMER, J. (1976a): "Relationships of maximun acceleration, maximun velocity, distance from source and local site conditions for moderately strong earthquakes". *Bulletin of the Seismological Society of America*, **66**, pp. 1323-1342.
- SPUDICH, P.; HELLWEG, M.; LEE, W. H. K. (1996): "Directional topographic site response at Tarzana observed in aftershocks of the 1994 Northridge, California earthquake: implications for mainshocks motions". *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86**, pp. 5193-5208.
- SU, F.; AKI, K.; TENG, T.; ZENG, Y.; KOYANAGI, S.; MAYEDA, K. (1992): "The relation between site amplification factor and surficial geology in Central California". *Bulletin of the Seismological Society of America*, **82**, 580-602.
- TRIFUNAC, M. D. (1971): "Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves". *Bulletin of the Seismological Society of America*, **61**, 1755-1770.
- TRIFUNAC, M. D. (1973): "Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon". *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **1**, 267-28
- WONG, H. L. (1982): "Effect of surface topography on the diffraction of P, SV, and Rayleigh waves." *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**, 1167-1183.
- YOKOI, T.; SÁNCHEZ-SESMA, F. J. (1998): "A hybrid calculation technique of the indirect boundary element method and the analytical solutions for three-dimensional problems of topography." *GIJ*, **133**, 121-139.
- ZHANG, B.; PAPARGEORGIU, A. S.; TASSOULAS, J. L. (1998): "A hybrid numerical technique, combining the finite-element and boundary-element methods, for modelling the 3D response of 2D scatterers". *Bulletin of the Seismological Society of America*, **88**, 1036-1050.

