

Estimación de la respuesta de sitio mediante el método del cociente espectral aplicado a ruido ambiental: aplicación a la Ciutat Vella de Valencia

R. Franklin, J.O. Caselles, J.A. Canas, J. Clapes y Ll. G. Pujades

Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica
Módulo D2, Campus Norte, UPC, Gran Capitan s/n
08034 Barcelona, España

Tel.: 34-93-401 72 57; Fax: 34-93-401 72 51

e-mail: rodrigo.franklin@upc.edu, oriol.caselles@upc.edu, josep.antonicanas@upc.edu, jaume.clapes@upc.edu, lluis.pujades@upc.edu

M. Navarro

Dpto. Física Aplicada, Universidad de Almería
Cañada de San Urbano s/n, 04120 Almería, España

Tel.: 34-950-01 50 61; Fax: 34-950-01 54 77

e-mail: mnavarro@ual.es

F. García

Dpto. de Ingeniería Cartográfica y Fotogrametría
Universidad Politécnica de Valencia

Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España

Tel.: 34-96-387 75 57; Fax: 34-96-387 75 59

e-mail: fgarcia@upv.es

Vega Pérez Gracia

Dpto. de resistencia de Materiales y estructuras en la Ingeniería
EUETIB, Universidad Politécnica de Cataluña

Urgell 187, 08036 Barcelona España

Tel.: 34-93-413 74 08, Fax: 34-93-413 74 01

e-mail: vega.perez@upc.edu

Resumen

Dentro del proyecto de estudio de la vulnerabilidad sísmica de la Ciutat Vella de Valencia se ha estudiado la respuesta de suelo de esta y su afectación a los edificios de vivienda existentes. Debido a la baja sismicidad de la zona, las características urbanísticas y al bajo coste, la respuesta de suelo se ha calculado mediante el método del cociente espectral aplicado a ruido ambiente (técnica de Nakamura), que proporciona solamente los rangos de periodos, en los que se produce amplificación pero no su valor. Para una correcta aplicación de este método previamente se ha estudiado su aplicabilidad en diversas zonas de la ciudad de Barcelona, ciudad densamente poblada, y por tanto, con escasa proporción de zonas libres donde realizar las mediciones libres de ruidos perjudiciales. Por ello se ha estudiado la influencia, que el tráfico de vehículos, paso de peatones y la presencia de árboles, mobiliario urbano, césped y edificios puede tener en los resultados obteniéndose una buena guía de aplicabilidad del método. Paralelamente se ha estudiado e implementado una ponderación de las señales medidas para mejorar los resultados y permitir condiciones de medida menos restrictivas. También se propone el uso de un ajuste gaussiano de los picos de amplificación para la asignación del valor máximo (periodo predominante) y distinguir mediante la desviación estándar de esta, cuando la variación lateral de dos medidas son significativas o no. Los resultados obtenidos en Valencia reflejan su complejidad geológica con tres rangos de periodos donde existe amplificación. También se ha calculado que el 36 % del total de los edificios de vivienda existentes presentan interacción suelo-estructura.

Palabras clave:

vulnerabilidad, respuesta de suelos, Ciutat Vella de Valencia, interacción suelo-estructura.

SITE RESPONSE ESTIMATION BY MEANS OF SPECTRAL RATIO METHOD APPLIED TO AMBIENT NOISE: APPLICATION TO CIUTAT VELLA (VALENCIA)

Summary

Inside the vulnerability Project relative to the Ciutat Vella of Valencia City, ground response has been calculated and its effects on existing buildings have been studied. Due to the low seismicity of the region, urban characteristics and low cost, ground response has been calculated using the Nakamura's method, providing period ranges in which amplification is observed.

Previous to the application of Nakamura's method to Ciutat Vella, several experiments have been applied in the city of Barcelona in order to know the different effects affecting signal recording of the ground vibration. Among them vehicle and pedestrian circulation, trees, urban furniture, grass and buildings have been considered.

Weighting of the measured signals have been applied to select the best signals range used for the analysis. At the same time a gaussian filter applied to the amplification maxima lets to the determination of predominant periods. Calculated standard deviations provide the degree of measurements significance. Results corresponding to Ciutat Vella present three period ranges where amplification exists. Determination of three period ranges may be due to the geological complexity of the studied region. Another interesting result is that 36 % of the existing buildings may present soil-structure interaction in case of earthquake.

Keywords:

vulnerability, ground response, Ciutat Vella-Valencia, soil-structure interaction.

INTRODUCCIÓN

El efecto de las acciones sísmicas en las construcciones humanas es el resultado de la propia acción sísmica en la fuente, la atenuación de las ondas en su desplazamiento a través de la Tierra y de lo que se conoce por efecto de sitio, además de la propia construcción. El efecto de sitio es, como mínimo, la superposición de dos factores: efectos superficiales de suelo y topográficos. Los efectos topográficos son las amplificaciones o atenuaciones, que localmente se perciben debidas a la resonancia de las ondas inducidas por la topografía del lugar. Por otro lado, se conoce por efecto superficial de suelo el aumento local de la vibración debida a la resonancia de los suelos situados encima del basamento rocoso. Esto se produce, cuando las ondas sísmicas entran en una cuenca sedimentaria, cuyo terreno presenta un contraste de velocidades sísmicas (impedancia sísmica) importante con la del basamento rocoso. Estas ondas quedan atrapadas amplificándose fuertemente las frecuencias propias de la cuenca. Estas frecuencias se determinan a partir de la velocidad de propagación de las ondas y la dimensión de la cubeta así como por su estratigrafía. El hecho de que sólo unos rangos de frecuencias queden amplificados, hace importante el poderlos determinar, ya que aquellas estructuras acopladas a estas frecuencias se verán especialmente afectadas por dicho efecto. Un ejemplo claro de este efecto es el de Ciudad de México, donde amplificaciones del orden de 50 veces¹ en el rango de frecuencias entorno a 0,5 Hz afectaron casi exclusivamente a los edificios de hormigón reforzado de entre 10 y 14 niveles de altura. A partir de este terremoto (Michoacán 1985) la amplificación del suelo empezó a ocupar la importancia, que se merece. Desde entonces se ha comprobado dicho efecto en múltiples terremotos como los de Caracas de 1967, Northridge de 1994 o Hyogo-ken Nambu (Kobe) de 1995.

Se han propuesto diferentes enfoques para la determinación de los efectos superficiales de suelo, desde enfoques numérico-teóricos a experimentales. Los enfoques teóricos necesitan de un conocimiento del subsuelo que es de difícil y costosa obtención, por lo que se han realizado principalmente a un nivel científico sin generalizarse ampliamente. Entre los enfoques experimentales hay dos líneas principales de trabajo, unos basados en la medición del efecto durante terremotos y otros, en la medición del ruido ambiental. Los basados en

terremotos de baja intensidad tienen el inconveniente de la necesidad de tener instalados en el suelo un gran número de sensores a la espera de dichos terremotos y, cuando éstos se producen, sus resultados se han de extrapolar a terremotos de gran magnitud, con el posible error que se comete al no conocerse con precisión los posibles efectos no lineales del suelo. Los trabajos basados en la medida del ruido ambiental empezaron a popularizarse a partir del trabajo de Nakamura², basado en la técnica del cociente espectral. Esta técnica, aunque ha sido bastante controvertida, se ha impuesto debido a su bajo coste y relativa facilidad de realización.

En general se define el efecto de suelo como el cociente entre el espectro de la componente horizontal de las ondas sísmicas en el sitio y este en el basamento rocoso debajo del sitio. A nivel práctico esto se realiza suponiendo, que las acciones sísmicas en el basamento rocoso y en un afloramiento cercano son iguales. La técnica del cociente espectral se basa en la propiedad de que la componente vertical no es amplificada al atravesar el suelo, por lo cual se puede considerar que el cociente entre la componente horizontal y la vertical es un buen estimador del efecto de sitio. Nakamura propuso, que esto mismo se podía generalizar a lo que se conoce como ruido ambiental. El ruido ambiental es la superposición de las vibraciones del suelo producidas por efectos naturales (viento, tormentas, mareas, olas, etc.) o artificiales (tráfico de vehículos, paso de peatones, maquinaria, vibraciones de las estructuras civiles, ferrocarriles, etc.). En los últimos años se han realizado innumerables trabajos basados en esta técnica, contrastándose algunos con otras técnicas o con los efectos de los terremotos. A partir de estos, se ha llegado al consenso de que esta técnica es fiable para determinar el periodo predominante o fundamental del suelo, pero no así para determinar el grado de amplificación. A pesar de este inconveniente, dado su bajo coste y su accesibilidad, se sigue utilizando profusamente ya que, aunque no se pueda conocer el factor de amplificación, como mínimo sirve para alertar de qué estructuras civiles pueden presentar problemas debido a que son sensibles a las frecuencias en que el suelo muestra amplificación.

Normalmente, los resultados se presentan en forma de mapas de periodos predominantes que se define como el valor para el cual el cociente espectral es máximo. Esta forma de presentar los resultados es muy compacta y útil, ya que en la mayoría de cuencas sedimentarias sólo se presenta un pico en el cociente espectral.

A nivel práctico, para el uso de la técnica, teóricamente es necesario que las fuentes que generan el ruido ambiental estén suficientemente lejanas para que la vibración directa sea pequeña comparada con la vibración de la resonancia del subsuelo que ellas provocan. Esto ha llevado a suponer que es necesario medir en días con poco viento y alejado varios metros del tránsito de vehículos, peatones y presencia de edificios y árboles. Estas ideas se plantearon sin que hasta el momento no se haya empezado a realizar trabajos sobre esta situación. De hecho, en la bibliografía sólo se encuentran tres resúmenes de congresos que traten este tema^{3,4,5}. El trabajo que aquí se presenta estudia la viabilidad de su aplicación en zonas densamente pobladas, y posibles mejoras técnicas y de procesado especialmente pensadas para estas zonas. Para ello se realizaron diferentes experimentos en la ciudad de Barcelona y la campaña de medidas en la Ciutat Vella de Valencia.

METODOLOGÍA, ADQUISICIÓN Y PROCESADO DE DATOS

La amplificación o efecto del suelo es la relación entre la amplitud de la componente horizontal del movimiento sísmico en el basamento rocoso y en la superficie. A nivel espectral su función de transferencia sería:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (1)$$

donde S_{HS} y S_{HB} son, respectivamente, el espectro horizontal del terreno en la superficie y en el basamento.

Pero S_{HS} viene contaminada por las ondas superficiales de Rayleigh. Por tanto, para que este cociente espectral sea realmente una función de transferencia, hay que eliminarle la parte debida a las ondas Rayleigh.

Como se supone, que la componente vertical no es amplificada por el efecto de suelo, podemos utilizar el cociente espectral de esta componente para evaluar la contaminación, que provocan las ondas Rayleigh. Definimos el cociente espectral de las componentes verticales S_V como

$$S_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (2)$$

donde S_{VS} y S_{VB} son los espectros verticales en la superficie y en el basamento respectivamente. En el caso de no existir ondas de Rayleigh S_V sería igual a 1. Asumiendo que el efecto en la superficie de las ondas de Rayleigh es igual en las componentes vertical y horizontal, este último cociente sirve para eliminar la amplificación aparente, que provocan estas en el cociente S_T . Así la función de amplificación del suelo sería

$$S_{TT} = \frac{S_T}{S_V} = \frac{\frac{S_{HS}}{S_{HB}}}{\frac{S_{VS}}{S_{VB}}} = \frac{R_S}{R_B} \quad (3)$$

donde $R_S = S_{HS}/S_{VS}$ y $R_B = S_{HB}/S_{VB}$.

Normalmente, para ruido ambiental, $R_B \approx 1$, por lo que $S_{TT} = R_S$ puede ser considerada una buena aproximación a la función de transferencia del suelo.

La aplicación del método del cociente espectral a ruido ambiental necesita el promediado de un número importante de señales y el suavizado de estas. A nivel de adquisición de los datos, dado que por norma general se quiere estudiar el rango de interés en ingeniería entre 0,1 y 2 s, se necesitan ventanas de 4 s de duración mínima. Habitualmente se hacen adquisiciones continuas de 3 minutos mediante sismógrafos, aunque hay investigadores que han llegado a realizar adquisiciones de hasta 30 minutos con ventanas de tiempos mayores para investigar periodos superiores. Aunque algunas veces se ha realizado la adquisición de los datos con acelerómetros, se considera preferible realizarlo con sismógrafos, ya que éstos son menos sensibles a las altas frecuencias y, por tanto, menos influenciados por vibraciones, que distorsionan las señales que queremos estudiar. Teóricamente, si se tiene un instrumental con suficiente rango dinámico, no ha de haber ningún inconveniente en usar cualquier tipo de instrumento con sensibilidad en el rango de periodos estudiado.

El intervalo de periodos a estudiar también está relacionado con las características geométricas y geotécnicas de la cubeta donde se realiza el estudio pues el periodo fundamental está relacionado con estos parámetros. En general, para una cubeta con una estructura simple se puede aproximar su periodo fundamental como

$$T_o = \frac{4H}{\beta} \quad (4)$$

donde H es la profundidad de la cubeta y β la velocidad promedio de las ondas de cizalla en ella^{6,7}.

En nuestro caso se utilizó un sismógrafo Lennartz de 20 s de periodo para los datos de los experimentos realizados en Barcelona y la mitad de Valencia y para la otra mitad de los datos de Valencia se utilizó un sismógrafo VSE-15 de 1 s. En el equipo con sensor Lennartz se hicieron registros de 5 min para poder tener suficientes ventanas en periodo largo, mientras que en el equipo de 1 s se realizaron adquisiciones de 3 min. Para que los datos de ambos instrumentos fueran homogéneos, se optó por la utilización de ventanas de 40 s de duración en ambos.

Una vez seleccionado el tiempo de cada ventana se comprueba que esta no esté fuertemente contaminada por vibraciones aleatorias de gran energía comparadas con el ruido de fondo, que se está midiendo en ninguna de sus tres componentes. Esto es así, ya que la única explicación para obtener aumentos importantes de la vibración medida es que alguna fuente importante y transitoria relativamente cercana haya generado principalmente una onda directa. Tal como se ha dicho anteriormente, las ondas directas son ruidos no adecuados para la medida, por lo cual estas ventanas se han de desechar para el cálculo de la respuesta de suelo. Este procedimiento se puede automatizar mediante un algoritmo tipo STA/LTA, aunque habitualmente se realiza ocularmente puesto que da mayores garantías de confianza.

Debido a la naturaleza estacionaria de la señal, éstas se tienen que abusar (multiplicar por una ventana, que decrece hasta cero en los extremos). Existen una gran cantidad de ventanas que son útiles; tradicionalmente se han utilizado las ventanas de Parzen (5) y las de Hanning (6).

$$w(n) = 1 - \left| \frac{n - 0,5(N - 1)}{0,5(N + 1)} \right|, \quad n = 1, \dots, N \quad (5)$$

$$w(n) = 0,5 \left| 1 - \cos \left| \frac{2\pi n}{(N - 1)} \right| \right|, \quad n = 1, \dots, N \quad (6)$$

Cada una de ellas tiene sus ventajas e inconvenientes. La ventana de Parzen no tiene lóbulos, por lo que no aparecen falsos picos en su espectro, por el contrario, tiene un ancho de banda muy grande, por consiguiente difunde la energía de cada frecuencia en un relativamente gran entorno espectral. Esta característica hace, que esta ventana suavice fuertemente los espectros, que, tal como se explica posteriormente, puede ser una buena característica. La ventana de Hanning es más selectiva, por lo que puede requerir un suavizado posterior más importante, por el contrario, su espectro presenta lóbulos que pueden confundirse con picos secundarios.

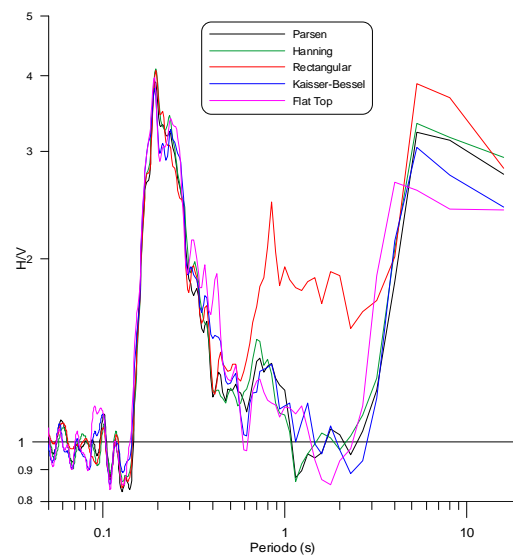


Figura 1. Comparación del uso de diferentes ventanas en la señal

Para comprobar la bondad de algunas ventanas se aprovecharon los datos de un experimento realizado en la Plaza Eusebi Güell de Barcelona. En la Figura 1 se aprecia, que la única ventana no adecuada para el procesamiento de las señales es la ventana rectangular, lo cual era de esperar debido a la naturaleza estacionaria de la señal. Debido a ello se escogió la ventana de Parzen de 3 Hz para el procesamiento de las señales, ya que ésta proporciona un

cierto suavizado, no produce falsos picos debido a que no presenta lóbulos y permite un solapamiento de las ventanas temporales de tal forma que ningún tiempo es sobrevalorado o subvalorado.

Como es habitual en el tratamiento de señales de estructuras excitadas por ruido aleatorio o blanco, estas se tienen que suavizar. No existe un acuerdo unánime en si es más conveniente suavizar las señales individuales o el promediado. Por el carácter de las fuentes generadoras de ruido, los espectros de amplitud individuales presentan una fuerte variabilidad de frecuencia; por este motivo preferimos el suavizado de las señales individuales en cada una de sus tres componentes, puesto que bajos valores aleatorios en una frecuencia determinada en la componente vertical pueden provocar valores del cociente espectral muy grandes y difíciles de suavizar. En cuanto al tipo de suavizado dependerá fuertemente de la naturaleza de la cuenca sedimentaria y del grado de precisión que se requiera. En cuencas constituidas por un suelo muy homogéneo, el cociente espectral presenta un pico estrecho y muy puro por lo tanto solamente se requiere un suavizado moderado y el promediado de pocas señales. Por otra parte, en cuencas cuya complejidad geológica es acusada, el suelo no se comporta como un filtro potente y se requiere el promediado de un gran número de señales y un fuerte suavizado. A cada componente de cada ventana se le calcula el espectro de amplitudes mediante la transformada de Fourier y se obtiene el espectro horizontal de amplitud mediante

$$H = \sqrt{\frac{NS^2 + EW^2}{2}} \quad (7)$$

donde NS y EW son los espectros de amplitudes de las componentes Norte-Sur y Este-Oeste, respectivamente, y H es el espectro de la componente horizontal. La media geométrica del cociente espectral será entonces

$$\overline{H/V_i H} = \frac{\sum_i \log_{10}(H_i/V_i) P_i}{n} \quad \text{y} \quad \overline{H/V} = 10^{\overline{H/V_i}} \quad (8)$$

donde $\overline{H/V}$ es la media geométrica del cociente espectral, V el espectro de amplitudes de la componente vertical, n el número de ventanas promediadas y P_i un peso, por si se quieren ponderar las distintas ventanas. La desviación estándar se puede calcular como

$$\sigma_{H/V} = 10^{\sqrt{\frac{\sum_i \log_{10}^2(H_i/V_i) P_i - n \log_{10}^2(\overline{H/V_i})}{n-1}}} \quad (9)$$

La desviación estándar sirve como segundo mecanismo de control para la aceptación o rechazo de las ventanas individuales.

Una de las preocupaciones más importantes, que suscita el método del cociente espectral aplicado a ruido ambiente es la contaminación de las ondas multireflejadas en el suelo por vibraciones procedentes directamente de fuentes cercanas. Ha habido diferentes enfoques para mejorar la calidad de los trabajos afectados por este hecho. Uno de ellos es la realización de las medidas durante la noche y en zonas distantes de cualquier objeto que pueda producir vibración (plazas públicas sin arbolado). Esto permite disminuir en gran medida el ruido generado por el tráfico de peatones y automóviles. El inconveniente de esto es la fatiga de trabajar a esas horas y especialmente la limitación de espacios adecuados, especialmente en zonas densamente pobladas y con bajo número de zonas libres sin arbolado, como suelen ser los centros históricos de las ciudades. Este hecho suele repercutir en una baja resolución espacial de las medidas, con especiales repercusiones en las zonas de rápidos cambios litológicos o de zonas alteradas por cursos de agua (subterráneos o antiguos causes superficiales).

El otro enfoque principal, y cada día más popular, ha sido medir sin ninguna restricción y posteriormente purgar las ventanas, en que se observa, visualmente o mediante algoritmos tipo STA/LTA, la presencia de ruidos no deseados. Esto conlleva la eliminación de un número de ventanas, que en algunas zonas y momentos determinados del día puede ser relativamente alto.

En nuestro caso se quería escoger esta segunda técnica para el estudio a realizar en el casco antiguo de la Ciudad de Valencia, por lo que previamente se planteó, si se podía conseguir una mejora de la técnica, que permitiera aprovechar mejor las ventanas con un nivel de ruido intermedio (en nuestro caso consideramos ruido la parte de la señal que procede de ondas directas de fuentes vibratorias cercanas).

Para ello introdujimos en la ecuación (8) un término de ponderación, que permita sobrevalorar las ventanas consideradas mejores y minusvalorar las peores. Se ha aplicado una ponderación inversamente proporcional a la energía total de cada ventana. Para la comprobación de su bondad se aprovecharon los datos de un experimento realizado en el Parque Cervantes de Barcelona, en el que se simuló el efecto de un tránsito intenso de peatones. En la Figura 2 se puede observar la mejora, que supone el uso de la ponderación comparado con las medidas realizadas en el mismo lugar sin ningún tipo de interferencia.

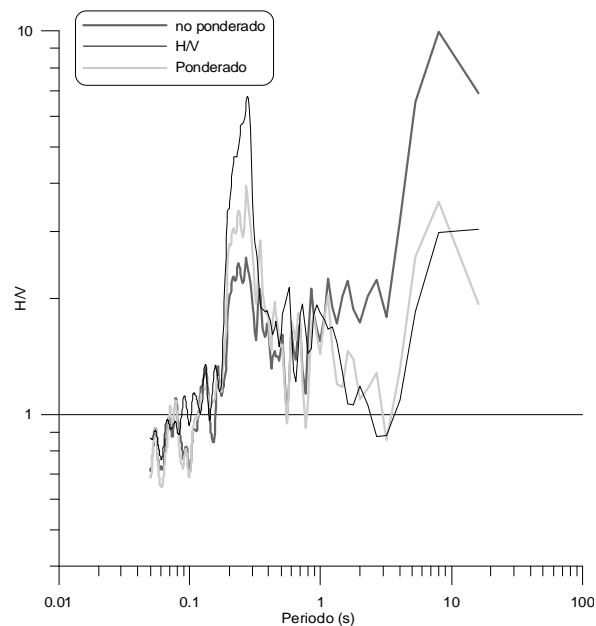


Figura 2. Comparación del uso de la ponderación por el inverso de la energía

En el desarrollo del programa de cálculo del cociente espectral se incorporó la visualización de las ventanas para permitir el rechazo de su procesado en el caso de la aparición de señales muy energéticas claramente no relacionadas con la amplificación del suelo o aquellas ventanas, que fueron anotadas debido a la existencia de algún factor externo observado durante la adquisición (por ejemplo; paso de vehículos o peatones cercanos). También se incorporó al programa la información de las ventanas, que superaban en cierto número de veces la desviación estándar calculada facilitándose el reprocesado del cociente espectral sin aquéllas, que se consideraran anómalas por esta causa. En general, se ha decidido descartar aquellas señales que presentaban una desviación estándar superior a 2 en alguna frecuencia

(máxima desviación estándar). Lo que se refleja de los datos procesados es que la desviación estándar es mayor en suelos no homogéneos que en homogéneos (Figura 3). En general, hemos encontrado desviaciones estándares de entre el 50 y el 100 % en suelos no homogéneos y de entre el 25 y el 50 % en suelos homogéneos, independientemente de la rigidez del mismo.

Debido a la forma de los cocientes espectrales que se obtuvieron en Valencia, también se optó por buscar un criterio objetivo para asignar a qué valor correspondía el máximo (periodo predominante). Dado que los datos están distribuidos logarítmicamente en ordenadas y la forma, que presentan los espectros, se decidió ajustar una gaussiana logarítmica entre los extremos del pico (Figura 4). Esta tiene además la ventaja de proporcionar la desviación estándar, que puede usarse como una medida del error del periodo predominante. En todas las medidas se requirió, que hubiera un mínimo de 5 ventanas promediadas para que esta fuera considerada, aunque en la mayoría de las mediciones se llegó a superar las 10 ventanas promediadas.

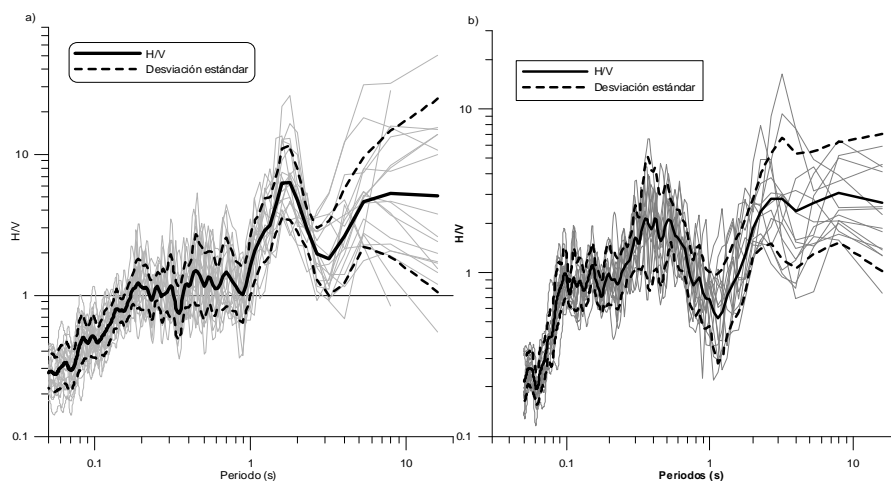


Figura 3. Ejemplo de cociente espectral de ventanas individuales con su medida y desviación estándar, a) medidas de la esquina de la calle Esprónceda con Perú de la ciudad de Barcelona, b) medidas en el punto 31 de la Ciutat Vella de Valencia

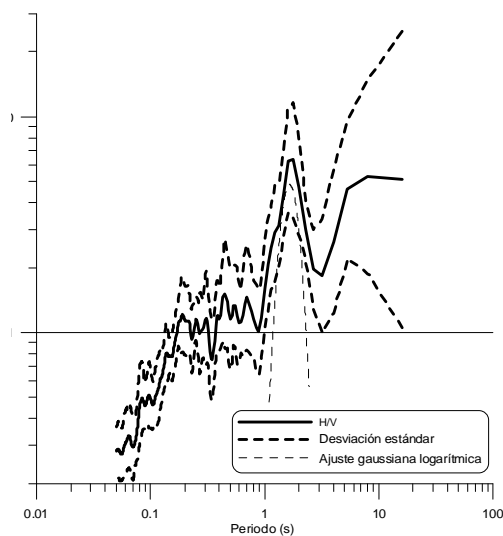


Figura 4. Ejemplo de ajuste gaussiano logarítmico del cociente espectral en la medida de la calle Esprónceda-Perú sin interferencias

RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

La finalidad del proyecto de investigación, que se presenta este estudio, es el estudio del riesgo sísmico en la Ciutat Vella de Valencia y, como uno más de los factores que intervienen en la vulnerabilidad, tener en cuenta la amplificación del suelo. Dadas las características urbanísticas de esta zona concreta de Valencia, con una muy alta densidad de habitantes y la escasa presencia de amplias plazas no ajardinadas, se procedió a un estudio previo de la aplicabilidad del método del cociente espectral aplicado a ruido ambiental para zonas de estas características. Para ello se realizaron diferentes experimentos en la ciudad de Barcelona. Por su estructura geotécnica, Barcelona presenta un cociente espectral con un sólo pico entre 0,05 y 2 s de periodo, a cuyo valor se le puede asignar el periodo predominante. Con sensores de tipo *broadband* o ampliados se puede llegar a medir un segundo pico con amplificación en valores entorno a 8 s, que no tiene interés para cálculos de vulnerabilidad y que posiblemente esté relacionado con cambios geológicos muy profundos, aunque algunos investigadores apuntan, que puede ser el efecto del mar en zonas poco alejadas de la costa.

Algunas de las principales fuentes de contaminación por ondas directas, que puedan afectar de forma relevante al método, son: circulación de automóviles, paso de peatones, césped, edificios, árboles y mobiliario urbano sometidos a viento u otras perturbaciones, que les provoquen vibración. La influencia, que cada uno de estas fuentes, puede causar en el resultado puede depender no solamente de las propias características sino también de las características del suelo; además de la fuerza del viento en aquellas estructuras, en que su principal fuente de excitación sea éste.

Para la influencia, que puede generar el viento mediante la excitación de ciertas estructuras, hay que evaluar solamente para días de vientos suaves, ya que la mayor parte de los sensores son directamente sensibles a él y por tanto no se pueden realizar medidas adecuadas con viento fuerte.

Para los experimentos en suelo blando se escogieron puntos situados en la formación deltaica del Besòs (arenas cuaternarias sin consolidación sobre arenas amarillas gruesas del plioceno también sin consolidar⁸) y una zona de alto periodo en la formación tricicle del llano de Barcelona (formación pleistocena caracterizada por la alternancia de arcillas rojas, limos y costras calcáreas). El punto en la zona deltaica se situó en la confluencia de las calles Perú y Esprónceda (Figura 5), que tiene como características principales: es el suelo más blando medido en Barcelona⁹, es una plaza con zonas libres de arbolado, escaso tráfico de peatones y vehículos, cercanía de un edificio de 12 plantas y de una autopista de entrada de la ciudad. El punto situado en la formación tricicle se ubicó en las confluencias de la calle Aragón con Enamorats (Figura 6) y su principal característica es ser un punto con un tráfico de vehículos y peatones intenso.

Por todo ello se decidió realizar en el punto de la calle Perú experimentos sobre la influencia de la presencia de edificios y tráfico de vehículos en los resultados. Se realizaron cuatro mediciones: una en la zona libre de influencias como corroboración de las mediciones efectuadas en el estudio de Alfaro *et al.*⁹, una repetición de esta última, cuando se levantó un viento suave, una medición a 20 cm del edificio mencionado y una medición a 4 m de la autopista (Figura 5). Congruentemente con las mediciones de Alfaro *et al.* (muy cerca de allí midió 2,08 s de periodo predominante) se obtuvo un periodo predominante de 1,7 s con una desviación estándar de la gaussiana logarítmica ajustada de 0,1 s. Los resultados obtenidos no dejan lugar a dudas sobre la escasa influencia que tienen los edificios y el tráfico de vehículos en este sitio. Los ajustes gaussianos logarítmicos señalan un periodo para el valor máximo que varía entre los 1,72 s de las medidas con viento y los 1,54 s para la medida cerca de la autopista, pasando por los 1,66 s cerca del edificio y 1,65 s en la medida sin viento; dada la desviación estándar de los datos (0,08, 0,09, 0,09 y 0,14 s para las medidas sin viento, con viento, cerca del edificio y cerca de la autopista, respectivamente).

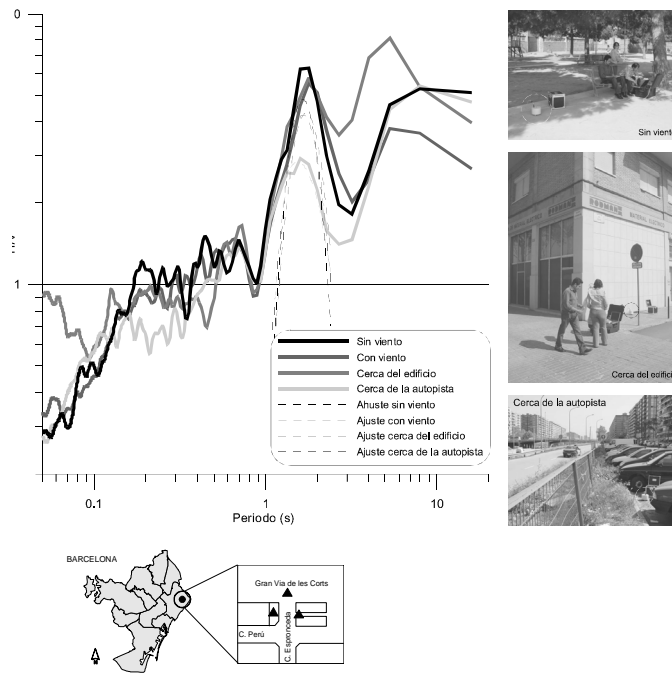


Figura 5. Comparación de los cocientes espectrales sin efectos de viento, con efectos del viento, cercanía de un edificio de 12 plantas y cercanía de una autopista. Mediciones en el entorno del cruce de la calle Perú con Esprónceda

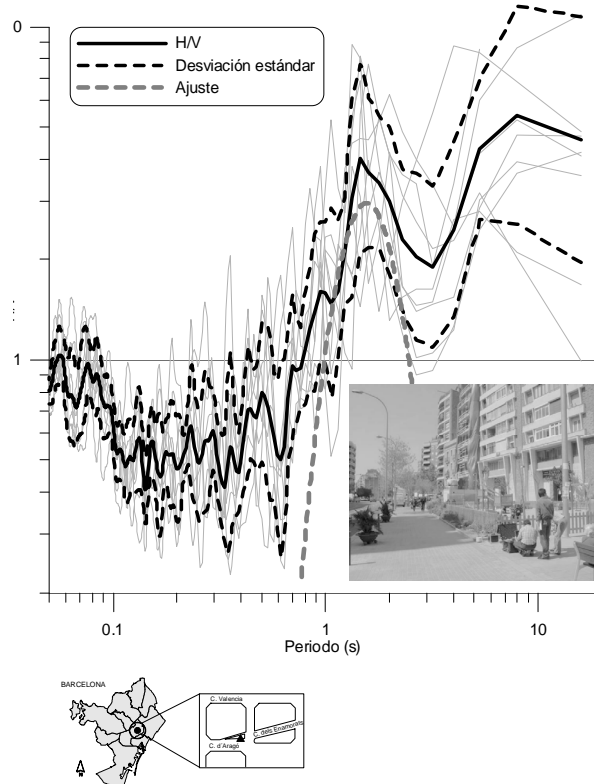


Figura 6. Resultados obtenidos en la medición realizada en la calle Aragón esquina Enamorats

Por lo que respecta a la medición realizada cerca del edificio, según la fórmula del periodo fundamental para edificios de hormigón armado en la ciudad de Barcelona de Espinosa *et al.*¹⁰ a este edificio le corresponde un periodo de 0,6 s, que no se aprecia en la gráfica del cociente espectral a pesar de medirse a escasos 20 cm de la pared del edificio y a unos 2 m de las columnas.

Para la medida relacionada con la cercanía del tráfico de vehículos, el cociente espectral presenta una disminución de la amplitud en el periodo predominante del espectro de interés (0,1-2 s) y su desviación estándar es sensiblemente mayor que en las demás medidas. En cuanto al valor del periodo predominante, hay que tener en cuenta, que en esta zona de la formación deltaica del Besòs se espera un fuerte buzamiento ascendente del basamento en la dirección entre la posición de las dos primeras medidas y la de la autopista⁸; lo que encaja perfectamente con la disminución, no significativa entre los periodos predominantes medidos. Este buzamiento también podría explicar la pequeña diferencia entre la mencionada medida de Alfaro *et al.* y la nuestra, aunque estos datos no son tan fáciles de comparar, ya que en nuestro caso no se utilizó un método subjetivo de asignación del periodo correspondiente al valor máximo.

El experimento que se realizó en el llano de Barcelona se situó en la esquina de la calle Aragón con Enamorats, donde se pretendía observar las posibles perturbaciones, que se producen en una zona de la ciudad con alto ruido en suelo blando. Para esta zona de la ciudad no existe ninguna medida muy cercana del trabajo de Alfaro *et al.*⁹, mostrando los más cercanos periodos altos, aunque muy dispares: en la plaza Gaudí (periodo predominante de 1,71 s), plaza Can robadors (1,00 s) y Plaza Monumental (1,00 s). En la Figura 6 se observa, que el periodo predominante en nuestra posición es 1,56 s con una desviación estándar de 0,14 s. Lo más importante que indica esta medida es que a pesar de medirse en una zona de alto ruido, especialmente debida al tráfico de vehículos, el periodo predominante queda perfectamente determinado. Lo único, que puede destacarse de la influencia del mencionado tráfico en suelo blando, es que parece aumentar la desviación estándar del periodo predominante.

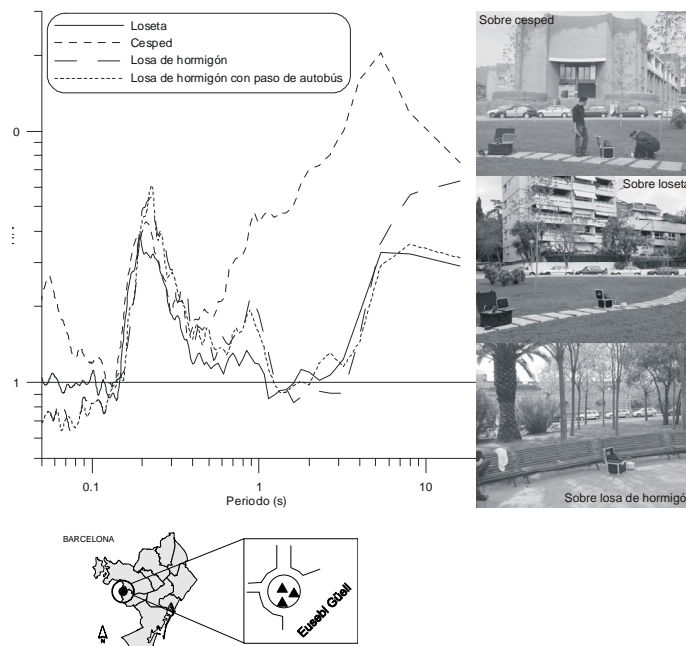


Figura 7. Comparación de los resultados obtenidos en las distintas mediciones realizadas en la plaza Eusebi Güell de Barcelona: sobre césped, sobre una loseta y sobre una losa de hormigón con y sin el paso de un autobús

Para los experimentos en suelo duro se decidió usar tres sitios cercanos al Campus Norte de la Universidad Politécnica de Cataluña: plaza Eusebi Güell, interior del Campus y Parque Cervantes (Figuras 7, 8 y 10). En la plaza Eusebi Güell se midió la influencia del firme en las mediciones; se midió sobre césped, sobre loseta y sobre losa de hormigón. En este último caso se pudo medir con y sin la influencia del paso de un autobús a unos 10 m de distancia. Las cuatro mediciones realizadas (Figura 7) marcan una frecuencia predominante de 0,22 s (0,21 s para las medidas sobre césped y sobre loseta; 0,23 s sobre losa de hormigón y 0,22 s sobre losa de hormigón con el paso del autobús) con una desviación estándar de 0,10 s (0,11 s sobre la loseta, 0,10 sobre césped, 0,09 sobre la losa de hormigón y 0,08 sobre la losa de hormigón con el paso de un autobús). Si nos atenemos al rango de periodos propios de la ingeniería civil, el periodo predominante queda bien determinado en las cuatro mediciones, pero en la medición sobre césped se observan unos máximos entorno a los periodos de 0,05 y 5,5 s, que sólo pueden ser atribuidos al césped. Este hecho hace claramente desaconsejable las mediciones en céspedes, tal como se indica en Duval *et al.*⁵. Considerando que en las medidas realizadas en el cruce Perú-Esprónceda se midió muy cerca de un parterre de césped, parece que la influencia de este es sólo en las mediciones realizadas en él y no cerca de él. Es de reseñar que en suelo duro también parece, que no existe inconveniente en medir cerca de tráfico de vehículos, aunque en este caso sólo se contabilizó el paso de un autobús y tres turismos a 10 m de distancia aproximadamente.

En el experimento, que se realizó en el interior del campus de la Universitat Politècnica de Catalunya (Figura 8), se pretendía medir la influencia de los edificios, árboles y mobiliario urbano en las medidas y el tráfico de peatones en suelo duro. Para realizarlo se obtuvo un valor de periodo predominante del suelo en la zona de 0,24 s y una desviación estándar de 0,2, midiendo en el centro de la plaza de Caminos tan alejados como fue posible de los edificios y otras causas de perturbación de las mediciones (Figura 8a). El periodo predominante es congruente con el valor obtenido en la plaza Eusebi Güell, que está separada menos de 300 m. En cambio, la desviación estándar es el doble, lo que podría ser influencia del mayor ruido ambiental en la plaza del campus. Para evitar la aproximación de la fórmula de Espinosa *et al.* mencionada se midieron los periodos fundamentales longitudinal (0,20 s) y transversal (0,22 s) de dos edificios, que al tener la misma altura y geometrías muy parecidas tienen los mismos periodos fundamentales. Entre estos dos edificios se midió a mitad de camino entre ellos (distancia al edificio de 4 m), a 4 m de distancia de una acacia y otros 4 m de una farola; en esta medición se obtuvo un periodo predominante igual que en la plaza (0,24 s con una desviación estándar de 0,19), pero en ella aparece un segundo máximo en 0,16 s (Figura 8d), que no es atribuible al edificio. A continuación se realizó una medida a sólo 2,5 m del edificio, a 4 m de la misma acacia y a 2 m de la farola anterior (Figura 8e). La forma del cociente espectral es muy parecida a la anterior. Se repitió la medida en este mismo punto, cuando se levantó un viento flojo obteniendo un cociente espectral también muy parecido (Figura 8g). Se procedió entonces a medir en el aparcamiento situado al otro lado de uno de los dos edificios situando el sensor a 8,2 m del edificio y a 2 m de otra acacia. En este punto el espectro es también parecido a los anteriores, aunque el pico secundario de 0,16 s, que aparecía parece que se divide en dos, con un máximo en 0,15 s y otro en 0,18. En otra medida en este mismo estacionamiento pero a 17,6 m del edificio, a 2,5 m de otra acacia y debajo de una marquesina de motocicletas existente, se obtuvo que el pico secundario de 0,18 s y casi alcanza el pico del periodo predominante y también crece fuertemente el pico secundario de 0,15 s. Posteriormente se midieron los periodos propios de la marquesina (0,18 s), de la farola (0,33 s) y de algunas acacias (entre 0,16 y 0,5 s). Dada la distribución de las medidas respecto a los objetos que supuestamente pueden interferir en las mediciones de la respuesta de suelo, los resultados parecen indicar, que el principal responsable de la aparición de máximos secundarios, que pueden perturbar las mediciones de suelos son los árboles. Esto es especialmente significativo para las acacias, pues poseen unas raíces largas, gruesas y muy superficiales que pueden transmitir su vibración a largas distancias, tienen

una copa fácilmente excitable con el viento y con periodos propios situados en un rango de frecuencias de importancia para la Ingeniería Sísmica. El resto de mobiliario urbano también puede influir en las mediciones, aunque parece que de forma menos importante. Respecto a los edificios no parece, que estos representen una perturbación importante para las mediciones.

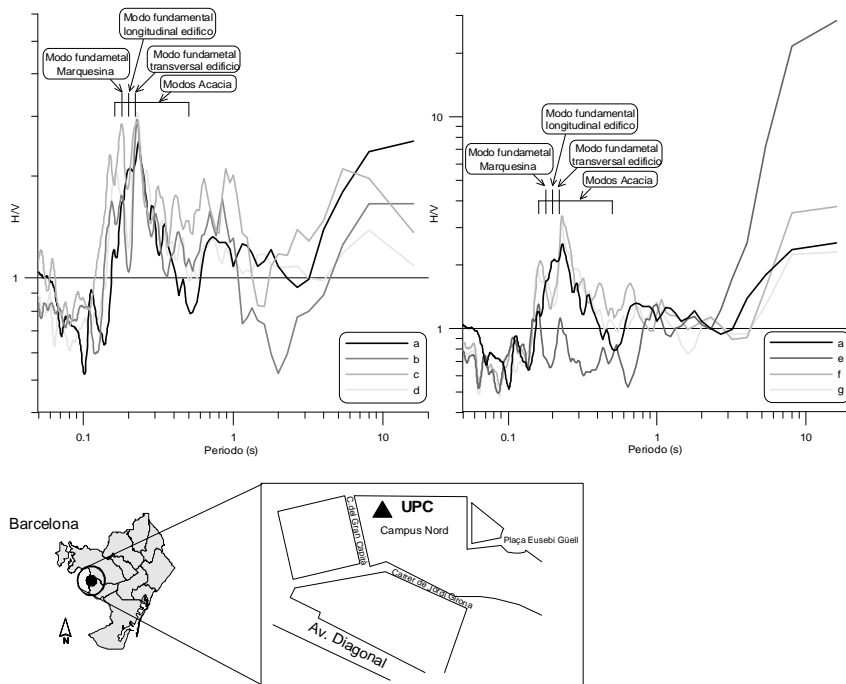


Figura 8. Resultados de los cocientes espectrales obtenidos en distintos sitios del Campus Nord de la Universitat Politècnica de Catalunya: a) Plaza de Caminos, b) en el aparcamiento a 8,2 m de un edificio y a 2 m de una acacia, c) en el aparcamiento a 17,6 m del edificio anterior, a 2,5 m de otra acacia y debajo de una marquesina del estacionamiento de motocicletas, d) en una calle del Campus a 4 m de cada edificio, a 4 m de una acacia y a 4 m de una farola, e) en una calle del Campus a 2,5 m de un edificio, a 2 m de una farola y a 4 m de una acacia con peatones andando a 1 m de distancia, f) en el punto anterior sin paso de peatones, g) en el punto anterior con viento suave

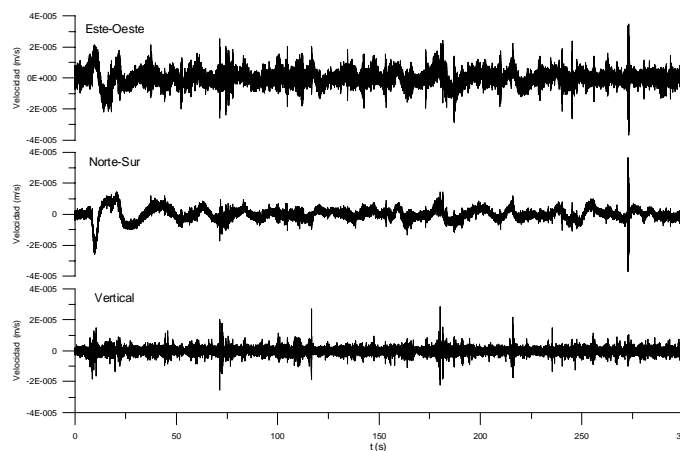


Figura 9. Señales temporales del cociente espectral de la Figura 8e

Para medir la influencia del tráfico peatonal en suelo duro se midió en la anteriormente citada calle del Campus, mientras tres personas paseaban continuamente a un metro de distancia del sensor. En las señales temporales de este experimento (Figura 9) se puede observar claramente cómo el paso de peatones a sólo un metro de distancia arruina totalmente las mediciones del cociente espectral (Figura 8f). El paso de peatones en esta calle interior del Campus, que tiene un firme de adoquines sobre una losa de hormigón armado, provoca fuerte deformación del pavimento tal como refleja el gran contenido en bajas frecuencias de las componentes horizontales. De esta manera al realizar el cociente espectral la baja frecuencia predomina de forma muy notoria en él; a pesar de ello, siguen apareciendo los picos de 0,25 y 0,16 s. Es de resaltar que predomina el pico de 0,16 s sobre el de 0,25 dando la impresión de que el propio paso de peatones excite el elemento estructural (probablemente la acacia), que introduce esta frecuencia anómala.

Debido a la complejidad urbanística del Campus se realizó un nuevo conjunto de experimentos en la parte norte del Parque Cervantes, que está situado a unos 600 m de distancia del Campus Norte. Según los datos geotécnicos existentes⁸ este emplazamiento ha de presentar un espesor de suelo mucho menor, aflorando el sustrato paleozoico a menos de 100 m (Ronda del Mig). Esta zona del parque tiene un relleno de arena gruesa de pocos centímetros de espesor y se encuentra alejada más de 50 m de cualquier árbol o elemento urbano, que pueda distorsionar las mediciones de la respuesta del suelo. En él se obtuvo un periodo predominante de 0,27 s con una desviación estándar de 0,07 (el mismo valor que el obtenido por Alfaro *et al.*⁹). Este valor ligeramente superior al del Campus Nord indica un suelo ligeramente más blando en contra de los escasos datos geotécnicos de la zona. A continuación se realizó esta misma medición pero con la perturbación provocada por el paso de peatones a 2, 1 y 0,2 m de distancia del sensor. Tal como se muestra en la Figura 10, todas las mediciones proporcionan un valor del periodo predominante muy similar (0,26 s en las mediciones con paso de peatones), aunque se distinguen por el aumento de la desviación estándar de las medidas con peatones (0,14, 0,15 y 0,14, respectivamente). También es de resaltar, que

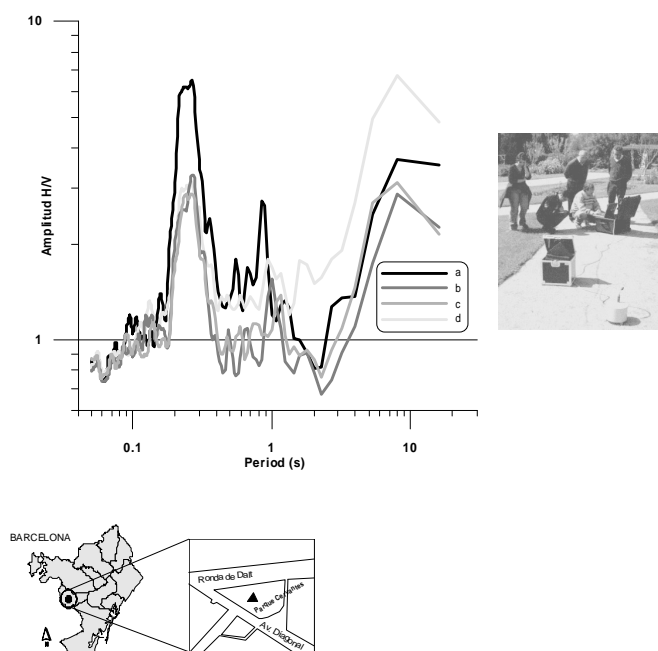


Figura 10. Resultados de los cocientes espectrales obtenidos en el Parque Cervantes: a) sin ruido, b) con paso de peatones a 2 m de distancia del sensor, c) A 1 m de distancia, d) A 0,20 m de distancia

para las medidas realizadas con el paso de peatones a 20 cm del sensor se produce un fuerte incremento del pico de 10 s de periodo debido a la fuerte deformación del terreno producido por el apoyo del peso a distancias tan cercanas (Figura 11); aunque debido a la baja rigidez del suelo más superficial esta no se transmite a grandes distancias (más de 1 m en un pavimento de hormigón armado).

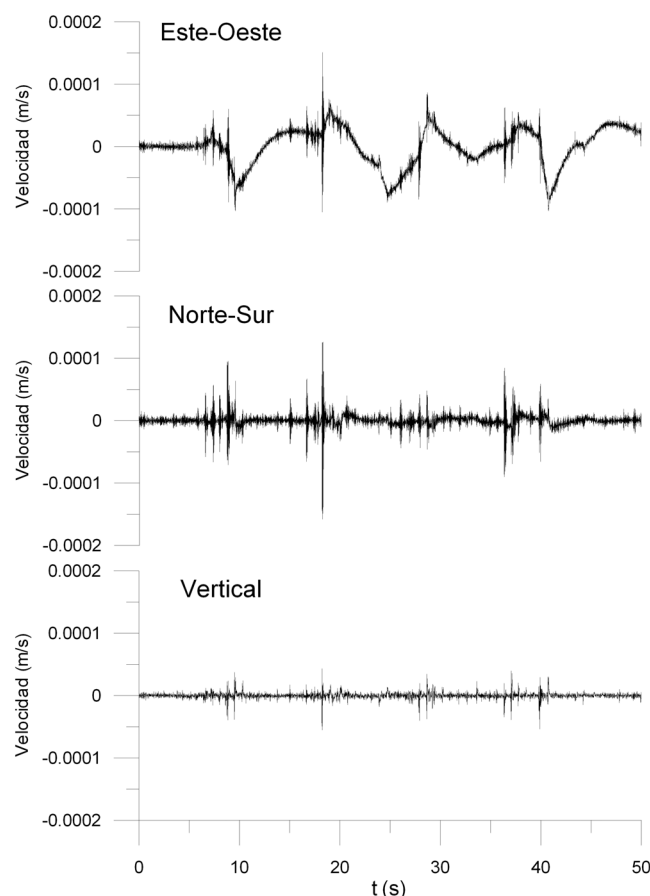


Figura 11. Señales temporales del cociente espectral de la Figura 10d

De la experiencia obtenida durante la fase de toma de datos en la Ciutat Vella de Valencia es de reseñar, en primer lugar, que en casi todos los puntos no hubo ningún problema en la obtención de los datos, ya que se tuvo la prudencia de medir alejados más de 1 m del paso peatonal o seleccionar las ventanas en que no hubo paso de peatones cercanos durante ella. Es interesante comentar, que el peor sitio de medida fue en una de las pocas plazas amplias que tiene este barrio (plaza de Alfonso el Magnánimo); se midió alejados de cualquier árbol, sin paso de peatones y con los vehículos a más de 20 m del sensor. A pesar de todo ello se podía observar que el paso de cualquier autobús a más de 50 m de distancia producía una vibración de gran amplitud (Figura 12). En este punto y en algún otro con elevado ruido se fue muy cuidadoso de elegir solamente las ventanas, en que no se producía esta interferencia. En dos puntos se tuvo que repetir la medición por el fuerte ruido, que se produjo durante la primera; uno fue causado por el intenso paso de peatones en la calle de Ribera y el otro por el tráfico de vehículos en la calle Colón. En este segundo punto, situado frente a un semáforo, lo que se observó, es que la peor influencia de los vehículos era al arrancar o frenar y no su paso. En los demás puntos de las calles que circunvalan la Ciutat Vella no hubo problemas pues el sensor se situó alejado de los semáforos.

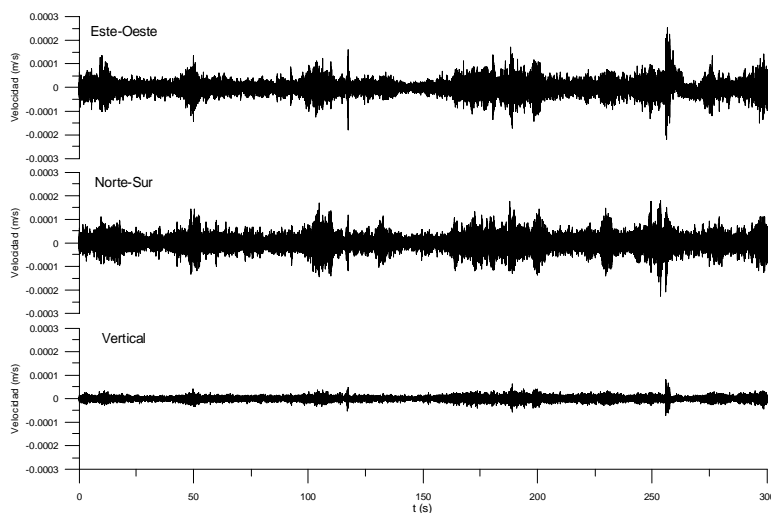


Figura 12. Señales temporales medidos en la plaza Alfonso el Magnánimo de Valencia

RESULTADOS EN CIUTAT VELLA DE VALENCIA

La Ciutat Vella de Valencia está situada en un pequeño promontorio rodeado por el antiguo cauce del río Turia a 4 km del mar Mediterráneo. En superficie aflora la unidad pleistocena aluvial formada por arcillas, arenisca, arenas y gravas con unos 100 m de potencia¹¹, que se sobrepone a la formación miocena marina compuesta por arcillas, arenisca y limos. Como en tantas otras formaciones aluviales se pueden esperar cambios rápidos a pequeña escala. Debido a ello, se planificó una malla de exploración densa de aproximadamente 125 por 125 m homogéneamente distribuida por el barrio. Por las causas expuestas en el anterior apartado, las medidas se realizaron en el punto más cercano a los nudos de la malla, que parecía más adecuado (poco tránsito de peatones y vehículos y especialmente lejanía de árboles y otro mobiliario urbano) quedando las mediciones muy homogéneamente distribuidas (Figura 13). Para corroborar, que el uso de dos instrumentos diferentes no introdujera un sesgo en los resultados, se midió con ambos simultáneamente en el punto 71 (calle de la Beata). En ambos se obtiene un espectro del cociente espectral casi idéntico excepto para periodos superiores a 2 s donde el sensor VSE-15 de 1 s empieza a no ser apto. Con el Lennartz de 20 s se obtuvo un valor de 0,39 s con una desviación estándar de 0,25, mientras que con el VSE-15 se obtiene el mismo resultado pero con una desviación estándar de 0,27, lo que refleja que no ha de existir sesgo en el rango de interés en ingeniería por la utilización de dos instrumentos de características diferentes (Figura 14).

Una de las características que distinguen claramente los resultados obtenidos en Ciutat Vella de Valencia y Barcelona es la forma del cociente espectral. Mientras que en Barcelona sólo existía un pico, en el rango de periodos de 0,1 a 2 s, al que se puede llamar predominante, en Valencia aparecen tres bandas mucho más amplias espectralmente.

La banda de más alta frecuencia varía entre los 0,06 y lo 0,10 s de periodo, presentando un máximo entorno a los 0,08 s. Debido a su alta frecuencia sólo puede estar relacionado con los estratos culturales más superficiales (escasos metros) y de acuerdo con ello presenta una fuerte variación lateral de su valor, amplitud y existencia. De hecho, sólo aparece en el 49 % de las mediciones y es predominante en el 10 %. Se encuentran puntos a distancias menores de 100 m, en los que esta banda pasa de ser predominante a no existir (punto 72 de la Figura 13). En la Figura 14 se muestra un ejemplo, en el que esta banda prácticamente no existe, mientras que en la Figura 15 se observa, cómo ésta es predominante.

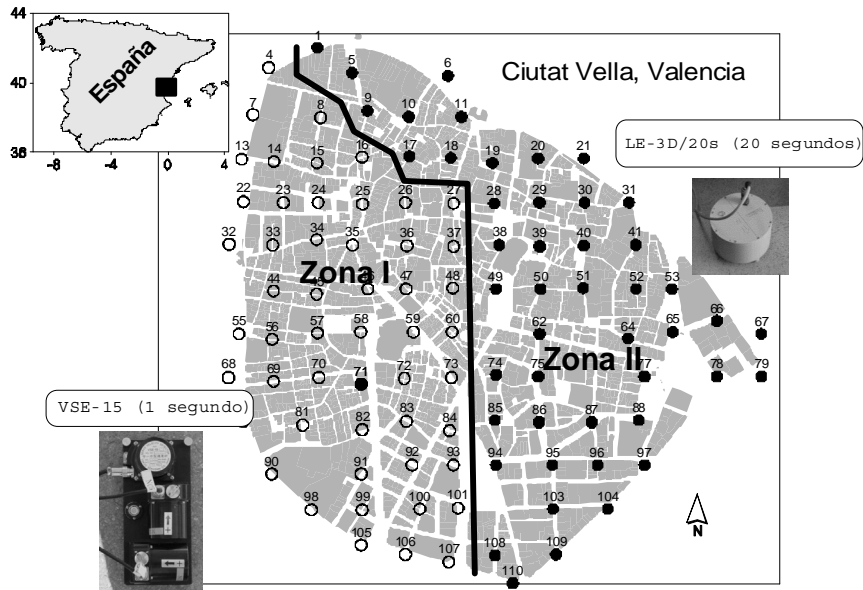


Figura 13. Mapa de la situación de las medidas realizadas en la Ciutat Vella de Valencia

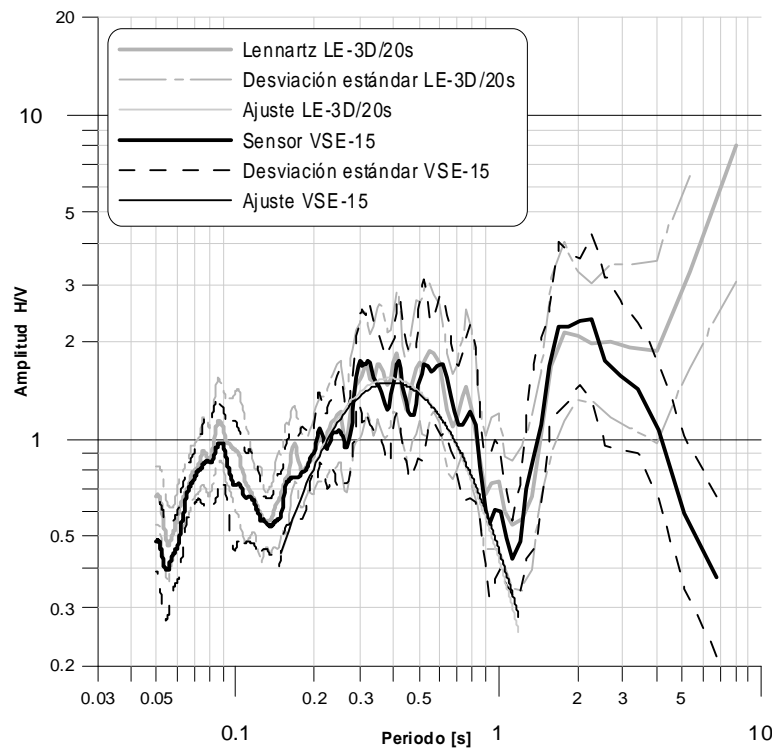


Figura 14. Comparación de los cocientes espectrales obtenidos mediante el sensor Lennartz de 20 s y el sensor VSE-15 de 1 s en la calle de la Beata de Valencia (punto 71 de la Figura 13)

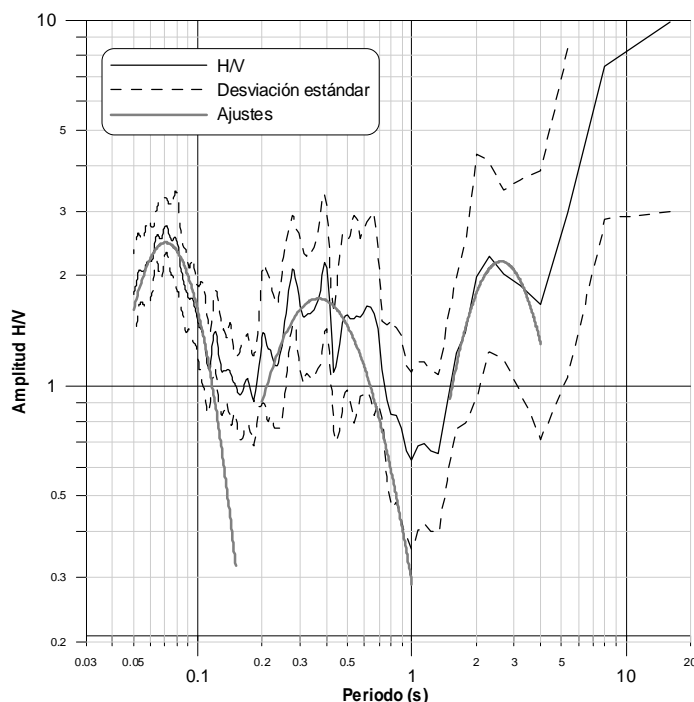


Figura 15. Cociente espectral obtenido en la plaza Portal de la Mar de Valencia (punto 78 de la Figura 13)

La segunda banda de frecuencias es la más importante desde el punto de vista de la Ingeniería Sísmica, ya que se presenta entre los 0,10 y los 1,10 s de periodo, presentando el pico entorno a los 0,39 s, aunque varía entre 0,21 y 0,69 s. De acuerdo con su mayor profundidad se encuentra en todas las mediciones y es predominante en el 34 % de ellas. Una observación detallada de la forma de esta banda, en que se produce amplificación (valor de H/V mayor que 1), muestra que está compuesta por más de un pico interno, en que la importancia de cada uno de ellos depende fuertemente de la medición, lo que se traduce en una variación importante entre el periodo, en que se ajusta el máximo. Este hecho reflejaría la gran complejidad geotécnica de los depósitos aluviales.

El tercer pico del cociente espectral se produce entorno a los 2,3 s y su banda de amplificación empieza a los 1,1 s y solamente tiene un final para el sensor VSE-15 de 1 s, ya que para el otro sensor queda unida a una cuarta banda con amplificación. La amplificación a estos periodos es sólo importante para los rascacielos (más de 30 plantas), que no existen en esta zona de la ciudad. A pesar de ello es predominante en el 51 % de las mediciones y podría estar relacionado con la transición entre los estratos miocenos y cuaternarios de la zona.

Tal como se ha mencionado, la finalidad de este trabajo era implementar la amplificación de suelos en los cálculos de vulnerabilidad en edificios de viviendas. Debido a la amplitud espectral de las bandas de frecuencia, donde se produce amplificación, el hecho de asignar sólo la amplificación al periodo del valor máximo descartaría un amplio rango, en el que probablemente se produce. Por ello se optó por asignar, que existe amplificación en todo el rango, en que el cociente espectral es mayor que 1. Esta forma de trabajo significa adjudicar amplificación en periodos, en que probablemente la amplificación si existe es muy pequeña, pero como nuestro propósito es implementarlo en los cálculos de vulnerabilidad, esto sólo supone un pequeño aumento de esta. Por contra, para calcular el periodo de los edificios se ha tenido en cuenta la fórmula de Espinosa *et al.*¹⁰ sin tener en cuenta la desviación estándar de esta.

Para calcular los periodos, en que existe amplificación del suelo (según la definición anteriormente expuesta), se interpoló linealmente el periodo mínimo y máximo de cada banda a toda la zona de estudio en una parrilla de 10 por 10 m (31 000 puntos). El rango de periodos de interés se dividió en 14 intervalos asociados a las alturas de los edificios: entre 0,08 y 0,14 s para edificios de hormigón armado de 1 planta o mampostería de 1 a 2 plantas; 0,14 y 0,20 s para edificios de hormigón de 2 a 3 plantas o mampostería de 3 plantas; 0,20 y 0,26 s para todos los tipos de entre 4 y 5 plantas; 0,26 y 0,32 s para 6 y 7 plantas; 0,32 y 0,38 s para edificios de hormigón de 8 y 9 plantas y de mampostería de entre 7 y 9 plantas; 0,38 y 0,44 s para edificios de hormigón de 10 y de mampostería de 11 y 12; 0,44 y 0,50 s para hormigón de 11 y 12 plantas o mampostería de 13 y 14; 0,50 y 0,56 s para edificios de hormigón de 13 y 14 plantas o mampostería entre 15 y 17; 0,56 y 0,62 s para 15 y 16 plantas de hormigón y 18 y 19 de mampostería; 0,62 y 0,68 s para hormigón de 17 y 18 plantas y mampostería entre 20 y 22; 0,68 y 0,74 s para 19 y 20 plantas de hormigón y entre 23 y 25 de mampostería; 0,74 y 0,80 s para edificios de hormigón de 21 y 22 plantas; 0,80 y 0,86 s para 23 y 24 plantas de hormigón; y 0,82 y 0,92 s para edificios de hormigón armado de 25 plantas. Con estos datos se realizó un mapa de la Ciutat Vella para cada una de estas bandas, que sirve de base para estudios de planificación del territorio, ya que alerta de qué posibles construcciones son más desfavorables en caso de terremoto. Como ejemplo, en la Figura 16 se muestran las zonas, en que es probable una amplificación del suelo para periodos entre 0,14 y 0,20 s que correspondería según la ley de Espinosa *et al.*¹⁰ a edificaciones de hormigón armado de entre 2 y 3 plantas o de mampostería de 3 plantas. De la colección de mapas de amplificación de suelos cabe destacar que para edificios con periodos fundamentales entre 0,20 y 0,74 s (correspondientes, según la mencionada ley, a edificios de hormigón armado entre 4 y 20 plantas o mampostería de más de 4 plantas) en casi toda Ciutat Vella existirá probabilidad de interacción; existiendo amplias zonas donde, especialmente, los edificios de entre 2 y 3 plantas o más de 20 de hormigón o de 3 plantas de mampostería no presentaran interacción.

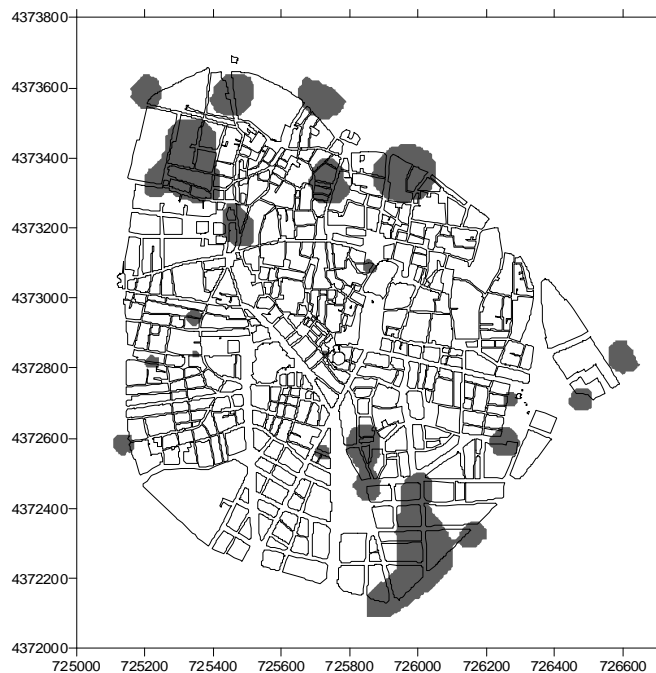


Figura 16. Mapa de amplificación de suelos para el rango de periodos entre 0,14 y 0,20 s. En oscuro zonas con probable amplificación

Para realizar los mapas definitivos de edificios con probable interacción suelo-estructura (Figura 17) se procedió a asignar a cada edificio existente la coordenada de la parrilla más cercana a su centro de masas, mediante la anteriormente mencionada fórmula de asignarle su periodo fundamental según sus características (tipología y altura) y, finalmente, calcular si existía o no interacción (periodo fundamental del edificio dentro del rango de periodos con amplificación del suelo). Asumiendo la forma ligeramente pesimista de calcular la interacción suelo-estructura, hay en la actualidad un 36 % de edificios de vivienda que probablemente pueden presentar interacción suelo-estructura. De ellos, el 66 % corresponde a edificios de mampostería; aunque sólo el 29 % de edificios de esta tipología presentan interacción dado el gran número de estos que existen; mientras que el 64 % de los edificios de hormigón armado la presentan.



Figura 17. Mapa de interacción suelo-estructura. En oscuro edificios con probable interacción

CONCLUSIONES

La principal conclusión del estudio es que el método del cociente espectral es menos sensible de lo que se suponía a las vibraciones directas que perturban las mediciones. De entre ellas, parece que el paso de peatones o vehículos cerca del sensor es sólo importante cuando el firme es el mismo y es rígido; aunque podría ser que las frenadas y arrancadas cercanas de vehículos fueran importantes en firmes diferentes pero con cierta conexión.

También es importante reseñar, que la proximidad de árboles puede ser causa de una incorrecta medición, especialmente aquéllos que por su naturaleza o por el suelo, en que se encuentran, tienen importantes raíces superficiales. La distancia a los árboles aconsejable para medir dependerá fuertemente de éstos y no es posible dar unas pautas adecuadas sin estudios más detallados. De todas formas parece plausible afirmar que para distancias superiores a 20 m puede ser una norma general.

No se descarta, que otros elementos urbanos como marquesinas, farolas etc, cuyas frecuencias fundamentales suelen estar entre 0,10 y 0,50 s puedan introducir suficiente energía para distorsionar las mediciones a pequeñas distancias. En estos casos, la distancia deberá ser mayor, cuando el anclaje de éstos esté en el propio firme, donde se realiza la medición.

Respecto a los edificios no se ha detectado en ningún caso su influencia ni a distancias tan corta como 20 cm del muro y 2 m de la columna. Esto puede ser debido a que el firme de las aceras no está fuertemente conectado a los edificios y, por tanto, su onda directa queda muy atenuada y probablemente distribuida en un gran volumen de terreno. Esto es sólo cierto para vibración ambiental sin viento fuerte, ya que en caso de terremoto sí que se ha demostrado, que la inyección de energía, que realizan los edificios, llega a grandes distancias (más de 20 m). El caso de viento fuerte es de difícil comprobación puesto que la sensibilidad de los sensores colocados usualmente en sitios abiertos hace imposible la medida.

Respecto a la medición de la respuesta de suelo en césped corroboramos la imposibilidad, apuntada por Duval *et al.*⁵ de realizarla correctamente. La única explicación posible a esto es que el imperceptible movimiento de las briznas de césped en el sensor podría poseer una gran energía comparada con la procedente del ruido ambiental, principalmente en las componentes horizontales.

A nivel de análisis de datos creemos necesario utilizar métodos objetivos para la determinación del periodo predominante. Esto es especialmente importante en cocientes espectrales complejos propios de zonas con una geología compleja y con diferentes cambios estratigráficos, que presentan suficiente contraste de impedancias sísmicas para generar más de un pico de resonancia o un pico complejo. En este trabajo proponemos un método simple de ajuste de una gaussiana logarítmica del promedio de los cocientes espectrales individuales. Si se pretende estudiar variaciones espaciales entre el periodo predominante, es importante usar un método objetivo de asignación y el cálculo de la desviación estándar para corroborar, si las diferencias son o no significativas. Esta desviación estándar parece estar relacionada con el nivel de ruido no deseado (ondas directas).

También es de reseñar la alta sensibilidad a variaciones laterales que presenta el cociente espectral en las mediciones realizadas en el cruce de la calle Perú y Esprónceda (Figura 5). Esto podría indicar la sensibilidad de este método como forma de prospección geofísica, especialmente en cuencas sedimentarias con un cociente espectral simple y profundidades importantes, donde otros métodos son de difícil aplicación en ciudades.

En la Ciutat Vella de Valencia los cocientes espectrales presentan una forma compleja con tres bandas con amplificación en el rango de periodos 0,05 a 2 s. No existe uniformidad, sobre cuál es predominante, ya que varía muy rápidamente de una medición a otra y también es posible que varíe de un momento del día a otro, dependiendo de la energía que excite el suelo. De los datos obtenidos la primera banda es predominante en el 10 % de los casos, en un 39 % la segunda y en un 47 % la tercera; presentando igual valor del máximo la segunda y la tercera en el 4 % restante de las mediciones.

La primera banda con amplificación se extiende desde los 0,05 a los 0,18 s de periodo, y en consecuencia, sólo afecta a las estructuras de menos de 4 niveles. Esta es la única banda, que no se observa en todo el barrio (49 % de las medidas) y, dada su variabilidad especial y sus frecuencias, está relacionada con el estrato sedimentario cultural de la Ciutat Vella (estrato sedimentario cuaternario reciente, donde se hallan los restos arqueológicos). Estos resultados están de acuerdo con los datos geotécnicos y geofísicos¹², que se poseen.

La segunda banda varía entre los 0,10 y los 1,10 s de periodo con el máximo de la banda variando entre 0,21 y 0,69 s. La forma de esta banda es compleja con la presencia de más de un pico interno con amplitudes relativas muy variables de un punto a otro. Esta característica reflejaría la variación entre los contrastes de impedancia de los diferentes estratos sedimentarios situados entorno a los 20 m de profundidad. Desde el punto de vista de la Ingeniería Sísmica es el más importante afectando a edificios de entre 1 y 31 plantas.

La tercera banda en el rango de interés empieza en los 1,10 s y se superpone con la última banda en las mediciones realizadas con el sensor de 20 s. Su efecto sería sólo importante para futuros rascacielos de más de 30 plantas. Para el sensor Lennartz de 20 s (por encima del rango de sensibilidad del sensor VSE-15) empieza un pico de amplificación. Éste podría estar relacionado con estructuras muy profundas o con el oleaje del mar.

Usando unas hipótesis ligeramente pesimistas, existe amplificación siempre que el cociente espectral medido con ruido ambiental sea superior a 1, y a partir de la ley de periodos fundamentales de Espinosa *et al.*¹⁰ se ha obtenido, que el 36 % de los edificios de viviendas de la Ciutat Vella de Valencia pueden presentar interacción suelo-estructura. Aunque en su mayoría son de mampostería (66 %), los edificios más afectados son los de hormigón armado, ya que el 64 % de éstos la presentan frente al 29 % de los de mampostería. Esto refleja la menor altura media de las edificaciones de mampostería frente a las de hormigón.

Para la planificación urbanística los datos reflejan, que en la mayor parte del barrio existirá probablemente interacción para el rango de periodos de 0,20 a 0,74 s, que corresponde a edificios de viviendas de entre 4 y 20 plantas.

Aunque el método de Nakamura no puede usarse con suficiente fiabilidad para calcular amplificaciones, sino solamente periodos con amplificación, la baja amplitud del cociente espectral en todas las observaciones y la complejidad del espectro nos llevan a pensar, que muy probablemente esta sea baja en Ciutat Vella.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología mediante los proyectos: REN2003-07170 RIES y REN2003-08159-C02-01 y la oficina de Urbanismo del Ayuntamiento de Valencia.

REFERENCIAS

- 1 J. Semblat, A.M. Duval y P. Bangla, "Numerical análisis of seismic wave amplification in Nice (France) and comparison with experiments", *Soils Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. **19**, pp. 347–362, (2000).
- 2 Y. Nakamura, "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", *Report Railway Tech. Research Institute*, Vol. **30**, N° 1, pp. 25–33, (1989).
- 3 M.G. Koller, J.L. Chatelain, B. Guillier, A.M. Duval, K. Atakan, C. Lacave, P.Y. Bard y the SESAME participants, "Practical user guidelines and software for the implementation of the H/V ratio technique: measuring conditions, processing method and results interpretation", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canadá, Paper N° 3132, en CD, (2004).
- 4 K. Atakan, A.M. Duval, N. Theodulidis, B. Guillier, L. Chatelain, P.Y. Bard y the SESAME team, "The H/V spectral ratio technique: experimental conditions, data processing and empirical reliability assessment", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canadá, Paper N° 2268, en CD, (2004).
- 5 A.M., Duval, J.L. Chatelain, B. Guillier y the SESAME WP02 team, "Influence of experimental condition for H/V on ambient noise vibration method", *Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canadá, Paper N° 306, en CD (2004).
- 6 M. Navarro, T. Enomoto, F.J. Sanchez, I. Matsuda, T. Iwatate, A.M. Posadas, F. Luzón, F. Vidal y K. Seo, "Surface soil effects using short-period microtremor observations in Almeria City, Southern Spain", *Pure Appl. Geophys*, Vol. **158**, pp. 2481–2497, (2001).

- 7 P. Guéguen, J.L. Chatelain, B. Guillier y H. Yepes, “An indication of the soil topmost response in Quito (Ecuador using noise H/V spectral ratio)”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. **19**, pp. 127–133, (2000).
- 8 A. Ventayol, J. Palau, A. Céspedes, M. Barbera, C. Pascual, R. Roset, I. Fabrellas, J.J. Fernández, J. Marturia, J. Cid, E. Parra, P. Buxó, M. Cabrera, J. Galindo y G. Bley, “Mapa geotécnico de Barcelona 1:25000”, Instituto Cartográfico de Cataluña, Barcelona, España, (2000).
- 9 A. Alfaro, Ll.G. Pujades, X. Goula, T. Susagna, M. Navarro, J. Sanchez y J.A. Canas, “Preliminary map of soil’s predominant periods in Barcelona using microtremors”, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. **158**, pp. 2499-2511, (2001).
- 10 F. Espinosa, U. Mena, J.A. Canas, Ll.G. Pujades y J.O. Caselles, “Estimación de algunas propiedades dinámicas de los edificios de Barcelona, España, utilizando SIG”, *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. **9**, N° 1, pp. 19–29, (2004).
- 11 Colegio Territorial de Arquitectos de Valencia (CTAV), Ayuntamiento de Valencia y Universitat de Valencia, “Historia de la Ciudad”, Ícaro, Valencia, España, (2002).
- 12 V. Pérez, J.A. Canas, Ll.G. Pujades, J. Clapés, J.O. Caselles, F. García y R. Osorio, “GPR survey to confirm the location of ancient structures under Valencia Cathedral (Spain)”, *Applied Geophysics*, Vol. **43**, pp. 167–174, (2000).