

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO EN LA POBLACIÓN DE CUMANACOA, REALIZADOS PARA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA, 2006

DETERMINATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF THE SOIL IN THE CUMANACOA LOCALITY, MADE FOR SEISMIC MICROZONATION, 2006

FRANCISCO ANTONIO BONIVE AGUILERA

Universidad de Oriente, Centro de Sismología, Cumaná, Venezuela
E-mail: fbonive@udo.edu.ve

RESUMEN

La población de Cumanacoa es considerada un patrimonio histórico de la región nororiental de Venezuela, que a pesar de su relativa distancia (~23 km) ¿De donde?, puede ser afectada por un terremoto originado en el sistema de fallas de El Pilar. Usando la técnica de Nakamura (Horizontal/Vertical) se determinó que en la localidad se logran interpretar períodos fundamentales entre 0,4 y 1 s, con amplificaciones entre 2 y 5,5. El índice de vulnerabilidad es comúnmente menor a 18, lo que la convierte en una población relativamente segura para amplificaciones en edificaciones importantes. El número crítico de ciclos fue siempre superior a 400, lo que certifica las condiciones de todas las medidas de microtemblores. El espesor sedimentario normalizado muestra una estructura cortical somera en la que predominan (60%) las zonas con la mitad de espesor del sedimento más profundo; éste afecta un área cercana al 40% de la zona estudiada. La distribución espacial muestra una correlación esperada entre el período fundamental y el espesor, mostrando una zona bien definida de mayor espesor sedimentario, hacia el centro de la población. La amplificación presenta una distribución espacial diferente evidenciando una posible dirección de orientación NNE-SSO. El índice de vulnerabilidad presenta sus mayores valores hacia la periferia de la población, en especial la zona centro sur.

PALABRAS CLAVE: Efecto de sitio, técnica de Nakamura.

ABSTRACT

The city of Cumanacoa is considered an historical patrimony of the northeastern region of Venezuela, which in spite of its relative distance (From where?), can be stricken by an earthquake originated in the fault zone of El Pilar. Using the technique of Nakamura (Horizontal/Vertical) it was determined that the locality has fundamental periods between 0.4 and 1 s, with amplifications between 2 and 5.5. The vulnerability index is commonly smaller than 18, which turns it into a relatively safe region for amplifications in important buildings. The critical number of cycles was always larger than 400, which certifies the conditions of all the measures of microtremors. The standardized sedimentary thickness shows a brief cortical structure which is dominated (60%) by areas with half the thickness of the deepest sediment; this affects an area close to 40% of the studied surface. The spatial distribution shows the expected correlation between the fundamental period and the thickness, with a well-defined area of increased sedimentary thickness towards the Centre of the town. The amplification displays a different space distribution demonstrating a possible orientation NNE-SSO. The vulnerability index presents its highest values towards the periphery of the town, specially in the South Central area.

KEY WORDS: Site effect, Nakamura's method.

INTRODUCCIÓN

La población de Cumanacoa ha sido afectada por eventos sísmicos importantes, desde tiempos históricos, que han sido registrados por los cronistas de la época, como son; los terremotos del 14 de diciembre de 1797, 15 de julio de 1853, 17 de enero de 1929 y, más recientemente, el terremoto de Cariaco, 9 de julio de 1997 con magnitud de 6.8 Ms, los cuales han dejado evidencia en sus edificaciones coloniales (Grases 1979, Avendaño 1997). Dada la cercanía al Sistema de Fallas del Pilar, es probable que la ocurrencia de un evento sísmico grande en este sistema pueda afectar la población y por lo tanto se hace necesario establecer un buen escenario sísmico que pueda anticipar, de manera acertada, las consecuencias de este terremoto

Las investigaciones científicas en el área de la

sismología, desde los comienzos de la edad moderna, se orientaron hacia la predicción de la ocurrencia de un terremoto (Wallace *et al.* 1984), pero con el transcurso del tiempo se ha demostrado que éstos son fenómenos mucho más complejos de lo que se había estimado (Kanamori 2003). Lograr predecir con precisión en el corto plazo, es una utopía (Geller *et al.* 1997), ya que en el caso de los riesgos naturales, al ser improbable interponerse y, en algunos casos, predecir de alguna manera la amenaza, es evidente que los trabajos e investigaciones de la literatura técnica revelen un especial beneficio en los estudios de vulnerabilidad y las técnicas de prevención-mitigación para reducirlas, ya que el objetivo conclusivo es lograr así la disminución del riesgo (Lantada *et al.* 2008).

Tomando en cuenta esta realidad, la tendencia de la sismología actual es hacia la predicción de algo mucho más

modesto y al parecer, menos complicado que un terremoto, se intenta estimar las consecuencias de una eventual ocurrencia de un sismo (Arcila 2007). En la actualidad se hacen esfuerzos importantes en completar, lo más cercano a la realidad, los escenarios sísmicos, así que la orientación es hacia las medidas geotécnicas de alta precisión y que produzca poco impacto en el entorno (ruido, explosiones, entre otras), ya que estas deben hacerse en áreas urbanas y por lo tanto, pobladas.

Una de las técnicas más utilizadas para realizar medidas geotécnicas destinadas a diagnosticar el comportamiento de un suelo, para actividades de ingeniería, es el SPT o *Standar Penetration Test*. A pesar de lo confiable que pueda parecer los datos obtenidos por este tipo de técnica, que produce resultados empíricos sobre el comportamiento estático del terreno, actualmente se necesitan deducciones útiles para predecir, eficientemente, el movimiento del suelo durante un terremoto. En algunas ocasiones, se opta por utilizar las técnicas que brindan mayor información sobre la dinámica del suelo en el sitio de interés, por lo que se anteponen las que están más ligadas con los módulos de rigidez, períodos fundamentales, magnificaciones, entre otras (Inazaki 2006).

Existen una variedad importante de técnicas que generan estos resultados y que se pueden aplicar para realizar medidas geotécnicas de interés en las poblaciones a estudiar. En Venezuela, se ha estandarizado el uso de la relación H/V o de Nakamura (1989), técnica desarrollada en Japón a finales del siglo XX. Este procedimiento toma en cuenta la correlación entre las diferentes amplitudes espectrales de los registros verticales y horizontales, pudiendo diferenciar los sitios de sedimentos grandes (largos períodos fundamentales) y los firmes (períodos fundamentales cortos). En definitiva, H/V se ha convertido en uno de los estudios más importantes dentro de la microzonificación sísmica con fácil obtención del efecto de sitio (Lermo y Chávez-García 1994, Field *et al.* 1995, Lachet *et al.* 1996, Bonilla *et al.* 1997, Riepl *et al.* 1998).

Este trabajo tuvo como objetivo determinar los períodos fundamentales y las magnificaciones usando la técnica de Nakamura en la población de Cumanacoa. Lamentablemente no se cuenta con estudios de suelo (SPT) para correlacionar esta técnica con la geología para dar un importante avance en el análisis de la vulnerabilidad sísmica y por lo tanto en el riesgo sísmico local de la ciudad de Cumanacoa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se aplicó la técnica de Nakamura o relación H/V en la población de Cumanacoa (Fig.1). La técnica permite establecer los períodos fundamentales y magnificaciones, instaurando las condiciones mínimas de resonancia para las edificaciones (Nakamura 1989). A pesar que esta técnica es de amplia difusión, en la actualidad carece de la historia y de la certidumbre experimental de otras técnicas como la refracción sísmica, pero es muy usada debido a que el proceso de adquisición de los datos es realmente sencillo, económico (si se cuenta con los equipos) y puede usarse en áreas urbanas ya que es reconocida como una técnica no invasiva (en comparación con los ensayos de SPT) y poco ruidosa, si se contrasta con la refracción sísmica, debido a que la señal con que se trabaja es de origen natural (microtremores), siendo finalmente registrada, por un sensor de tres componentes. Los equipos usados (Fig. 2a, 2b) en la adquisición de los datos fueron un sismómetro broadband banda ancha (3 s), un digitalizador de 24 bits, una computadora portátil, equipos conexos y un equipo GPS (GARMIN GPSMAP 76 S, DGPS (USCG), 3-5 m).



Figura 1. Imagen satelital de la ciudad de Cumanacoa, donde se señala con puntos los sitios de registro de ruido ambiental, usados para la técnica de Nakamura, basada en microtremores.



Figura 2a. Equipo usado para el registro del ruido ambiental para la obtención posterior de los microtremores.



Figura 2b : Adquisición de registro de ruido ambiental usando un sensor de tres componentes broadband (flecha)

Con relación a la técnica H/V, se usaron dos programas informáticos uno para la adquisición y otro para el procesamiento. El primero, Seislog, software que utiliza el Seisan (Ottemöller y Havskov 1999) para la adquisición y digitalización de datos. A pesar que registra los datos en un formato bien específico, cuenta con un número importante de programas de conversión de formato; además tiene la cualidad de ser un software libre sustentado por un grupo de investigación en la Universidad de Bergen, Noruega. El segundo es el J-Sesame, también software libre, construido dentro del proyecto internacional SESAME (ECU 2000), desarrollado por los países que integran la Comunidad Económica Europea, entre los años 2001 y 2004, utilizado para determinar el efecto de sitio.

Para la aproximación de un estrato somero se calcula por la ecuación (1).

$$F_0 = \frac{C_s}{4 * h}$$

donde, F_0 es la frecuencia fundamental en Hz, C_s es la velocidad de la onda S (m/s) en el estrato superficial, h es el espesor del estrato.

Se puede complementar el cálculo anterior con:

$$F_0 = \frac{C_B}{4 * h * Amp}$$

donde F_0 es la frecuencia fundamental en Hz, C_B es la velocidad de la onda S (m/s) en el basamento y Amp es el factor de amplificación del microtremor.

Otro resultado importante se presenta con el índice de vulnerabilidad ($indv$). Es una forma preliminar de medir la vulnerabilidad en el sitio, por lo cual es proporcional a ella y existe en la actualidad un amplio número de investigaciones en el área, la expresión usada para calcularla está dada por:

$$indv = \frac{(Amp)^2}{F_0}$$

tanto la Amp (adimensional) como F_0 (Hz) son resultados directos de la curva de la relación H/V, en este trabajo se utilizó indistintamente tanto el período como la frecuencia fundamental.

El número crítico de ciclos se define como la cantidad, no consecutivas de ciclos completos proporcionados por una selección de ventanas temporales, que contienen una señal de frecuencia dada, y para un estudio específico no debe ser menor a 200, según la bibliografía, aunque en este trabajo se considera bueno si supera los 400. La expresión usada para calcularlo es:

$$NC = N_v * L_v * F_0$$

donde: N_v es el número de ventanas, L_v es la longitud de la ventana en segundos. F_0 la frecuencia hallada en el sitio en Hz, la cual es el pico principal en el registro H/V.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos, a partir de la aplicación de la técnica de Nakamura o relación H/V, en la población de Cumanacoa, se pueden observar en las figuras 3 y 4 donde se representa la ubicación espacial de los períodos fundamentales de vibración del suelo y sus magnificaciones, obtenidos con la aplicación de la técnica de Nakamura. En las figuras 5 y 6 se representan el índice de vulnerabilidad y un espesor normalizado a 1, que implican un cálculo basado en los resultados anteriores, usando las expresiones 1 y 3. Para las evaluaciones de la estabilidad de los resultados se utiliza la data representada en la Figura 7, que representa al número crítico de ciclos, calculados con la expresión 4.

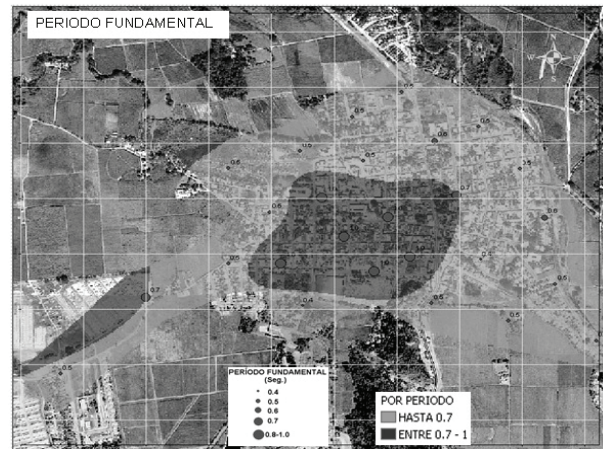


Figura 3. Representación espacial de los períodos fundamentales mediante la aplicación de la técnica de Nakamura. Existe una perfecta definición, de la zona de mayor periodo. Zonas oscuras corresponde a valores de periodo fundamental mayores a 0,7 s.

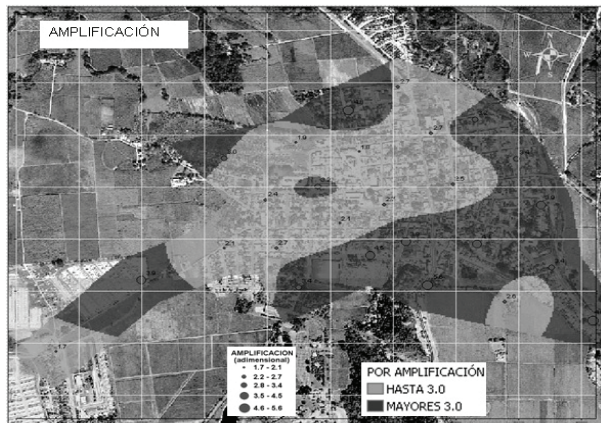


Figura 4. Representación espacial de las magnificaciones mínimas, mediante la aplicación de la técnica de Nakamura. Zonas oscuras corresponde a valores de magnificación mayores a 3,0.

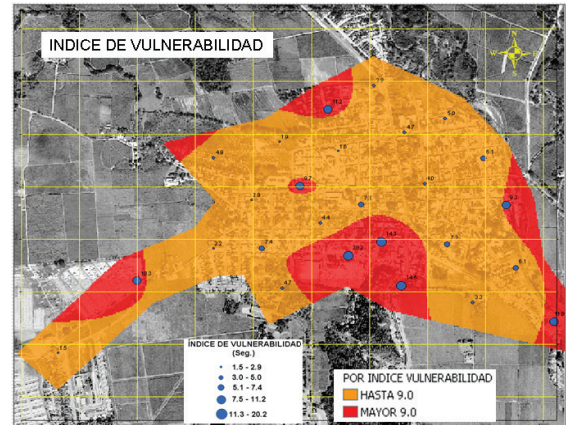


Figura 5. Representación espacial del índice de vulnerabilidad, éste es uno de los cálculos más relevantes de la aplicación de la técnica de Nakamura. Zonas oscuras se relacionan a valores mayores a 9.

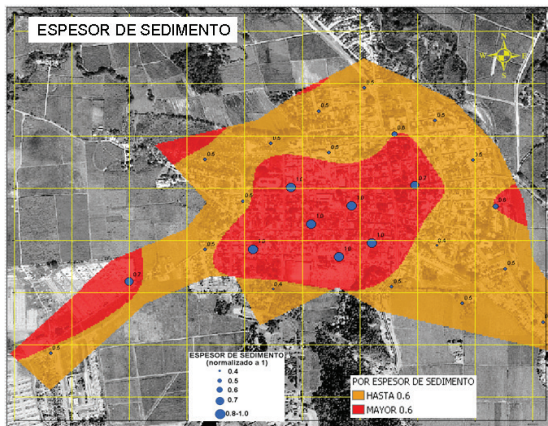


Figura 6. Representación espacial de los espesores sedimentarios, éste es uno de los cálculos más relevantes de la aplicación de la técnica de Nakamura. Zonas oscuras se relacionan a valores mayores a 72 m.

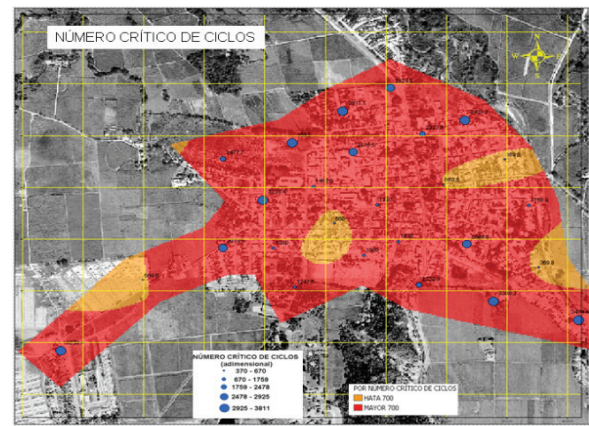


Figura 7. Representación espacial del número crítico de ciclos, siendo éste parámetro muy importante para estimar la confiabilidad de los resultados conseguidos con la aplicación de la técnica de Nakamura. Zonas oscuras corresponde a valores mayores de 400.

DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra la disposición espacial de los períodos fundamentales del suelo, en este se puede ver una zona de alto período, bien delimitada, lo que indica la existencia de una estructura sedimentaria bien consolidada y definida, cuyo centro esta aproximadamente a 750 m al oeste del curso actual del río Manzanares, que en un ambiente fluvial es una distancia significativa. Ya que este río es el perfilador del valle, es lógico pensar que esta estructura fue fabricada por él, lo que indicaría que el río estaba más al oeste. La Figura 4 complementa la hipótesis anterior ya que en ella se puede inferir la dirección aproximada de un posible paleo canal, el cual parece tener un rumbo de suroeste a noreste, por la disposición mas blanda del contraste entre el basamento y sedimento.

En la Figura 5 se muestra la distribución espacial del índice de vulnerabilidad, uno de los parámetros

más importantes, al estudiar el riesgo sísmico de una zona. Para este estudio, se utiliza una aproximación más básica de este coeficiente, ya que en la actualidad se desarrollan expresiones más completas. Los niveles máximos alcanzados en este trabajo no representan un peligro relevante para las estructuras bien edificadas en la región ya que la mayoría de los valores encontrados se ubicaron por debajo de 10, que es el valor en el cual es probable conseguir daños de factor uno (1) en estructuras de acero. Es conveniente, estimar las respuestas para mayor cantidad de estructuras particulares en el sitio donde se realizó el estudio.

El espesor normalizado del sedimento (Fig. 6) es una manera preliminar de trabajar este importante parámetro sin incorporar errores particulares, relacionados con la falta de información sobre las características mecánicas del sitio, como el módulo de rigidez, densidad y coeficiente de Poisson. En la gráfica es fácil evidenciar que los sedimentos

más profundos duplican el espesor de los más delgados.

El número crítico de ciclos (Fig. 7) muestra que la mayoría de la data que se registró se encuentra muy por arriba, del valor mínimo necesario, de 200. Los valores mínimos están bien sectorizados y su menor valor es 300.

El índice de vulnerabilidad es relativamente pequeño, en 75% de los casos está por debajo de 10. Este parámetro es importante ya que está ligado estadísticamente a la posibilidad de daños estructurales empiezan a ser probables a partir 10. La Figura 6 muestra el sedimento normalizado a 1 y en él se puede ver claramente dos interfases bien definidas, una que tiene el doble del espesor de la otra. El número crítico es en la mayoría de los casos mayor a 400, que es el valor mínimo estándar a la hora de establecer los registros H/V confiables (Fig. 7).

CONCLUSIONES

La síntesis del presente trabajo se puede enmarcar en dos grupos bien diferenciados, el primero corresponde a las conclusiones que son derivadas de los resultados geotécnicos orientados hacia la vulnerabilidad y el segundo, a las que dependen de los resultados geológicos.

Conclusiones geotécnicas

Los periodos fundamentales son menores a 1,0 s, lo que disminuye la posibilidad de resonar el suelo con las edificaciones.

Las amplificaciones son relativamente pequeñas, esto hace que en Cumanacoa el suelo no tienda a amplificar fuertemente una señal sísmica.

El índice de vulnerabilidad, muestra un suelo con tendencia a moderar el valor la intensidad de un terremoto y los efectos de un evento sísmico deberían ser muy sectorizados, debido al perfil de microzonificación de los periodos determinados.

Tanto el número crítico de ciclos como el número de ventanas certifican los datos obtenidos con microtemores.

La estabilidad espacial de las curvas H/V permiten admitir una estructura sedimentaria bien consolidada en toda la extensión del centro de la población de Cumanacoa, ya que no se aprecia marcadas fluctuaciones espaciales al azar o un ruido estadístico pronunciado.

Como un ejemplo sobre los cálculos urbanísticos se

coloca el cálculo de la altura de los edificios, porque esto es una gran aproximación basada en una formula empírica (6), aun así, a grandes rasgos, si se tiene planificado edificar grandes edificios en la población de Cumanacoa tendrán que realizarse en el perímetro exterior al centro, ya que corren mayor peligro si se construyen en este.

Conclusiones geológicas

El espesor de la estructura cortical varía en toda la extensión de la ciudad, en relación de profundidad de dos a uno, entre la parte de mayor y menor espesor, y ésta no es simétrica con respecto al curso del río Manzanares.

Los microtemores revelan una estructura sedimentaria bien definida, que varía de espesor, alcanzando su mayor profundidad entre los -63.9203° y -63.9242° longitud oeste, y 10.2534° y 10.2744° latitud norte, que coincide con la parte central de la población de Cumanacoa.

AGRADECIMIENTO

Quisiera reconocer la contribución del personal adscrito al Centro de Sismología de la Universidad de Oriente en el desarrollo del presente trabajo, en especial a Víctor Díaz, Claudio Marchán, Hernán Maneiro, Francisco Álvarez, Américo Montilla, Jorge Rojas y Hassan Baig en la adquisición de datos. A Claudio Marchán por su excelente trabajo de campo como en el procesamiento de Data de GIS, fotografía satelital y análisis geoestadístico. Al Profesor Jaime Avendaño que contribuyó gentilmente con la revisión final del manuscrito. Este artículo es producto del financiamiento del proyecto PN-5.2 UDO-OPSU, 2006, sin el cual no se hubiera podido realizar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCILA M. 2007. ¿Es posible predecir un sismo? Revista cambio. Disponible en línea en: <http://seisan.ingominas.gov.co/RSNC/Prediccion.pdf>. (Acceso 31.07.2013).
- AVENDAÑO J. 1997. Sismicidad Histórica de la Región Nororiental, 1530-1997. Recopilación Bibliográfica. Centro de Sismología, Universidad de Oriente, Cumaná.
- BONILLA LF., STEIDL JH, LINDLEY GT, TUMARKIN AG, ARCHULETA RJ. 1997. Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods. Bull. Seism. Soc. Am. 87(3):710-730.

- ECU. 2000. SESAME Project, European Commission-Research General Directorate, Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
- FIELD E, CLEMENT A, JACOB K, AHARONIAN V, HOUGH S, FRIBERG P, BABAIAH T, KARA-PETIAN S, HOVANESSIAN, ABRAMIAN H. 1995. Earthquake site response in Giumri (formerly Leninakan), Armenia using ambient noise observations. Bull. Seism. Soc. Am. 85(1):349-353.
- GELLER R, JACKSON D, KAGANY, MULARGIA F. 1997. Earthquakes cannot be predicted. Science. 275(5306):1616-1617.
- GRASES J. 1979. Investigación sobre los sismos destructores que han afectado al oriente de Venezuela, Delta del Orinoco y Regiones Adyacentes. INTEVEP.
- INAZAKI T. 2006. Relationship between s-wave velocities and geotechnical properties of alluvial sediments. proceedings of the 19th annual symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems (sageep2006), cd-rom, 1296-1303.
- KANAMORI H. 2003. Earthquake prediction: An overview. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. 81B. International Association of Seismology & Physics of the Earth's Interior. pp. 1205-1216.
- LACHET C, HATZFELD D, BARD P, THEODULIDIS N, PAPAIOANNOU C, SAVVAIDIS A. 1996. Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece): comparison of different aproaches. Bull. Seism. Soc. Am. 86(6):1692-1703.
- LANTADA N, PUJADES L, BARBAT A. 2008. Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- LERMO J, CHÁVEZ-GARCÍA F. 1994. Are microtremors useful in site response evaluation? Bull. Seism. Soc. Am. 84(5):1350-1364.
- NAKAMURA Y. 1989. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI).
- OTTEMÖLLER L, HAVSKOV J. 1999. Seisnet: A general purpose virtual seismic network. Seism. Res. Lett.70:522-528
- RIEPL J, BARD P, HATZFELD D, PAPAIOANNOU C, NECHTSCHIEIN S. 1998. Detailed evaluation of site response estimation methods across and along the sedimentary valleyof Volvi (EURO-SEISTEST). Bull. Seism. Soc. Am. 88(2):488-502.
- WALLACE R, DAVIS J, McNALLY K. 1984. Terms for expressing earthquake potential, prediction and probability. Bull. Seism. Soc. Am. 26(5):1819-1825.