

Resultados y experiencias de aplicación del método de Refracción por Microtremor (Sísmica Pasiva) para la investigación geofísica de las nuevas líneas de metro en Madrid (España)

Results and experiences of application of the Refraction Microtremor method for the geophysical investigation of the new subway lines in Madrid (Spain)

A. Muñoz Martín y A. Carbó Gorosabel

Grupo de Tectonofísica Aplicada. Departamento Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid, España. amunoz@geo.ucm.es

ABSTRACT

Geophysical exploration with seismic methods in urban zones presents several disadvantages: the presence of numerous sources of seismic noise, the scanty penetration when the seismic source is a hammer and the disability to detect buried low-velocity beds. Recently (Louie, 2001) a new method of seismic investigation has been developed, which allows vertical modeling of Rayleigh waves from spectral analysis (Vphase/frequency) using the seismic signal registered with conventional seismographs and geophones. This method allows to detect low-velocity buried beds of great interest in tunneling, and to reach depths below 50 meters. In this work we discuss the conditions of application and experiences obtained during the 2005 geophysical surveys carried out in Madrid before the excavation of the new subway tunnels.

Key words: Refraction microtremor, Rayleigh waves, seismic, geophysics, Madrid.

*Geogaceta, 40 (2006), 51-54
ISSN: 0213683X*

Introducción y Objetivos

Los métodos sísmicos, calculan y estudian la distribución en el subsuelo de las velocidades de transmisión de ondas sísmicas (generalmente V_p y V_s), que junto con la densidad (ρ), son los parámetros que permiten calcular los módulos elásticos dinámicos (Rigidez, Bulk, Young):

$$V_p = \sqrt{\frac{4/3\mu + K}{\rho}} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad [1]$$

Siendo, K el módulo de Bulk, μ el módulo de Rigidez y ρ la densidad. Tal y como muestran las ecuaciones anteriores, la velocidad de las ondas S es más sensible a la rigidez del material.

Las ondas sísmicas internas (V_p y V_s) al propagarse en el subsuelo y encontrar superficies que separan materiales con distintas velocidades, se refractan, se reflejan o se difractan. En prospección aplicada a obra civil, se suelen utilizar de forma generalizada las ondas P refractadas (sísmica de refracción) y solo en algunos casos, las ondas P reflejadas (sísmica de reflexión). En sísmica de refracción se mide el tiempo transcurrido entre el momento del disparo y

la primera llegada de la perturbación a cada geófono (bien la onda directa, o bien las ondas refractadas), y se trabaja normalmente con la velocidad de las ondas P (V_p). Las superficies donde se produce refracción (refractores) vienen definidas por cambios de impedancia acústica (= densidad * velocidad), y se produce una refracción total cuando el ángulo de incidencia alcanza un valor determinado según la Ley de Snell.

No obstante, la sísmica de refracción convencional tiene algunas limitaciones que, sobre todo en ambientes urbanos, dificultan su aplicación:

- Se necesita un ambiente sin ruidos, cosa casi imposible en áreas urbanas.
- Se asume que existe un aumento de velocidad en profundidad, que aunque en general es un principio válido, cuando existen capas de baja velocidad, no se detectan.
- Para determinar V_s , es preciso realizar ensayos especiales ("cross-hole", "down-hole") que son complejos, caros y lentos.

Además de las ondas internas, las fuentes sísmicas pueden generar ondas superficiales (Rayleigh y Love) que presentan un movimiento de vibración de las partículas similar al de las ondas S (cizalla). Las ondas superficiales tienen como característica

principal que son dispersivas: son grupos de ondas en los que viajan diferentes fases, cada una con diferente velocidad de propagación (V_{fase}), longitud de onda y grado de penetración. En general las fases más largas son las más rápidas y las que más penetran en el subsuelo. Dentro de las ondas superficiales, las ondas Rayleigh son ondas sísmicas plano-polarizadas verticalmente,

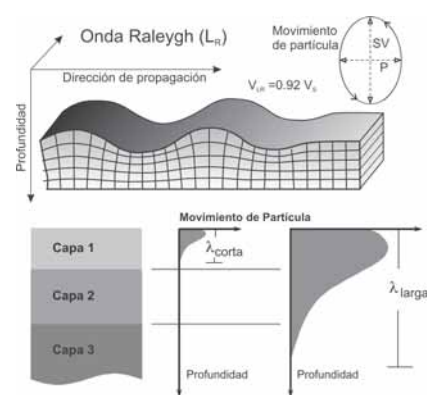


Fig. 1.- Modo de propagación de las ondas Rayleigh, cuya principal característica es su carácter dispersivo.

Fig. 1.- Rayleigh waves mode of propagation, showing the dispersive character.

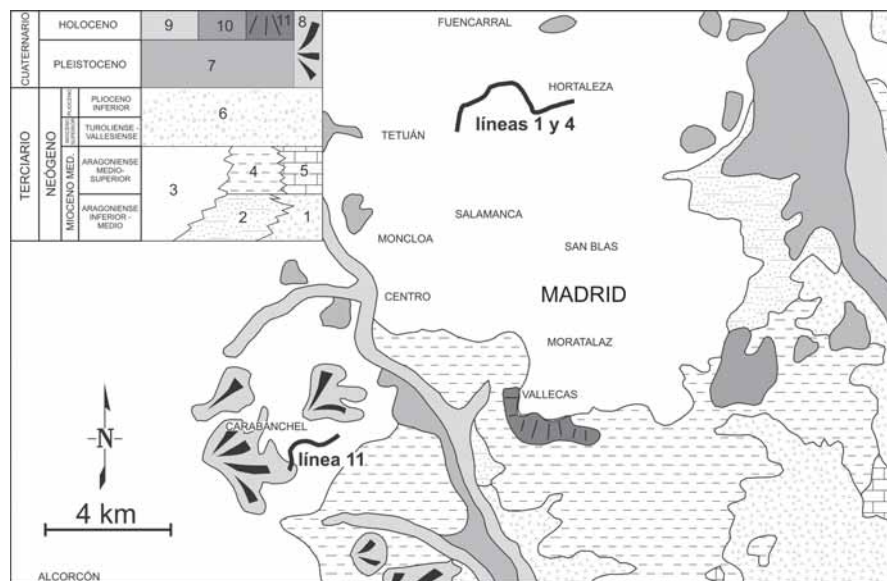


Fig. 2.- Mapa geológico simplificado del entorno de Madrid, y posición de los tramos de ampliación de las líneas 1, 4 y 11 de Metro estudiados en este trabajo. 1 – yesos, arcillas y margas; 2 – arcillas, arenas finas y yesos; 3 – arcosas, arcillas arenosas y limos; 4 – arcillas verdes, arenas y dolomías; 5 – calizas, dolomías y margas; 6 - arcosas gruesas y limos; 7 - terrazas; 8 – glacia; 9 – fondos de valle; 10 – depósitos semiendorreicos y 11 – coluviones.

Fig. 2.- Simplified geological mapping of Madrid, including studied new sections of the subway lines 1, 4 and 11. 1 – gypsum, shales and marls; 2 - clays, fine sands and gypsum; 3 – arcotic sands, sandy clays and silts; 4 - green clays, sands and dolomites; 5 - limestones, dolostones and marls; 6 – coarse arkosic sands and silts; 7 - terraces; 8 - glacia; 9 – valley funds deposits; 10 – semi-endorheic deposits and 11 – colluvial deposits.

con una vibración de partículas elíptica y retrógrada (Fig. 1).

Ante la necesidad de obtener de forma rápida, la distribución de velocidad de ondas S, en zonas urbanas, se han desarrollado varios métodos basados en el análisis de Ondas Superficiales:

- Análisis espectral de Ondas Superficiales (“Spectral Analysis of Superficial Waves” – SASW, Besson *et al.*, 1998)
- Refracción por Microtremor (REMI) (Louie, 2001)

De estas dos técnicas, resulta mucho más atractiva la segunda, debido a que no se requiere realizar golpes durante la adquisición y la fuente de señal es el propio ruido acústico. Recientemente, y gracias a la publicación del trabajo de Louie (2001) se ha puesto a disposición de la comunidad científica y técnica la caracterización del suelo a partir de la modelización de la velocidad de Ondas Raleygh en profundidad a partir de la adquisición de registros de ruido sísmico (microtremor).

La zona norte de Madrid (líneas 1 y 4, Fig. 2) presenta desde el punto de vista litológico numerosos rellenos antrópicos y/o cuaternarios poco consolidados, sobre un conjunto de materiales detríticos terciarios (Mioceno) en general subhorizontales: arenas (“Arenas de miga”), arcillas y limos (“Tosco”), y un conjunto de términos inter-

medios limo-arenosos (“Tosco arenoso”, “Arena tosquiza”,...) que se interdigitalizan y cambian de facies y espesores muy frecuentemente. En cuanto a la zona Sur de Madrid (Línea 11, Fig. 2), el substrato está constituido por arcillas (“Peñuela”) con niveles delgados de sepiolita, sobre los que se sitúan arenas, arcillas y limos con espesores variables. En este tipo de litologías, especialmente en las detríticas más groseras, una pequeña variación en los contenidos de la matriz limo-arcillosa hace que la resistencia al corte pueda variar de una manera importante. El resultado es la posible presencia de inversiones de velocidad (capas de baja velocidad sísmica limitadas por capas de alta velocidad), que pueden llegar a ser causa de importantes asientos en superficie, sobre todo si se realizan obras en sus proximidades.

El objetivo de este trabajo es discutir las condiciones de aplicación, las experiencias y los resultados obtenidos durante las campañas de caracterización geofísica del terreno para la ampliación de la red de Metro de Madrid durante el año 2005 utilizando refracción por microtremor (sísmica pasiva).

Instrumentación y Metodología

Dentro del Plan de Ampliación de la Red de Metro de Madrid para el periodo 2003-2007, el grupo de Prospección

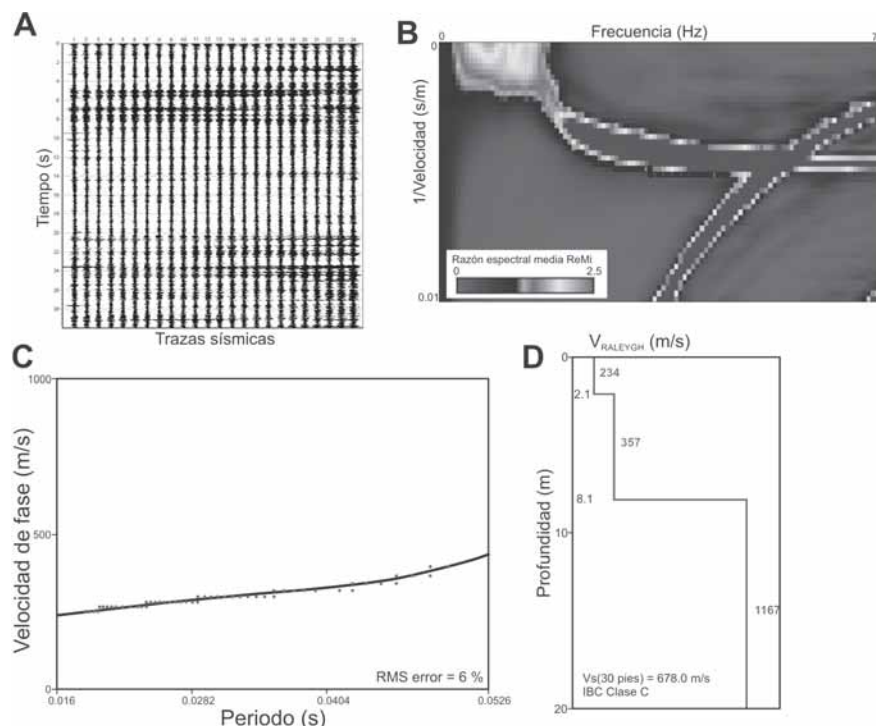


Fig. 3.- A) Registro de microtremor con un sismógrafo de 24 canales. B) Razón espectral media del registro y picado de la case del espectro. C) Curva de dispersión (Vfase/Periodo). D) Modelo de distribución vertical de VRaleygh y clasificación IBC del terreno (BSSC, 1998).

Fig 3.- A) Microtremor record obtained with a 24 channel-seismograph. B) Averaged Remi spectral ratio and picks along the spectrum lower limit. C) Dispersion curve (Vphase/Periodo). D) Vertical profile of V_{RAYLEIGH} and IBC site classification (BSSC, 1998).

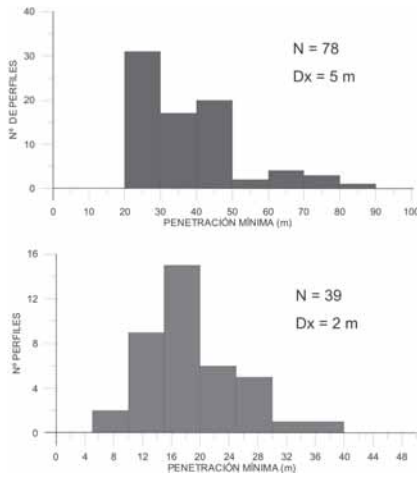


Fig. 4.- Histogramas con la profundidad mínima de penetración obtenida mediante la inversión por Microtremor para el total de implantaciones sísmicas. Arriba se muestran las secciones obtenidas con separación entre geófonos de 5 m y abajo de 2 m.

Fig. 4.- Minimum depth penetration obtained with ReMi method for all the seismic profiles with 5 m and 2 m between geophones.

Geofísica del Departamento de Geodinámica de la UCM se encargó del estudio mediante sísmica pasiva de la ampliación de las líneas 1, 4 y 11. El conjunto de actuaciones realizadas se resume en la tabla I, suponiendo un total de 120 implantaciones sísmicas, a lo largo de un recorrido de 9800 m lineales de traza. To-

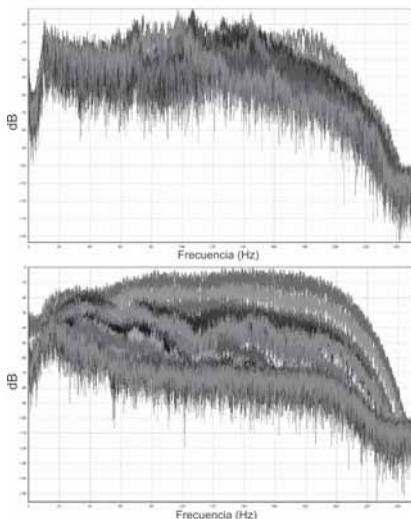
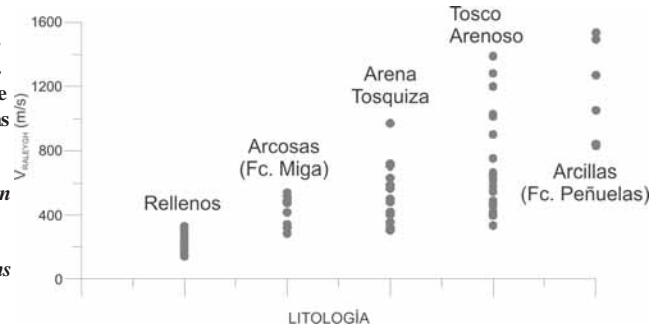


Fig. 5.- Ejemplos de espectros de frecuencia para dos registros de sísmica pasiva sin martillazos (arriba) y con martillazos (abajo). Se observa el enriquecimiento de la señal por encima de 60 Hz.

Fig. 5.- Spectrum calculated for two different records with (up) and without (down) hammer blows. It is clear the energized signal above 60 Hz in the lower record.

Fig. 6.- Relaciones entre litologías obtenidas en sondeos y valores de $V_{RALEYGH}$. Las mayores dispersiones se observan en las facies mixtas arenas-arcillas.

Fig. 6.- Relationships between lithologies obtained in boreholes and $V_{RALEYGH}$'s values. The higher dispersions are observed in the mixed terms sands - clays.



das ellas se realizaron con un sismógrafo DAQ-LINK II de 24 bits y 24 canales y geófonos de 10 Hz. Las separaciones entre los geófonos fueron de 2 o 5 m, en función de la profundidad a investigar. Para cada implantación se adquirieron entre 10 y 14 registros de 30 segundos de duración, utilizando un intervalo de muestreo de 2 ms (Fig. 3).

Para el procesado de los datos, en primer lugar se realiza una comprobación de la señal en campo, para observar si se ha obtenido registro en todos los canales, y posteriormente se realiza la transformación al dominio de frecuencias. El procesado consta de cuatro etapas (Fig. 3):

1) La transformación del dominio de tiempos a frecuencias (filtro P/Tau) de la velocidad vertical de las partículas (Torzón y Claerbout, 1985)

2) La transformación de Fourier de P/Tau a P/frecuencia (Mc Mechan y Tedlin, 1981), siendo P el parámetro de rayo ($= 1 / V_{APARENTE}$)

3) Representación de la razón espectral media Remi ("Average Remi Spectral Ratio") y picado de espectro. El límite inferior del espectro de velocidades aparentes,

se corresponde con las velocidad mínima de cada fase (Louie, 2001, Fig. 3C).

4) Por último, se modeliza la distribución vertical de $V_{RALEYGH}$ ajustando la curva de dispersión $V_{FASE} / \text{Frecuencia}$. El resultado final es un perfil vertical de velocidades, así como la clasificación IBC del terreno (BSSC, 1998) a partir de la velocidad media de las Ondas Rayleigh en los 10 primeros m del terreno (Fig. 3D).

Además de los datos sísmicos se contó con un número importante de sondeos para calibrar los resultados de la sísmica pasiva, que incluyen ensayos SPT, clasificación de Casagrande, valores de densidad seca, resistencia a compresión simple y posición del nivel freático.

Resultados

Desde un punto de vista metodológico conviene destacar la gran penetración de la sísmica pasiva, que alcanza valores de entre 20 y 90 m para separación entre geófonos de 5 m y entre 8 y 40 m para una separación de 2 m. (Fig. 4).

En cuanto al espectro de frecuencias registradas, están entre los 10 Hz (frecuen-

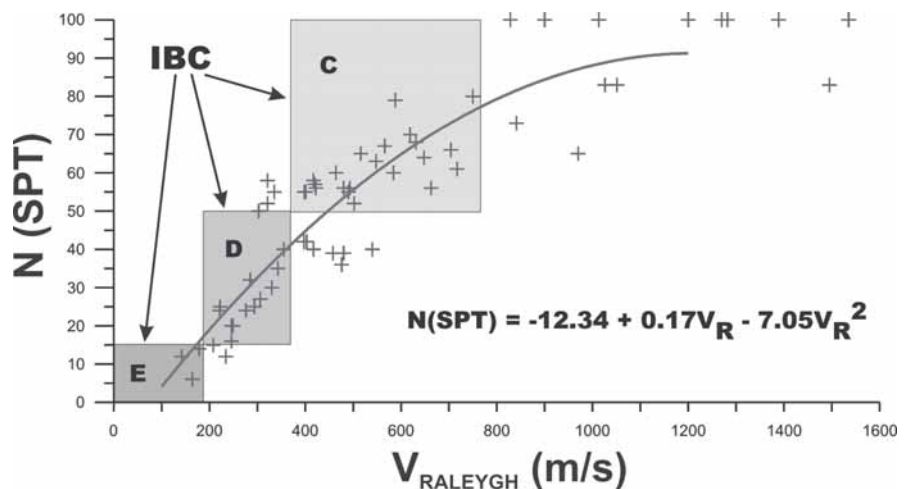


Fig. 7.- Relación empírica deducida entre los valores de ensayos SPT frente al valor de $V_{RALEYGH}$ obtenido a partir de Refracción por microtremor.

Fig. 7.- Empirical relationships deduced between the SPT values versus $V_{RALEYGH}$ calculated from Remi solutions.

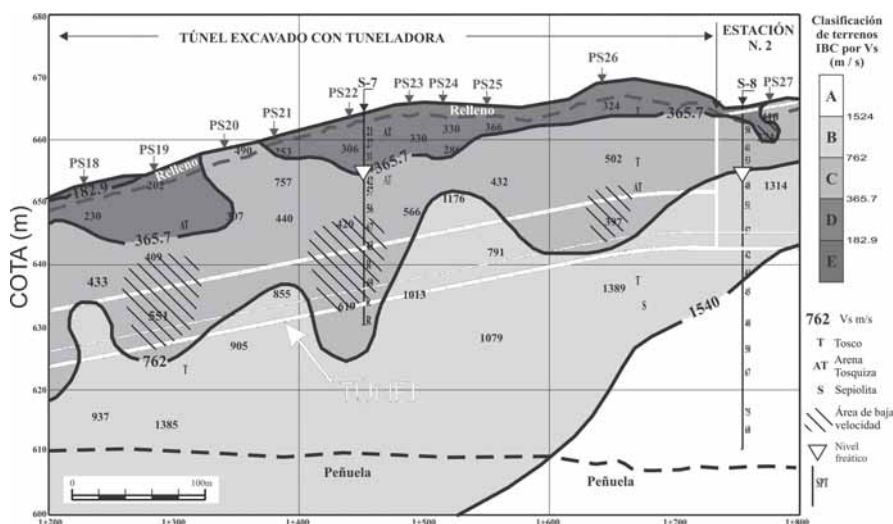


Fig. 8.- Ejemplo de distribución de V_{RALEYGH} y correlación con clasificación IBC para un tramo de la Línea 1 del metro de Madrid (tramo Intercambiador de Chamartín – Parque de Santa María). Se observan inversiones de velocidad que afectan a la traza del túnel.

Fig. 8.- V_{RALEYGH} 's distribution and correlation with IBC classification for a section of the Madrid's subway Line 1 (Chamartín - Park of Santa María). Velocity inversions that concern the trace of the tunnel are observed.

Trabajos	Longitud de Traza	Datos utilizados
Línea 1 + fondo saco	2500 m	80 Implantaciones sísmicas
Línea 4 + Ramal	3800 m	28 sondeos mecánicos
Línea 11	3000 m	40 Implantaciones sísmicas 26 sondeos mecánicos
TOTAL	9800 m	120 Implantaciones sísmicas 54 sondeos mecánicos

Tabla I.- Resumen de trabajos realizados.

Table I.- Resume of works.

CLASE	Propiedades medias en los 100 primeros pies		
	Vs (m/s)	SPT número	Resistencia a la cizalla Su (psf)
A	Vs > 1524	No aplicable	No aplicable
B	762 < Vs < 1524	No aplicable	No aplicable
C	365.7 < Vs < 762	N > 50	Su > 2000
D	182.9 < Vs < 365.7	15 < N < 50	1000 < Su < 2000
E	Vs < 182.9	N < 15	Su < 1000
F	Cualquier perfil de suelo con más de 10 pies con: Índice de Plasticidad (IP) > 20 Su < 1000 Contenido en humedad (w) > 40 %		

Tabla II.- Clasificación del terreno de la IBC (BSSS, 1998).

Table II.- IBC site classification (BSS, 1998)

cia inferior de los geófonos) y 250 Hz (Frecuencia de Nyquist para el intervalo de muestreo utilizado, Fig. 5). Sin embargo en algunos casos fue necesario realizar martillazos para enriquecer la señal del ruido sísmico presente. Mediante estos golpes se consigue aumentar mucho la energía en las frecuencias por encima de los 60 Hz, lo que redundará en una mejor modelización de las capas más superficiales (Fig. 5). Usualmente se daban entre 3 y 5 golpes aleatoriamente repartidos durante los 30 segundos de adquisición.

Los resultados proporcionados por la refracción por microtremor presentan una clara relación con las litologías presentes en la zona de Madrid (Fig. 6). Las mayores dispersiones en los valores de V_{RALEYGH}

se observan en los términos mixtos arcilloso-arenosos, donde la testificación de los distintos términos litológicos es más subjetiva. El método ha permitido detectar inversiones de velocidad a más de 30 m de profundidad, y existe una muy buena correlación con los resultados de ensayos SPT y litologías testificadas en sondeos (Fig. 6). A partir de los datos calculados se ha calculado una relación empírica entre V_{Raleygh} y Valor de SPT para los dos sectores analizados, y su correlación con la clasificación IBC (Fig. 7 y Tabla II, BSSC, 1997). En un futuro se pretenden realizar relaciones empíricas analizando las relaciones entre V_{Raleygh} y valores de otros ensayos tales como densidad seca y resistencia a compresión uniaxial.

Los resultados de los perfiles verticales de ondas Raleygh se representaron para cada tramo de línea como secciones de distribución de V_{Raleygh} en profundidad (Fig. 8), definiendo los límites entre las clases definidas por la IBC, que se encuentran calibradas con ensayos SPT y con resistencia al corte. Estas secciones se obtuvieron mediante la interpolación a lo largo de secciones verticales a lo largo del eje de la traza. En numerosas ocasiones se han detectado inversiones de velocidad que afectaban a la traza del túnel. Este hecho permite optimizar los trabajos durante la realización de dicho túnel, especialmente cuando se realiza con tuneladora.

Conclusiones

La aplicación de la técnica de refracción por microtremor a los estudios geofísicos de caracterización del subsuelo para la ampliación las nuevas líneas del Metro de Madrid ha permitido establecer las siguientes conclusiones:

- La técnica presenta una gran profundidad de penetración, alcanzándose profundidades de 90 m con 24 geófonos de 10 Hz, y separación entre ellos de 5 m.
- Es capaz de detectar inversiones de velocidad sísmica incluso a profundidades superiores a los 30 m.
- Los resultados de V_{RALEYGH} obtenidos se correlacionan con los valores de resistencia al corte y con medidas de SPT.
- La técnica es aplicable en hormigón, materiales saturados y rellenos, y resulta recomendable enriquecer la señal en altas frecuencias mediante el golpeo aleatorio con martillo para ganar resolución en los primeros metros.
- Resuelve las investigaciones sísmicas en zona urbana, y tiene una clara aplicación a microzonificación sísmica.

Referencias

Bessason, B., Baldvinsson G.I. y Thorrinsson, O. (1998). En: *11th European Conference on Earthquake Engineering*. Balkema, Rotterdam, 1- 11.
 BSSC -Building Seismic Safety Council- (1998). *1997 Edition NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings*, FEMA 302/303, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
 Louie, J. N. (2001). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 347-364.
 McMechan, G. A., y Yedlin, M. J. (1981). *Geophysics*, 46, 869-874.
 Thorson, J. R., y Claerbout, J. F. (1985). *Geophysics*, 50, 2727-2741.