



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propiedades del campo de ondas sísmicas
generado por maquinaria de excavación en
túneles**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Eloy Mondragón López

DIRECTOR DE TESIS

M. en C. Miguel Rodríguez González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

Agradecimientos

A mis padres que me enseñaron a trabajar duro para lograr mis objetivos y me mostraron su apoyo a pesar de que en todo este tiempo hubo ocasiones en las que estuve a punto de desistir de realizar este trabajo.

A mis hermanas cuyo énfasis en que realizara mi mejor esfuerzo me lleno de coraje para lograr el objetivo que me había propuesto desde que comencé a realizar la licenciatura y que en todo momento me manifestaron su admiración y apoyo para animarme a terminar mis estudios y llevar a cabo el cumplimiento de mis objetivos.

A mis amigos tanto de la escuela como de mi casa quienes en alguna ocasión buscaron la oportunidad para mostrar su admiración y apoyo para animarme a terminar mis estudios y llevar a cabo el cumplimiento de mis objetivos.

De forma especial, a mi amigo y compañero de trabajo, Ing. Rockdrigo Rockjas Hernández quien, con su apoyo y buena vibra me apoyó a dar termino a mucho tiempo de trabajo.

Me gustaría agradecer también a mis sinodales de titulación: el Dr. Jorge Aguirre, Dr. Antonio Uribe, Dr. Martín Cárdenas y Dr. David Escobedo, quienes con sus correcciones y valiosas recomendaciones hicieron posible la terminación del actual trabajo.

A mi tutor, el M.C. Miguel Rodríguez González quien me recibió en su grupo de trabajo y junto con mis colegas: Rodrigo Rojas Hernández, Favio Cruz Hernández, me ayudaron tanto de forma académica como en la realización de este trabajo en el que quedan plasmados varios de sus conceptos y mucha de su colaboración.

Índice general

ÍNDICE	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
1. Introducción	1
1.1. Presentación	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Justificación	2
2. Antecedentes	3
2.1. Introducción	3
2.2. Estado del arte	3
2.3. Primeros trabajos	4
2.4. Trabajos Similares	10
3. Fundamentos	11
3.1. Perfil Sísmico Vertical	11
Definición	11
Configuración de adquisición de datos VSP	12
3.2. Interferometría Sísmica	17
Definición	17
Interferometría óptica	17
Interferometría sísmica	18
Descripción matemática	19
Interferometría sísmica multidimensional	25
Procesamiento	26
4. Sísmica Mientras se Excava	28
4.1. Introducción	28
Tiempo real	29
4.2. Definición (SWE)	30
Túneles	31
4.3. Metodología Sísmica Mientras se Excava (SWE)	32

Logística y procesamiento básico	33
Zona de daño de excavación	34
Características de propagación de ondas en el túnel	35
Patrón de radiación	36
5. Avances en la experimentación	39
5.1. Introducción	39
Zona de estudio	39
Marco geológico	40
5.2. Objetivo	41
5.3. Trabajo de campo	41
Túnel “Cerro Los Becerros”	42
Descripción de los experimentos	43
Túnel “El Varal”	83
6. Resultados y análisis.	102
7. Conclusiones	107
Referencias	110
APÉNDICE A	113
APÉNDICE B	115

Resumen

Presentamos en este trabajo los resultados obtenidos de los experimentos sismológicos realizados en dos túneles excavados durante la construcción de la carretera Durango-Mazatlán. En cada uno de los túneles “Cerro Los Beceros” y “El Varal” se realizaron dos experimentos, uno durante la operación de la maquina barrenadora conocida como “Jumbo” y otro durante la detonación de explosivos insertados en la pared frontal del túnel, elementos que en este estudio constituyen nuestras fuentes sísmicas. En tales experimentos registramos señales con arreglos oportunamente ubicados dentro del túnel. Aplicamos análisis espectral, así como correlaciones cruzadas en el dominio del tiempo para estimar las propiedades del campo de ondas sísmicas generado por la maquinaria empleada en la excavación de túneles.

El análisis espectral lo constituye el cálculo de los espectros de densidad de potencia para los registros de ruido ambiental adquiridos en arreglos lineales implementados en el piso del túnel durante la operación del Jumbo y espectros de amplitud para las señales registradas durante la detonación de los explosivos. También se obtuvieron estimaciones de modelos de velocidad de onda de cortante en el entorno de cada túnel. Los modelos de velocidades sísmicas en función de la profundidad se estimaron para los arreglos lineales midiendo la dispersión de la velocidad de fase del modo fundamental de propagación de la onda de Rayleigh y se asignaron al centro de cada tendido con siete y cuatro capas al inicio de la inversión, respectivamente.

Los espectros de densidad de potencia de los registros obtenidos muestran que tanto con los geófonos de frecuencia natural 4.5 [Hz] como con los sensores (sondas) de frecuencia de 15 [Hz] observamos máximos en las frecuencias de 30, 40, 60 y 80 [Hz] en ambos. Aunque la forma es similar, el nivel de la sonda se ubica por debajo de aquel del geófono 50 [dB] en un experimento y hasta 90 [dB] en el otro en el rango entre 60 y 105 [Hz] aproximadamente. En ambos se ubica por debajo del límite superior del modelo de ruido global. El nivel de los geófonos es ligeramente mayor comparado con el observado en las sondas debido a que estas últimas van empotradas dentro de la formación y no registran el sonido generado por los trabajos de construcción. En el caso de comparar los geófonos de 28 [Hz] con las sondas de 15 [Hz] la diferencia es mínima, lo cual nos indica que ambas opciones son buenas y nos pueden proveer información útil.

Por otro lado, para el primer arreglo lineal en el túnel Los Beceros obtuvimos el modelo de velocidad de ondas sísmicas de cortante con tres primeras capas de velocidad entre 400[m/s] y 500 [m/s] y espesor de 11 [m] que podría caracterizar una primera unidad y a su vez representar la zona de daño de excavación (EDZ, por sus siglas en inglés), a partir de ahí la velocidad aumenta a 2550 [m/s] hasta la profundidad total de investigación. Para el caso del túnel “El Varal”, se asignaron solo tres capas y el semiespacio al modelo inicial de inversión que nos dio dos capas de 340 y 410 [m/s] hasta 16 [m] a partir de donde aumenta la velocidad a 1300 [m/s] hasta la profundidad de investigación.

Aplicé correlaciones cruzadas filtradas en tiempo a los datos de los arreglos lineales para calcular las velocidades de onda de grupo en diferentes anchos de banda: en los anchos de banda de 4-19 y 65-100 [Hz], velocidades de grupo de $V_G(f_c) = 215 [m/s]$ y $V_G(f_c) = 2360 [m/s]$ fueron calculadas respectivamente para Los Beceros mientras que, para El Varal calculamos $V_G(f_c) = 2864 [m/s]$, $V_G(f_c) = 2360 [m/s]$ y $V_G(f_c) = 1850 [m/s]$ en los anchos de banda de 3-9, 10-25 y 32-55 [Hz], respectivamente.

En el caso de las señales de explosiones típicas observé que, superponiendo un pulso de menor amplitud contra uno mayor, estos tienen similitud en forma al menos en cinco segundos de duración y que al multiplicar el primero por un valor determinado puede reproducir el segundo. Al correlacionar un pulso piloto con toda la señal los demás pulsos se resaltan, con lo que comprobamos que cada pulso representa la respuesta al impulso de la formación a la excitación provocada por las explosiones y que esta respuesta se repite de manera periódica aproximadamente cada dos segundos.

Calculamos también una VPP (velocidad pico de la partícula) para cada túnel y la comparamos con los niveles de vibración límite recomendados en formaciones rocosas al realizar voladuras. Estas fueron de $VPP = 0.132 [m/s]$ para el caso de Los Beceros y de $VPP = 0.0659 [m/s]$ para El Varal. Estos valores se encuentran por debajo del umbral establecido y nos indica que los procedimientos seguidos durante las detonaciones son los correctos.

Abstract.

We present in this work, the results obtained from the seismological experiments carried out in two tunnels excavated during the construction of the Durango-Mazatlán highway. In each of the "Cerro Los Becerros" and "El Varal" tunnels, two experiments was carried out, one during the operation of the boring machine known as "Jumbo" and another during the detonation of explosives inserted in the front wall of the tunnel, elements that in this study constitute our seismic sources. In such experiments, we recorded signals with arrangements conveniently located within the tunnel. We applied spectral analysis as well as cross-correlations in the time domain to estimate the seismic wavefield properties generated by the machinery used in the excavation of tunnels.

The spectral analysis is the calculation of the power spectral density for the environmental noise records acquired in linear arrays implemented in the tunnel floor during the Jumbo operation and amplitude spectra for the signals recorded during the detonation of the explosives. Estimates of shear wave velocity models were obtained in the tunnel environment. The models of seismic velocities as a function of the depth were estimated for the linear arrays by measuring the dispersion of the phase velocity of the fundamental mode of propagation of the Rayleigh wave and they were assigned to the center of each arrangement with seven and four layers at the beginning of the inversion, respectively.

The power spectral density of the obtained registers show that both with the natural frequency geophones 4.5 [Hz] and with the sensors (probes) of frequency of 15 [Hz] we observe maximums in the frequencies of 30, 40, 60 and 80 [Hz] in both. Although the shape is similar, the level of the probe is located below that of the geophone 50 [dB] in one experiment and up to 90 [dB] in the other in the range between 60 and 105 [Hz] approximately. In both, it is located below the upper limit of the global noise model. The level of the geophones is slightly higher compared to that observed in the probes because the latter are embedded within the formation and do not record the sound generated by the construction work. In the case of comparing the geophones of 28 [Hz] with the probes of 15 [Hz] the difference is minimal, which indicates that both options are good and can provide useful information.

On the other hand, for the first linear array in the Los Becerros tunnel, we obtained the seismic shear wave velocity model with three first velocity layers between 400 [m / s] and 500 [m / s] and thickness of 11 [m] that could characterize a first unit and in turn represent the excavation damage zone (EDZ), from there the velocity increases to 2550 [m / s] up to the total depth of investigation. In the case of the El Varal tunnel, only three layers and the semi-space were assigned to the initial inversion model that gave us two layers of 340 and 410 [m / s] up to 16 [m] from where I increased the speed to 1300 [m / s] to the depth of investigation.

For the data of the linear arrays I applied cross-correlations filtered in time to calculate the group wave velocities in different bandwidths: in the bandwidths of 4-19 and 65-100 [Hz], group velocities of $V_G(f_c) = 215 [m/s]$ and $V_G(f_c) = 2360 [m/s]$ were calculated for Los Becerros while for El Varal we calculate $V_G(f_c) = 2864 [m/s]$, $V_G(f_c) = 2360 [m/s]$ and $V_G(f_c) = 1850 [m/s]$ in the bandwidths of 3-9, 10-25 and 32-55 [Hz], respectively.

In the case of typical explosion signals, I observed that, by superimposing a pulse of lower amplitude against a greater one, they have similarity in shape for at least five seconds and that multiplying the first by a certain value can reproduce the second. When correlating a pilot pulse with the whole signal, the other pulses are highlighted, which shows that each pulse represents the impulse response of the formation to the excitation caused by the explosions and that this response is repeated periodically approximately every two seconds.

We also calculate a PPV (peak particle velocity) for each tunnel and compare it with the recommended vibration limit levels in rock formations when blasting. These were $PPV = 0.132$ [m / s] for the case of Los Becerros and $PPV = 0.0659$ [m/s] for El Varal. These values are below the established threshold and indicates that the procedures followed during the detonations are correct.

Índice de figuras

- Figura 2.1. Sección de túnel y tuneladora. Tomados de <http://www.ambergtechnologies.ch/home>
- Figura 2.2. Coordenadas cilíndricas de la geometría relacionada a la radiación de una maquina tuneladora (TBM). Tomado de Poletto, F. y Miranda, F., (2004).
- Figura 2.3. Ejemplos de componentes de patrones de radiación para dos diferentes tipos de fuente, en este caso fuente puntual y fuente par de fuerzas colineales.
- Figura 2.4. Procesamiento y análisis con software de la técnica TSP. Tomado de <http://www.ambergtechnologies.ch>.
- Figura 2.5. Disposición de los sensores registradores en la pared del túnel de la técnica TSP. Tomado de <http://www.ambergtechnologies.ch>.
- Figura 2.6. Diagrama ilustrativo de la implementación del método SWE-SSRT y los registros obtenidos. Tomado de Murayama, H. et al. (2011).
- Figura 2.7. Esquema UNS, Herrenknecht. Tomado de <http://www.herrenknecht.com>.
- Figura 3.1 Principales componentes del estudio VSP. Tomado y editado de Hardage, B. A., (1983).
- Figura 3.2.- Geometría de adquisición estándar de VSP.
- Figura 3.3.- Geometría de adquisición de VSP con desplazamiento lateral de fuente.
- Figura 3.4.- Geometría de adquisición de VSP con desplazamientos múltiples.
- Figura 3.5.- Geometría de adquisición de VSP con desplazamiento de fuente y receptores.
- Figura 3.6.- Geometría de adquisición de VSP de proximidad de la sal.
- Figura 3.7.- Geometría de adquisición de VSP en 3D. Tomado de <http://www.slb.com>.
- Figura 3.8. Interferometría óptica. Tomado y editado de Schuster (2008).
- Figura 3.9. a) Caso simple de fuente armónica con profundidad y fuente desconocida, b) lente de arena subyaciendo a una sobrecarga con variaciones de velocidad lateral llamadas "estáticos" y c) sismogramas desplazados y corregidos revelando la geometría del lente de arena sin las distorsiones causadas por las heterogeneidades laterales en la sobrecarga. Tomados y editados de Schuster (2008).
- Figura 3.10. Desplazando en tiempo la reflexión en el panel izquierdo por τ_{AyA} obtendremos la traza en el panel derecho. La operación de corrección por desplazamiento en tiempo (time-shift) es aproximadamente el mismo que la correlación entre las trazas de la izquierda y del centro. Tomado y editado de Schuster (2008).
- Figura 3.11.- Volumen arbitrario con el punto de integración x a lo largo de la superficie denotada por $\mathbf{S} = \mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_\infty$. El volumen limitado por \mathbf{S} se denota por \mathbf{V} . Tomado y editado de Schuster (2008).
- Figura 3.12. Convolución de una traza directa con una reflexión primaria para producir cinemáticamente una reflexión primaria. Tomado y editado de Schuster (2008).

Figura 3.13. Correlación entre la onda directa de una traza VSP con una reflexión primaria SSP para producir una reflexión primaria VSP en la extrema derecha. Tomado y editado de Schuster (2008).

Figura 4.1. El enfoque empleado en la exploración hacia el frente de un túnel es el de un estudio VSP realizado en forma horizontal.

Figura 4.2. a) Modelo TSWD con ondas transmitidas y reflejadas. Interfaz con coeficientes de transmisión y reflexión t y c respectivamente. Sensor piloto P, estaciones frontal y trasera, F y B. b) Campo de ondas usado para obtener reflexiones de onda R de la transmisión X . c) Modelo TSWD, con ondas transmitidas (X_F). El sismograma de reflexión R_F se calcula auto-correlacionando X_F . d) Eventos hacia delante W y hacia atrás U en la geometría TSWD. e) La dimensión de la fuente de la TBM se extiende en el espacio a lo largo del eje del túnel de manera que estas dos señales sean diferentes. f) Inclinación de capas delante de la cara del túnel (Tomado de Petronio et al., 2003).

Figura 4.3. Diagrama de flujo de procesamiento. Una curva de ganancia se aplica para compensar por divergencia esférica y poder comparar los sismogramas delanteros y traseros. Tomado de Poletto y Miranda (2004).

Figura 4.4.- Componente transversal de la onda S radiada para una fuente de torque uniformemente distribuida sobre un plano circular tanto para campo cercano como para campo lejano ($a/r_0 = 0.1$ y $a/r_0 = 0.01$). Tomado de Gangi (1987).

Figura 4.5.- Componente transversal de la onda P radiada para una fuente de torque uniformemente distribuida sobre un plano circular tanto para campo cercano como para campo lejano ($a/r_0 = 0.1$ y $a/r_0 = 0.01$). Tomado de Gangi (1987).

Figura 5.1.- Localización de los túneles Cerro Los Becerros y El Varal. Se indica en el mapa en color las litologías que atraviesa la Super Carretera Dgo-Maz.

Figura 5.2.-Arreglo lineal de geófonos clavados en el piso dentro del túnel Cerro Los Becerros iniciando a 10 metros del frente y una extensión de 105 metros.

Figura 5.3.-Modelos de las sondas usadas en el tendido lineal empotradas en la pared del túnel (las medidas están dadas en mm).

Figura 5.4.- Ejemplo de trazas adquiridas con equipo registrador GEODE. Registro correspondiente a la primera toma de la variante 1. Nótese las amplitudes mayores en las trazas 1 y 12 correspondientes con las sondas, registradas a una misma ganancia.

Figura 5.5.- Arriba izquierda: Espectro de densidad de potencia correspondiente a 60 ventanas del segundo canal con geófono de 4.5 [Hz]. Arriba derecha: Espectro de densidad de potencia correspondiente al primer canal (sonda) con sensor de 15 [Hz] empotrada en la pared justo arriba del primer geófono. En la ventana inferior se incluyen los EDP promedio comparados contra los modelos globales de ruido.

Figura 5.6.- Ejemplo de registro con equipo registrador GEODE. Registro correspondiente a la primera toma de la variante 2. Nuevamente observamos las mayores amplitudes en las trazas 1 y 12 pertenecientes a las sondas empotradas en la pared del túnel.

Figura 5.7.- Arriba izquierda: Espectro de densidad de potencia correspondiente a 16 ventanas del segundo canal con geófono de 28 [Hz]. Arriba derecha: Espectro de densidad de potencia correspondiente al primer canal (sonda) con sensor de 15 [Hz] empotrada en la pared justo arriba del primer geófono. En la ventana inferior se consignan los EDP promedio comparadas contra los modelos globales de ruido.

Figura 5.8.- Ubicación de sensores triaxiales Lennartz dentro del túnel a 125 metros de separación del frente de excavación.

Figura 5.9.- Ejemplo de registro con equipo registrador DoReMi y sensores Lennartz correspondiente a la primera toma. Los sensores se denotan por las letras A, B y C, para su identificación el componente se identifica en cada traza.

Figura 5.10.- Espectro de densidad de potencia correspondiente a 46 ventanas de la componente vertical del primer sensor Lennartz (arriba) y su promedio (abajo) para una sola toma.

Figura 5.11.- Ubicación del registrador K2 con sensor FBA interno y el sensor triaxial CMG-40T externo dentro del túnel.

Figura 5.12.- Ejemplo de registro con equipo registrador K2 + sensores FBA y CMG-40T, correspondiente a 30 minutos de registro continuo. Se recortaron ambos registros debido a la deriva que se presenta al inicio de cada uno.

Figura 5.13.- Arriba izquierda: Espectro de densidad de potencia correspondiente a 87 ventanas de la componente vertical del acelerómetro FBA-23. Arriba derecha: Espectro de densidad de potencia calculado para el sismómetro CMG-40T. Abajo: EDP promedio comparados contra los modelos globales de ruido.

Figura 5.14. Espectros de densidad de potencia de los registros obtenidos con los diferentes equipos y configuraciones.

Figura 5.15.- Transformación al dominio de la velocidad de fase y la frecuencia. Los puntos son mediciones de la velocidad de fase, los blancos se asocian al modo fundamental y los rojos al primer modo de propagación de ondas de Rayleigh.

Figura 5.16.- Ajuste de la curva de dispersión correspondiente con el modo fundamental y un modo superior, en triángulos, empleada para obtener el modelo de velocidad de onda de cortante en el piso del túnel “Cerro Los Becerros”.

Figura 5.17.- Modelo de velocidad de onda de cortante asignado al centro del tendido lineal de geófonos clavados en el piso del túnel Cerro Los Becerros.

Figura 5.18.- Correlaciones cruzadas de los registros obtenidos en la variante uno del arreglo lineal calculadas en cuatro diferentes anchos de banda. Nótese que los máximos de las correlaciones se ubican a corrimientos positivos menores a 0.5 [s].

Figura 5.19.- Sismogramas virtuales obtenidos después de filtrar la correlación cruzada en el ancho de banda de 65 y 100 [Hz] con una señal predominante que recorre el tendido de geófonos a cerca de 2360 [m/s].

Figura 5.20.- Correlaciones cruzadas de los registros obtenidos con geófonos de alta frecuencia, calculadas en cuatro diferentes anchos de banda como se describe arriba. Nótese que es posible seguir

una misma fase hasta aproximadamente 70 [m] y los máximos de las correlaciones se ubican a corrimientos negativos menores a 0.6 [s].

Figura 5.21.-Sismogramas virtuales obtenidos después de filtrar la correlación cruzada en el ancho de banda de 4 a 19 [Hz] con una señal predominante que recorre el tendido de geófonos a más o menos 215 [m/s].

Figura 5.22.- Arriba: muestra típica de registro obtenido con registrador K2-1310+Guralp correspondiente a 30 minutos de registro de explosiones. Los entrecuadros interiores indican el componente. Abajo: ventana con 750 segundos de registro del segundo canal (FBA-vertical) con ganancia recortada.

Figura 5.23.- Explosión mayor acompañada de dos pulsos menores registradas en el acelerómetro FBA-23.

Figura 5.24.- Espectros de Amplitud correspondiente a la componente vertical del sensor FBA-23. Se incluyen la explosión mayor junto con dos menores además de dos segmentos de ruido aleatorio para comparación.

Figura 5.25.- Arriba: muestra típica de registro obtenido con registrador K2 y sensores triaxiales: FBA integrado y CMG-40T conectado externamente ubicado en el portal de entrada del túnel, correspondiente a 30 minutos de registro de explosiones. Abajo: ventana con poco más de 1000 segundos de registro del segundo canal (FBA-vertical) con ganancia recortada.

Figura 5.26.- Explosión mayor acompañada de dos pulsos menores registradas en el componente vertical del acelerómetro FBA-23.

Figura 5.27.- Espectros de Amplitud correspondiente a la componente vertical del sensor FBA-23. Se incluyen la explosión mayor junto con dos menores además de dos segmentos de ruido aleatorio para comparación.

Figura 5.28.- Arriba: muestra típica de los registros obtenidos con equipo DoReMi + sensor triaxial Lennartz LE-3D. Abajo: Ventana con los primeros 200 segundos de registro del primer canal (vertical) con ganancia recortada.

Figura 5.29.- Explosión mayor acompañada de dos pulsos menores registradas en el sismómetro DoReMi.

Figura 5.30.- Espectros de Amplitud correspondiente a la componente vertical del sensor LE-3D. Se incluyen la explosión mayor junto con dos menores además de dos segmentos de ruido aleatorio para comparación.

Figura 5.31.- Segmento de las señales obtenidas con equipo K2 + sensor FBA en el que se eligió los pulsos a empatar con separación de 5 segundos para comparar visualmente.

Figura 5.32.- Arriba: pulso mayor empatado con uno de menor amplitud. Abajo: autocorrelación y zoom de la cros-correlación del pulso piloto con toda la señal registrada en el sensor FBA-23.

Figura 5.33.- Amplitud rms calculada en el espectro de potencia de velocidad para la explosión mayor.

Figura 5.34.- Valores pico de velocidad observados en observados directamente en las señales sin filtrar (arriba) y filtradas (abajo).

Figura 5.35.- Arreglo lineal de geófonos clavados en el piso dentro del túnel El Varal a 10 [m] de separación y 92 [m] de extensión total. Las cruces indican la posición lateral en que se situaron las sondas empotradas en la pared del túnel.

Figura 5.36.- Ejemplo de trazas adquiridas con equipo registrador GEODE dentro del túnel “El Varal”. Registro correspondiente a la primera toma.

Figura 5.37.- Arriba izquierda: Espectro de densidad de potencia correspondiente a 60 ventanas del segundo canal con geófono de 4.5 [Hz]. Arriba derecha: Espectro de densidad de potencia correspondiente al tercer canal (sonda con sensor omnidireccional) empotrada en la pared justo arriba del primer geófono. Abajo: Promedio.

Figura 5.38.- Transformación al dominio de la velocidad de fase y la frecuencia para detectar la curva de dispersión de la velocidad de fase del modo fundamental de la onda indicada por los puntos blancos.

Figura 5.39.- Ajuste de la curva de dispersión correspondiente con el modo fundamental empleada para obtener el modelo de velocidad de onda de cortante en el piso del túnel “El Varal”.

Figura 5.40.- Modelo de velocidad de onda de cortante calculado a partir de la inversión de la curva de dispersión de la velocidad de fase para el modo fundamental incluidos los valores numéricos. Las dos primeras capas tienen velocidades menores a 450 [m/s] y aumentan a 1300 [m/s] a partir de los 16 [m] de profundidad.

Figura 5.41.- Correlaciones cruzadas de los registros obtenidos con geófonos de alta frecuencia, calculadas en cuatro diferentes anchos de banda como se describe arriba con información en tres de ellos. Los máximos de las correlaciones se ubican a corrimientos positivos menores a 0.1 [s].

Figura 5.42.- Sismogramas virtuales obtenidos después de filtrar la correlación cruzada en el ancho de banda de 3 y 9 [Hz] con una señal predominante que recorre el tendido de geófonos a 2864 [m/s].

Figura 5.43.- Correlaciones cruzadas filtradas en el ancho de banda entre los 10 y los 25 [Hz] con una velocidad de 2360 [m/s].

Figura 5.44.- Sismogramas virtuales obtenidos después de filtrar la correlación cruzada en el ancho de banda de 32-55 [Hz] con una señal predominante que recorre el tendido de geófonos a más o menos 1850 [m/s].

Figura 5.45.- Arriba: muestra típica de registro obtenido con registrador K2-1310+Guralp correspondiente a 30 minutos de registro de explosiones cerca del frente de excavación del túnel “ElVaral”. Los entrecuadros interiores indican el componente. Abajo: ventana con 600 segundos de registro del segundo canal (FBA-vertical) con ganancia recortada.

Figura 5.46.- Explosión mayor acompañada de dos pulsos menores registradas en el componente vertical del acelerómetro FBA-23.

Figura 5.47.- Espectros de Amplitud correspondiente a 87 ventanas de la componente vertical del sensor FBA-23. Se incluyen la explosión mayor junto con dos menores además de dos segmentos de ruido aleatorio para comparación.

Figura 5.48.- Muestra típica de los registros obtenidos con equipo DoReMi + Lennartz correspondiente a poco más de 19 minutos de registro de explosiones dentro del túnel.

Figura 5.49.- Explosión mayor acompañada de dos pulsos menores registradas en el sismómetro DoReMi.

Figura 5.50.- Espectro de Amplitud correspondiente a 187 ventanas de la componente vertical del sensor LE-3D. Se incluyen la explosión mayor junto con dos menores además de tres segmentos de ruido aleatorio para comparación.

Figura 5.51.- Segmento de las señales obtenidas con equipo K2 + sensor FBA en el que se eligió los pulsos a empatar para comparar visualmente.

Figura 5.52.- Empalme entre dos pulsos con una separación entre ellos de 5 [s] aproximadamente y una correspondencia de al menos 1 [s].

Figura 5.53.- Arriba: pulso mayor empatado con uno de menor amplitud. Abajo: autocorrelación y zoom de la crosocorrelación del pulso piloto con toda la señal registrada en el sensor FBA-23.

Figura 5.54.- Amplitud rms calculada en el espectro de potencia de velocidad para la explosión mayor.

Figura 5.34.- Valores pico de velocidad observados en observados directamente en las señales sin filtrar (arriba) y filtradas (abajo).

Índice de tablas

Tabla 5.1.- Localización de los túneles Cerro Los Beceros y El Varal, así como su longitud total y radio de sección.

Tabla 5.2.- Especificaciones técnicas correspondientes a los sensores de los geófonos verticales y de las sondas omnidireccionales.

Tabla 5.3.- Parámetros básicos de adquisición en las variantes de registro implementadas en el Túnel Cerro Los Beceros realizadas con el arreglo lineal de geófonos.

Tabla 5.4.- Especificaciones técnicas de los sensores de tres componentes LE-3D empleados de manera conjunta al tendido lineal.

Tabla 5.5.- Parámetros básicos de adquisición del equipo DoReMi dentro del túnel Cerro Los Beceros durante la operación de la herramienta barrenadora.

Tabla 5.6.- Especificaciones técnicas de los sensores de tres componentes CMG-40T y FBA-23 empleados de manera conjunta al tendido lineal.

Tabla 5.7.- Parámetros básicos de adquisición del equipo K2 dentro del túnel Cerro Los Beceros durante la operación de la herramienta barrenadora.

Tabla 5.8.- Parámetros básicos de adquisición de los equipos K2 dentro del túnel Cerro Los Beceros durante las detonaciones de explosivos.

Tabla 5.9.- Parámetros de adquisición básicos para el equipo DoReMi dentro del túnel Cerro Los Beceros durante las detonaciones de explosivos.

Tabla 5.10.- Especificaciones técnicas correspondientes a los sensores de los geófonos verticales y las sondas (omnidireccionales).

Tabla 5.11.- Parámetros básicos de adquisición del experimento realizado en el Túnel El Varal, adquiridos con el arreglo lineal de geófonos.

Tabla 5.12.- Parámetros básicos de adquisición de los equipos K2 dentro del túnel El Varal durante las detonaciones de explosivos.

Tabla 5.13.- Parámetros de adquisición básicos para el equipo DoReMi dentro del túnel El Varal durante las detonaciones de explosivos.

Introducción

1.1.- Presentación.

Dentro del estudio de las propiedades elásticas del subsuelo, recientemente se ha abierto un creciente interés por una rama de la Geofísica llamada Interferometría Sísmica, término que generalmente se refiere al estudio del fenómeno de interferencia entre pares de señales a fin de obtener información de las diferencias entre ellas. La principal herramienta matemática utilizada para este fin es la cross-correlación de pares de señales. Las diferentes teorías y aplicaciones que utilizan Interferometría sísmica se pueden dividir en dos tipos de técnicas: las que se utilizan principalmente para obtener información sobre el medio a través del cual se han propagado las ondas, y los que reconstruyen información sobre las ondas que se propagan.

Actualmente en el campo de la excavación de túneles se han desarrollado una gran cantidad de metodologías para ayudar a que el desempeño de las herramientas de perforación mejore de manera que se eviten posibles percances en el frente de excavación del túnel. Una de estas metodologías es la Sísmica Mientras se Excava (SWE, por sus siglas en inglés). Este procedimiento utiliza como fuente el campo de ondas de ruido sísmico proveniente de las diferentes herramientas de excavación como son máquinas barrenadoras conocidas como “Jumbo”, explosivos colocados y detonados en huecos hechos por el “Jumbo”, las herramientas de corte situadas en la parte frontal de los escudos utilizados para realizar el devastamiento del material en el túnel (Drill-Bit) cuando son empleadas maquinas tuneladoras (TBM, por sus siglas en inglés), rozadoras, etc. De esta manera, para el caso del Jumbo, el escudo de la tuneladora y las rozadoras, tenemos una fuente activa y semi-continua y para el caso de los explosivos tenemos una fuente impulsiva que genera señales cuyas reflexiones se pueden registrar con geófonos situados a distancias considerables del frente del túnel.

En el presente trabajo se realizaron pruebas con señales registradas durante los trabajos de excavación de dos túneles en la carretera Durango-Mazatlán en los que se emplearon explosivos para devastar el material en el frente del túnel. Los explosivos eran colocados en barrenos hechos con maquinarias Jumbo cuyas brocas sirven como fuente que genera el campo de ondas sísmico a registrar. Por otra parte, las detonaciones de los explosivos funcionaron como otro tipo de fuente (impulsiva) y cuyas señales arrojaron una estimación bastante aceptable de la respuesta sísmica al impulso de la formación.

Una vez procesados los datos se obtuvieron estimaciones de las características sismológicas del medio rocoso que circunda al túnel, empleando análisis espectral y cross-correlaciones en tiempo.

1.2.- Objetivo.

Establecer las características de propagación de las ondas sísmicas generadas por la excitación del medio circundante de dos túneles excavados en la carretera Durango-Mazatlán usando maquinaria de excavación. Características representadas por los contenidos de espectro de densidad de potencia de las señales adquiridas, modelos de velocidades de ondas sísmicas de corte en el piso del túnel, así como análisis de dispersión de velocidades de onda utilizando correlaciones cruzadas en tiempo. También se pretende comprobar la viabilidad de usar arreglos lineales de geófonos durante la operación de la maquinaria. Otro objetivo es obtener la respuesta al impulso que da la formación rocosa en el entorno del túnel al detonar explosivos en el frente de excavación y verificar la repetitividad de los pulsos registrados como la representación de dicha respuesta. En este sentido también se pretende verificar mediante el cálculo de la velocidad pico de partícula (VPP) si los procedimientos de dichas detonaciones son los correctos al comparar dichos valores con aquellos establecidos para voladuras en roca.

1.3.- Justificación.

Proveer de información útil que permita sustentar la implementación y aplicación de un sistema de prevención de riesgos durante la excavación de un túnel.

Antecedentes.

2.1.- Introducción.

El concepto de Sísmica Mientras se Perfora (SWD, por sus siglas en inglés) fue acuñado varios años atrás en la industria petrolera. Este método usa el ruido de la herramienta de corte o broca (Drill-Bit) como fuente sísmica y mide las señales registradas en los geófonos colocados en el suelo cerca del pozo o en el fondo marino, así como también geófonos fijados en las paredes del pozo. Dicha excitación es producida por el cono rotatorio de la sarta de perforación al ir avanzando. A partir de la información obtenida y mediante la técnica SWD (www.slb.com) se puede producir información en tiempo-profundidad y hasta información de reflexión de manera casi inmediata. No obstante, para efectos prácticos y con la pertinente interpretación se pueden generar mejoras en las conversiones tiempo-profundidad mientras se perfora, evaluar y evitar riesgos, detectar zonas de alta presión o a manera de guía, establecer trayectorias más satisfactorias hacia zonas más productivas en el yacimiento.

2.2.-Estado del arte.

Actualmente los trazados de ferrocarriles metropolitanos y de alta velocidad, las vías de alta velocidad urbanas e interurbanas y la optimización en el trazo y excavación de estas obras de infraestructura obligan a la frecuente construcción de túneles. De igual manera, los sistemas de abastecimiento de agua, la minería, la energía, exigen soluciones subterráneas, que hoy son posibles gracias al empleo de potentes máquinas excavadoras de túneles, mejor conocidas como tuneladoras (TBM, por sus siglas en inglés), capaces de excavar el túnel a sección completa y que conviven con los procesos tradicionales de excavación. Así, el método de exploración SWD ha adquirido estas nuevas perspectivas como sus enfoques de motivación para los cuales se han desarrollado diversas técnicas a fin de encontrar apertura en el creciente mercado de construcción de túneles. El método erróneamente ha adoptado el concepto de Sísmica Mientras se Perfora (SWD) por sus orígenes en la exploración petrolera, sin embargo es más correcto utilizar el término Sísmica Mientras se Excava ya que hablamos de masas considerablemente grandes de material extraído durante la construcción de un túnel u obra subterránea.



Figura 2.1. Sección de túnel y tuneladora. Tomados de <http://www.ambergtechnologies.ch/home>

2.3.- Primeros trabajos.

Uno de los primeros grupos en desarrollar estudios relativos a las características sismológicas de los túneles excavados mediante TBM fue el Departamento de Geofísica de la Universidad de Texas, quienes realizaron cálculos teóricos del comportamiento de los patrones de radiación de las máquinas TBM al ir avanzando y excitar el medio circundante. Este estudio fue requerido y utilizado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos en la segunda mitad de la década de los ochenta. Dicho estudio tenía el fin de explorar el subsuelo en busca de túneles que posibilitaran el paso de inmigrantes, así como el tráfico de drogas. El enfoque primario se basaba en identificar las trayectorias de procedencia de ciertas señales sísmicas emitidas por una máquina TBM.

El estudio llamado "Un estudio teórico de los patrones de radiación de una maquina TBM (para un medio infinito)" (Gangi, 1987), indica que dichos patrones de onda no muestran gran complejidad o variabilidad con el ángulo formado entre la orientación de la máquina TBM y la línea entre la máquina y la disposición de los geófonos, llamado "ángulo de mira". Comúnmente para las frecuencias (<500 [Hz]) y velocidades de onda (1600-3500 m/s) observadas en la Tierra la fuente generada por la TBM se considera como una fuente puntual tomando en cuenta que el diámetro del frente de corte es menor que la mitad de una longitud de onda. Los efectos de las anclas en los patrones de radiación provocan que el comportamiento de la TBM sea como el de un acople de fuerzas más que como una fuerza aislada; es por esto que los patrones pueden ser ligeramente modificados (al ir de una fuente puntual a una fuente de fuerzas acopladas), aunque esta se puede seguir considerando como una fuente puntual para bajas frecuencias (menores a 100 [Hz]) siempre que el espacio entre las anclas y el frente de corte sea menor que el de la mitad de una longitud de onda. Así, todos los patrones de radiación varían directamente con el ángulo de mira, θ . Si bien hay valores nulos en estos patrones de radiación, estos son bastante agudos y solo cubren un pequeño rango de ángulos de mira. Además, los movimientos transversales y longitudinales tienen sus valores nulos ubicados a diferentes ángulos de mira y, en consecuencia, no es muy probable que haya "puntos ciegos" para la detección de las señales de la TBM.

Los patrones de radiación son generados por cinco tipos de fuentes:

- a) Una fuente impulsiva puntual dirigida (vector fuerza) con dependencia del tiempo (función-delta de dirac).
- b) Una fuente puntual dirigida armónica en el tiempo.
- c) Una fuente par de fuerzas impulsiva (sin momento).
- d) Una fuente impulsiva distribuida con una fuerza normal uniforme sobre un círculo de radio a .
- e) Una fuente impulsiva distribuida con una fuerza tangencial uniforme (con simetría axial) sobre el mismo círculo de radio a .

A continuación, en la Figura 2.2 utilizando coordenadas cilíndricas se muestra la configuración utilizada para analizar las condiciones sismológicas dentro de un túnel asumiendo un medio infinito, homogéneo y sin restricciones.

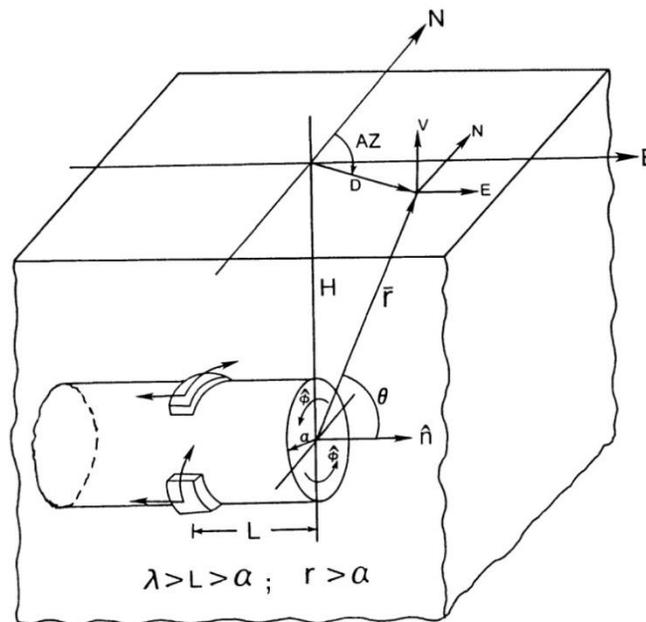


Figura 2.2. Coordenadas cilíndricas de la geometría relacionada a la radiación de una máquina tuneladora (TBM). Tomado de Poletto y Miranda (2004).

Los dos últimos tipos se combinan para dar una aproximación de las fuerzas ejercidas por la herramienta de corte de la TBM. Se asume que las fuerzas ejercidas por la TBM en las direcciones de los vectores \hat{n} y $\hat{\phi}$ son ambas normales y tangenciales al frente de la máquina, respectivamente. Hay, además fuerzas de reacción. En general, la longitud de onda dominante será mayor que L y esta a su vez, mayor que el radio a del frente de la máquina.

Los efectos de la superficie libre en las señales de las ondas de cuerpo recibidas (ondas P y S) pueden ser calculados relativamente simple si los geófonos están en el campo de radiación de las señales de la TBM, aunque suelen ser generadas ondas superficiales de gran amplitud cuando los geófonos están a 5 o 6 veces la profundidad de la fuente de la TBM. De este modo, la superficie libre primariamente afecta los patrones de sensibilidad de los geófonos ubicados en la superficie es decir, la respuesta de un geófono orientado verticalmente será ligeramente diferente en la superficie que en un medio infinito elástico y homogéneo.

Los resultados indican que usando las señales de geófonos de tres componentes es posible extraer las componentes longitudinal y transversal de movimiento de las ondas sísmicas. Estas componentes a su vez pueden emplearse para determinar la dirección o incluso ubicación de la TBM si: a) se ubica en la "Zona de Fresnel" del arreglo y b) se conoce la estructura de velocidades de la tierra o no es muy heterogénea. La distancia hasta la TBM se calcula con los retrasos entre las ondas P y S siempre que tengan una igual dependencia de tiempo.

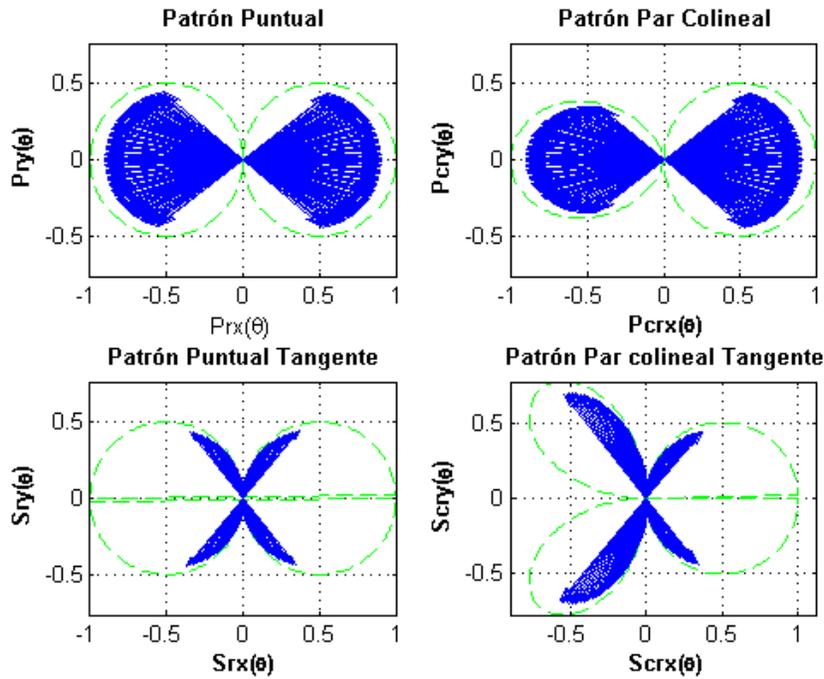


Figura 2.3. Ejemplos de componentes de patrones de radiación para dos diferentes tipos de fuente, en este caso fuente puntual y fuente par de fuerzas colineales.

Explícitamente, la señal generada por una TBM es considerada como una variable aleatoria en el tiempo ya que ofrece un comportamiento favorable debido a su carácter impulsivo. Gracias a este comportamiento es fácil obtener la respuesta al impulso de una señal aleatoria por medio de la convolución en tiempo. Sin embargo, deben tomarse en cuenta los efectos causados empleando la convolución en tiempo, así como la variabilidad de los espectros en frecuencia al realizar el análisis de las señales. Para ejemplificar el tipo de patrones que se pueden generar usando estos tipos de fuente, la Figura 2.3 nos muestra los patrones correspondientes a dos diferentes tipos de fuente con sus respectivas componentes.

En este estudio fueron registradas frecuencias de hasta 20 [KHz] con respuestas en frecuencia ubicadas por debajo de 1 [KHz], rango mucho mayor al esperado en las pruebas de campo incluida una pequeña variabilidad en el espectro. Como para una fuente puntual no hay variabilidad con la frecuencia empleando una función impulsiva en tiempo, se considera al frente de corte de la TBM como una fuente puntual. El efecto producido por las anclas también se toma en cuenta en la respuesta en frecuencia, aunque es mínimo para los tiempos de respuesta entre dichas anclas y los geófonos ya que los periodos de interés se miden sobre la distancia L. Ya que las fuerzas en las anclas son de reacción, su dirección

es opuesta al frente de corte, generando así señales cuyo valor es el negativo de aquellas provenientes del frente de corte. El estudio propone como consecuencia de este acople (positivo/negativo) que las señales registradas son la derivada temporal de las señales emitidas por la fuente en el frente de corte, lo que provoca menor energía a bajas frecuencias para el par de fuerzas que para la fuerza individual.

La observación principal es que la respuesta en frecuencia del par de fuerzas tiene valores nulos a frecuencias que usualmente son más altas que aquellas registradas en campo. De esta manera se observó que el efecto de una fuente distribuida es el de un filtro pasa bajas aplicado a una función de tiempo de entrada cuya frecuencia de corte ocurre en $f_{1/2} = 0.603/\Delta t$, con $\Delta t = (2a/\alpha) \sin \theta$. Si la señal de entrada tiene poca energía de entrada por encima de $f_{1/2}$, la señal es pasada con una pequeña atenuación. Sin embargo, si dicha señal es de frecuencia constante, será atenuada por un factor de 2 (Gangi, 1987).

Amberg Technologies (<http://www.ambergtechnologies.ch/home>).

El desarrollo del método SWD se vio suspendido varios años. Sin embargo, en la amplia producción mecanizada aplicada a la construcción subterránea, se hicieron necesarias técnicas de alto rendimiento en excavación intensiva respaldadas en sistemas logísticos diseñados para realizar trabajos de manera continua y avanzar manejando adecuadamente riesgos ofreciendo altos índices de eficiencia. Es bien sabido que los riesgos geológicos y los cambios en las condiciones de las rocas siempre están latentes y causan muy a menudo costosas pérdidas de tiempo que resultan innecesarias. Además, la percepción previa de estructuras litológicas heterogéneas y cualquier variación en las propiedades mecánicas de las rocas permite seleccionar la técnica adecuada de construcción, lo cual es un factor de suma importancia en la logística operacional de cualquier túnel.

El sistema llamado Predicción Sísmica de Túneles (TSP, por sus siglas en inglés) de la empresa Amberg Technologies, trata de identificar cambios en las propiedades mecánicas de los materiales mediante el análisis e interpretación de la propagación de ondas en el entorno geológico próximo al perfil del túnel en construcción, que el trazo del túnel encontrará durante la excavación. Las distancias típicas que alcanza la técnica están en el rango de los 100 a 300 metros. Las fuentes de ondas sísmicas pueden ser escudos TBM o más comúnmente explosivos, que operan tanto en el frente de la excavación en el caso de los escudos como en las paredes de tramo ya excavado cuando se utilizan explosivos, los sensores se localizan en las paredes mismas del túnel. La señal emitida ilumina el entorno y las reflexiones sísmicas, originadas en los contrastes que registran los sensores permiten identificar a distancia las anomalías estructurales de interés. El análisis e interpretación de las señales sísmicas obtenidas es un proceso que requiere el concurso de un ingeniero especializado, pero ofrece una rápida evaluación de las mediciones y una estimación de los resultados.

El completo procedimiento de adquisición, procesamiento e interpretación se lleva a cabo en un dispositivo de manufactura propia de la empresa que permite realizar un rápido análisis de las observaciones desglosando los resultados que de este se obtengan (Figura 2.4).

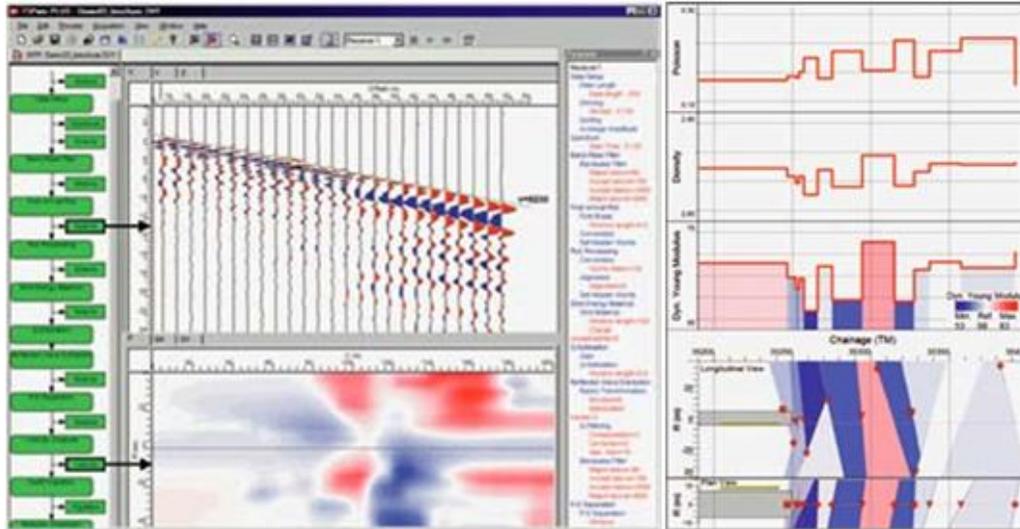


Figura 2.4. Procesamiento y análisis con software de la técnica TSP. Tomado de <http://www.ambergtechnologies.ch>.

En este contexto, la empresa promueve dicho sistema prometiendo evitar problemas comunes como:

- Hundimientos, colapsos, accesos de agua.
- Costosos periodos de inactividad.
- Entrampamiento de las TBM.
- Poner en peligro personas y equipo,

inherentes durante las operaciones de excavación de túneles.



Figura 2.5. Disposición de los sensores registradores en la pared del túnel de la técnica TSP. Tomado de <http://www.ambergtechnologies.ch>.

Fujita (<http://www.fujita.com>).

Otra empresa que también está dedicada al desarrollo de dicha metodología es la empresa Fujita, proveniente de Japón. Fujita fue creada por los hermanos Fujita al ser contratados para realizar trabajos de ingeniería de construcción en Hiroshima en 1910. La empresa creció tanto en escala como en reputación y a finales de 1959 y principios de 1960 fue fundado el Instituto Técnico Fujita con el fin de brindar nuevas tecnologías enfocadas a la construcción automatizada, así como nuevas técnicas de cómputo. Desde marzo de 2008 el instituto en colaboración con la Compañía Japonesa de Servicios Geofísicos (JGI, por sus siglas en inglés), logró determinar las condiciones geológicas delante del trazo de un túnel en el portal usando una fuente sísmica mecanizada desde fuera del túnel. El método, llamado Estudio Sísmico de Reflexión Somero para Túneles (SSRT, por sus siglas en inglés) se emplea para prever la geología al frente del túnel haciéndolo útil para un económico y seguro trabajo de excavación.

La técnica SSRT realiza estudios de reflexión basados en los conceptos de perfiles sísmicos verticales directos, así como inversos para túneles (VSP e IVSP orientados horizontalmente). Las fuentes que generan las ondas registradas en esta técnica pueden ser explosivos, un impactor hidráulico o un vibrador (vibroiseis) lo cual le permite aplicarse tanto en la entrada del túnel para realizar estudios previos al inicio de las operaciones de excavación, así como mediciones de Sísmica Mientras se Excava empleando SSRT (SWE-SSRT, por sus siglas en inglés) dentro del túnel.

Esta última modalidad emplea las detonaciones multi-paso de explosivos como fuente por lo cual no causa interrupción en el ciclo total de excavación ya que estos explosivos son los empleados para devastar el material en el frente del túnel. Para llevar a cabo esto la instalación del equipo se mueve conforme avanza la excavación por lo que las señales generadas mientras se hacen las detonaciones se registran de manera continua.

El método SWE-SSRT usa los tiempos de retraso (200-250 [ms]) entre explosiones, incluyendo las ondas reflejadas delante del frente del túnel. Se debe lograr un tiempo de registro de explosión por debajo de los 10 [μs] de manera que, para lograr una buena sincronización entre el reloj interno del registrador y las detonaciones de los explosivos, se emplean dos alternativas: la primera es una señal de tiempo GPS proveniente de un dispositivo que use cable de fibra óptica para poder emplear un registrador convencional, sin embargo, es común la rotura de la fibra debido a los trabajos del túnel. La segunda opción propone el uso de un reloj atómico de rubidio (Rb), con una excelente precisión, acompañado de un registrador especial.

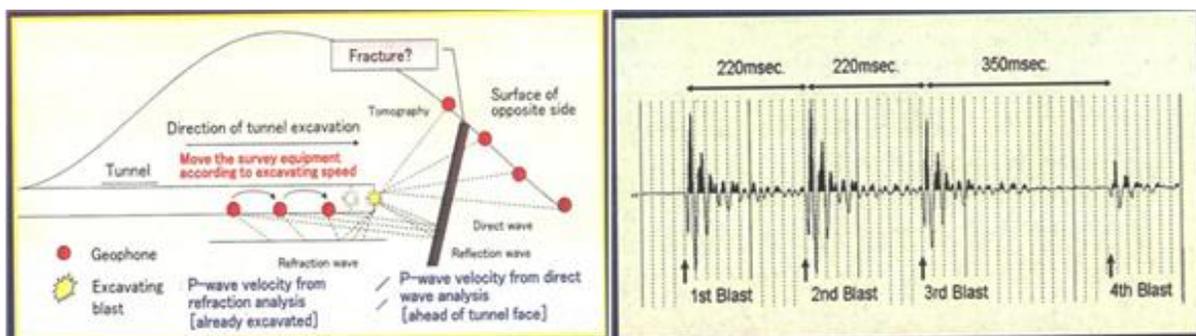


Figura 2.6. Diagrama ilustrativo de la implementación del método SWE-SSRT y los registros obtenidos. Tomado de Murayama et al. (2011).

Esta técnica aprovecha la energía liberada por las explosiones la cual se propaga en todas direcciones con un patrón cilíndrico y genera reflexiones en las interfaces tanto al frente como en el entorno del trazo del túnel (Murayama et al., 2011).

2.4.- Trabajos Similares.

Existen más empresas dedicadas a la excavación, construcción e instrumentación que han desarrollado metodologías similares. Sin embargo, estas solo sirven para guiar las operaciones de excavación clasificándolas solo como sistemas logísticos secundarios ya que no dependen de los conceptos empleados en el desarrollo de las técnicas de predicción de estructuras geológicas utilizando Sísmica Mientras se Excava. Estas empresas han diseñado tecnologías completas para conseguir que se conserve la dirección de sus máquinas durante campañas extensas de trabajo como lo es la excavación. Ejemplo de ello es la empresa Herrenknecht AG ubicada en Alemania, la cual ha establecido como su principal línea de trabajo la construcción y provisión de maquinaria pesada para empresas prestadoras de servicios de construcción. Esta empresa además de diseñar y construir maquinaria cuyas especificaciones se ajustan a las necesidades del contratista, ha desarrollado en conjunto con la empresa VMT GmbH, un completo sistema de guía. Provee los llamados aparejos de Perforación Horizontal Dirigida (HDD, por sus siglas en inglés) que permiten dirigir maquinas TBM sin zanjas haciendo que el tendido de líneas de abastecimiento y tuberías sea de manera rápida, económica y noble con el entorno. Estos artefactos se emplean en conjunto con el "Sistema Universal de Navegación" (UNS, en inglés) instalado en las maquinas tuneladoras que procesa los datos obtenidos en un equipo de cómputo (<http://www.herrenknecht.com>) (Figura 2.7).



Figura 2.7. Esquema UNS, Herrenknecht. Tomado de <http://www.herrenknecht.com>.

En general, todos estos sistemas sirven para proveer una excelente conducción de las maquinas tuneladoras al seguir el trazo marcado para el túnel pero no ofrecen un informe detallado de las condiciones geológicas y las propiedades mecánicas de las rocas en el frente del túnel.

Fundamentos teóricos.

3.1.-Perfil Sísmico Vertical (VSP)

Definición.

El Perfil Sísmico Vertical (VSP, por sus siglas en inglés), es un procedimiento de medición que consiste en registrar una señal originada en la superficie de la tierra con geófonos asegurados a varias profundidades en un pozo perforado.

Los geófonos están dirigidos 90° respecto de la posición de aquellos usados durante el registro de datos sísmicos de reflexión en superficie (en forma radial). Un geófono se ubica lejos por debajo de la superficie de la tierra durante el registro VSP de manera que, este responde tanto el campo de ondas ascendente como al descendente. Con geófonos ubicados en superficie no se pueden identificar eventos viajando hacia abajo. Un VSP es similar a una medición de velocidad ya que usan geometrías de fuente-geófono similares. Debe haber al menos un disparo para cada nivel de geófonos.

- El VSP se registra cada 10 [m] ó 25 [m] de avance en profundidad.
- Se detectan los primeros arribos, así como eventos del campo de ondas ascendente y descendente.

Mediante los datos de VSP se puede obtener comprensión y entendimiento teórico tanto de algunas características fundamentales de la propagación de ondículas sísmicas como de los procesos de reflexión y transmisión de las mismas en la tierra. De esta manera se mejora la interpretación estructural, estratigráfica y litológica de los registros sísmicos de superficie.

Otras aplicaciones nos permiten dar una estimación de la inclinación de los reflectores, correlación de reflexiones de ondas de cortante con ondas compresionales, ubicación de planos de falla, determinación de efectos litológicos en ondículas al propagarse, predecir reflectores en el frente de la herramienta de perforación, determinar los efectos de hidrocarburos en la propagación de ondículas, identificación de eventos múltiples en los límites intracapa, medición de velocidades tanto de onda de compresión como de cortante y, estimación de la conversión de modos de energía de compresión a cortante y viceversa.

Los elementos fundamentales del estudio VSP son:

1. Pozo perforado (entubado o no entubado).
2. Fuente estándar en la superficie o cerca de ella (enterrada).
3. Paquete de geófonos fijados a las paredes del pozo.
4. Sistema de registro digital.
5. Cable desde el geófono hasta el registrador.

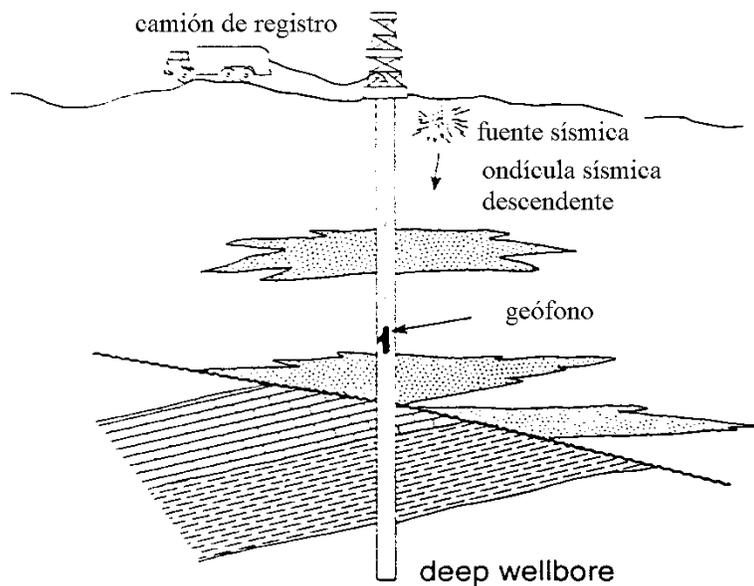


Figura 3.1 Principales componentes del estudio VSP. Tomado y editado de Hardage, B. A., (1983).

La geometría de registro mostrada en la Figura 3.1 permite que un geófono registre eventos sísmicos tanto descendentes como ascendentes, mientras que eventos descendentes no pueden ser aislados y analizados en registros sísmicos de estudios estándar de superficie. Es por eso que, al registrar los campos de ondas descendente y ascendente en un VSP permite que dichos registros sean usados en algunas aplicaciones de exploración específicas (Hardage, 1983).

Configuraciones de adquisición de datos VSP.

Existen cinco configuraciones definidas para la adquisición de datos de VSP. La primera configuración empleada fue el VSP sin desplazamiento lateral de fuente la cual se localiza inmediatamente encima del receptor en pozos verticales. En esta técnica, las imágenes resultantes se limitan a la zona que rodea al pozo, pero con mayor resolución que aquellas obtenidas con sísmica de superficie. Posteriormente se desarrollaron las otras configuraciones que permiten iluminar un rango más amplio y con mayor resolución que el primero. A continuación, se da una breve descripción de estas configuraciones.

➤ **VSP con desplazamiento cero.**

En esta configuración la fuente se sitúa muy cerca de la cabeza del pozo. Registran las señales durante periodos más prolongados de tiempo y a espaciamientos regulares en el pozo. Los tiempos de adquisición prolongados permiten captar señales sísmicas reflejadas, lo cual ayuda a generar una imagen sísmica después del procesamiento. Los registros VSP permiten obtener imágenes debajo de la profundidad del pozo (Hardage, 1983; Breton, 2002) (Figura 3.2).

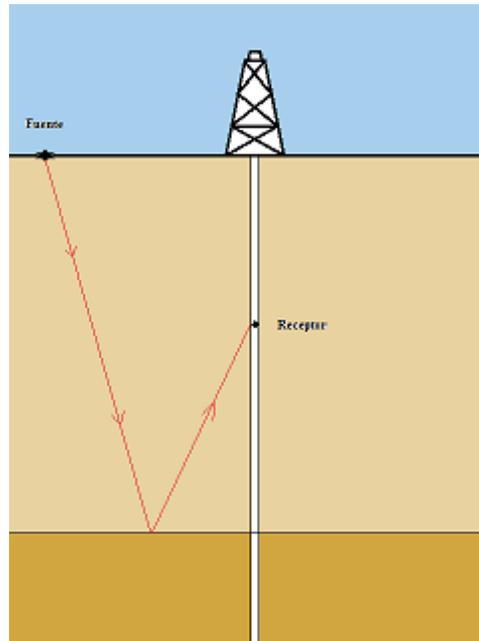


Figura 3.2.- Geometría de adquisición estándar de VSP.

➤ **VSP con desplazamiento lateral de fuente (OVSP, por sus siglas en inglés).**

Para ampliar el volumen de investigación del subsuelo, los VSP con desplazamiento lateral se registran con una fuente colocada a una distancia de separación considerable de la boca del pozo y receptores en el pozo para investigar las superficies de reflexión lejos del pozo. Permiten obtener imágenes sísmicas de alta resolución de las fallas y acuíferos estratigráficos adyacentes. Esta técnica se utiliza generalmente para el diseño de pozos de drenaje. Se pueden registrar datos de VSP con desplazamientos múltiples en diferentes direcciones respecto del pozo en la técnica 3D (Hardage, 1983) (Figura 3.3).

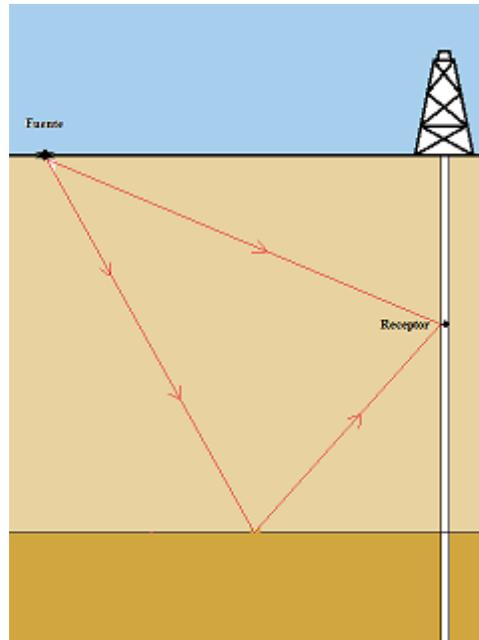


Figura 3.3.-Geometría de adquisición de VSP con desplazamiento lateral de fuente.

➤ **VSP con desplazamiento lateral sucesivo de fuente (Walkaway-VSP).**

Esta técnica utiliza múltiples ubicaciones de la fuente en superficie y de cinco a siete receptores en el pozo, cuyas posiciones son fijas. Las posiciones agregadas de la fuente amplían aún más el volumen del subsuelo en las imágenes VSP. Con esta técnica la cobertura lateral puede alcanzar un 50% de la profundidad del pozo (Hardage, 1983) (Figura 3.4).

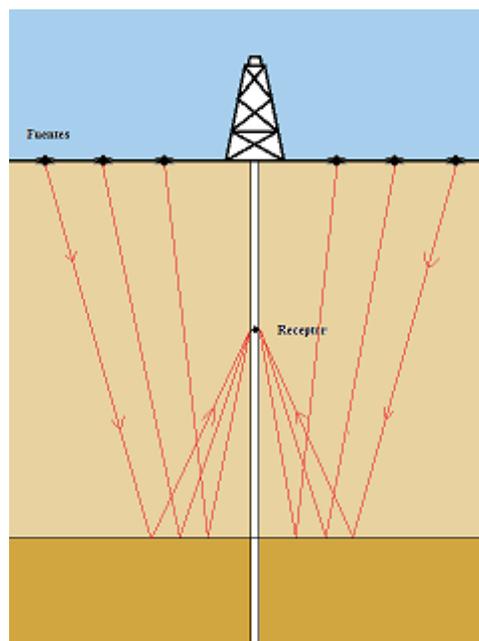


Figura 3.4.- Geometría de adquisición de VSP con desplazamientos múltiples.

➤ **VSP con desplazamiento de fuente y receptores (VSP de pozo desviado).**

En esta técnica también conocida como VSP de incidencia vertical, la fuente de superficie directamente sobre el receptor de pozo en un pozo desviado. Aquí la fuente se desplaza junto con el receptor a medida que se obtienen las imágenes debajo del subsuelo. Con esta técnica se miden variaciones laterales de velocidad y se obtienen imágenes de debajo del pozo para localiza y caracterizar fallas y estructuras de forma más completa (Hardage, 1983) (Figura 3.5).

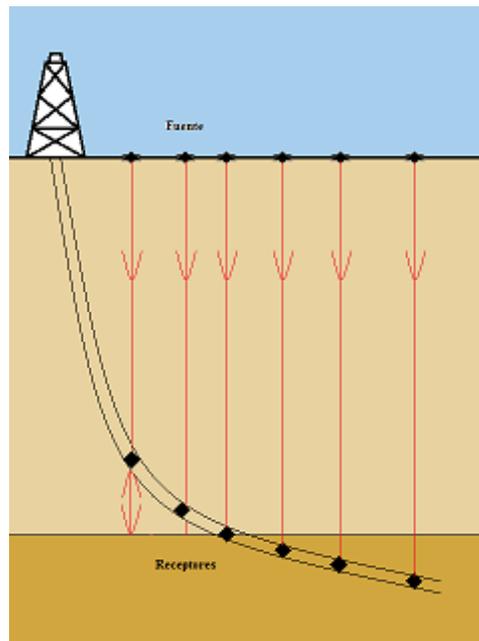


Figura 3.5.- Geometría de adquisición de VSP con desplazamiento de fuente y receptores.

➤ **VSP de proximidad de la sal.**

Este utiliza una fuente colocada encima de un domo salino y un receptor ubicado en distintas posiciones en un pozo adyacente al domo salino. El procesamiento requiere tener conocimiento de la ubicación exacta de la fuente y el receptor durante el levantamiento, la velocidad de la sal y de los estratos circundante, así como la distancia al tope del domo salino. De esta forma se genera un perfil del domo salino que permite conocer la distancia del domo a la sal, así como una indicación de la forma del mismo (Hardage, 1983) (Figura 3.6).

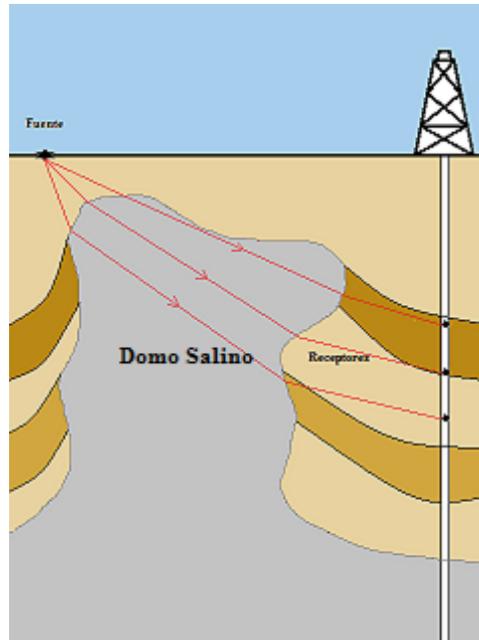


Figura 3.6.- Geometría de adquisición de VSP de proximidad de la sal.

➤ **VSP 3D.**

Al combinar datos de levantamientos de VSP con desplazamientos múltiples se pueden obtener imágenes sísmicas 3D de alta resolución. La adquisición de VSP 3D adquiere las geometrías regulares de sísmica de superficie y puede seguir un esquema de líneas paralelas o círculos concéntricos alrededor de un pozo (<http://www.slb.com>) (Figura 3.7).

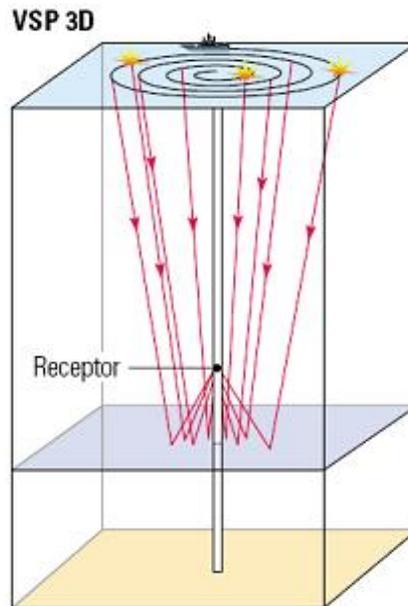


Figura 3.7.- Geometría de adquisición de VSP en 3D. Tomado de <http://www.slb.com>.

3.2.-Interferometría Sísmica

Definición.

La interferometría usa la correlación de señales adquiridas en diferentes ubicaciones para obtener información acerca de las propiedades internas de un medio en el cual las ondas registradas se han propagado (Rickett y Claerbout, 1999; Wapenaar et al., 2002; Wapenaar et al., 2004, citados por Schuster, 2008). La interferencia de las ondas de luz se ha usado desde hace poco más un siglo para estimar las propiedades de un objeto. La idea clave es que un haz luminoso es usado, combinado con un haz de referencia, para evidenciar las propiedades de un objeto o un medio. El patrón de intensidad de referencia resultante es llamado algunas veces interferograma y magnifica suavemente las propiedades ópticas del objeto. Cambios sutiles son aumentados debido a que el interferograma realza las diferencias en las fases entre los haces de referencia y los muestreados. Un ejemplo bien conocido son los anillos de Newton, donde las ondas de luz de dos superficies muy cercanas que se reflejan interfieren para formar un patrón anular (Schuster, 2008).

Interferometría Óptica.

La Figura 3.8 muestra dos haces interfiriendo donde uno ilumina la porción más baja del lente y el interferograma es registrado por encima del lente el cual es el resultado de la interferencia entre la onda directa de referencia (sA) denotado por $\tilde{d}_A = e^{i\omega\tau_{sA}}$ y la onda reflejada dentro del lente (sArB) denotada por $\tilde{d}_B = R^2 e^{i\omega(\tau_{sA} + \tau_{Ar} + \tau_{rB})}$:

$$\tilde{d}_A = e^{i\omega\tau_{sA}}; \quad \tilde{d}_B = R^2 e^{i\omega(\tau_{sA} + \tau_{Ar} + \tau_{rB})}. \quad (3.1)$$

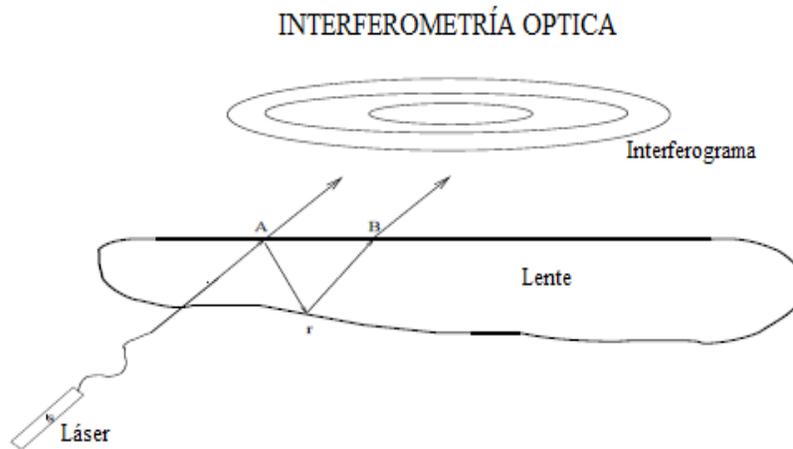


Figura 3.8. Interferometría óptica. Tomado y editado de Schuster (2008).

Aquí τ_{ij} es el tiempo de propagación a lo largo de la trayectoria ij , R es el pequeño coeficiente de reflexión asociado con la interfaz aire-vidrio y ω es la frecuencia angular de la onda óptica. Las líneas oscuras en el interferograma denotan las zonas donde los haces de reflexión y directos están fuera de fase, y las zonas en-fase representan interferencia coherente. La fase está controlada por el espesor del lente y cambios en dicho espesor resultarán en cambios en la fase entre los arribos directos y los

reflejados, produciendo el interferograma tipo anillo. Desviaciones de un patrón tipo anillo sugieren anomalías en la geometría del lente.

Matemáticamente, el interferograma es la intensidad de la suma de las ondas directas y las reflejadas:

$$I = (\tilde{d}_A + \tilde{d}_B)(\tilde{d}_A + \tilde{d}_B)^* = 1 + 2R^2 \cos(\omega[\tau_{Ar} + \tau_{rB}]) + R^4 \quad (3.2)$$

donde el patrón de intensidad I está controlado por la fase $\omega[\tau_{Ar} + \tau_{rB}]$ a lo largo de la porción reflejada de la trayectoria del rayo. Una observación importante es que: la intensidad o patrón tipo anillo es independiente de la fase de la fuente o la posición del láser a lo largo de sA. Esto significa que la ubicación de la fuente o de la ondícula fuente no necesita ser conocida a fin de delinear la geometría del lente. Ambos haces, directos y reflejados viajan a lo largo de la trayectoria común sA, y así en el término de fase en la ecuación 2 solamente destaca el desplazamiento de fase a lo largo de trayectoria ArB (Schuster, 2008).

Interferometría Sísmica.

La interferometría sísmica es usada para estimar las propiedades detalladas de la Tierra analizando los patrones de interferencia de las ondas sísmicas. Estos patrones o interferogramas son obtenidos de la cros-correlación y suma de pares de trazas con otra para mapear robustamente las propiedades elásticas de la Tierra. Lo anterior obedece a la conjetura de Claerbout que dice (Claerbout, 1968, citado por Schuster, 2008): "Cros-correlacionando trazas de ruido registradas en dos ubicaciones sobre la superficie, podemos construir el campo de ondas que sería registrado en una de las ubicaciones si hubiera una fuente en la otra y así crear sismogramas de pseudo-reflexión que incluyen efectos tales como NMO y DMO". En la Figura 3.9 se muestran dos ejemplos, la Figura 3.9a muestra el caso de una fuente armónica a cierta profundidad desconocida con una ondícula de fuente también desconocida y la Figura 3.9b, muestra un modelo de la Tierra donde son registradas trazas sísmicas de un solo canal sobre un lente de arena de bajo de una compleja sobrecarga. Hay dos eventos, el primero es la reflexión ascendente desde el tope y el segundo es la reflexión desde el fondo del lente de arena. El objetivo es estimar la distribución de reflectividad de las trazas sísmicas registradas en A y B, dadas en la ecuación (1) y así determinar su geometría. En la figura 3.9a, en lugar de sumar las dos trazas juntas, el conjugado del espectro de la traza en A es multiplicado con el espectro de la traza en B para obtener:

$$\tilde{\Phi}_{AB} = \tilde{d}_A^* \cdot \tilde{d}_B = Re^{i\omega(\tau_{Ar} + \tau_{rB})} + o. t.; \quad (3.3)$$

donde $\tilde{\Phi}_{AB}$ denota el espectro del producto, el término exponencial representa la correlación de la onda directa en A con la reflexión fantasma registrada en B y *o. t.* denota otros términos tales como las correlaciones de onda directa-directa y/o reflejada-reflejada.

Igual que la función de intensidad del láser en la ecuación 2, $\tilde{\Phi}_{AB}$ es una función de la fase $i\omega(\tau_{Ar} + \tau_{rB})$ a lo largo de la porción reflejada de la trayectoria del rayo. Así, los cambios en la geometría del reflector conducen a cambios en los datos correlacionados $\tilde{\Phi}_{AB}$. La geometría del reflector se puede recuperar aplicando el kernel de migración $e^{i\omega(\tau_{Ar'} + \tau_{r'B})}$ a $\tilde{\Phi}_{AB}$.

Desafortunadamente en la figura 3.9b, la forma del lente se distorsiona por las variaciones de velocidad lateral referidas como estáticos. Nótese que el tiempo de transito vertical a través de la sobrecarga es igual a τ_{AyA} proveniente de la parte superior del lente de arena y denota el tiempo de viaje de una onda

de reflexión propagándose desde A hacia y en la parte superior del lente y de regreso al punto A. Tomando en cuenta que la trayectoria se denota igual para todas las trazas, la variación de τ_{AyA} de traza a traza define los estáticos de la sobrecarga (Schuster, 2009).

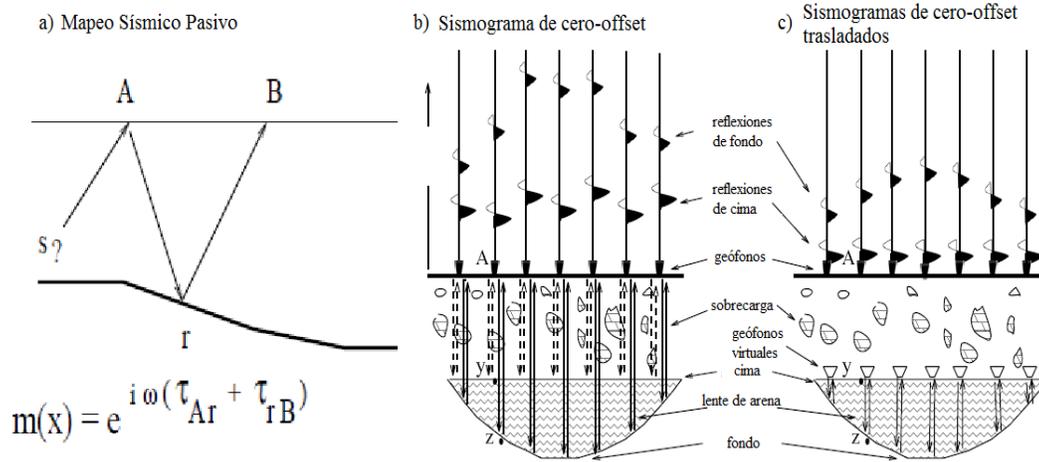


Figura 3.9. a) Caso simple de fuente armónica con profundidad y fuente desconocida, b) lente de arena subyaciendo a una sobrecarga con variaciones de velocidad lateral llamadas "estáticos" y c) sismogramas desplazados y corregidos revelando la geometría del lente de arena sin las distorsiones causadas por las heterogeneidades laterales en la sobrecarga. Tomados y editados de Schuster (2008).

Desplazando en tiempo cada traza por τ_{AyA} se remueven dichos estáticos para obtener la forma del lente no distorsionado representado por los sismogramas de fuentes y receptores virtuales en la parte superior del lente. Este procedimiento, análogo a la interferometría óptica, nos revela la geometría del lente de arena libre de efectos de distorsión y es similar a aplicar correcciones estáticas a datos terrestres (Yilmaz, 2001, citado por Schuster, 2008).

Descripción Matemática.

Extraeremos una de las trazas de la Figura 3.9b para mostrar el procedimiento de corrección y desplazamiento en tiempo de dicha traza. En la figura 3.10 se muestra la reflexión desde la parte superior del lente en el panel central. El tiempo de arribo τ_{AyA} es usado para desplazar en tiempo el sismograma mostrado en el panel de la izquierda y así obtener el sismograma mostrado en la derecha. Usando una función delta de Dirac mostraremos que la corrección por desplazamiento en tiempo es crudamente equivalente a correlacionar un par de trazas con otra.

Así, asumiendo una fuente impulsiva descrita por la función delta de Dirac $\delta(t)$ (Butkov, 1972, citado por Schuster, 2008), de manera que la traza de reflexión en el panel izquierdo de la Figura 3.10 está representada por los datos de cero-offset $d(\mathbf{A}, t|\mathbf{A}, 0)$:

$$d(\mathbf{A}, t|\mathbf{A}, 0) = \overbrace{\delta(t - \tau_{AyA})}^{\text{cima del lente}} + \overbrace{\delta(t - \tau_{AZA})}^{\text{fondo del lente}} \quad (3.4)$$

se asigna un valor unitario a los coeficientes de reflexión y la onda directa es atenuada.

La notación matemática empleada indica que \mathbf{A} es un vector de coordenadas cuya posición a la derecha de la barra vertical está en la fuente y a la izquierda, en el receptor. Por convención, el tiempo de

iniciación de la fuente siempre es el tiempo cero, el tiempo de observación es t y los vectores se denotan con letras en negritas. Por simplicidad, los efectos de la dispersión geométrica y los coeficientes de reflexión se eliminan mediante un procedimiento de normalización de traza (Yilmaz, 2001) como por ejemplo, Control de Ganancia Automática (AGC, por sus siglas en inglés). De forma general, el campo de onda excitado por una fuente impulsiva puntual en \mathbf{B} iniciando en t_s y un observador en \mathbf{A} , es descrito por la función de Green $g(\mathbf{A}, t|\mathbf{B}, t_s)$ (Morse y Feschback, 1953, citado por Schuster, 2008).

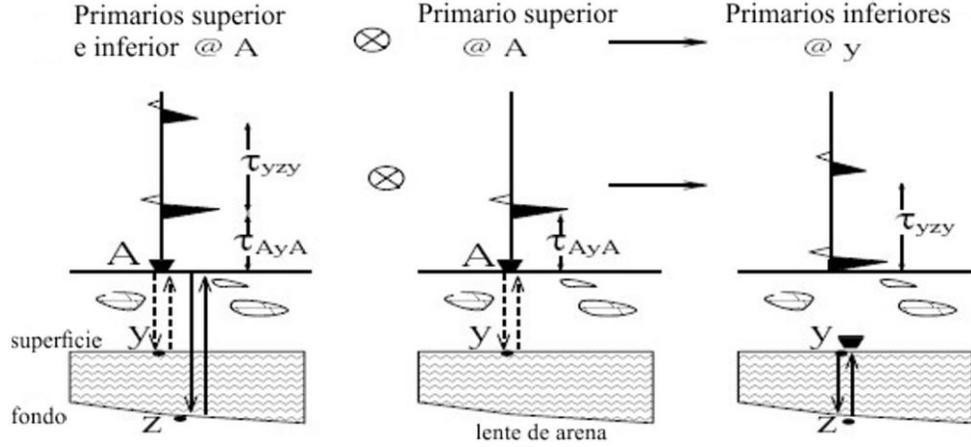


Figura 3.10. Desplazando en tiempo la reflexión en el panel izquierdo por τ_{AyA} obtendremos la traza en el panel derecho. La operación de corrección por desplazamiento en tiempo (time-shift) es aproximadamente el mismo que la correlación entre las trazas de la izquierda y del centro. Tomado y editado de Schuster (2008).

La transformada de Fourier de $d(\mathbf{A}, t|\mathbf{A}, 0)$ es igual a:

$$D(\mathbf{A}|\mathbf{A}) = \frac{1}{2\pi} [e^{i\omega\tau_{AyA}} + e^{i\omega\tau_{AzA}}] \quad (3.5)$$

donde $D(\mathbf{A}|\mathbf{A})$ es el espectro de Fourier del sismograma $d(\mathbf{A}, t|\mathbf{A}, 0)$ con la variable de frecuencia angular eliminada. Desplazando en tiempo el sismograma por τ_{AyA} equivale a multiplicar el espectro $D(\mathbf{A}|\mathbf{A})$ por $e^{i\omega\tau_{AyA}}$ obteniendo así el espectro $D(\mathbf{A}|\mathbf{A})' = D(\mathbf{A}|\mathbf{A})e^{-i\omega\tau_{AyA}} = [1 + e^{i\omega(\tau_{AzA} - \tau_{AyA})}] / (2\pi)$. Ahora, calculamos la intensidad ponderada o espectro de magnitud cuadrado de $D(\mathbf{A}|\mathbf{A})'$ como:

$$\begin{aligned} 4\pi^2 |D(\mathbf{A}|\mathbf{A})'|^2 &= 4\pi^2 D(\mathbf{A}|\mathbf{A})' D(\mathbf{A}|\mathbf{A})'^* = \left| 1 + e^{i\omega(\tau_{AzA} - \tau_{AyA})} \right|^2 \\ &= 2 + 2\cos\left(\omega(\tau_{AyA} - \tau_{AzA})\right) \\ &= 2 + 2\cos(\omega\tau_{zyz}) \end{aligned} \quad (3.6)$$

donde el tiempo de viaje vertical de ida y regreso en el lente es $\tau_{zyz} = 2|z - y|/v$, v representa la velocidad de la onda P.

El interferograma espectral $|D(\mathbf{A}|\mathbf{A})'|^2$ en la ecuación (3.6) solo depende del tiempo de tránsito a través del lente de arena lo que indica que será sensible a cualquier irregularidad en la forma del lente

de arena y cinemáticamente equivale a uno registrado con una fuente y receptor reubicados en la parte superior del lente de arena.

Mejor aún que desplazar en tiempo cada traza por τ_{AyA} , se pueden auto-correlacionar las trazas para remover los estáticos de la sobrecarga. De la ecuación (3.6), la transformada de Fourier ponderada de la función de auto-correlación en tiempo $\mathbf{d}(\mathbf{A}, \mathbf{t}|\mathbf{A}, \mathbf{0}) \otimes \mathbf{d}(\mathbf{A}, \mathbf{t}|\mathbf{A}, \mathbf{0})$ es el espectro de magnitud cuadrada:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \mathcal{F}(\mathbf{d}(\mathbf{A}, \mathbf{t}|\mathbf{A}, \mathbf{0}) \otimes \mathbf{d}(\mathbf{A}, \mathbf{t}|\mathbf{A}, \mathbf{0})) &= D(\mathbf{A}|\mathbf{A})D(\mathbf{A}|\mathbf{A})^*, \\ &= |e^{i\omega\tau_{AyA}} + e^{i\omega\tau_{AzA}}|^2 \\ &= 2 + 2\cos(\omega\tau_{yzy}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

que es igual al resultado obtenido en la ecuación (3.6) para el cuadrado del espectro de las trazas desplazadas en tiempo. Así, la auto-correlación de las trazas equivale a remover las distorsiones y reubicar la fuente y los receptores justo encima del cuerpo de interés (Schuster, 2008).

➤ Funciones de Green.

La función de Green en 3D es la respuesta impulsiva puntual de un medio acústico que satisface la ecuación de Helmholtz 3D para un medio acústico lineal y arbitrario con densidad constante (Morse y Feshbach, 1953, citado por Schuster, 2008):

$$(\nabla^2 + k^2)G(\mathbf{g}|\mathbf{s}) = -\delta(\mathbf{s} - \mathbf{g}), \quad (3.8)$$

Con $k = \omega/v(\mathbf{g})$, la diferenciación es con respecto a \mathbf{g} y $\delta(\mathbf{s} - \mathbf{g}) = \delta(x_s - x_g)\delta(y_s - y_g)\delta(z_s - z_g)$. Resolviendo esta ecuación encontramos dos soluciones independientes: una función de Green entrante (acausal) $G(\mathbf{g}|\mathbf{s})^*$ y una función de Green emergente (causal) $G(\mathbf{g}|\mathbf{s})$, dada por:

$$G(\mathbf{g}|\mathbf{s}) = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-ikr}}{r}, \quad (3.9)$$

con $e^{-i\omega t}$ asumida como el kernel de la transformada inversa de Fourier, el número de onda, $k = \omega/v$, $r = |\mathbf{g} - \mathbf{s}|$ y $1/r$ representa la dispersión geométrica. El principio de reciprocidad nos dice que la fuente y el receptor pueden intercambiarse, es decir, $G(\mathbf{g}|\mathbf{s}) = G(\mathbf{s}|\mathbf{g})$.

La función de Green asintótica de alta frecuencia para una distribución de velocidad suave está dada como (Bleistein et al., 2001, citado por Schuster, 2008).

$$G(\mathbf{g}|\mathbf{s}) = A(\mathbf{g}, \mathbf{s})e^{-i\omega T_{gs}}, \quad (3.10)$$

donde $A(\mathbf{g}, \mathbf{s})$ son los efectos de la dispersión geométrica y es una solución a la ecuación de transporte y T_{gs} es el tiempo de viaje para una onda propagándose de \mathbf{s} a \mathbf{g} (Schuster, 2008).

➤ **Ecuación de reciprocidad del tipo de convolución.**

Sea un medio acústico 3D donde $G(\mathbf{x}|\mathbf{A})$ son interpretadas como ondas sísmicas excitadas por una fuente puntual en \mathbf{A} y registrado en \mathbf{x} dentro de V . Las ecuaciones del Helmholtz,

$$(\nabla^2 + k^2)G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) = -\delta(\mathbf{x} - \mathbf{A}), \quad (3.11)$$

$$(\nabla^2 + k_0^2)G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B}) = -\delta(\mathbf{x} - \mathbf{B}), \quad (3.12)$$

donde $k = \omega/v(\mathbf{x})$, $k_0 = \omega/v_0(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} \in V$ y $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in V$ son ubicaciones de fuentes puntuales interiores. Dentro del volumen de integración, $v(\mathbf{x}) = v_0(\mathbf{x})$ mientras que fuera $v(\mathbf{x}) \neq v_0(\mathbf{x})$. Al multiplicar la Ecuación (3.11) por $G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B})$ y la Ecuación (3.12) por $G(\mathbf{x}|\mathbf{A})$ y sustrayendo, tenemos

$$G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B})\nabla^2 G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) - G(\mathbf{x}|\mathbf{A})\nabla^2 G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B}) = G_0(\mathbf{x}|\mathbf{A})\delta(\mathbf{x} - \mathbf{B}) - G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B})\delta(\mathbf{x} - \mathbf{A}), \quad (3.13)$$

para toda \mathbf{x} dentro del volumen de integración. Usando la regla de la cadena para la diferenciación, obtenemos

$$G(\mathbf{x}|\mathbf{A})\nabla^2 G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B}) = \nabla \cdot [G(\mathbf{x}|\mathbf{A})\nabla G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B})] - \nabla G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) \cdot \nabla G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B}), \quad (3.14)$$

$$G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B})\nabla^2 G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) = \nabla \cdot [G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B})\nabla G(\mathbf{x}|\mathbf{A})] - \nabla G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B}) \cdot \nabla G(\mathbf{x}|\mathbf{A}). \quad (3.15)$$

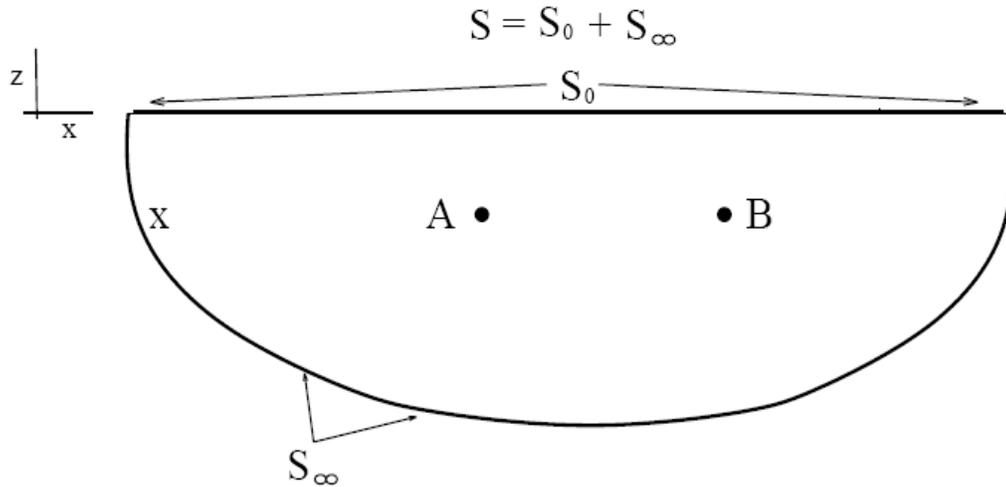


Figura 3.11.- Volumen arbitrario con el punto de integración x a lo largo de la superficie denotada por $S = S_0 + S_\infty$. El volumen limitado por S se denota por V . Tomado y editado de Schuster (2008).

Insertando estas identidades en la Ecuación (3.8), integrando sobre el volumen delimitado por la frontera $S = S_0 + S_\infty$, y usando el teorema de Green

$$\int_V \nabla^2 f(\mathbf{x}) dx^3 = \int_S \nabla f(\mathbf{x}) \cdot \hat{\mathbf{n}} dx^2, \quad (3.16)$$

donde $\hat{\mathbf{n}}$ es el vector normal a la frontera. La ecuación del tipo de convolución es:

$$G(\mathbf{B}|\mathbf{A}) - G_0(\mathbf{A}|\mathbf{B}) = \int_S \left[G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B}) \frac{\partial G(\mathbf{x}|\mathbf{A})}{\partial n_x} - G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) \frac{\partial G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B})}{\partial n_x} \right] d^2x, \quad (3.17)$$

$\partial G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B})/\partial n_x = \hat{\mathbf{n}} \cdot \nabla G_0(\mathbf{x}|\mathbf{B})$ y \mathbf{B} no está sobre la frontera. Si cualquier punto está sobre la frontera entonces una contribución de valor principal debe incorporarse en el lado izquierdo. Se justifica el carácter convolutivo de esta ecuación porque está compuesta de productos espectrales, que en el dominio del tiempo son convoluciones.

Los integrandos en la Ecuación (3.16) son producto de las funciones de Green de una fuente monopolo $G(\mathbf{x}|\mathbf{A})$ y una dipolo $dG/dn \approx [G(\mathbf{x} + d\mathbf{n}|\mathbf{A}) - G(\mathbf{x}|\mathbf{A})]/|dn|$ lo que significa que las fases espectrales se suman.

$$G dG/dn = |G dG/dn| e^{i(\phi_G + \phi_{dG})}, \quad (3.18)$$

Es por esto que el producto monopolo-dipolo predice eventos con tiempos de viaje y trayectorias mayores comparadas con los arribos asociados con cualquiera de las funciones de Green, monopolo o dipolo.

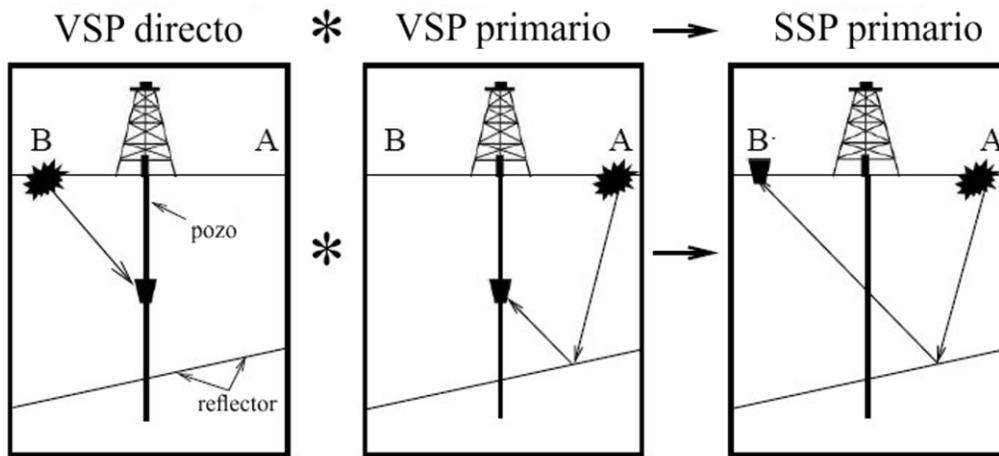


Figura 3.12. Convolución de una traza directa con una reflexión primaria para producir cinemáticamente una reflexión primaria. Tomado y editado de Schuster (2008).

En la figura anterior se demuestra que la convolución de una reflexión primaria con una onda directa de VSP produce una reflexión SSP primaria, llamada transformación $VSP \rightarrow SSP$ del tipo convolución.

Para el caso de una superficie de integración infinita, $v(\mathbf{x}) = v_0(\mathbf{x})$ y $G_0(\mathbf{x}|\mathbf{A}) = G(\mathbf{x}|\mathbf{A})$, la contribución integral es cero. Esto demuestra la propiedad para cualquier distribución de velocidad que también se cumple para funciones conjugadas.

$$G(\mathbf{B}|\mathbf{A}) = G(\mathbf{A}|\mathbf{B}) \quad (3.19)$$

Los métodos de modelación directa tienen su fundamento en la ecuación del tipo de convolución. Tales métodos son el Método del Elemento Frontera (Brebbia, 1978, citado por Schuster, 2008), el modelado de Kirchhoff (Hilterman, 1970; Eaton, 2006, citados por Schuster, 2008), o la aproximación de dispersión simple conocida como Modelación Directa de Borm (Schuster, 2008).

➤ **Ecuación de reciprocidad del tipo de correlación.**

Tomando en cuenta el mismo medio mostrado en la figura 1, se define la ecuación de reciprocidad del tipo de correlación:

$$(\nabla^2 + k^2)G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) = -\delta(\mathbf{x} - \mathbf{A}), \quad (3.20)$$

$$(\nabla^2 + k_0^2)G(\mathbf{x}|\mathbf{B}) = -\delta(\mathbf{x} - \mathbf{B}), \quad (3.21)$$

con los mismos parámetros definidos previamente. Multiplicando la Ecuación (3.12) por $G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^*$ y la Ecuación (3.13) por $G(\mathbf{x}|\mathbf{A})$ y restando tenemos

$$G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^* \nabla^2 G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) - G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) \nabla^2 G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^* = G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{B}) - G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^* \delta(\mathbf{x} - \mathbf{A}), \quad (3.22)$$

para toda \mathbf{x} dentro del volumen de integración. Usando la regla de la cadena para la diferenciación:

$$G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^* \nabla^2 G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) = \nabla \cdot [G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^* \nabla G(\mathbf{x}|\mathbf{A})] - \nabla G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^* \cdot \nabla G(\mathbf{x}|\mathbf{A}), \quad (3.23)$$

$$G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) \nabla^2 G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^* = \nabla \cdot [G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) \nabla G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^*] - \nabla G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) \cdot \nabla G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^*, \quad (3.24)$$

Insertando estas identidades en la Ecuación (3.22), integrando sobre el volumen delimitado por la frontera $S = S_0 + S_\infty$, y usando el teorema de Gauss obtenemos la ecuación de reciprocidad del tipo de correlación:

$$G(\mathbf{B}|\mathbf{A}) - G(\mathbf{A}|\mathbf{B})^* = \int_S \left[G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^* \frac{\partial G(\mathbf{x}|\mathbf{A})}{\partial n_x} - G(\mathbf{x}|\mathbf{A}) \frac{\partial G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^*}{\partial n_x} \right] d^2 x, \quad (3.25)$$

donde $\partial G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^* / \partial n_x = \hat{\mathbf{n}} \cdot \nabla G(\mathbf{x}|\mathbf{B})^*$ y \mathbf{B} y \mathbf{A} no están sobre la frontera. Se debe agregar un valor de contribución principal si cualquier punto está sobre la frontera. En esta ecuación los integrandos se componen de la multiplicación de un espectro por el conjugado de otro los cuales se convierten en correlaciones bajo la transformada inversa de Fourier (Schuster, 2008).

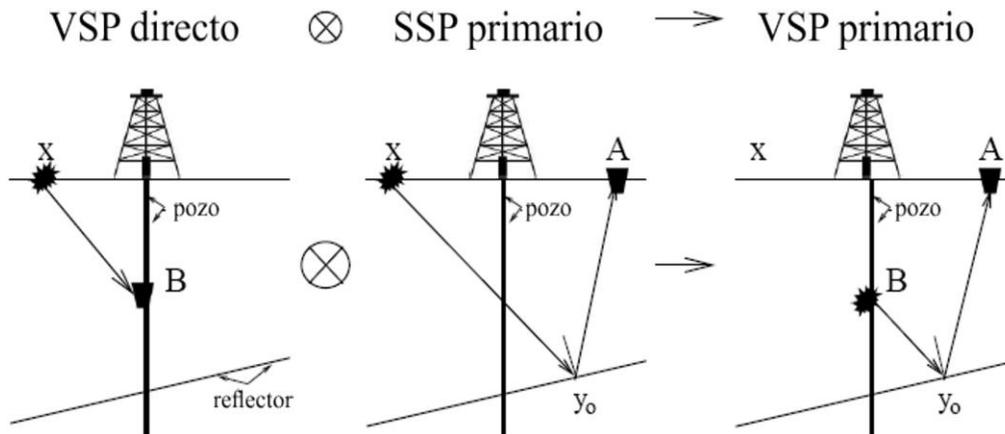


Figura 3.13. Correlación entre la onda directa de una traza VSP con una reflexión primaria SSP para producir una reflexión primaria VSP en la extrema derecha. Tomado y editado de Schuster (2008).

La ecuación (3.25) (de Hoop, 1995, citado por Schuster, G. T., 2008) es considerada como la ecuación gobernante de la interferometría acústica (Wapenaar, 2004, citado por Schuster, 2008) y forma su base fundamental. Se puede demostrar que esta ecuación para un medio con densidad heterogénea es la misma agregando el término $1/\rho(\mathbf{x})$ multiplicado por el integrando (Wapenaar y Fokkema, 2006, citado por Schuster, 2008).

Algunas propiedades útiles para la ecuación del tipo de correlación son:

1. El lado izquierdo de la Ecuación (3.25) puede reescribirse como $2iIm[G(\mathbf{B}|\mathbf{A})] = G(\mathbf{B}|\mathbf{A}) - G(\mathbf{A}|\mathbf{B})^*$. Aplicando la transformada inversa de Fourier obtenemos $g(\mathbf{B}, t|\mathbf{A}, 0) - g(\mathbf{B}, -t|\mathbf{A}, 0)$. La función causal de Green satisface $g(\mathbf{B}, t|\mathbf{A}, 0) = 0$ para $t < 0$ y la acausal satisface $g(\mathbf{B}, -t|\mathbf{A}, 0) = 0$ para $t \geq 0$ que significa que podemos recuperar la función causal de Green evaluando $g(\mathbf{B}, t|\mathbf{A}, 0) - g(\mathbf{B}, -t|\mathbf{A}, 0)$ para $t \geq 0$.
2. La ecuación de correlación-reciprocidad se caracteriza por el producto de una función de Green conjugada y una no conjugada. Es por esto que las fases en el producto monopolo-dipolo se sustraen y predicen eventos con tiempos de viaje y trayectorias menores.
3. Para la ecuación del tipo de convolución, la integración sobre la superficie en el infinito tiende a cero por la condición de radiación fuente de Somerfeld. Argumento que no se puede aplicar a la ecuación del tipo correlación ya que los integrandos son productos de funciones de Green tanto causales como acausales. Matemáticamente esto es equivalente a decir que un medio suficientemente heterogéneo induce que el producto monopolo-dipolo decaiga más rápido que el término de superficie de área $O(r^2)$. Por esto, la condición de anti-radiación de Wapenaar esta definida para desvanecerse de la integral de reciprocidad -correlación en el infinito debido a la fuerte dispersión en el medio.
4. Si \mathbf{A} esta en la superficie libre mientras que \mathbf{B} a lo largo de un pozo vertical, entonces las funciones de Green en la Ecuación (3.25) se pueden interpretar como funciones de Green de VSP o SSP.

Interferometría Sísmica Multidimensional.

El concepto de reubicación mediante correlación es también valido para datos con offset diferente de cero (Figura 3.13), a excepción de que se utilizan preferentemente las trazas VSP cross-correlacionadas que las auto-correlacionadas. Aquí, la correlación del arribo directo $d(\mathbf{A}, t|\mathbf{x}, 0)$ en \mathbf{A} con la reflexión "fantasma" $d(\mathbf{B}, t|\mathbf{x}, 0)^{ghost}$ registrado en \mathbf{B} exactamente cancela el tiempo de viaje del "fantasma" a través de la trayectoria de rayo común $\mathbf{x}\mathbf{A}$ resultando en la reflexión sísmica primaria virtual de superficie cuya trayectoria se ilustra en el panel izquierdo de la Figura 3.13. De esta forma la fuente y los receptores están ubicados virtualmente sobre la superficie e iluminan mucho mejor la Tierra comparado con el mapeo VSP estándar.

La posición de la fuente \mathbf{x} en la figura anterior se ubica de manera conveniente para que el rayo directo $\mathbf{x}\mathbf{A}$ coincida con la primera rama del rayo fantasma especular, llamada posición de fuente estacionaria. Sumando las trazas correlacionadas garantizamos que esta posición siempre sea encontrada:

$$d(\mathbf{B}, t|\mathbf{A}, 0) \approx \sum_{\mathbf{x} \in S_{well}} d(\mathbf{A}, t|\mathbf{x}, 0) \otimes d(\mathbf{B}, t|\mathbf{x}, 0)^{ghost} \quad (3.26)$$

donde la ondícula de fuente se asume impulsiva. Para asegurar la correcta aplicación de desplazamiento en tiempo se realiza la suma con aperturas de fuente-receptor bastante amplias para transformar la reflexión fantasma especular en una reflexión primaria en **B**. Cualquier arribo incorrectamente desplazado en tiempo tenderá a cancelar la suma ya que generalmente está fuera de fase con algún otro, que muestra que las contribuciones de las correlaciones no estacionarias cancelarán asintóticamente a otra correlación.

Procesamiento.

Para experimentos sobre un medio con muchas capas, el procesamiento consiste de los siguientes pasos:

1. Filtrado de las correcciones estáticas de ruido y de la superficie cercana.
2. Reconstrucción de las trazas de conjunto de disparo común (CSG, por sus siglas en inglés) en conjuntos de punto-medio común (CMG, por sus siglas en inglés) donde el par fuente-receptor de cada traza tiene la misma ubicación de punto-medio.
3. Las trazas en el CMG son desplazadas en tiempo para alinearlas con el evento de reflexión de offset cero (ZO, por sus siglas en inglés).
4. Apilar las trazas en el CMG desplazado en tiempo para formar una sola traza en la posición del punto medio y,
5. Repetir los pasos 3-4 para todos los CMG.

Si la reflectividad subterránea es compleja entonces los pasos 2-5 son omitidos y en su lugar se usa el algoritmo llamado migración sísmica (Schuster, 2008).

➤ **Mapeo sísmico.**

La metodología convencional para sísmica de reflexión consiste en estudiar las reflexiones de los contrastes de impedancia generados por fuentes de energía sísmica ubicadas en la superficie. El ruido ambiental presente en el subsuelo se refleja de la misma forma mediante contrastes de impedancia. El mapeo sísmico pasivo se basa en el hecho de que al cross-correlacionar las respuestas de transmisión de un medio, se puede reconstruir su respuesta de reflexión. En un modelo 1D de la Tierra, iluminado por ondas planas aleatorias desde abajo, la cross-correlación de trazas de ruido registradas sobre la superficie en dos puntos es igual que si registráramos teniendo un disparo en una ubicación y un receptor en la otra. Con datos reales podemos construir "sismogramas de pseudo-reflexión" a partir de ruido de fondo, que podrían ser procesados y usados para mapear cumpliendo con la conjetura de Claerbout (1968).

Las condiciones de mapeo de auto-correlogramas están diseñadas para migrar energía de reflexión primaria o las reflexiones fantasmas de la superficie libre. La principal ventaja es que no es necesario saber la ondícula de fuente. Un problema clave obteniendo una imagen precisa de migración es la estimación de un modelo de velocidad suficientemente preciso ya que puede conducir a imágenes de migración desenfocadas y en ocasiones inútiles. Si se provee un VSP, se puede mostrar que estos datos

pueden ser usados como funciones de Green naturales para superar los problemas del modelo de velocidades usando interferometría (Schuster, 2008).

Sísmica Mientras se Excava

4.1.-Introducción.

La técnica convencional de medición VSP implica altos costos y riesgos al momento de perforar ya que es necesario interrumpir la perforación. Se pueden emplear señales de ruido pasivo de fuentes desconocidas para el mapeo sísmico (Draganov et al., 2004). Monitorear en superficie estas señales producidas por la herramienta de corte al ir perforando como una fuente sísmica (drill-bit VSP) ayuda a superar estas dificultades y provee información valiosa en tiempo/profundidad. Se recopila información en el pozo, usando señales de referencia (piloto) y de geófono que serán correlacionadas (Poletto y Miranda, 2004).

De aquí se desprende la técnica Sísmica Mientras se Perfora (SWD) que utiliza el ruido de la herramienta de corte (broca) como una fuente sísmica durante la perforación de un pozo y mediante la correlación cruzada con señales piloto como referencia se crea un perfil sísmico vertical inverso (RVSP) (Rector y Marion, 1991; Poletto y Miranda, 2004, citados por Poletto y Petronio, 2006). Yu y Schuster (2006) discuten ampliamente sobre la migración de auto-correlogramas y cros-correlogramas de datos en superficie aplicados en perfiles sísmicos verticales inversos.

El éxito de la metodología de sísmica de broca mientras se perfora (drill-bit SWD), es un resultado del mejoramiento del método sísmico convencional con tiempos de inicio en cero. Para garantizar la medición pasiva continua en el desarrollo de la técnica, es fundamental establecer un método de adquisición y un sistema adecuado en la medición del ruido de la herramienta de corte con muestreos regulares en profundidad durante todas las fases de la perforación, para ello:

1. Se considera a un pozo operando como un ambiente complejo que al ser perforado determina con variaciones impredecibles los tiempos de adquisición de datos sísmicos.
2. No se pueden repetir mediciones en el mismo nivel de profundidad una vez que ha sido perforado.
3. Los datos sísmicos de broca son obtenidos muchas veces en condiciones ruidosas con cantidades significativas de contenido de frecuencias variable y su uso requiere un minucioso entendimiento y pruebas por parte de geofísicos y exploradores.

A pesar de estos retos, la técnica mientras se perfora presenta un valioso potencial en varios campos de aplicación ya que fue fundada para ser robusta. La disponibilidad de mediciones durante la perforación y de información multi-offset durante todas las fases de la perforación hace a la técnica

SWD muy conveniente por ser robusta ya que se obtienen datos en pseudo-tiempo real para predecir discontinuidades en la vecindad del entorno. Este análisis se ha hecho tanto en pozos geotérmicos como de petróleo y gas (Poletto y Miranda, 2004).

Tiempo real.

Adquirir información de inclinación, dirección y áreas vecinas a las paredes del pozo en tiempo real es factible gracias a técnicas que emplean registros sísmicos adquiridos durante la perforación (LWD, por sus siglas en inglés). Sin embargo, esta información no contiene mediciones sísmicas de reflexión y solo describe la formación adyacente que puede o no asemejarse al volumen sísmico en estudio.

Los métodos de adquisición de datos sísmicos durante la perforación proveen información de la relación tiempo-profundidad en tiempo real y permite a las compañías operadoras actualizar sus modelos de velocidad para revisar frecuentemente las profundidades objetivo e identificar riesgos en la perforación y minimizar las incertidumbres al determinar la posición de la barrena en la sección sísmica de superficie.

La técnica Mediciones Sísmicas Mientras se Perfora (SMWD, por sus siglas en inglés) emplea una herramienta LWD que contiene sensores sísmicos, una fuente sísmica de superficie y un sistema de transmisión por telemetría. Se genera energía con una fuente sísmica de superficie convencional (p.ej. un cañón de aire). La herramienta se coloca en el arreglo de fondo de pozo (BHA, por sus siglas en inglés) para registrar las ondas sísmicas directas y reflejadas. Se activa la fuente en momentos de inactividad en las operaciones de perforación. Los receptores de la herramienta Seismic-MWD forman parte de la sarta de perforación y así el acoplamiento con la formación depende de la desviación del pozo, la cual se dificulta en pozos verticales y entubados. Para estos se recomienda el uso de hidrófonos.

Las señales sísmicas se reciben en el pozo por la herramienta de manera sincronizada, previa configuración antes de ser bajada y se procesan en el fondo del mismo para determinar los tiempos críticos de los primeros arribos o de los tiros de prueba de velocidad. La rutina de grabación contempla los tiempos de transmisión de datos, así como la cantidad de disparos. Las señales sísmicas provenientes de la fuente se almacenan en memoria para su posterior procesamiento y así generar imágenes VSP. En superficie, la relación tiempo profundidad obtenida en tiempo real se emplea para ubicar la barrena en la imagen sísmica de superficie.

El uso de geófonos multicomponente en la herramienta Seismic-MWD permite obtener datos con los cuales determinar la dirección de propagación de las ondas sísmicas. Así también, estos datos abren la posibilidad de procesar ondas de corte con sus numerosas aplicaciones (Breton et al., 2002).

4.2.-Definición SWE.

Para realizar la conversión de tiempo a profundidad sin datos de pozo es necesario establecer modelos de velocidad a partir de parámetros de procesamiento de datos sísmicos. Sin embargo, en presencia de irregularidades geológicas, pueden producirse errores de gran magnitud en el cálculo de velocidades que deben ser promediadas a lo largo de grandes extensiones acarreado así mayores imprecisiones. Resulta de gran ayuda identificar y aislar fallas que no proveen sellos porque pueden actuar como conductos para la migración de los fluidos y de la presión. En pozos profundos la identificación precisa de los riesgos de perforación permite realizar pozos con menos revestimientos. Para una imagen sísmica detallada se adquieren perfiles sísmicos verticales con cable eléctrico que generan datos de mayor resolución, menor nivel de ruido con información valiosa para la perforación de pozos vecinos. Pero en cualquiera de estos casos, es necesario detener la perforación para bajar el cable, lo que significa riesgos, ineficiencia y costos de operación (Breton et al., 2002).

Recientemente en la industria de la excavación y construcción de túneles se han implementado experimentos para obtener mediciones sismológicas empleando la energía generada por diferentes sistemas de excavación como son las tuneladoras (TBM), explosivos, rozadoras y jumbos y de esta manera proveer de información oportuna delante del túnel. Dicha información resulta de fundamental importancia ya que mediante una correcta interpretación se pueden anticipar eventualidades geológicas y así realizar los trabajos con mayor eficiencia.

Breve descripción de la metodología Sísmica Mientras se Perfora.

Los datos de sísmica mientras se perfora pueden ser adquiridos tendiendo una o más líneas de receptores y varios sensores piloto diseñados para registrar el ruido in situ y la señal producida por la herramienta de corte sin el efecto de filtrado producido por las formaciones atravesadas. Una buena configuración geométrica de adquisición asegurará la confiabilidad de los datos adquiridos:

1. Las trazas de geófonos están ubicadas a lo largo de líneas sísmicas tendidas en la vecindad de los pozos en la dirección del buzamiento de las estructuras geológicas de interés con un offset suficiente desde el pozo.
2. El offset máximo es elegido en relación con la profundidad del objetivo y puede ser de más de 3 Km.
3. La señal puede ser muestreada cada 10 o 20 [m], con intervalos regulares de penetración, con un control continuo de las condiciones de perforación y calidad de la señal. Esto es hecho para eliminar degradación o pérdida de datos.

Se realiza un preprocesamiento basado en la síntesis de una señal piloto que representa la señal emitida por la herramienta de corte. Correlacionando esta señal con aquellas registradas con los geófonos y apilándolas obtenemos una relación a un nivel de profundidad dado. Cuando la señal piloto es medida en superficie lejos de la fuente de la herramienta de corte, el retraso se agrega a los tiempos de correlación a fin de obtener el tiempo cero correcto de la señal que viaja a través del terreno. Para obtener señales sísmicas con una alta relación señal-ruido se adquieren y procesan gran cantidad de datos crudos usando largos tiempos de monitoreo. Con esta configuración, se usan sensores superficiales en la torre de perforación, así como en la superficie para muestrear la señal de la herramienta de corte. Una estación de trabajo es usada para el procesado, control de calidad y manejo de datos.

Los datos contienen ruido ambiental coherente que es removido mediante el uso de técnicas de filtrado multicanal, usando las trazas medidas por sensores de ruido a fin de identificar sus características y así poder removerlo (Rector, 1990; Poletto et al., 1991; Poletto et al., 1996 y Poletto et al., 2000, citados por Poletto y Miranda, 2004).

Actualmente se debe tener un completo control de las operaciones de perforación debido a la complejidad de la fuente broca y el pre-procesado que es realizado automáticamente por el sistema. Posteriormente los datos son sometidos a un mayor procesado e interpretación. Esto permite a los geofísicos y perforadores tomar oportunamente decisiones útiles para la exploración y la perforación. La principal información obtenida permite la calibración puntual del revestimiento y la dirección de los parámetros de perforación (Poletto y Miranda, 2004).

Túneles.

En la excavación de túneles, este enfoque ha encontrado una amplia oportunidad de desarrollo mediante la interferometría de autocorrelogramas usando el ruido producido por las maquinas tuneladoras (TBM). Para optimizar la excavación mecánica y trabajar con seguridad, es necesario estimar la geología del medio circundante. La TBM produce ondas elásticas (señales) mientras se excava, información útil para predecir la geología delante del frente de excavación.

El término original es "perforar" por haber sido acuñado en la exploración petrolera, pero para el caso de túneles se emplea "excavar" debido a las considerables cantidades de material que se extrae. El enfoque empleado en esta metodología es el de un VSP horizontal en el que los arribos directos y reflejados que se registran son similares a los de un VSP de pozo. La geometría del túnel, similar a la de un Perfil Sísmico Vertical Inverso (RVSP) usando una broca, hace posible registrar ondas sísmicas transmitidas delante del frente del túnel y aquellas reflejadas desde la región entre el frente y la salida proyectada del túnel. Al mismo tiempo, arribos directos y reflejados son registrados a lo largo del túnel y fuera de la entrada del túnel.

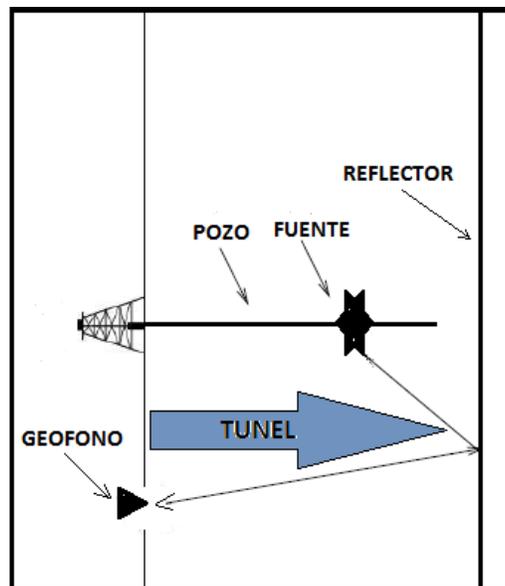


Figura 4.1. El enfoque empleado en la exploración hacia el frente de un túnel es el de un estudio VSP realizado en forma horizontal.

4.3.-Metodología sísmica mientras se excava.

En el siguiente desarrollo se empleará el termino excavar en lugar de perforar y en él se incluirán los diferentes métodos investigados. Actualmente se han desarrollado variadas técnicas de registro, procesamiento e interpretación de señales obtenidas durante la excavación de túneles. La técnica Sísmica de Túnel Mientras se Perfora (TSWD, por sus siglas en inglés) depende de una geometría en la que las ondas transmitidas delante del frente del túnel pueden ser registradas por sensores desplegados en la cara frontal del túnel. Estas ondas son transmitidas desde el frente de excavación de la TBM hacia un receptor posicionado típicamente en la salida proyectada del túnel. Al mismo tiempo, las ondas directas y reflejadas que van de regreso son registradas a lo largo del túnel y en la superficie externa en algún punto cerca de la entrada principal del túnel. En un estudio TSWD se obtienen diferentes productos geofísicos y suelen caracterizar la configuración geológica del túnel (Petronio et al., 2003).

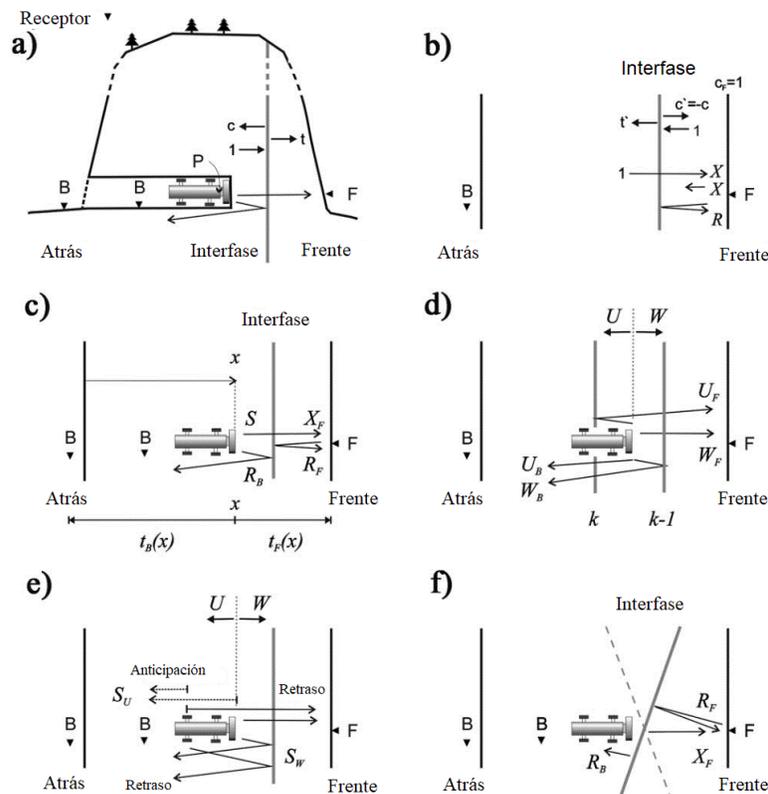


Figura 4.2. a) Modelo TSWD con ondas transmitidas y reflejadas. Interfaz con coeficientes de transmisión y reflexión t y c respectivamente. Sensor piloto P, estaciones frontal y trasera, F y B. b) Campo de ondas usado para obtener reflexiones de onda R de la transmisión X . c) Modelo TSWD, con ondas transmitidas (X_F). El sismograma de reflexión R_F se calcula auto-correlacionando X_F . d) Eventos hacia delante W y hacia atrás U en la geometría TSWD. e) La dimensión de la fuente de la TBM se extiende en el espacio a lo largo del eje del túnel de manera que estas dos señales sean diferentes. f) Inclinación de capas delante de la cara del túnel (Tomado y editado de Petronio et al., 2003).

Los perfiles TSWD se obtienen muestreando las señales de la TBM a intervalos regulares de espacio mientras esta avanza y los arribos directos y reflejados se producen desde las interfaces delante del frente de excavación. Generalmente se asume que las fuentes sísmicas y los receptores se limitan al frente del túnel en un medio sin pérdidas para un túnel recto excavado en una montaña infinitamente alta y una

buena opción para reconstruir la propagación de rayos podría ser el mapeo sísmico mediante migración por interferometría o la llamada migración de Fresnel que da una mejor resolución espacial. Para obtener dichos perfiles se construye el sismograma de reflexión a partir del sismograma de transmisión combinando las ondas transmitidas y reflejadas, tomando en cuenta lo siguiente:

1. Se usan los resultados basados en la ecuación de Kunetz, que usa el “autocorrelograma” de la onda transmitida para medir la reflectividad en la superficie (Claerbout, 1968, citado por Poletto y Petronio, 2006).
2. Se estiman los coeficientes de reflexión a lo largo de la trayectoria del túnel y la variación de las amplitudes transmitidas escaladas por la magnitud de la fuente

Sin embargo, un problema fundamental es que los reflectores (zonas de falla o fronteras petrológicas) solo son mapeadas en su intersección con el eje del túnel si son ortogonales. Si los reflectores son oblicuos tendrían que ser extrapolados para estimar su intersección con el eje del túnel suponiendo una continuación plana. Esto impone mayor incertidumbre en la predicción si el carácter y la orientación de la falla cambian. Otra limitación es el conocimiento del campo de velocidades sísmicas enfrente del túnel. Es necesario entender la complejidad que existe en la propagación de una onda sísmica desde el túnel hacia y alrededor del revestimiento.

La señal cuasi-continua generada por la herramienta de corte es transformada a un sismograma normal mediante el uso de una señal piloto medida directamente en la fuente, con las siguientes consideraciones:

- El uso de la herramienta de corte como fuente sísmica provee suficiente energía en una amplia banda de frecuencia. Esto garantiza un monitoreo continuo con la ubicación de la fuente cerca del frente del túnel.
- Despliegado de geófonos de tres componentes en huecos (barrenos) a menos de 100 m detrás del frente a fin de detectar reflexiones relativamente débiles inferiores al alto nivel de ondas sísmicas directas o dispersas en el campo cercano de la fuente (herramienta de corte).
- Los huecos deben tener suficiente profundidad para asegurar un viaje sin disturbios de las ondas de cuerpo a través de la masa de roca. Al plantar geófonos más profundos se mejora la razón señal/ruido y ubicarlos lejos del frente del túnel permite eliminar interrupciones en las labores de excavación.
- El propósito principal de procesamiento es encaminar señales desde su primera aparición en los datos sísmicos hasta su intersección con el eje del túnel reduciendo así las incertidumbres mencionadas antes.

Logística y procesamientos básicos.

Asumiendo que la señal del sensor piloto se propaga hacia el eje del soporte principal, se colocan receptores en la parte no rotatoria del soporte. Se colocan los demás sensores en barrenos perforados en las paredes laterales del túnel a separaciones constantes del frente del túnel y a un intervalo de muestreo recomendado de 1000 muestras por segundo.

De esta forma a continuación se muestra el flujo de trabajo basado en el enfoque de Poletto y Miranda (2004) el cual sigue un método estándar para obtener sismogramas interpretables basados en la correlación entre señales piloto-sensor usando datos tanto dentro del túnel como en la salida proyectada del mismo. El flujo de trabajo que siguen estos autores se indica en la Figura 4.3.

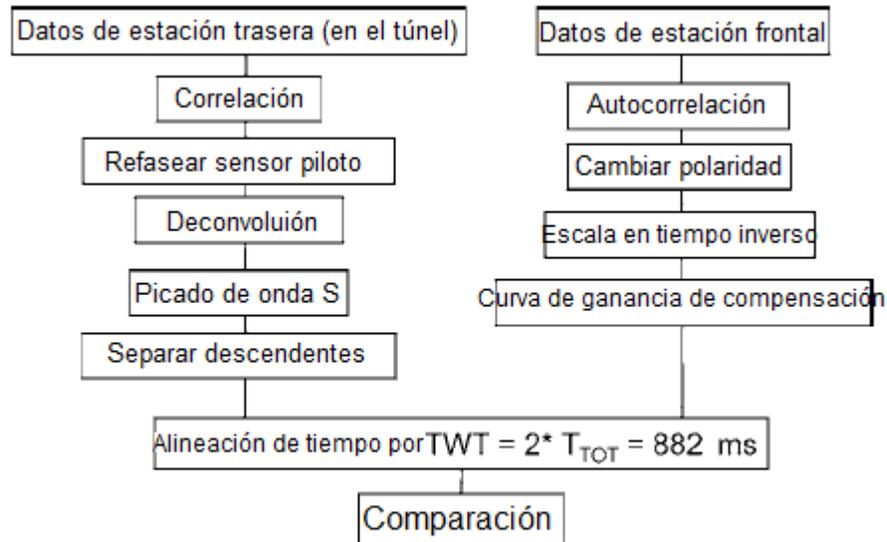


Figura 4.3. Diagrama de flujo de procesamiento. Una curva de ganancia se aplica para compensar por divergencia esférica y poder comparar los sismogramas delanteros y traseros. Tomado y editado de Poletto y Miranda (2004).

Zona de daño de excavación.

Comenzando desde una superficie libre, la velocidad de onda de cuerpo usualmente se incrementa. Las ondas superficiales con contenidos de frecuencias más altas tienen longitudes de onda más cortas que no penetran mucho en la formación (lejos de la superficie) y además viajan a la velocidad determinada por las propiedades elásticas cerca de la superficie. En contraste, las ondas con contenidos de frecuencias más bajas se caracterizan por longitudes de onda más grandes, que penetran más profundo en la formación y viajan a una velocidad que es más alta que las velocidades en la superficie. La propagación de ondas de superficie en un medio gradual causa diferentes velocidades de fase como una función de la frecuencia de excitación. En secciones de sismogramas registradas o modeladas, podemos observar las fases de la señal distanciándose mientras se propagan a través del medio que ocasionan deformaciones en las formas de onda.

Durante la construcción del túnel, el ambiente rocoso alrededor del túnel es significativamente alterado. Como consecuencia, una zona de roca quebrada es formada alrededor del túnel excavado, que es conocida como zona de daño de excavación (EDZ, por sus siglas en inglés). De acuerdo con suposiciones comunes sobre las dimensiones de la EDZ (Schuster et al., 2001; Borm et al., 2003, citados por Jetschny, 2010) esta se extiende dos veces el radio del túnel dentro de la formación circundante y es aproximadamente de una velocidad sísmica gradual. Las mediciones consideran la curvatura de la superficie de la pared del túnel con respecto a la longitud de onda de la onda TS. Las curvas de dispersión para los diferentes escenarios son calculadas a partir del espectro de potencia cruzado de dos trazas después de la transformación al dominio de las frecuencias.

Todos los escenarios causan que las ondas TS sean dispersivas. Por otra parte, y aunque las ondas TS muestran características tanto de ondas de cortante como de ondas compresionales, el comportamiento disperso está dominado por el gradiente de la velocidad de ondas de cortante. De acuerdo con la curva

de dispersión puede no haber diferencia significativa con solo un gradiente fuerte para el campo de velocidades de la onda P y sin gradiente para todos los demás. Se debe tener en mente siempre que un gradiente en el campo de velocidad de onda P siempre va acompañado de un gradiente en el modelo del campo de velocidades de la onda S. Muchas otras investigaciones en las propiedades de un EDZ son limitadas a mediciones del primer arribo (Jetschny, 2010).

Características de propagación de ondas en túnel.

Para investigar las características de propagación de las ondas de superficie de túnel (ondas TS) se han usado soluciones analíticas, así como resultados de cálculos numéricos de modelado en diferencias finitas. La solución analítica describe la propagación de ondas de superficie en coordenadas cilíndricas alrededor de un tubo vacío dentro de un espacio completamente homogéneo con diferentes órdenes de fuente (es decir monopolo, dipolo, etc.). Por lo tanto, podemos calcular el vector de velocidad y amplitud de una onda TS circular simétrica en el punto de excitación directamente en la pared del túnel para frecuencias de fuente específicas. Para el caso de modelado 3D en diferencias finitas, estos se calculan usando coordenadas cartesianas para una fuerza simple a lo largo del túnel con separaciones laterales y la distancia a la pared arbitrarias. Debido a la trayectoria helicoidal, estas ondas TS excitadas no son simétricas circularmente. Los cálculos con diferencias finitas son mayores a los de la solución analítica por lo que es preferible realizarlos para la solución analítica. Primero que nada, se obtiene la velocidad de fase de onda de superficie en el túnel v_{ts} como una función de la frecuencia para los modelos básicos de velocidad. En lugar de graficar la frecuencia se introduce una razón de la longitud de onda al diámetro del túnel ω que se calcula como:

$$\omega = \frac{\lambda}{d} = \frac{\lambda}{2r} = \frac{v_{ts}}{2rf} \quad (4.1)$$

La variable ω caracteriza tanto la velocidad de propagación como la excitación de las ondas TS. Las curvas de dispersión resultantes se normalizan con la onda S y se grafican contra la relación ω . Se usa una fuente de excitación de fuerza normal a la pared del túnel (fuente anular monopolo) la cual se representa regularmente por la función de Hankel de orden cero. Las gráficas resultantes muestran que incrementando ω la velocidad de la onda de superficie en el túnel converge a la velocidad de la onda S de la formación. A valores de ω pequeños se presentan amplitudes altas para las componentes radial y longitudinal del vector de excitación (A_r y A_x , respectivamente) además de que $A_r > A_x$. Un incremento en ω causa un decremento de amplitud en la dirección radial y longitudinal con convergencia a cero. La grafica de la amplitud implica que $A_r = A_x \rightarrow 0$ y $A_\phi = 0$. La solución analítica predice típicas ondas Rayleigh para $\omega < 0.6$ y ondas de superficie con amplitudes pequeñas y velocidad cercana a la de onda S para $\omega > 1.2$, que contribuye a las ondas S generadas por las fuentes. En definitiva, las ondas TS están compuestas por ondas S y ondas Rayleigh.

Por otro lado, la simulación mediante diferencias finitas arroja que no hay efectos de dispersión relacionada al medio. Encontramos dispersión relacionada al túnel debido a la relación del diámetro del túnel y la longitud de onda TS. La dispersión relacionada al túnel es menos efectiva que la dispersión relacionada al medio en muchos ambientes de túnel (Lüth et al., 2007; Malmgreen et al., 2007; Bohlen et al., 2007 citados por Poletto y Miranda, 2004).

Modelando las ondas TS usando una fuente de fuerza simple aplicada a un lado de la pared del túnel y registrando las velocidades de la partícula en el mismo lado (azimut idéntico) en lugar de directamente calcular la curva de dispersión, se filtran los datos modelados obteniendo dos conjuntos de datos con dos diferentes rangos de frecuencias de fuente. Desplazamos cada sismograma de traza por un retraso de tiempo de $\frac{s}{v_{red}}$, con s como la distancia a la fuente. La onda TS viaja a una velocidad idéntica a la de la onda S con rangos de frecuencia más bajos, incrementando la frecuencia decrece la velocidad de onda de superficie del túnel. La amplitud decae incrementando ω .

En general existe buena concordancia entre los dos enfoques al investigar los comportamientos de la amplitud y la velocidad de la onda TS. A altos valores de ω , tanto la solución analítica como los resultados de la modelación en diferencias finitas indican que $v_{ts} \rightarrow v_s$. En lugar de las ondas TS, las ondas S son excitadas a valores altos de ω . Disminuyendo ω resulta en la excitación de típicas ondas de superficie ($v_{ts} < v_s$ y amplitud significativa). Resulta claro que incluso las mediciones cuantitativas del decaimiento de amplitud y velocidad al incrementar ω son idénticas.

Patrón de radiación.

Tomando como base el estudio realizado por Gangi (1987) se ha establecido que las ondas tanto de cuerpo como de superficie dentro de un túnel se desplazan siguiendo patrones de radiación bien definidos. Los patrones descritos en este trabajo se enlistan a continuación en cinco tipos de fuentes:

1. Una fuente impulsiva puntual dirigida (vector fuerza) con dependencia en el tiempo (función-delta de Dirac).
2. Una fuente impulsiva de par de fuerzas (sin momento).
3. Una fuente puntual dirigida armónica en el tiempo.
4. Una fuente impulsiva distribuida con una fuerza normal uniforme sobre un círculo de radio a y
5. Una fuente impulsiva distribuida con una fuerza tangencial uniforme (con simetría axial) sobre el mismo círculo de radio a .

A continuación, se presentan únicamente las ecuaciones que describen las componentes de los patrones de radiación para los dos últimos tipos de fuente enlistados arriba que combinados, representan el comportamiento de una maquina TBM al ir avanzando. Los detalles del desarrollo matemático se pueden consultar en Gangi (1987).

➤ Respuestas de campo lejano para una fuente par de fuerzas (torque) distribuida sobre un plano circular.

Combinando los dos últimos tipos de fuente se puede obtener una buena aproximación a las fuerzas ejercidas por la herramienta de corte de una TBM las cuales se espera que sean tanto tangenciales como normales al frente de corte. Las fuerzas tangenciales son aquellas que permiten romper la roca o el suelo mientras la maquina rota. En este último apartado se analizarán las fuerzas tangenciales para cuya geometría tendrá la característica de que la fuerza ejercida sobre la superficie plana será en la dirección $\hat{\phi}$ y esta representada por:

$$\bar{F}(\bar{r}) = \hat{\phi}FH(a - \xi) \delta(n)/\pi a^2 \quad (4.2)$$

donde F es fuerza por unidad de área de la fuente, $H(a - \xi)$ es la función paso y $\delta(n)$ la función delta, con lo cual se asume un comportamiento impulsivo (dependiente del tiempo).

Evaluamos la única integral diferente de cero numéricamente ya que:

$$I_q^S(0, t; \theta = 0) = -\beta \int_{-\pi}^{\pi} \cos \psi d\Psi \equiv 0 \quad (4.3)$$

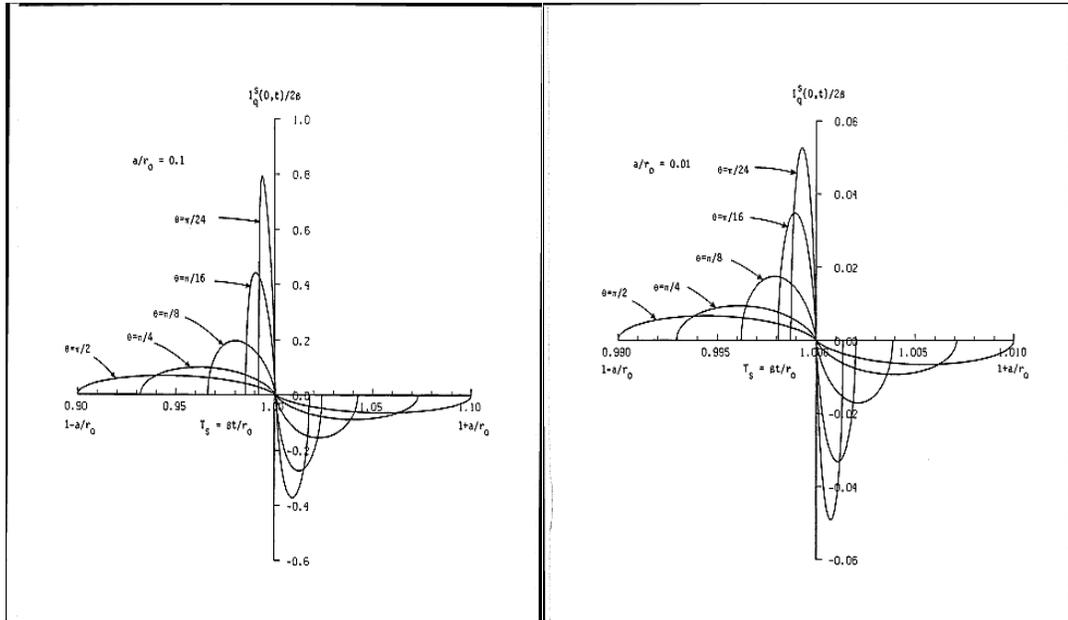


Figura 4.4.- Componente transversal de la onda S radiada para una fuente de torque uniformemente distribuida sobre un plano circular tanto para campo cercano como para campo lejano ($a/r_0 = 0.1$ y $a/r_0 = 0.01$). Tomado de Gangi (1987).

Teniendo en cuenta las mismas consideraciones, la respuesta de la onda P se representa mediante la integral que tampoco se puede evaluar en forma cerrada sino de forma numérica más que solo para $\theta = 0$.

$$I_q^P(0, t; \theta = 0) = (2a/r_0)\pi [T^2 - 1]^{1/2} / 2T^2 \quad (4.4)$$

expresión válida para:

$$1 \leq T \leq r_1/r_0 \quad (4.5)$$

de otra forma $I_q^P(0, t; \theta = 0) = 0$.

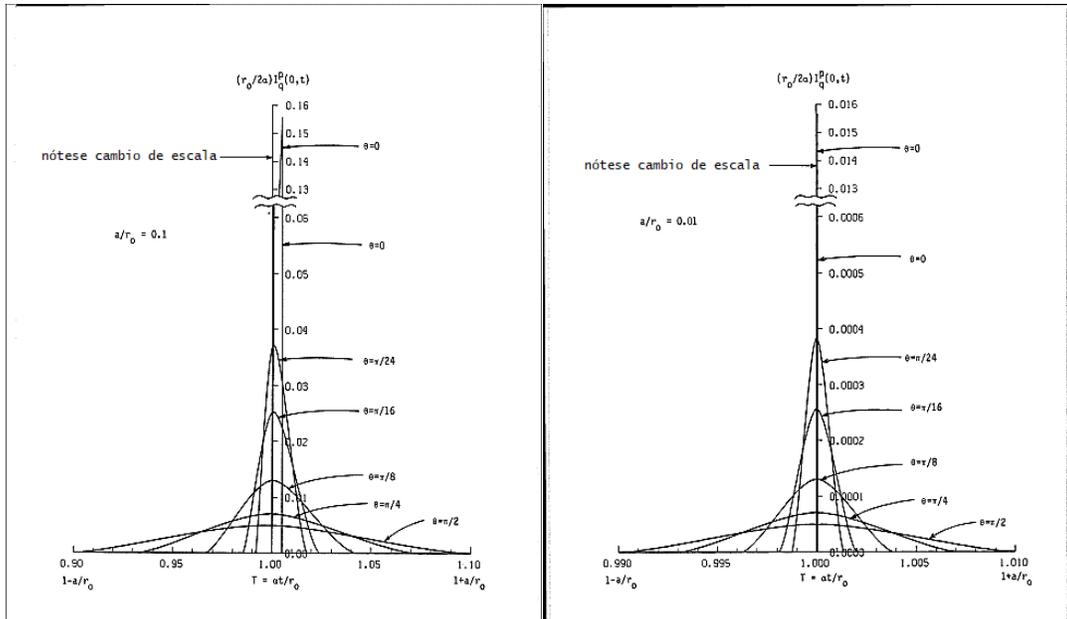


Figura 4.5.- Componente transversal de la onda P radiada para una fuente de torque uniformemente distribuida sobre un plano circular tanto para campo cercano como para campo lejano ($a/r_0 = 0.1$ y $a/r_0 = 0.01$). Tomado de Gangi (1987).

Con esto se termina el análisis realizado para los patrones de radiación del campo de ondas generado por una TBM dentro de un túnel generado por diferentes tipos de fuentes. De forma concluyente se asume que la mejor aproximación es combinar los dos tipos de fuentes mencionados al principio del apartado ya que se habla tanto de fuerzas ejercidas en dirección normal al frente de excavación por la maquinaria de empuje de la TBM como de fuerzas tangenciales (o de corte) ejercidas por el escudo de la misma “mientras” gira al ir devastando el material enfrente del túnel.

Avances en la experimentación

5.1.-Introducción.

La Secretaria de Comunicaciones y Transportes definió un sistema de corredores carreteros transversales como el de “Mazatlán-Matamoros”, que integra a Mazatlán, Durango, Torreón-Gómez Palacio, Saltillo, Monterrey, Reynosa y Matamoros. El proyecto que incluye solo el tramo Durango-Mazatlán consiste en la construcción de una autopista de cuota con dos carriles de circulación de 12.0 m de ancho de corona y una longitud de 230 km con 115 puentes, viaductos y pasos a desnivel, 61 túneles (de los cuales obtuvimos datos de experimentos sismológicos realizados en dos de ellos), incluyendo el puente Baluarte considerado uno de los puentes atirantado más largo.

La autopista Durango-Mazatlán permitirá a los usuarios atravesar la Sierra Madre Occidental con significativos aumentos de seguridad y reducción en tiempos de recorrido ya que ofrecerá una conexión directa de la región noroeste del país a la costa del Pacífico (SCT, 2012).

Zona de estudio.

La carretera Durango-Mazatlán atraviesa la Sierra Madre Occidental en una zona particularmente difícil, en la que se encuentran en funcionamiento 152 Km del Libramiento de Durango hasta el entronque de “El Salto” y de “La Guayanera” del Km 185 + 000 al Km 204 + 000, “El Zapotillo” y de “La Concordia” hasta Villa Unión” (zona donde se llevaron a cabo los experimentos de medición), en tramos de terreno plano y lomerío suave (SCT, 2012). Realizamos mediciones sismológicas en dos túneles: Cerro Los Becerros ubicado en el Km 152 + 345 y El Varal en el Km 159 + 654 sobre el trazado de la carretera. En la Tabla 5.1 se consigna la ubicación, longitud y radio de los túneles y en la imagen de la Figura 5.1 se muestra su ubicación exacta. Así mismo, en la imagen se da una noción del tipo de roca que atraviesa la carretera en el tramo comprendido entre los dos túneles.

Túnel	Latitud (°)	Longitud (°)	Extensión (m)	Radio (m)
Los Becerros	23.5639607	-105.7394997	354	11
El Varal	23.5194252	-105.7742390	310	9

Tabla 5.1.- Localización de los túneles Cerro Los Becerros y El Varal, así como su longitud total y radio de sección.

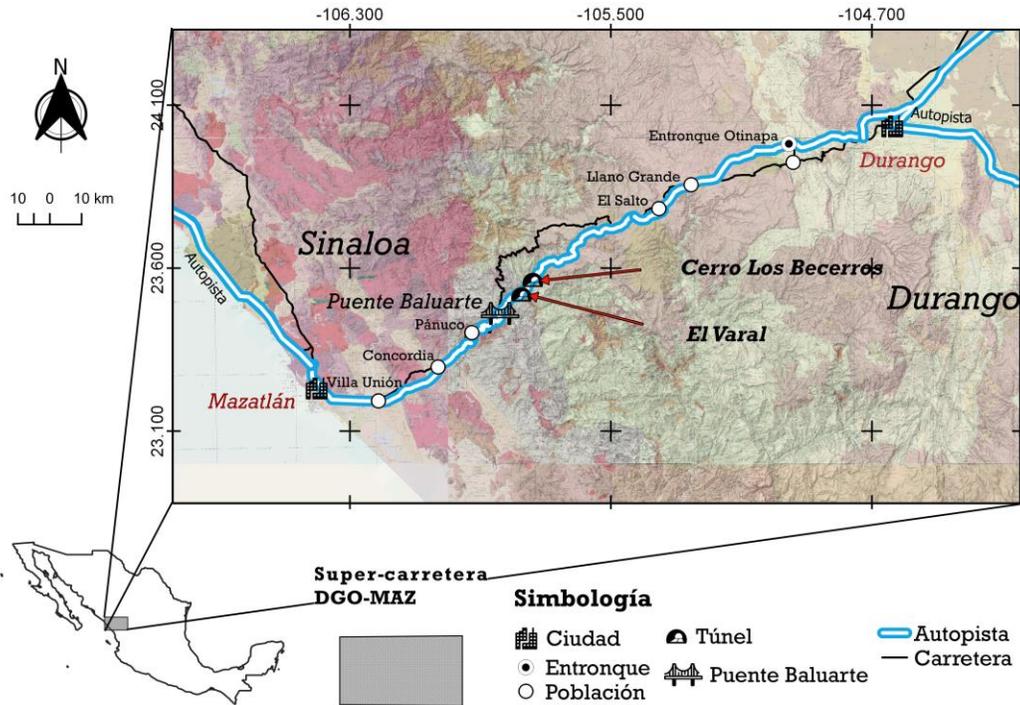


Figura 5.1.- Localización de los túneles Cerro Los Becerros y El Varal. Se indica en el mapa en color las litologías que atraviesa la Super Carretera Dgo-Maz.

Marco Geológico.

Esta carretera atraviesa la Sierra Madre Occidental por lo que los proyectos de túneles estarían atravesando litologías dominadas por conjuntos de rocas ígneas asociadas a diferentes episodios magmáticos, producto de la subducción de la placa Farallón debajo de la placa de Norte América. Estas rocas se conforman por: 1) rocas plutónicas y volcánicas del Cretácico Superior-Paleoceno; 2) rocas volcánicas andesíticas y en mayor medida dacítico-reolíticas del Eoceno; 3) ignimbritas silíceas del Oligoceno Temprano y el Mioceno Temprano; 4) coladas basáltico-andesíticas posteriores a las ignimbritas y 5) coladas de basaltos alcalinos e ignimbritas ubicadas principalmente en la periferia de la SMO emplazadas en el Mioceno Tardío, Plioceno y Cuaternario. En superficie se observa una amplia complejidad rocosa debido a lo intrincado de las estructuras que conforman la gran heterogeneidad litológica de las diferentes unidades y que contrastan con la regularidad que exhiben en el lado oriente de la SMO.

Todos estos episodios cubren a su vez un basamento heterogéneo pobremente expuesto del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico. Posterior a estos eventos se dieron transformaciones significativas causadas por la tectónica Terciaria provocando la formación de amplios Graben en su flanco este, así como fallamiento normal que constituye una terminación abrupta de grandes desplazamientos y zonas de profundas barrancas. En el Mioceno Temprano se dio una extensión mientras la subducción de la placa Farallón aún era activa. En muchos sentidos se dice que la SMO sigue siendo una frontera geológica (Ferrari et al., 2005).

5.2.- Objetivo.

El propósito del estudio fue realizar mediciones experimentales para determinar la respuesta sísmica del entorno geológico y verificar las propiedades del campo de ondas sísmicas en un túnel para lo cual se realizaron varios experimentos empleando técnicas como sísmica de dispersión de ondas superficiales y pruebas con la metodología de Sísmica Mientras se Excava. Se realizaron mediciones oportunas aprovechando como fuente tanto las detonaciones de explosivos para devastar el material en el frente de excavación, como las vibraciones generadas a partir de la perforación de los huecos donde se colocan dichos explosivos.

Los alcances del estudio se dan a continuación:

- Breve descripción de los trabajos de campo.
- Presentación de los espectros de Potencia de cada una de las explosiones, así como las funciones de respuesta sísmica de la formación rocosa.
- Estimación de un modelo de velocidad de onda de cortante para el terreno dentro del túnel para conocer el rango de penetración de las ondas radiadas mediante estas fuentes sísmicas.
- Cálculo de velocidad pico de la partícula (VPP) para compararlos con límites de vibración aceptados en taludes durante voladuras.
- Discusión de los resultados.

La importancia de este estudio radica en el desarrollo de una metodología completa que permita detectar zonas de debilidad en el frente del túnel para así garantizar un efectivo avance en el trazado del túnel. Para conseguir este objetivo se pretende generar información detallada de la respuesta que ofrece la roca a la excitación provocada por una función de entrada proveniente de diferentes tipos de fuentes.

5.3.- Trabajo de campo.

En el mes de junio de 2012 realizamos una campaña de cuatro días de medición en las obras de excavación y construcción de dos túneles en la "Carretera Durango-Mazatlán", en la que se realizaron varios experimentos de prospección utilizando el campo de ondas de ruido sísmico ambiental generado durante la operación de la máquina barrenadora conocida como Jumbo y la detonación de explosivos como fuente de ondas sísmicas. Medimos dos días en el túnel "Cerro Los Beceros" y dos días en el túnel "El Varal". En cada túnel se realizaron dos experimentos para medir el campo de ondas de ruido sísmico ambiental. Durante la operación del Jumbo se tendió un arreglo lineal de geófonos conectados a un registrador adecuado, también colocamos sensores triaxiales de 1 [Hz] y de banda intermedia (0.03-50 [Hz]) para comparar las respuestas obtenidas con cada equipo. Por otro lado, durante las explosiones se utilizaron solo sensores triaxiales de 1 [Hz] y de banda intermedia ubicados tanto cerca del frente de excavación como en el portal de entrada.

Los detalles de la logística de los experimentos realizados que se llevaron a cabo durante la campaña de medición se plasman a continuación.

Túnel “Cerro Los Beceros”.

Al realizar la excavación empleando explosivos es necesario primero perforar los huecos donde irán incrustados utilizando la maquina barnadora (Jumbo) con lo que se tiene una fuente que nos permite registrar ruido sísmico que podemos procesar para obtener información de velocidad de onda de cortante adicional del medio circundante. Se colocan todos los explosivos (salchichas) en dichos huecos lo cual absorbe entre 4 y 6 horas. Una vez hecho esto las “salchichas” son detonadas consecutivamente mediante dispositivos conocidos como "estopín" o fulminante, se obtienen registros separados en tiempo que nos arrojan una aproximación de la respuesta al impulso del entorno rocoso, que posteriormente puede usarse para generar información en el frente del túnel. Tales dispositivos detonan las cargas a intervalos determinados minuciosamente. Esta técnica de excavación ofrece una buena alternativa como fuente sísmica en la prospección hacia el frente del túnel ya que, desplegando un adecuado y conveniente arreglo de geófonos podemos registrar los campos de ondas y las reflexiones generadas en el frente de onda. Después de la detonación se deja ventilar el lugar por 2 o 3 horas y una vez que es accesible, se saca la rezaga de material durante mas o menos 5 horas cumpliendo así con un ciclo de excavación.

Anomalías en la estructura de la velocidad de propagación de ondas sísmicas son la causa de que parte de la energía sísmica que sale de la fuente de ondas, regrese al túnel con información de las características mecánicas de la formación geológica que iluminó. El despliegue de instrumental sismológico que operó dentro y fuera del túnel se hizo para registrar las señales sismológicas que permitan identificar y localizar variaciones en la estructura de la velocidad de propagación.

Equipo utilizado.

El equipo utilizado en los arreglos lineales lo constituyen los 24 geófonos verticales de 4.5 [Hz], 12 geófonos de 28 [Hz] y 2 sondas con sensores omnidireccionales de 15 [Hz] de frecuencia natural. El equipo de registro es un sismógrafo típico de exploración somera con digitalizador de 24 bits, el acondicionador de la señal con ganancia variable y filtro anti-alias. La grabación de los registros se hace en una computadora portátil que sirve para el almacenamiento de las señales, controlar el proceso de adquisición de información y llevar el control de calidad de los datos.

La configuración del equipo permitió hacer mediciones adecuadas entre 4.5 y 500 [Hz].

Las especificaciones técnicas de los geófonos y las sondas se consignan en la Tabla 5.2 y las curvas de respuesta instrumental en el Anexo A.

Modelo geófono	Frecuencia Natural (Hz)	Resistencia (Ω)	Sensitividad intrínseca (V/m/s)	Amortiguamiento (% del crítico)
GS-11D	4.5	4000 Ω	32	34
Omni-2400	15	2400 Ω	52	57
GS-14-L3	28	570 Ω	11.4	18

Tabla 5.2.- Especificaciones técnicas correspondientes a los sensores de los geófonos verticales y de las sondas omnidireccionales.

Descripción de los experimentos.

El primer experimento realizado dentro del túnel Cerro los Becerros consistió en medir el campo de ondas sísmicas generado por la maquinaria conocida como Jumbo; esta herramienta posee dos o tres brazos con barrenos rotatorios que, impulsados por un elemento hidráulico, se encarga de perforar las oquedades que contendrán explosivos para devastar el material en el frente del túnel. Durante la excavación de estas oquedades la herramienta de corte se acopla a la roca para inducir un campo de ondas sísmicas que ilumina la formación geológica en el entorno y hacia el frente del túnel.

Para medir las señales sísmicas generadas durante la operación de las perforadoras se decidió instalar, lo más cercano al frente de excavación, un arreglo lineal de geófonos verticales empotrados en el piso con extensión de 105 metros, colineal con el eje de trazado del túnel. De esta manera el primer geófono se instaló aproximadamente a 10 metros de separación del frente de excavación y los geófonos restantes se instalaron con separación entre geófonos de 5 metros en dirección hacia el portal de entrada del túnel (Figura 5.2).

Con objeto de comparar el movimiento del terreno obtenido en el piso del túnel con el movimiento en la formación, el primero y doceavo sensor operaron dentro de la formación en sondas que quedaron instaladas en barrenos horizontales, perforados aproximadamente a 1.5 metros de altura respecto del piso del túnel, con diámetro de dos pulgadas y profundidad de dos metros. Los sensores que operaron dentro de la sonda son de tipo omnidireccionales de 15 [Hz] de frecuencia natural, modelo **omni-2400** de la marca Oyo-Geospace. Los geófonos 2 y 11 se instalaron en el piso, precisamente bajo los huecos. La disposición de dichos geófonos se muestra en la Figura 5.2 mientras que la sonda que porta cada uno de los dos geófonos omnidireccionales y sus principales características se incluye en la Figura 5.3.

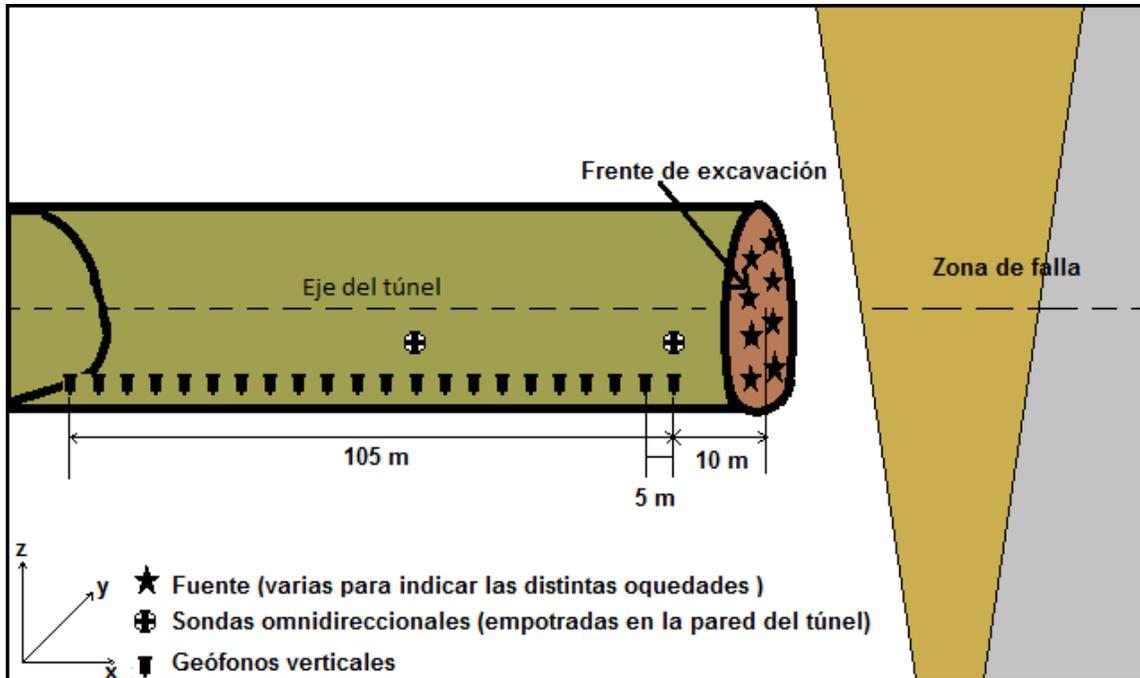


Figura 5.2.-Arreglo lineal de geófonos clavados en el piso dentro del túnel Cerro Los Beceros iniciando a 10 metros del frente y una extensión de 105 metros.

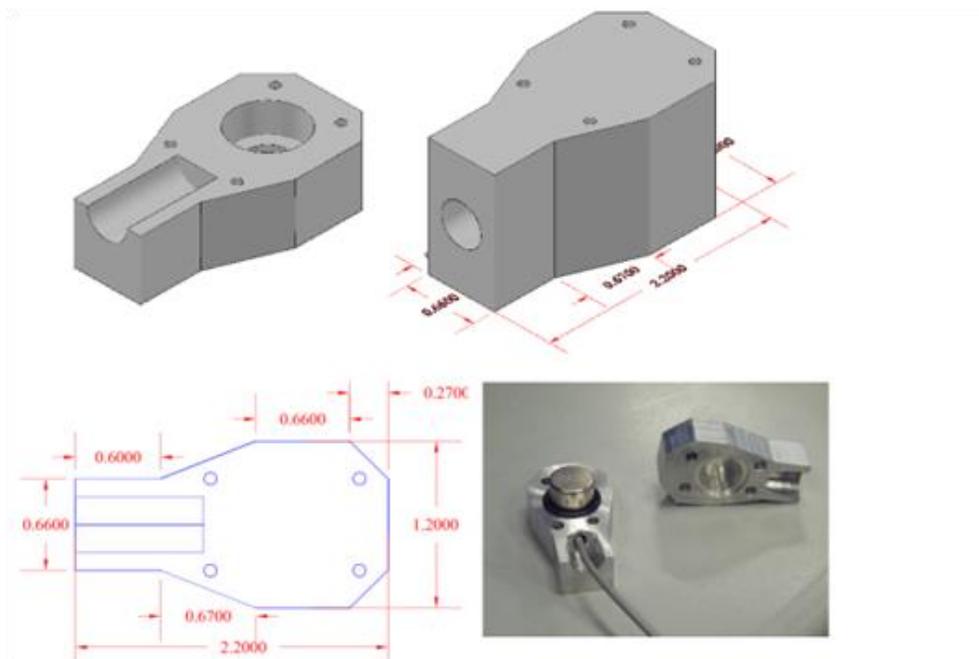


Figura 5.3.-Modelos de las sondas usadas en el tendido lineal empotradas en la pared del túnel (las medidas están dadas en mm).

Debido a que la perforación de cada oquedad toma un lapso de 2 a 5 minutos en el que el perforista sostiene la operación de la herramienta de corte trabajando de manera constante, se decidió que cada toma de datos tuviera la máxima duración del registro que ofrece el equipo a determinada cadencia. Se obtuvieron registros con longitudes de 60 y 16 segundos a cadencias de muestreo de 250 y 1000 muestras

por segundo respectivamente. Todos los canales operaron a ganancia constante de 24 decibeles (baja ganancia).

Comenzamos la grabación de datos después de iniciada la operación de la herramienta de perforación y obtuvimos 40 tomas por lo que la base de datos que se formó cuenta con aproximadamente 40 minutos de registro del movimiento del terreno generado durante la operación de esta herramienta para la primera variante del experimento. El movimiento del terreno obtenido con 22 geófonos verticales de 4.5 [Hz] y dos de 15 [Hz], para un total de 24 sitios quedó registrado en el mismo ordenador que controla la adquisición. Adicionalmente se hicieron 60 tomas del movimiento del terreno con una variante que consistió en sustituir once geófonos de 4.5 [Hz] por otros once geófonos con frecuencia natural de 28 [Hz] (convenimos llamarles geófonos de alta frecuencia) ubicados de forma intercalada; de modo que el segundo canal contiene un geófono de 28 [Hz], el tercer canal uno de 4.5 [Hz] y así sucesivamente dejando los canales 1 y 12 para las sondas que se ubicaron en la misma posición que los geófonos 2 y 11 respectivamente por encima de estos empotradas en la pared. Los parámetros básicos de adquisición para estas dos variantes implementadas se consignan en la tabla 5.3. La figura 5.4 consigna una muestra típica de las tomas realizadas para la variante 1.

Variante	f_n [Hz]	Separación entre geófonos [m]	Δt [s]	F_{Nyq} [Hz]	Duración [s]	No de tomas	Ganancia [dB]
1	4.5 y 15	5	0.004	125	60	40	24
2	4.5, 15 y 28	5	0.001	500	16	60	24

Tabla 5.3.- Parámetros básicos de adquisición en las variantes de registro implementadas en el Túnel Cerro Los Beceros realizadas con el arreglo lineal de geófonos.

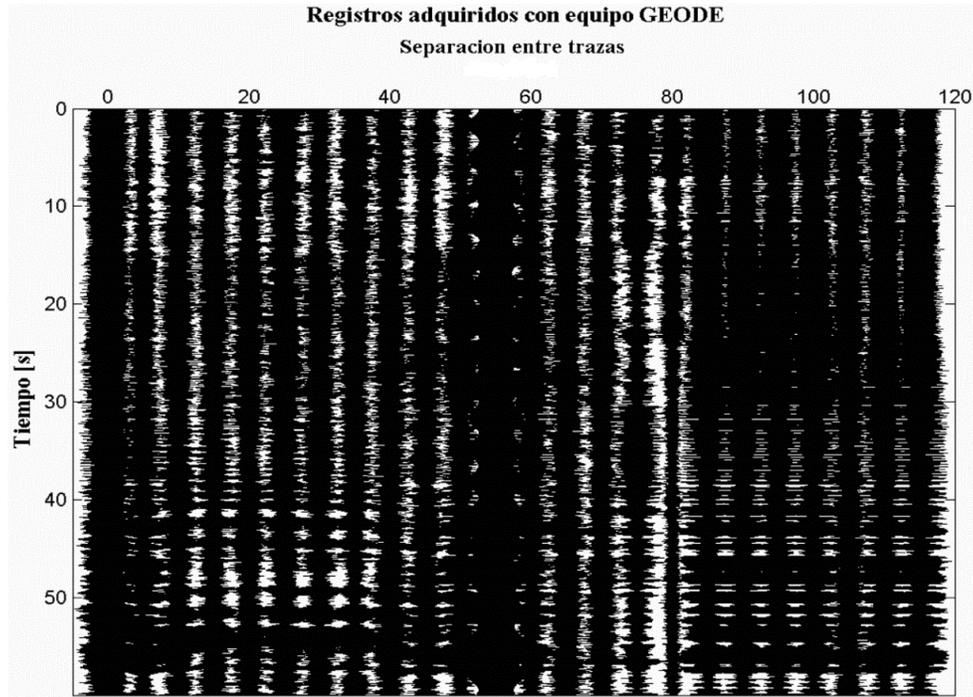


Figura 5.4.- Ejemplo de trazas adquiridas con equipo registrador GEODE. Registro correspondiente a la primera toma de la variante 1. Nótese las amplitudes mayores en las trazas 1 y 12 correspondientes con las sondas, registradas a una misma ganancia.

Con objeto de comparar los registros obtenidos se hizo el cálculo del espectro de densidad de potencia (PSD, por sus siglas en inglés) para cada registro lo que se logró usando programas de cómputo y procesamiento sísmológico tales como SAC (Seismic Analysis Code, por sus siglas en inglés), Matlab y Geopsy, de distribución libre para uso académico el primero y el último y el segundo de uso comercial con licencia.

Para las tomas obtenidas mediante el arreglo de geófonos conectados al sísmógrafo GEODE, los registros obtenidos con los sensores Lennartz y los pertenecientes al registrador K2, se realizó el cálculo usando una rutina en Matlab.

El procedimiento incluye una primera etapa en la que se aplica la corrección instrumental cuyo resultado es el registro corregido expresado en unidades de velocidad o aceleración (m/s o m/s^2), y debido a que es común expresar el espectro de densidad de potencia en decibelios [dB], referidos a $1 (m/s^2)^2/Hz$, cuando se trata de aceleración, la expresión utilizada en el cálculo es:

$$PSD [dB] = 10 \log_{10} PSD \left[(m/s^2)^2 / Hz \right]$$

Así la secuencia fue:

- Editar y transformar archivos a formatos SAC y ascii que permitan su procesamiento en los mencionados programas.
- Leer un registro.
- Seleccionar ventanas de 1 segundo de registro.
- Quitar media.
- Quitar tendencia lineal.
- Aplicar ventaneo (taper) para atenuar el efecto de discontinuidad en los bordes de la señal.
- Corrección instrumental y derivar para obtener aceleración en el caso de los geófonos y sismómetros (velocidad).
- Cálculo del EDP.
- Obtener el logaritmo en base 10 y multiplicar por 10.
- Guardar los cálculos en formato ascii para generar las imágenes correspondientes y darles un formato de presentación.
- Regresar a la ventana subsecuente y así realizar el cálculo para las ventanas subsecuentes hasta hacerlo para las 60 ventanas sin traslape que contiene cada registro.

Las imágenes de espectro de densidad de potencia de todos los canales para una sola toma se consignan en el Anexo B y para ilustrar aquí los resultados se insertan las imágenes de los EDP asociadas a los dos primeros canales de registro tomados con diferente sensor y en la misma posición horizontal, en la Figura 5.5.

Para las tomas de la primera variante del tendido lineal de geófonos la ventana utilizada tiene una longitud de 1 [s] por lo que para cada toma de 60 segundos se consideraron 60 ventanas sin traslape. La ventana de datos fue acondicionada mediante la aplicación de un suavizamiento tipo Hanning para atenuar el efecto de discontinuidad de la primera derivada en los bordes de la ventana seleccionada.

El espectro promedio mostrado en las imágenes de la Figura 5.5 indica que es en el ancho de banda entre 15 y 110 [Hz] en donde se concentra la energía contenida en la señal. La respuesta de los geófonos verticales de frecuencia natural 4.5 [Hz], es plana al movimiento del terreno hasta los 80 [Hz] a pesar de corregir por respuesta instrumental, motivo por el cual los espectros se ven atenuados aún antes de la frecuencia de Nyquist. La forma del espectro para frecuencias mayores de 125 [Hz] es manifestación de la frecuencia de Nyquist. Se incluyen los modelos globales de ruido alto y bajo como referencia.

En la toma perteneciente al geófono seis máximos espectrales locales pueden identificarse en el espectro promedio, el primero cerca de 30 [Hz], el segundo y el tercero con máximos muy cercanos en 40 [Hz], el cuarto en 60 [Hz], el quinto máximo ubicado en 80 [Hz] y finalmente dos máximos con el mismo nivel en 95 y 106 [Hz] sesgado por el límite que impone la frecuencia de Nyquist. Estos máximos aumentan en contenido de energía conforme aumenta la frecuencia y mantienen un nivel estable después de los 60 y hasta los 110 [Hz]. El nivel de potencia se sitúa por encima del modelo de ruido alto global a partir de 1 [Hz] que es la frecuencia más baja recuperable con los geófonos de 4.5 [Hz]. Los modelos globales de ruido alto y bajo son calculados para periodos altos más que para frecuencias altas por lo que la referencia solo se da hasta los 10 [Hz] (Figura 5.5).

Por otro lado, en el espectro promedio calculado para la sonda, observamos un comportamiento más consistente y plano casi 50 dB por debajo del nivel estimado para los geófonos. En las estimaciones se observa que la energía se concentra principalmente en el ancho de banda entre los 15 y 110 [Hz]. Se distinguen máximos ubicados en las frecuencias de 20, 30, 40, 60 y 80 [Hz] siendo más significativo el ubicado en la frecuencia de 60 [Hz]. Una vez más el efecto de la frecuencia de Nyquist se manifiesta a partir de los 110 [Hz] en donde el EDP comienza a decaer totalmente hasta los 125 [Hz]. Para este caso, observamos que el espectro estimado se encuentra en buen acuerdo con los modelos de ruido alto y bajo globales dentro del rango de frecuencias para el que el espectro es aceptable (Figura 5.5). Los espectros calculados muestran que el ruido ambiental afecta en forma considerablemente mayor a los geófonos verticales que a las sondas con sensores omnidireccionales empotrados en la pared con lo que podemos decir que el acople de las sondas a la formación es mejor.

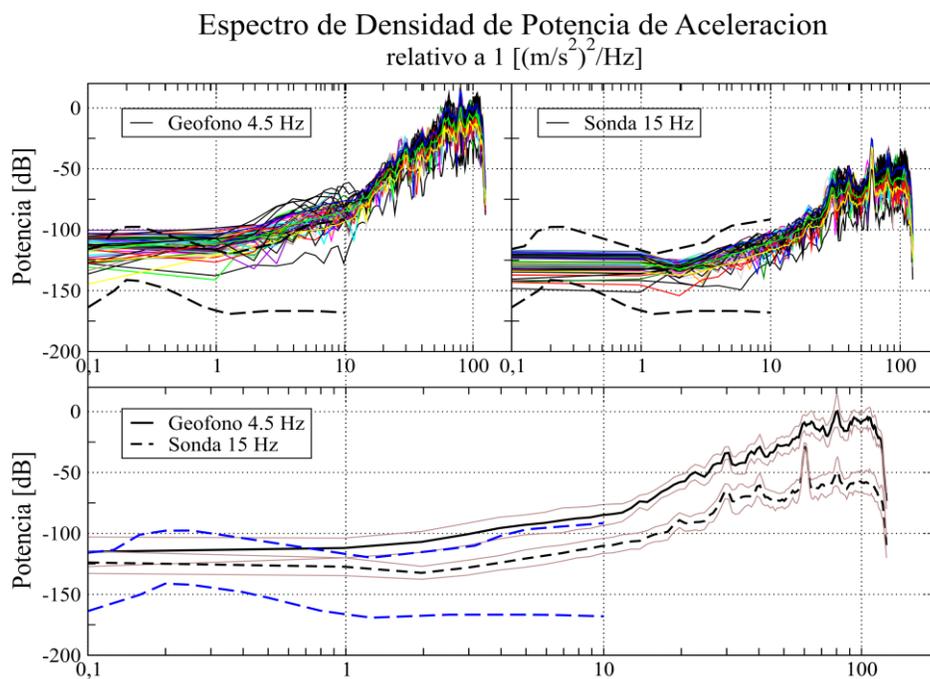


Figura 5.5.- Arriba izquierda: Espectro de densidad de potencia correspondiente a 60 ventanas del segundo canal con geófono de 4.5 [Hz]. Arriba derecha: Espectro de densidad de potencia correspondiente al primer canal (sonda) con sensor de 15 [Hz] empotrada en la pared justo arriba del primer geófono. En la ventana inferior se incluyen los EDP promedio comparados contra los modelos globales de ruido.

En las tomas de la segunda variante se hicieron mediciones utilizando 11 sensores de 4.5 [Hz] y otros 11 sensores de 28 [Hz], colocados de forma intercalada. La Figura 5.6 es una muestra de la primera toma.

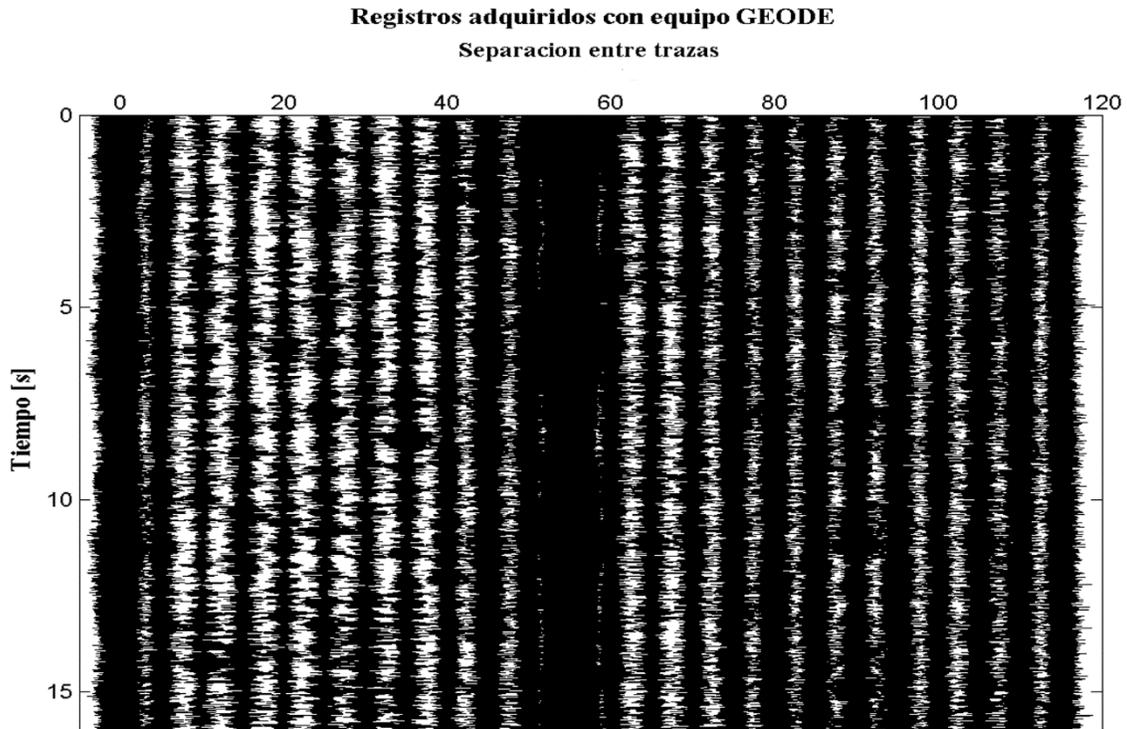


Figura 5.6.- Ejemplo de registro con equipo registrador GEODE. Registro correspondiente a la primera toma de la variante 2. Nuevamente observamos las mayores amplitudes en las trazas 1 y 12 pertenecientes a las sondas empotradas en la pared del túnel.

Los espectros típicos estimados de señales obtenidas con este tipo sensores y muestreando la señal a una cadencia de 1000 muestras por segundo, se muestran en las imágenes de la Figura 5.7 y los correspondientes a todas las trazas para una sola toma con esta variante se consignan en el Anexo B. La ventana usada tiene una duración de 1 [s] que resulta en 16 ventanas para todo el registro. Dicha ventana fue acondicionada con un suavizamiento tipo Hanning.

Calculamos el espectro de densidad de potencia para el geófono de frecuencia alta ubicado en el canal 2 y cuya energía se concentra principalmente entre los 25 y los 450 [Hz]. Desde los 25 [Hz] va en ascenso hasta los 100 [Hz], frecuencia a partir de la cual tiene la forma de una meseta. El límite a frecuencias bajas corresponde aproximadamente con la frecuencia natural de los geófonos (28 Hz) aunque observamos información hasta 8 [Hz] después de la corrección instrumental, y el límite en frecuencias altas corresponde con el 80 % de la frecuencia de corte asociada al filtro pasa bajas, correspondiente a la frecuencia de Nyquist. El espectro estimado es una clara manifestación del campo generado por la maquinaria de perforación, **pero modulado por la respuesta del instrumento.**

En las estimaciones hechas se pueden identificar máximos espectrales locales en 30, 50, 60, 80, 102, 152, 202 [Hz], además de una serie más o menos constante de máximos con niveles similares de potencia a partir de 250 y hasta 450 [Hz] donde comienza a decaer por causa de la frecuencia de Nyquist. Estas

estimaciones también se comparan con los modelos de ruido alto y bajo globales, pero solo concuerdan con los modelos por debajo de 1 [Hz] y a partir de ahí se encuentra por encima hasta los 10 [Hz] (Figura 5.7).

Por otro lado, los registros obtenidos con la sonda instalada dentro de la formación y conectada en el canal 1 permitieron calcular espectros que muestran un incremento constante y suave de las amplitudes también entre los 25 y los 450 [Hz], límite desde el cual comienza a descender. De igual forma se empleó una ventana de 1 [s] resultando en 16 ventanas. Máximos espectrales pueden identificarse ahora en las frecuencias de 30, 50, 60, 102, 152, 204 [Hz]. A partir de aquí, una vez más se observa una sucesión de máximos con niveles similares de potencia en los 250, 300, 350, 400 y 450 [Hz] aproximadamente, donde el espectro comienza a decaer súbitamente. **Por causa de los trabajos de excavación verificamos nuevamente que el espectro de densidad de potencia de aceleración calculada para los geófonos clavados en el piso es mayor a aquél calculado para las sondas empotradas en la pared,** aunque destacamos que la forma de los espectros calculados para estos dos sensores es mas parecida entre sí. En casi todos los espectros hasta el momento encontramos un máximo preponderante correspondiente a la frecuencia de 60 [Hz], muy probablemente relacionada con la frecuencia de la alimentación eléctrica instalada dentro del túnel. Los espectros estimados para los registros de las sondas se ubican dentro de los niveles de ruido globales mientras que aquellos calculados para los registros del geófono de frecuencia alta se ubican ligeramente por encima de estos hasta por 45 dB con lo que decimos que las sondas usando sensores de 15 [Hz] son muy recomendables para medir los niveles de ruido y compararlos con dichos modelos.

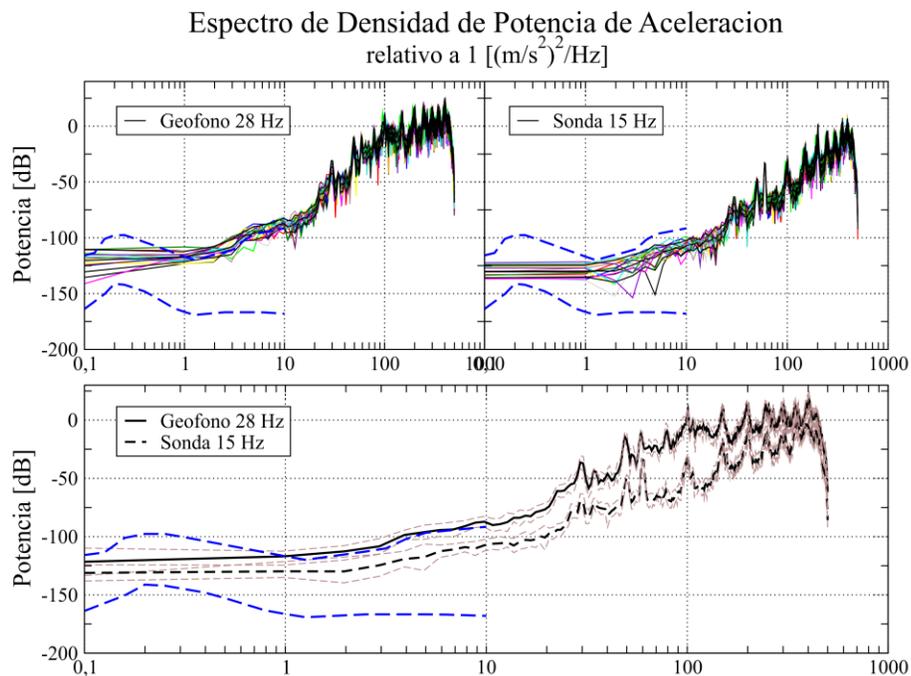


Figura 5.7.- Arriba izquierda: Espectro de densidad de potencia correspondiente a 16 ventanas del segundo canal con geófono de 28 [Hz]. Arriba derecha: Espectro de densidad de potencia correspondiente al primer canal

(sonda) con sensor de 15 [Hz] empotrada en la pared justo arriba del primer geófono. En la ventana inferior se consignan los EDP promedio comparadas contra los modelos globales de ruido.

Otro experimento consistió en monitorear el movimiento del terreno causado por la operación de la herramienta jumbo con sensores triaxiales ubicados a una distancia aproximada de 115 metros del frente de excavación aún dentro del túnel. La disposición de los sensores se muestra en la Figura 5.8.

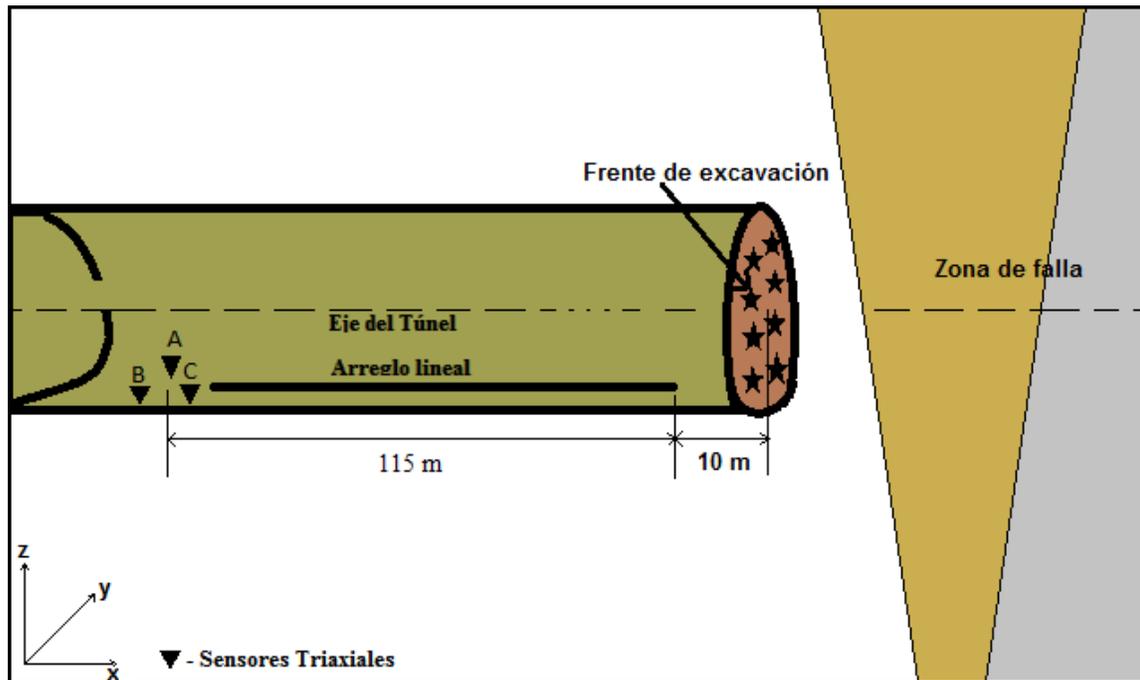


Figura 5.8.- Ubicación de sensores triaxiales Lennartz dentro del túnel a 125 metros de separación del frente de excavación.

También medimos con sensores de velocidad y periodo corto (1.0 [Hz]). El equipo con que se realizaron las mediciones consistió de 1 sismógrafo DoReMi de la empresa SARA Electronics®, con un sistema de registro electrónico distribuido a lo largo del cable que incluye un amplificador, un convertidor A/D de 24 bits y un buffer de almacenamiento de memoria. Al cable se conectaron tres sensores Lennartz triaxiales con frecuencia natural de 1 [Hz] denominados A, B y C y ubicados muy cerca de la computadora con la que se llevó a cabo el registro de las señales. La tabla 5.4 muestra las especificaciones técnicas de los sensores triaxiales de la marca Lennartz modelo LE-3D y la respuesta instrumental de estos se ilustra en el Anexo A.

Con estos sensores se pudo obtener información comprendida aproximadamente en el ancho de banda de 1 y los 100 [Hz].

Los tres sensores A, B y C, estuvieron separados entre sí aproximadamente 1 metro orientando la componente NS en la dirección longitudinal del túnel y el sismógrafo se configuró según los parámetros consignados en la tabla 5.5.

Modelo sensor	Frecuencia Natural (Hz)	Resistencia (Ω)	Sensitividad intrínseca (V/m/s)	Amortiguamiento (% del crítico)
LE-3D	1	-	400	70

Tabla 5.4.- Especificaciones técnicas de los sensores de tres componentes LE-3D empleados de manera conjunta al tendido lineal.

Equipo	f_n [Hz]	Δt [s]	F_{Nyq} [Hz]	Duración [s]	No de tomas	Ganancia [dB]
DoReMi + Lennartz	1	0.005	200	120	20	27

Tabla 5.5.- Parámetros básicos de adquisición del equipo DoReMi dentro del túnel Cerro Los Beceros durante la operación de la herramienta barrenadora.

El inicio de la grabación se dio unos instantes después de iniciada la operación de la herramienta de perforación y se realizaron 20 tomas formando una base de datos con 40 minutos de registro. Los archivos obtenidos con estos sensores quedaron registrados en el mismo ordenador que controla la adquisición para su posterior manipulación. La Figura 5.9 contiene una muestra típica de los registros obtenidos con estos sensores.

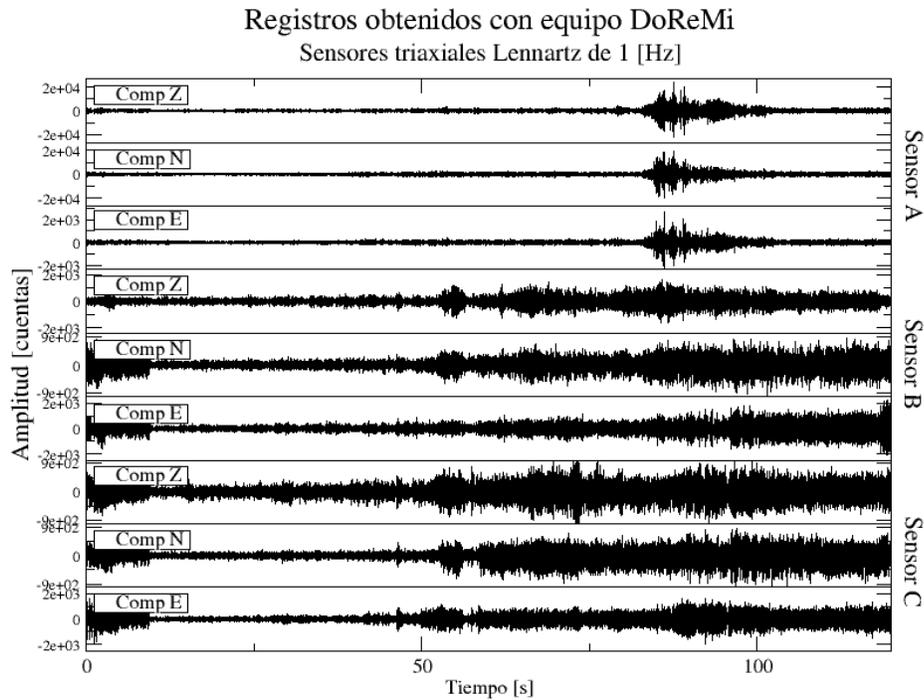


Figura 5.9.- Ejemplo de registro con equipo registrador DoReMi y sensores Lennartz correspondiente a la primera toma. Los sensores se denotan por las letras A, B y C, para su identificación el componente se identifica en cada traza

Para cada sensor la componente vertical es la primera traza, la componente norte-sur es la segunda y la componente este-oeste es la tercera. El equipo DoReMi permite registrar señales y guardarlas en diferentes formatos; en este caso se resolvió guardar los datos en formato seg2-DAT. La ventana usada para el cálculo de los EDP fue de 3 [s] dando 46 ventanas sin traslape para la longitud completa del registro. Para obtener las densidades de potencia espectral de los registros se siguió el mismo algoritmo de cálculo empleado para los registros del equipo GEODE descrito anteriormente. El cálculo de las unidades expresadas se hizo eliminando previamente la respuesta nominal de cada instrumento y solo se ilustra la componente vertical de uno de los sensores. Los espectros correspondientes a las demás componentes se consignan en el Anexo B.

Consignamos el espectro estimado para estos sensores en la Figura 5.10. Hay un aumento en el contenido de energía en el ancho de banda entre los 10 y los 95 [Hz] del espectro y se corta de forma abrupta a los 100 [Hz], **el filtro antialias no fue suficiente para excluir frecuencias mayores a los 100 [Hz].**

El espectro se incrementa a partir de los 10 [Hz] hasta los 28 [Hz] donde se observa un máximo espectral local, para incrementar con tasa aproximadamente constante, después de los 35 [Hz], hasta alcanzar el máximo cerca de los 60 [Hz], frecuencia de la alimentación eléctrica utilizada dentro del túnel. Finalmente, a frecuencia de aproximadamente 95 [Hz] se puede observar otro máximo local. Como referencia se incluyen los modelos NHHM Y NLNM, de ruido sísmico globales y corroboramos que los EDP calculados tienen forma similar a los modelos globales para frecuencias menores de 10 [Hz] y se

ubican cerca del límite superior, pero dentro de los límites que los modelos proponen a pesar de que estos modelos fueron estimados con sensores instalados en superficie.

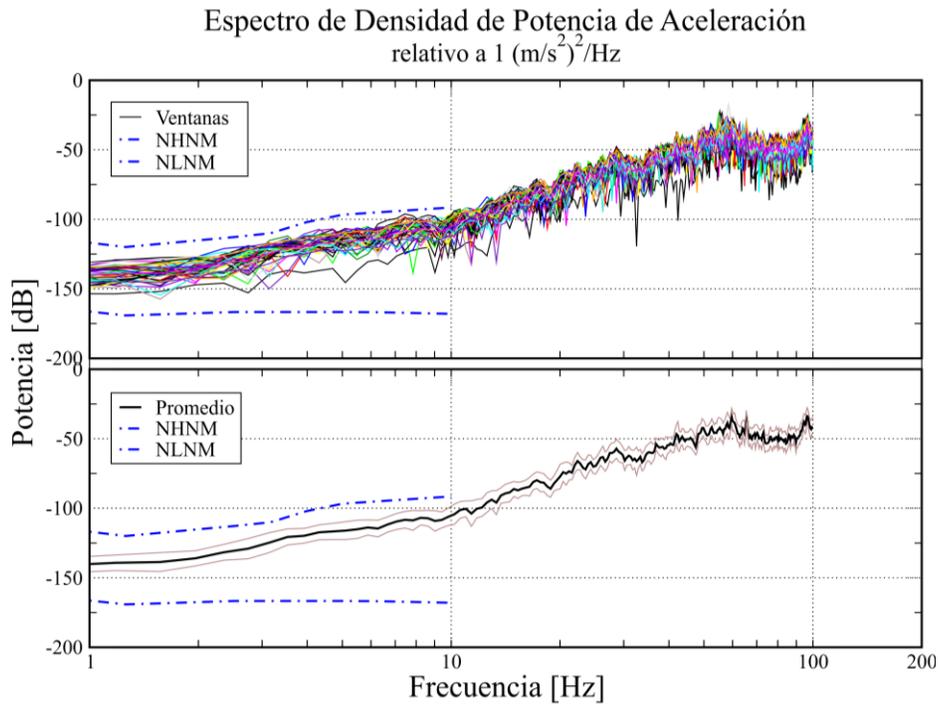


Figura 5.10.- Espectro de densidad de potencia correspondiente a 46 ventanas de la componente vertical del primer sensor Lennartz (arriba) y su promedio (abajo) para una sola toma.

También realizamos mediciones con un acelerómetro con grabadora modelo K2 de manufactura Kinemetrics® de seis canales y convertidor A/D de 24 bits. Este equipo cuenta con sistema electrónico e incluye un acelerómetro de tres componentes modelo FBA-23 de banda intermedia. A este digitalizador se le conectó un sismómetro de banda intermedia de tres componentes marca Guralp® modelo CMG-40T que responde de manera plana a la velocidad del terreno entre los 0.02 y los 30 segundos. La Figura 5.11 muestra la disposición del equipo en el túnel, el cual se ubicó aproximadamente a 3 metros adyacente al equipo DoReMi ambos con separación al frente de excavación de 115 [m] aproximadamente. Con este equipo se obtuvo un solo registro de 1800 [s] a una cadencia de 100 muestras por segundo y un rango dinámico de ganancia superior a los 135 [dB]. La configuración se realizó previamente por lo que solo es necesario nivelarlo correctamente y dar inicio. En este caso el equipo se orientó de tal manera que el componente N-S tuviera la dirección del trazo del túnel (ver Fig. 5.11).

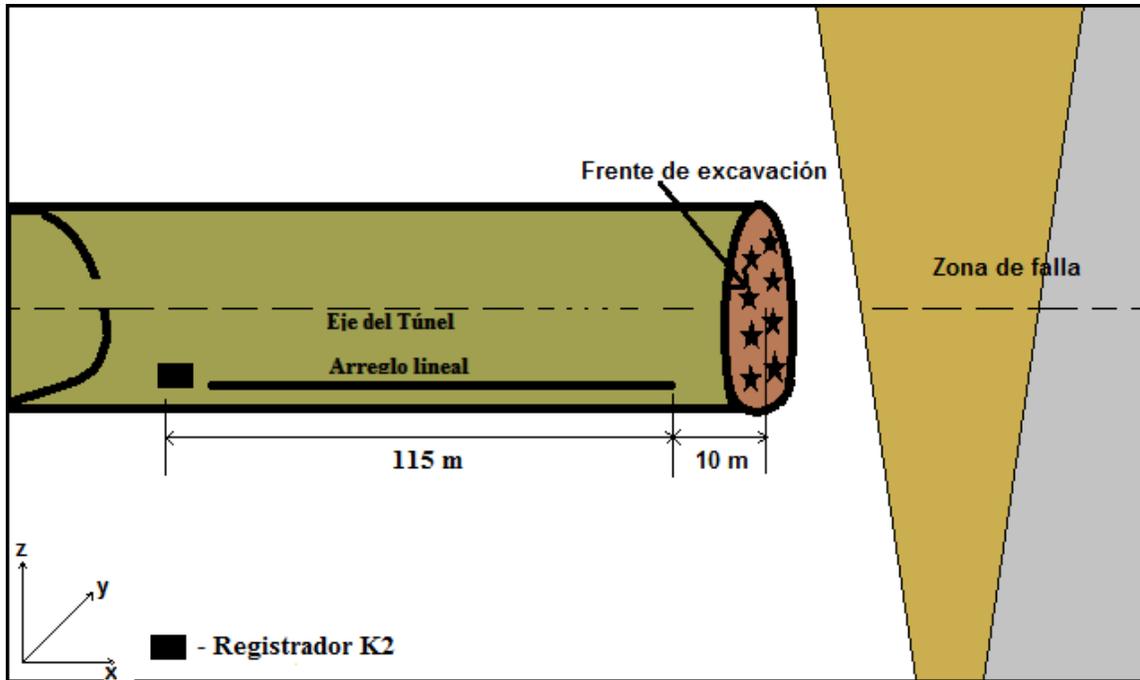


Figura 5.11.- Ubicación del registrador K2 con sensor FBA interno y el sensor triaxial CMG-40T externo dentro del túnel.

Las especificaciones técnicas de los sensores triaxiales FBA-23 y CMG-40T se consignan en la Tabla 5.6 y las curvas de respuesta respectivas en el Anexo A y los parámetros básicos de adquisición de cada uno de estos equipos se consignan en la Tabla 5.7.

Modelo sensor.	Frecuencia Natural (Hz)	Resistencia (Ω)	Sensibilidad intrínseca	Amortiguamiento (% del crítico)
FBA-23	50	30	0.2550 V/m/s ²	70
CMG-40T	0.033-50	47	800 V/m/s	70

Tabla 5.6.- Especificaciones técnicas de los sensores de tres componentes CMG-40T y FBA-23 empleados de manera conjunta al tendido lineal.

Nota: La sensibilidad nominal (G) en $V/m/s^2$ del Acelerómetro FBA-23 se calcula como:

$$G = [\text{Escala Completa de Voltaje} / \text{Nivel de Recorte}] / [9.80665 \text{ m} / (g * s^2)]$$

De donde el voltaje completo es de $\pm 2.5 \text{ V}$ y el nivel de recorte es $2g$.

Equipo	f_n [Hz]	Δt [s]	F_{Nyq} [Hz]	Duración [s]	No de tomas	Ganancia [dB]
K2 + Guralp	50	0.01	50	1800	1	>114

Tabla 5.7.- Parámetros básicos de adquisición del equipo K2 dentro del túnel Cerro Los Becerros durante la operación de la herramienta barrenadora.

En la Figura 5.12, que muestra la toma hecha, las primeras 3 trazas pertenecen al sensor FBA y las siguientes tres al sensor CMG-40T. Los componentes N-S corresponden a los canales 1 y 4, los componentes Z a los canales 2 y 5 y los E-W a los canales 3 y 6 respectivamente. Se observa una deriva al inicio de cada una de las trazas misma que se recortó para tener un mejor registro. Se trabajará con los componentes verticales de ambos sensores, es decir las trazas 2 y 5.

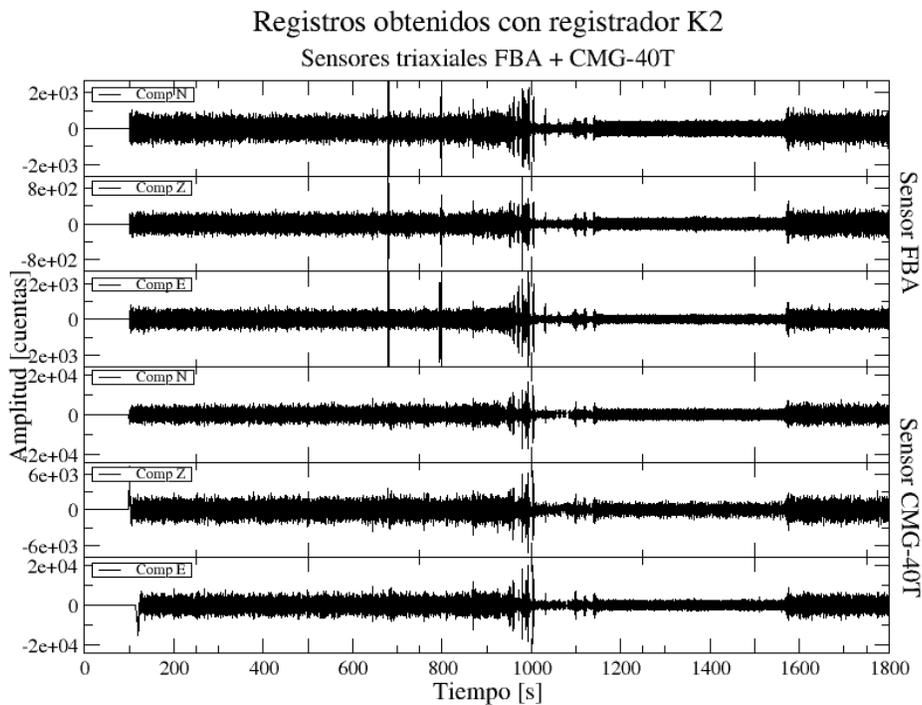


Figura 5.12.- Ejemplo de registro con equipo registrador K2 + sensores FBA y CMG-40T, correspondiente a 30 minutos de registro continuo. Se recortaron ambos registros debido a la deriva que se presenta al inicio de cada uno.

Los espectros típicos estimados de señales obtenidas con estos sensores, muestreando la señal con un intervalo de 100 muestras por segundo se muestran en las imágenes de la Figura 5.13. Se usó una ventana de 20 [s] con lo que se obtuvieron 87 ventanas sin traslape. Se ilustran solo los espectros de las componentes verticales de cada sensor y los espectros para las demás componentes se consignan en el Anexo B.

Después de eliminar la respuesta instrumental de los dos sensores y debido a que la cadencia de muestreo fue de 100 muestras, la frecuencia de Nyquist fue de 50 [Hz]; se observa un nivel aproximadamente

constante de energía hasta los 20 [Hz] y un incremento suave para alcanzar un máximo entre 40 [Hz] aproximadamente que representa el 80% del espectro, límite al que es posible obtener información. Se pueden distinguir máximos locales en los 25, 34.5 y 40 [Hz]. Con respecto a los modelos de ruido mundial, notamos que el espectro calculado para el sensor FBA-23 se encuentra cerca de 10 dB mayor que el nivel de ruido alto para frecuencias menores a 10 [Hz], mientras que el espectro calculado para el sensor CMG-40T mantiene una buena concordancia por debajo de este nivel después de los 3 [Hz].

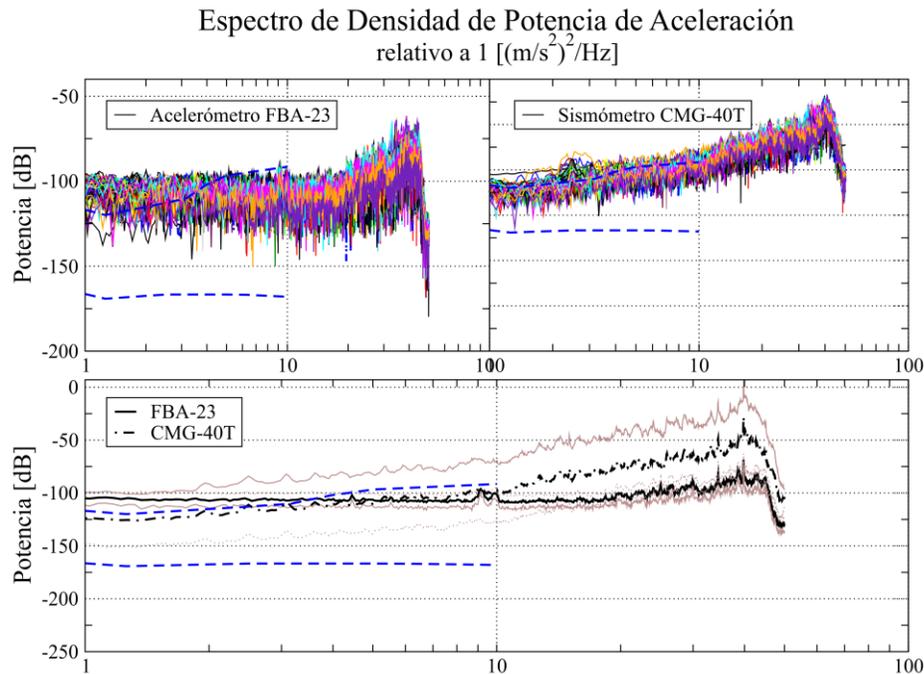


Figura 5.13.- Arriba izquierda: Espectro de densidad de potencia correspondiente a 87 ventanas de la componente vertical del acelerómetro FBA-23. Arriba derecha: Espectro de densidad de potencia calculado para el sismómetro CMG-40T. Abajo: EDP promedio comparados contra los modelos goobales de ruido.

Discusión de resultados preliminares.

1. El ancho de banda y nivel de vibraciones inducido por el proceso de construcción de oquedades hechas para la disposición de explosivos en el frente de excavación del túnel Los Becerros, es similar en forma y nivel de vibración, a los modelos de ruido sísmico ambiental global, NHNM y NLNM (por sus siglas en inglés) propuestos por Peterson, (1993). La comparación se logró hacer en tanto se hizo la corrección instrumental a los registros obtenidos y mediante el uso de los espectros de densidad de potencia. Se logró comparar con los modelos globales en un ancho de banda limitado, en frecuencias hasta de 10 [Hz] como límite superior y desde 1 [Hz], principalmente, como límite inferior, puesto que sólo el sensor Guralp operó a periodos mayores. Ver Figura 5.13.

Para frecuencias mayores a 10 [Hz] los EDP para los tendidos lineales incrementan a tasa aproximadamente constante de 80 dB/decada hasta los 100 [Hz] y dos de estas alcanzan, a tasa de crecimiento menor, los 450 [Hz] aproximadamente, que es la frecuencia de corte del filtro antialias.

Hay frecuencias asociadas a máximos locales que aparecen en los EDP obtenidos con los geófonos y con la sonda; esto es con los de 4.5 y 28 [Hz] y la sonda de 15 [Hz], aquellos son precisamente los que se usaron a tasa de muestreo alta mayores a 250 m/s. Las frecuencias asociadas a los máximos son de 45, 50, 60, 80, 100 [Hz] y, adicionalmente, de 150, 200, 250, 300, 350, 400 y 450 [Hz]. Los EDP que alcanzan los 450 [Hz] fueron calculadas con los registros obtenidos por los geófonos GS-14 y los sensores instalados en las sondas, OMNI 2400.

Debe reconocerse que el límite de los 450 [Hz] esta relacionado al muestreo seleccionado y al límite real de recuperación de señal que es del 80% de la frecuencia de Nyquist, por lo que es muy probable que el ancho de banda de la señal establecida en el túnel alcanzaba frecuencias aún mayores durante la duración de los experimentos.

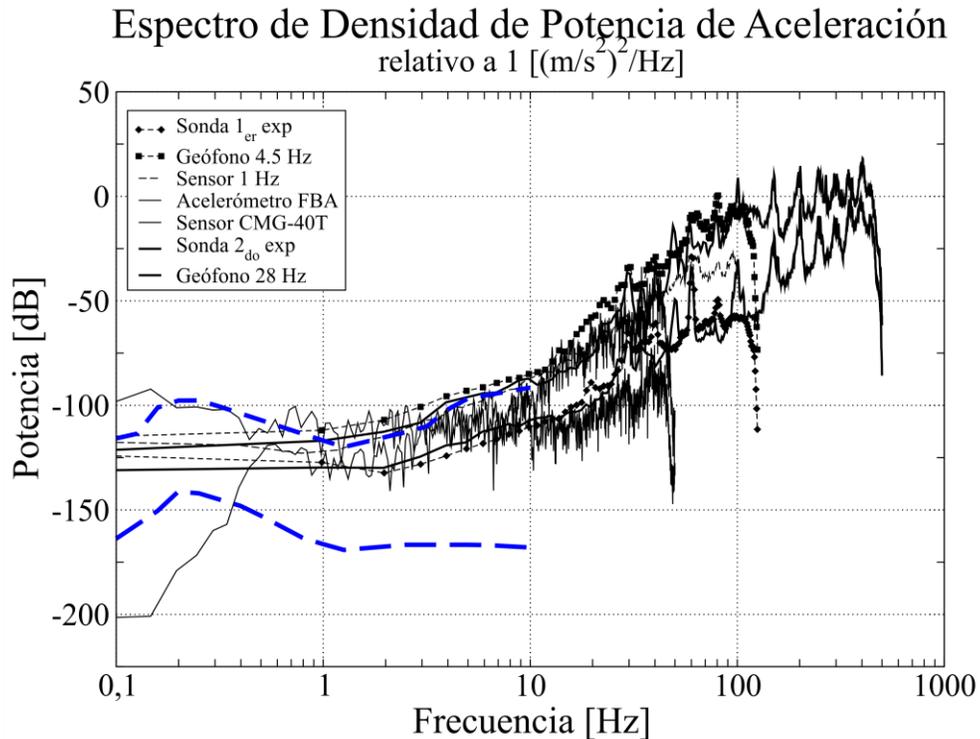


Figura 5.14. Espectros de densidad de potencia de los registros obtenidos con los diferentes equipos y configuraciones.

2. El uso de sondas incrustadas en la formación permite reducir el nivel de ruido ambiente dentro del túnel y por tanto mejorar la relación señal a ruido. La Fig. 5.7 indica que el nivel espectral obtenido de los registros de la sonda incrustada 1.5 metros en la pared del túnel es menor, en aproximadamente 45 dB, que aquellos obtenidos en el piso del túnel. Así, los máximos locales y sus frecuencias asociadas sobresalen de manera significativa en los EDP obtenidos de las sondas. Ver Fig 5.7.

Velocidad de cortante en el entorno del túnel Cerro Los Becerros

Para estimar la estructura somera de velocidad de cortante en el entorno del túnel se utilizó la información de los arreglos lineales que monitorearon el campo de ondas sísmicas de ruido ambiental generado por la barrenadora al estar trabajando. Desde esos registros se calcularon las curvas de dispersión de la velocidad de fase para una interpretación del modo fundamental de propagarse de ondas de Rayleigh. Se utilizó para esto la técnica Sísmica de Dispersión que no es sino una extensión de la técnica de la auto correlación espacial (Aki, 1957).

Procesado de datos

Para realizar la transformación al dominio de la frecuencia contra velocidad de fase, empleamos el paquete comercial SEISIMAGER®, provisto por la empresa Geometrics. La Figura 5.15 consigna la imagen típica de dicha transformación en la que se debe identificar inicialmente el modo fundamental y medir los valores de velocidad de fase correspondientes que sigan una curva suave y decreciente, con amplitudes sobresalientes; el proceso anterior corresponde precisamente a la identificación de los modos de propagación que están presentes en los datos. Los modos superiores se identifican comúnmente a frecuencias mayores y en caso de encontrar alguno se deben medir adicionalmente los valores correspondientes de velocidad de fase para restringir aún más el modelo de velocidad de cortante involucrado.

La Fig 5.15 es la imagen con la transformación al dominio de la velocidad de fase y la frecuencia. La interpretación hecha identifica con símbolos blancos diferentes pares de velocidad de fase y frecuencias asociadas; este conjunto de pares de valores forma la curva de dispersión de la velocidad de fase del modo fundamental de propagación de ondas de Rayleigh. Los rangos de validez se han considerado aquí mediante por la relación $2\Delta L < \lambda < 2L$, límites que dependen de la separación mínima, ΔL , y máxima, L , entre geófonos, respectivamente.

En nuestros cálculos, las velocidades de fase decrecen desde los 1350 [m/s] a 13 [Hz] hasta los 440 [m/s] en 22 [Hz] aproximadamente para los puntos marcados en blanco correspondientes al modo fundamental de propagación de la onda de Rayleigh mientras que los puntos máximos marcados en rojo nos representan la velocidad del sonido con un valor fijo de 330 [m/s] localizado en la banda de 5 a 15 [Hz]. Velocidades de fase hasta de 1400 m/seg aparecen asociados a un modo superior, la forma sugiere que el límite superior de las velocidades de fase con las que se propagan los modos superiores podría ser aún mayores a este valor.

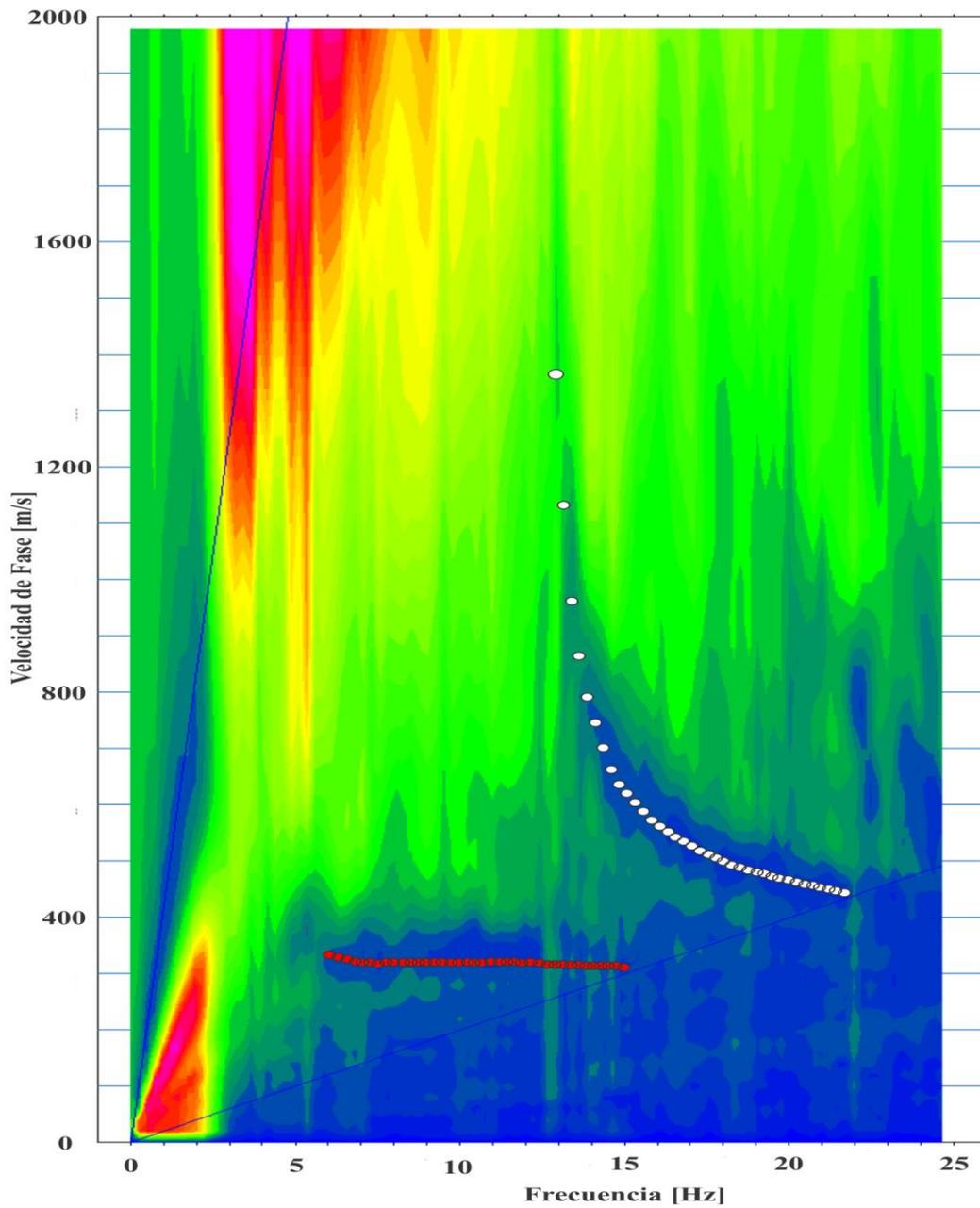


Figura 5.15.- Transformación al dominio de la velocidad de fase y la frecuencia. Los puntos son mediciones de la velocidad de fase, los blancos se asocian al modo fundamental y los rojos al primer modo de propagación de ondas de Rayleigh.

La Figura 5.16 contiene tanto las curvas de dispersión observadas, como las calculadas con el modelo obtenido de la inversión del modo fundamental. Note el buen ajuste obtenido entre las observaciones y la curva de dispersión calculada para el modo fundamental, mientras que las observaciones hechas para un modo superior indican que el modelo explica sólo en parte las observaciones hechas para el modo superior observado.

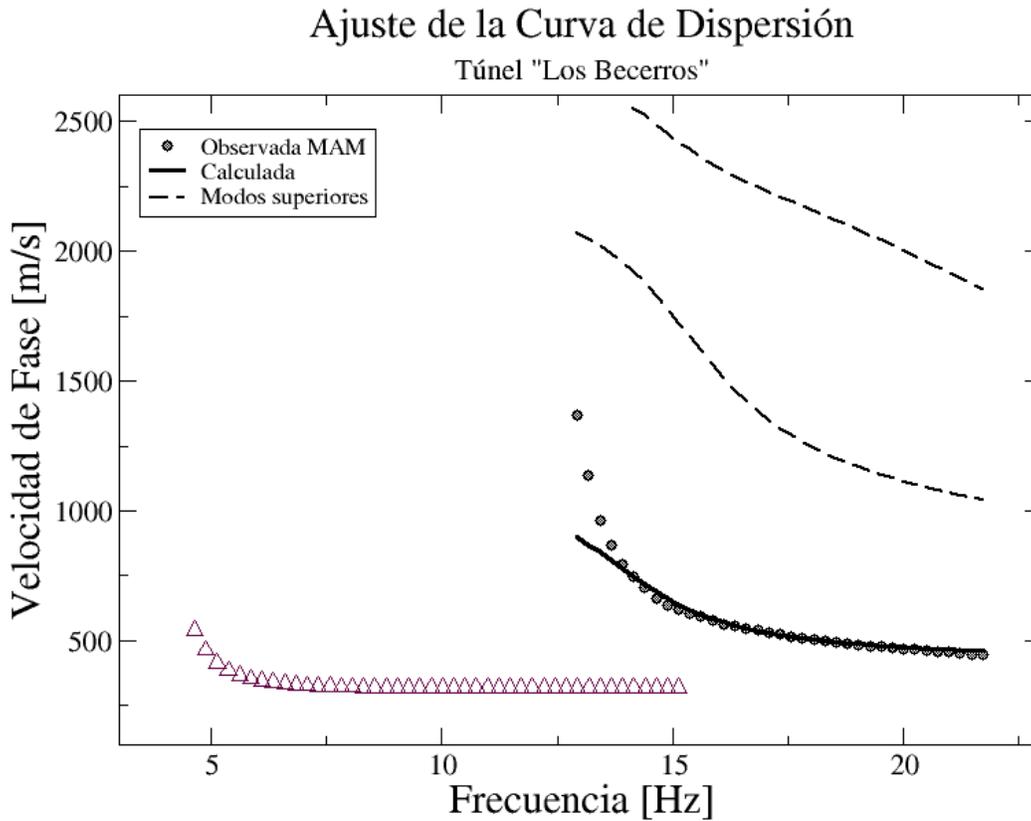


Figura 5.16.- Ajuste de la curva de dispersión correspondiente con el modo fundamental y un modo superior, en triángulos, empleada para obtener el modelo de velocidad de onda de cortante en el piso del túnel "Cerro Los Becerros".

La Figura 5.17 muestra el modelo de velocidad de cortante obtenido al hacer la inversión de la curva de dispersión de velocidad de fase identificada desde los 13 [Hz] hasta los 22 [Hz]. Se adjunta una tabla con los valores numéricos en la misma figura. Se asignaron solo 7 capas y el semi-espacio al modelo debido a que la curva de dispersión presenta una variación suave hasta la profundidad estimada. Observamos que una velocidad de cortante de entre 400 y 500 [m/s] puede caracterizar a la primera unidad sísmica, podría esta representar la zona de daño de excavación (EDZ) con un espesor de cerca de los 11 [m], profundidad a partir de la cual la velocidad aumenta considerablemente a 2550 [m/s] hasta la profundidad total de investigación, velocidad que permite deducir que es la roca sana.

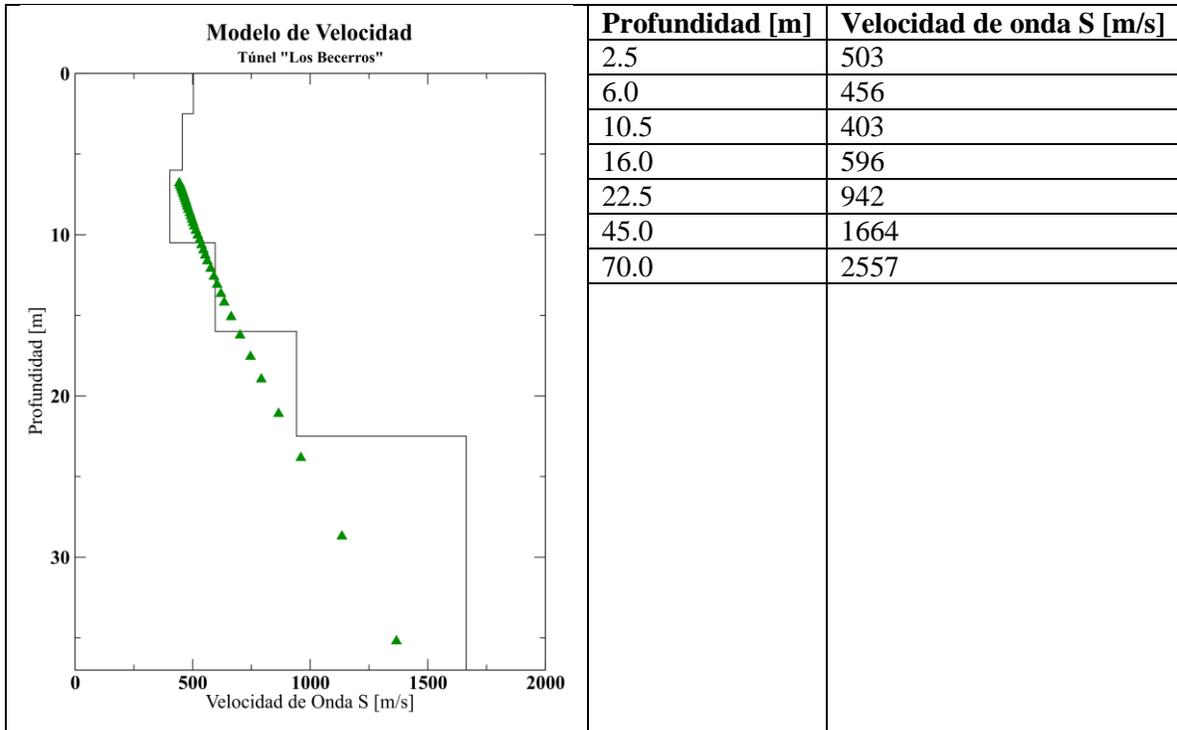


Figura 5.17.- Modelo de velocidad de onda de cortante asignado al centro del tendido lineal de geófonos clavados en el piso del túnel Cerro Los Beceros.

Ahora bien, para tratar de aportar información adicional desde la dispersión observada se hicieron estimaciones de las velocidades de grupo asociadas. Para lograrlo se calcularon sismogramas virtuales mediante la correlación cruzada de los registros entre la segunda traza, que fue la traza obtenida a menor separación del frente de excavación (10 metros) y las restantes (sin incluir las sondas).

Para hacer el cálculo de la correlación se seleccionaron ventanas simultáneas y secuenciales de longitud de un segundo que permitió separar 60 ventanas de cada registro. Enseguida se procedió a acondicionar las señales, quitando media y tendencia lineal para finalmente hacer el cálculo de las correlaciones cruzadas en el dominio del tiempo. A cada grupo de correlación calculada se le asigna la distancia correspondiente que da cuenta de la posición del sensor a la que está ubicado y se le clasifica según esta distancia de separación entre estaciones. La correlación promedio para cada grupo de correlaciones ofrece una estimación del sismograma virtual para la separación correspondiente. En las secciones se incluyen las autocorrelaciones promedio del registro de la primera estación (Figura 5.18).

Enseguida filtramos cada sismograma virtual en los anchos de banda siguientes: 4-19, 22-40, 45-58 y 65-100 [Hz]. con las que se forman secciones en cuatro diferentes anchos de banda. A cada sismograma se le calculo la envolvente de Hilbert y sobrepuestas, las envolventes de cada uno de los sismogramas virtuales se muestran en la Fig. 5.18. La selección de los anchos de banda se hizo de manera arbitraria de manera que fuimos probando diferentes anchos de banda de los cuales se seleccionaron los anteriormente incluidos.

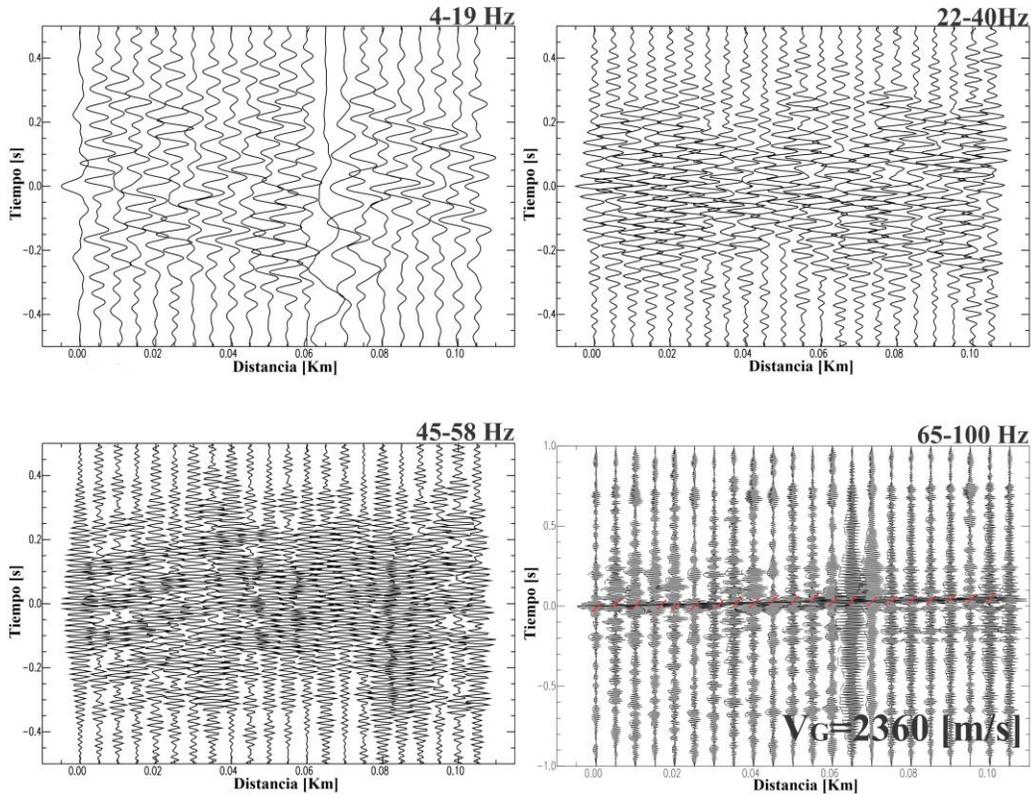


Figura 5.18.- Correlaciones cruzadas de los registros obtenidos en la variante uno del arreglo lineal calculadas en cuatro diferentes anchos de banda. Nótese que los máximos de las correlaciones se ubican a corrimientos positivos menores a 0.5 [s].

Debe notarse que hay coherencia espacial entre un grupo de señales que aparecen a corrimientos entre 0 y 0.5 segundos, las señales tienen forma de huso con máximos bien definidos. Los máximos de algunas de las envolventes indican que es posible unirlos, a través de todo el tendido, lo que indica la rapidez con la que esas envolventes se propagan a lo largo del tendido, rapidez que representa la velocidad de grupo V_G , asociada a la frecuencia media del grupo, f_c .

La línea con la que identificamos a la velocidad de grupo es trazada en dirección positiva del eje de tiempo lo que nos indica que el tren de onda viaja desde el frente de excavación hacia el portal de entrada, debe recordarse que el primer geofono operó a la distancia más cercana al frente de excavación (10 m). En este caso la velocidad de grupo medida fue de $V_G(f_c) = 2360 \text{ [m/s]}$. La Figura 5.19 muestra los sismogramas virtuales filtrados en este ancho de banda, note que el máximo de la envolvente se puede seguir a lo largo del tendido completo.

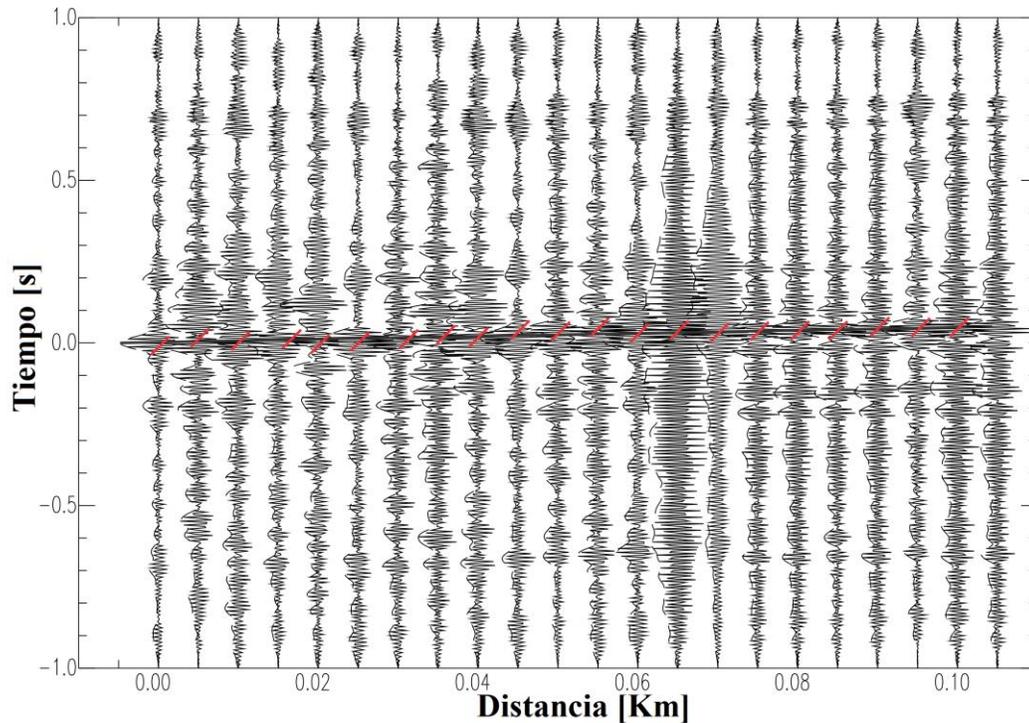


Figura 5.19.-Sismogramas virtuales obtenidos después de filtrar la correlación cruzada en el ancho de banda de 65 y 100 [Hz] con una señal predominante que recorre el tendido de geófonos a cerca de 2360 [m/s].

Ahora bien, para los datos obtenidos con la variante dos del primer tendido lineal de geófonos cuya cadencia de muestreo fue de 0.001, se realizó la misma secuencia de procesamiento logrando formar una sección sísmica con los sismogramas virtuales calculados a partir de las correlaciones cruzadas de los registros esto es, con una secuencia intercalada de geófonos de frecuencia natural de 4.5 [Hz] y geófonos de frecuencia natural de 28 [Hz]. Las señales contenidas en dichos registros se acondicionaron para que cada promedio de correlaciones se obtuviera con 16 ventanas. En este caso la banda de frecuencias en que se encontró información fue de 4-19 [Hz]. A continuación, la Figura 5.20 consigna la sección sísmica construida con estos datos. Existe una buena correspondencia entre los sismogramas virtuales hasta aproximadamente los 70 [m] donde se puede seguir claramente la misma fase solo que a corrimientos negativos.

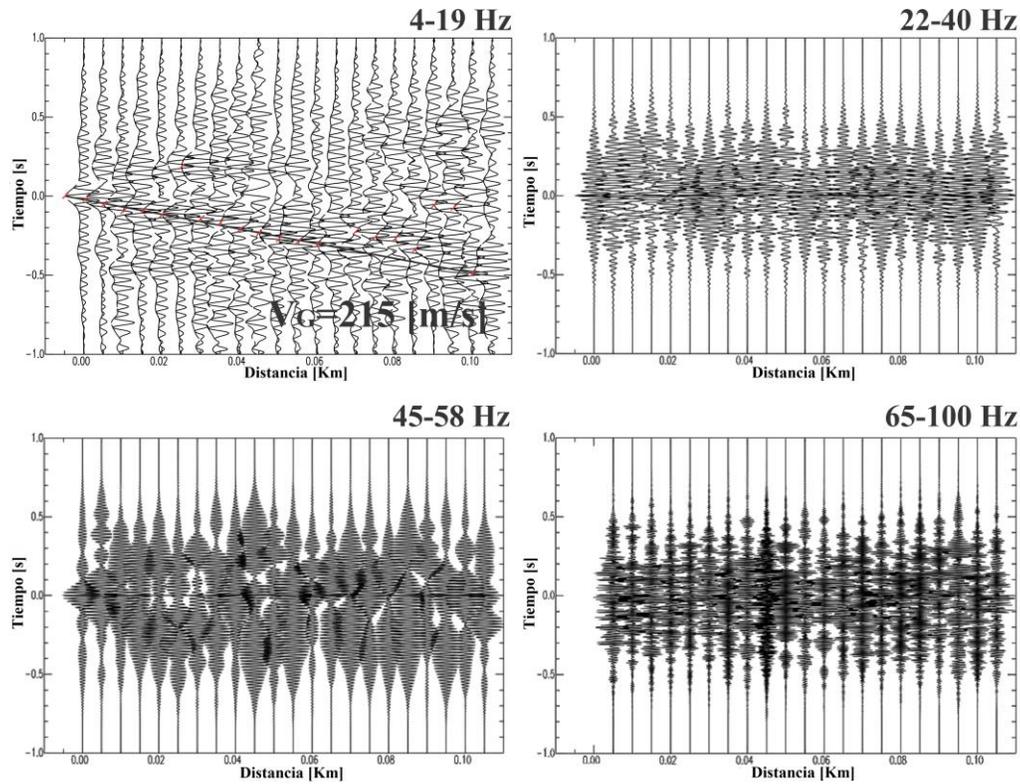


Figura 5.20.- Correlaciones cruzadas de los registros obtenidos con geófonos de alta frecuencia, calculadas en cuatro diferentes anchos de banda como se describe arriba. Nótese que es posible seguir una misma fase hasta aproximadamente 70 [m] y los máximos de las correlaciones se ubican a corrimientos negativos menores a 0.6 [s].

Nuevamente calculamos las envolventes de cada promedio de correlaciones y las incluimos en la imagen para de esta manera estimar la velocidad de grupo con la que las ondas atraviesan el tendido completo en los anchos de banda antes indicados. La Figura 5.21 muestra la sección filtrada en el ancho de banda de 4 y 19 [Hz] con las envolventes incluidas y la línea indica que las ondas sísmicas viajan con una velocidad de grupo de $V_G(f_c) = 215 [m/s]$, en contraste con la velocidad de grupo estimada en la banda de 65 y 100 [Hz] en la variante uno. Destaca una fase que se puede seguir a lo largo del tendido hasta aproximadamente 70 [m] además de que al final del tendido hay una inversión de polaridad en la señal. Debido a que los máximos de las envolventes se presentan a corrimientos negativos, deducimos que la señal viaja desde el portal de entrada hacia el frente de excavación ya que la correlación la realizamos tomando la señal del canal mas cercano al frente de excavación como referencia.

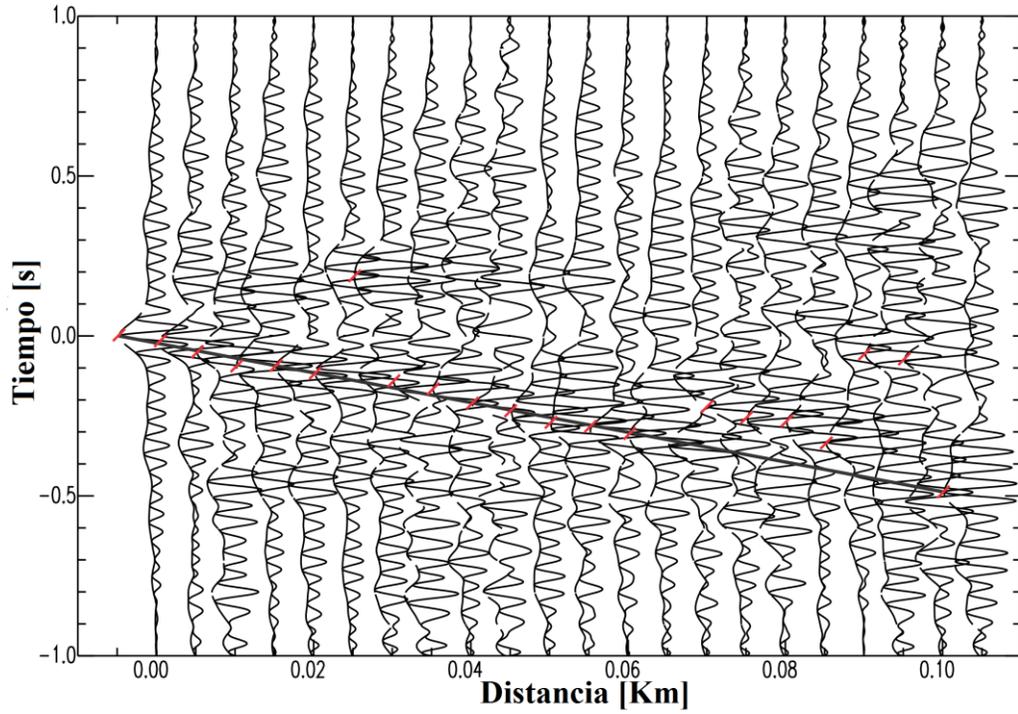


Figura 5.21.-Sismogramas virtuales obtenidos después de filtrar la correlación cruzada en el ancho de banda de 4 a 19 [Hz] con una señal predominante que recorre el tendido de geófonos a más o menos 215 [m/s].

Medición del movimiento del terreno generado por explosiones dentro del túnel.

Mecanismo de la explosión.

Una explosión consiste básicamente en la liberación casi instantánea de energía de origen químico o nuclear. Dicha energía es liberada dentro de la zona ocupada por el explosivo en forma cuasi puntual (profunda), fuera de ella (adósada) o en forma lineal (como en nuestro caso, usando barrenos).

Dentro del agujero la onda detonante se propaga a velocidades que oscilan entre 2 y 7 Km/s (Johansson y Persson, 1974; citados por Jiménez, 1980) y cuyos efectos generan sacudidas y vibraciones del terreno que modifican las propiedades y el comportamiento de la roca circundante. Dentro del terreno la explosión se transmite como una onda de choque con un frente cónico coaxial con el agujero, aunque con complejidades en las características de la onda y, por consiguiente, el movimiento del terreno. En una zona inmediata al barreno (1 a 2 radios en roca sana) la roca se pulveriza. **Hasta 3 o 4 diámetros**, existe fracturación intensa debido a las tensiones tangenciales, zona conocida como zona de rotura (“breakage zone” o “**transition zone**”) con huellas permanentes y visibles.

Más allá se extiende la zona elástica o sísmica donde no aparecen fisuras visibles y las tensiones tangenciales inducidas por la onda son resistidas por la roca en régimen elástico. Aitchinson (1971, citado por Jiménez, 1980), esquematiza las tres zonas descritas (véase Jiménez, 1980, p.980). La energía de la onda frontal disminuye con la distancia al centro de la explosión (Khanukayev, 1974; citado por Jiménez Salas, 1980) desde 40 % a dos diámetros hasta menos de 10 % a 30 diámetros. Posterior a 100 diámetros la onda más destructiva es la onda superficial (o de Rayleigh); del mismo modo la velocidad máxima de vibración de las partículas decrece con esta condición. En la que a distancias mayores a 100 o 200 diámetros la velocidad máxima de las partículas es de varias decenas de cm/s a varios cm/s.

Una vez que la onda alcanza el límite rocoso esta se refleja totalmente si no existe nada al otro lado y parte de ella es transmitida si la roca linda con el suelo. Según Aitchinson (1971), las tracciones se pueden duplicar ya que la onda reflejada se superpone con la onda incidente causando roturas a tracción (como se cita en Jiménez Salas, 1980). Cualquier punto de la Tierra ha estado sometido a ondas sísmicas a lo largo de su historia geológica (Ambraseys, 1970; citado por Jiménez Salas et al., 1980) y la reflexión de dichas ondas sería el origen de la diaclasa encontrada comúnmente como frontera entre la roca sana y la meteorizada y que es paralela a la superficie del terreno (diaclasas en V de los valles cerrados) con lo que se habría facilitado dicha meteorización.

Un efecto importante de la explosión es la formación de cráteres además de rotura por grietas, etc., abiertas por el gas al escapar hacia la atmosfera. Un cráter se formará cuando la carga se detone cerca de la superficie del terreno o a profundidad moderada de manera que los efectos de la zona de rotura casi lleguen a la superficie. Empíricamente se ha demostrado que radio de un cráter de este tipo es proporcional a la raíz cúbica de la carga (medida en peso de explosivos)

$$R_c = K_1 W^{1/3}$$

donde K_1 es una constante de la roca.

Posteriormente, Vortman (1963; citado por Jiménez Salas et al., 1980) presentó datos analizando cargas que varían de 256 libras a 100 kilotones, con los que logró extraer una expresión adecuada a sus cálculos:

$$R_c = KW^\alpha$$

donde: R_c = radio del cráter (en pies)

W = carga del explosivo (en libras)

α oscila entre 1/3, 0.3 y 1/4.

K varía entre 2.5 y 4.5.

Por otro lado, la formación de un cráter a causa de una explosión subterránea depende de la relación entre profundidad y carga. Clark (1967; citado por Jiménez Salas et al., 1980, p. 981) muestra los mecanismos de rotura para diferentes profundidades, somera, óptima o excesiva; en donde, para el caso de profundidad optima la zona superior del cráter presenta roturas por tracción debidas a la reflexión de la onda de choque en la superficie.

La onda de choque generada por una voladura puntual en un medio isótropo es esférica y la ecuación que la define es:

$$\frac{\partial^2(ru)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2(ru)}{\partial r^2} \quad (5.1)$$

y su solución

$$ru = g(r + ct) + f(r - ct) \quad (5.2)$$

donde: u = desplazamiento radial de un punto.

r = distancia al foco.

t = tiempo.

c = celeridad longitudinal.

La deformación dinámica unitaria ε al paso de la onda es:

$$\varepsilon = \frac{V}{c} \quad (5.3)$$

donde V es la velocidad de las partículas $V = \dot{u}$.

Para un comportamiento elástico:

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (5.4)$$

donde E = módulo de elasticidad

ρ = densidad del medio.

Y la tensión dinámica al paso de la onda σ :

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{V}{c} = \rho c V \quad (5.6)$$

La tensión es proporcional a la velocidad de las partículas V y a la impedancia del medio ρc . Al paso de la onda aparecerán compresiones y después de reflejarse en una cara libre (o una discontinuidad) surgirán tracciones. Como la resistencia de la roca a la tracción es menor que a compresión serán mas probables las roturas en lajas paralelas a las caras libres. La velocidad (y el desplazamiento) se amortigua al crecer la distancia r (Ecuación 5.2).

Dicho amortiguamiento se expresa de manera empírica con ecuaciones dimensionalmente diferentes, aplicadas no en un medio infinito e isótropo sino en las cercanías de la superficie

$$V = K \left(\frac{D}{Q^\alpha} \right)^\beta \quad (5.7)$$

donde: K = constante empírica a determinar en cada caso.

Q = carga del explosivo por cada fase de tiro.

D = distancia al foco.

β = factor de amortiguamiento.

α es un factor muy controvertido, representa el tipo de escala adimensional y vale:

- a) $\frac{1}{3}$ para las teorías basadas en análisis dimensional (Ambraseys y Hendron, 1968, citados por Jiménez Salas, 1980). “Escala cúbica”.
- b) $\frac{1}{2}$ para las determinaciones empíricas americanas (USBM, Oriard, 1970, 1971; Devine, etc.; citados por Jiménez Salas, 1980). “Escala cuadrática”.
- c) $\frac{2}{3}$ para las determinaciones empíricas de Langefors y Kihlstrom (1963; citados por Jiménez Salas, 1980).

De Paula, Saad y Duzzi (1978; citados por Jiménez Salas, 1980) demostraron estadísticamente que los coeficientes de correlación eran muy buenos para cualquier escala:

- | | |
|----------------------|---------------|
| a) Escala cúbica | 0.900 – 0.979 |
| b) Escala cuadrática | 0.915 – 0.973 |
| c) Fórmula Sueca | 0.930 – 0.947 |

El efecto de una explosión lejana es triple; se siente una detonación, vibra el terreno y finalmente pueden caer proyectiles rocosos.

- a) La detonación se transmite por el aire con una onda P produciendo un incremento de la presión atmosférica y es percibido como un ruido por los seres vivos a los que puede dañar si es de gran intensidad.
- b) El terreno transmite vibraciones complejas que incluyen ondas P con origen en el foco, ondas S provenientes de reflexiones y o refracciones de las ondas P cuando encuentran discontinuidades del terreno y finalmente ondas de superficie (Love o Rayleigh) que se transmiten a través de la superficie con componentes de compresión y de corte y pueden causar daños en las construcciones.
- c) Los proyectiles desprendidos pueden llegar a causar daños serios a la integridad de las personas cercanas a las obras.

La detonación se transmite mal en el terreno y aire a causa de la gran diferencia de impedancias. La impedancia característica de la roca es del orden de:

$$\text{Roca: } \rho \cdot c = 27.5 \text{ KN/m}^3 * 3000 \text{ m/s} = 82500 \text{ KN/m}^2\text{s}.$$

Por lo tanto, la mayor parte de la detonación se deberá a la transmisión directa de la explosión al aire. Dicha transmisión depende mucho de la presión atmosférica. Con presiones altas esta se produce preferentemente hacia las capas altas de la atmosfera y por lo tanto menos hacia el suelo. Lo contrario ocurre con presiones bajas, en cualquier caso, la existencia de vientos hace que la transmisión sea asimétrica.

Las tracciones provocaran daños en la roca si:

$$\delta = \sigma cV = \sigma_T \quad (5.8)$$

donde σ_T es resistencia a tracción y

$$V_{crit} = \frac{\sigma_T}{\rho \cdot c} \quad (5.9)$$

Para una roca sana normal

$$\rho = \gamma/g = 2.7 \text{ KN/m}^3 * (9.8 \text{ m/s}^2)^{-1}$$

$$C \sim 5000 \text{ m/s}$$

y por lo tanto

$$V_{crit} \text{ mm/s} = \frac{\sigma_T(\text{KPa})}{140} \quad (5.10)$$

expresiones que nos permiten obtener la velocidad crítica a partir de ensayos sencillos: determinación de la celeridad de las ondas longitudinales, en el terreno de la densidad y la resistencia a tracción.

Por ultimo, para evaluar los daños en taludes rocosos, Baner y Calder (1971, citados por Jiménez Salas et al., 1980) dan el criterio seguido en la siguiente tabla.

v <i>cm/s</i>	v/c <i>(mm/m)</i>	Daños presumibles
<25	<0.08	No hay peligro en roca sana.
25-60	0.08-0.2	Puede aparecer desprendimiento de lajas por rotura a tracción.
60-250	0.2-0.8	Puede aparecer grandes roturas por tracción.
>250	>0.8	Colapso total del macizo rocoso.

Por lo que las precauciones necesarias en taludes permanentes son:

0.1 $< \frac{v}{c} < 0.2$ Mallas y gunitados

0.2 $< \frac{v}{c} < 0.8$ Revestimientos resistentes

Para excavaciones subterráneas Langefors y Kihlstrom (1963) y Ambraseys (1968) (ambos citados por Jiménez, 1980) indican la existencia de unos valores críticos de la máxima velocidad de partículas para los que se producen daños, en función de la celeridad (velocidad de propagación de las ondas P).

v/c <i>(mm/m)</i>	Daños presumibles
<0.1	No son de esperar problemas.
0.1-0.2	Aparecen desprendimientos de bloques.
>0.2	Aparecen roturas en la masa del terreno.

Un túnel deberá revestirse si pueden aparecer desprendimientos de bloques

$$\frac{V}{c} \geq 0.1 \frac{mm}{m}$$

Es decir, si $c = 3000$ (m/s) $v \geq 30$ (cm/s).

En ambos casos con $v = 300$ (mm/s) se inicia la desorganización del macizo rocoso por lo que puede adoptarse también este límite para evitar daños apreciables en cimentaciones rocosas.

El problema de grandes excavaciones adopta cada vez nuevos aspectos tecnológicos de las operaciones de voladura que exigen pocos barrenos de grandes diámetros dispuestos en forma normalizada con grandes voladuras. Al mismo tiempo se busca causar el menor daño a la roca circundante y ello exige un estudio cuidadoso, ensayos “in situ”, una zonificación.

El segundo experimento consistió en registrar el campo de ondas sísmico generado por las detonaciones de explosivos requeridas durante la excavación del túnel.

Cuando hablamos de explosiones es necesario detallar tiempos y distancias. En el caso de excavación de túneles con explosivos, la detonación debe realizarse mediante dispositivos específicos conocidos como estopines. Primero se realiza la perforación de huecos con 4.5 metros de profundidad dentro de los cuales van incrustados cartuchos con explosivos de medidas de 1.5 a 2 metros de longitud y con un peso de 1.38 Kg cada uno. Este proceso puede durar de 4 a 6 horas, tiempo en el que se realiza la barrenación, colocación y detonación de lo explosivos, para posteriormente esperar alrededor de dos horas más para la aereación del lugar y poder ingresar a extraer la razaga del material devastado. Cada explosivo se clasifica según su tiempo de respuesta, aquí se emplearon explosivos con retardos que van desde 25 [ms] hasta 9600 [ms], los cuales representan las explosiones mayores.

Para las mediciones los equipos usados fueron:

- 2 registradores tipo K2 de la empresa Kinematics con acelerómetro tipo FBA (ganancia de +- 1g y sensibilidad de 0.255 [m/s/s]).
- 2 sismómetros triaxiales de banda intermedia modelo CMG-40T de la empresa Güralp Systems.
- 1 digitalizador DoReMi de la empresa SARA Electronics.
- 1 sensor triaxial marca Lennartz.

La Tabla 5.8 contiene la configuración que se usó para registrar con los dos equipos: K2-1310 y K2-1313 y la Tabla 5.9, la configuración usada para el sensor Lennartz acoplado al registrador DoReMi.

Equipo	f_n [Hz]	Δt[s]	F_{Nyq} [Hz]	Duración [s]	No de tomas
K2 + Guralp	50	0.01	50	1800	1

Tabla 5.8.- Parámetros básicos de adquisición de los equipos K2 dentro del túnel Cerro Los Becerros durante las detonaciones de explosivos.

Equipo	F_s [Hz]	Δt [s]	Duración [s]	No de tomas
DoReMi + Lennartz	1	0.001	20	19

Tabla 5.9.- Parámetros de adquisición básicos para el equipo DoReMi dentro del túnel Cerro Los Becerros durante las detonaciones de explosivos.

Mediciones

Las mediciones se hicieron en dos posiciones, la primera dentro del túnel aproximadamente a 50 metros del frente de excavación y la segunda cerca del portal de entrada aproximadamente al doble de separación respecto al frente. El sitio dentro del túnel se seleccionó considerando las recomendaciones del personal encargado de la detonación, quienes consideraron que a esa separación las rocas eyectadas por la explosión no eran de peligro, aún así se cubrió el equipo con barreras de piedra como protección del instrumental.

En el sitio interior se puso en operación un sismómetro de banda intermedia acoplado al registrador K2-1310 el cual contó adicionalmente con un acelerómetro FBA internos; en el portal se utilizó un sensor más de banda intermedia y el registrador K2-1313 con su FBA interno. En el sitio del portal operó adicionalmente un sensor triaxial Lennartz de 1.0 [Hz] acoplado al registrador DoReMi. Inicialmente se conoce el instante en que se hará la explosión, de modo que los equipos se configuran previamente para su operación. El equipo se configuró para registrar 30 minutos y se decidió iniciar la operación del equipo 15 minutos antes del horario establecido para la explosión, tiempo en que se deja operando el equipo de manera autónoma pues el personal sale del túnel. En los registros obtenidos se observa movimientos ajenos correspondientes a un compresor destinado para la aereación del lugar.

Frente de excavación

Este equipo que operó cerca del frente de excavación, registró a una cadencia de 100 muestras por segundo con una longitud total de registro de 1800 [s].

El resultado son seis registros del movimiento del terreno, tres canales corresponden al sensor de aceleración y los otros tres al sensor de velocidad, ver Fig 5.22.

En los seis canales se pueden contar 56 explosiones bien definidas con la mayor registrada aproximadamente a los 700 seg después del inicio. La aceleración máxima registrada es de 266.74 Gales, mientras que el evento mayor observado en los sensores de velocidad estan saturados durante aproximadamente 30 segundos. En la imagen se incluye una ventana de los primeros 750 segundos de la componente vertical del sensor FBA (segundo canal) que contiene a las explosiones con ganancia recortada para destacarlas. Mostramos en la Figura 5.23 las ventanas de tiempo en que se identificaron las explosiones usadas para hacer los cálculos, ventanas correspondientes solo al canal 2.

Registro de explosiones con equipo K2-1310

Sensores triaxiales FBA + CMG-40T

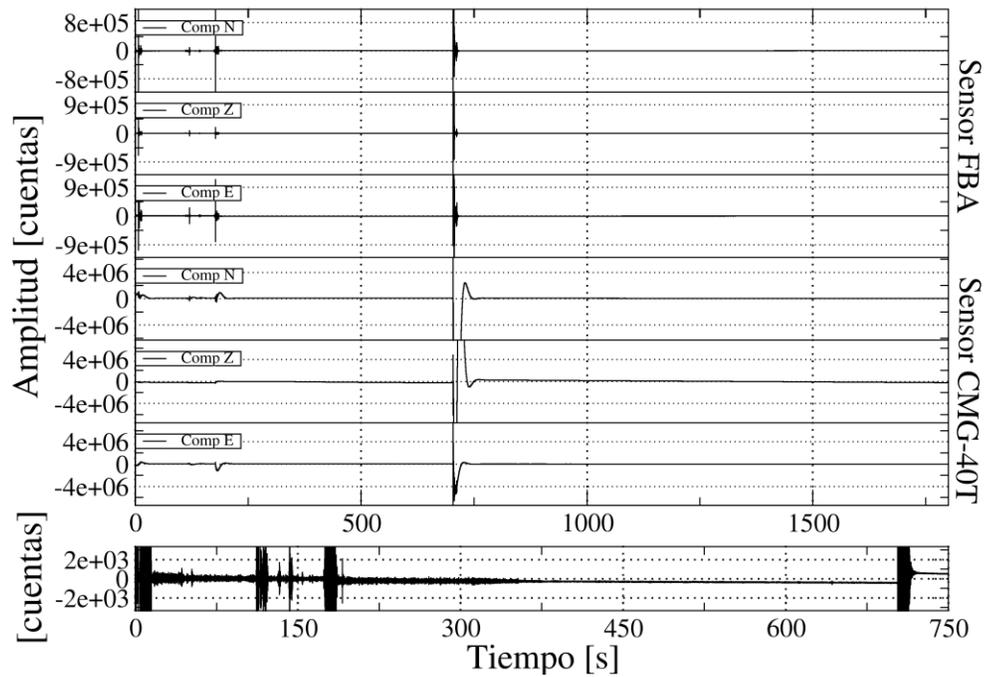


Figura 5.22.- Arriba: muestra típica de registro obtenido con registrador K2-1310+Guralp correspondiente a 30 minutos de registro de explosiones. Los entrecuadros interiores indican el componente. Abajo: ventana con 750 segundos de registro del segundo canal (FBA-vertical) con ganancia recortada.

Pulsos registrados a diferentes tiempos

Registros de aceleración

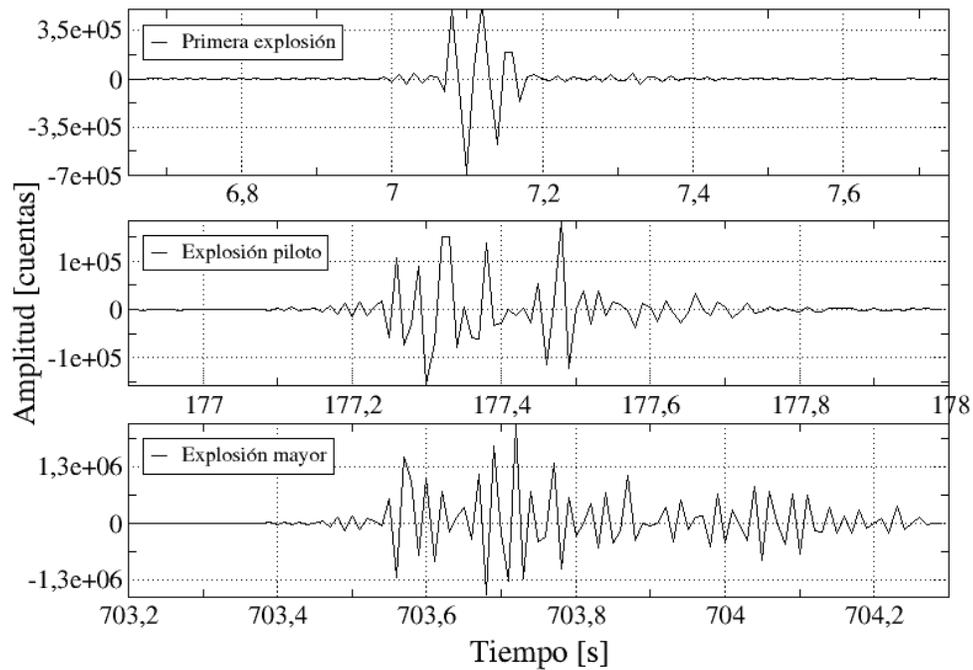


Figura 5.23.- Explosión mayor acompañada de dos pulsos menores registradas en el acelerómetro FBA-23.

A continuación, en la Figura 5.24 se presentan las estimaciones de los espectros de amplitud para las explosiones registradas dentro del túnel separadas 50 [m] del frente de excavación. Seleccionamos del registro crudo solo el pulso correspondiente a las explosiones mayor, menor y piloto, sin ventaneo y los espectros corresponden a la vertical (canal 2) del sensor FBA-23 del interior del equipo K2-1310. Podemos observar que la energía se concentra principalmente en el ancho de banda entre 10 y 50 [Hz], sin embargo observamos la presencia de máximos locales ubicados por debajo de los 10 [Hz] estos se localizan en las frecuencias de 4.5, 5.5, 9 y 10 [Hz] con menor resolución, y a partir de ahí vemos máximos locales ubicados en las frecuencias de 18, 20, 22, 27,28, 30, 33, 35 [Hz], observados en la explosión mayor y una acumulación de energía desde los 39 hasta los 45 [Hz] donde el espectro pierde magnitud debido a la frecuencia de Nyquist. La forma del espectro es representativa de la respuesta de la roca a las detonaciones de explosivos y se verifica en los tres pulsos/explosiones. En esta imagen sobresalen los valores que se ubican en 9, 30, 35 y el pico ubicado a 40.62 [Hz] con amplitud mayor a los demás hasta por tres órdenes de magnitud. Destacamos que la forma exhibida por el espectro de la explosión piloto es bastante suave y que solo se incluyen los espectros estimados para los registros de aceleración del sensor FBA-23 debido a la poca resolución obtenida con las señales de los sismómetros CMG-40T.

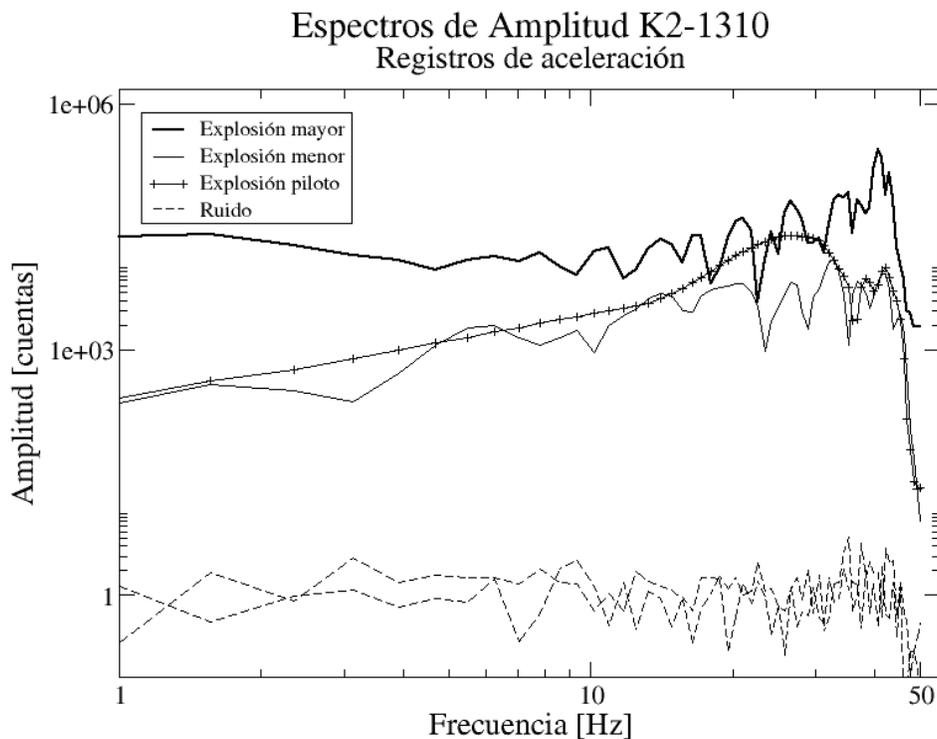


Figura 5.24.- Espectros de Amplitud correspondiente a la componente vertical del sensor FBA-23. Se incluyen la explosión mayor junto con dos menores además de dos segmentos de ruido aleatorio para comparación.

Portal del túnel

En la Fig. 5.25 se consigna el registro obtenido de la explosión aproximadamente a 30 metros dentro del portal de entrada. En el se pueden identificar 18 señales con forma impulsiva que pueden asociarse a explosiones, destacando la mayor con una aceleración pico de 220 Gales, que aparece aproximadamente a los 400 segundos de haber iniciado el registro.

La imagen es una muestra típica de los registros de explosiones observadas con estos equipos en la que también se incluye una ventana de los 400 a los 1750 segundos aproximadamente pertinente a la componente vertical del sensor FBA (segundo canal) cuya amplitud ha sido recortada para destacarlas.

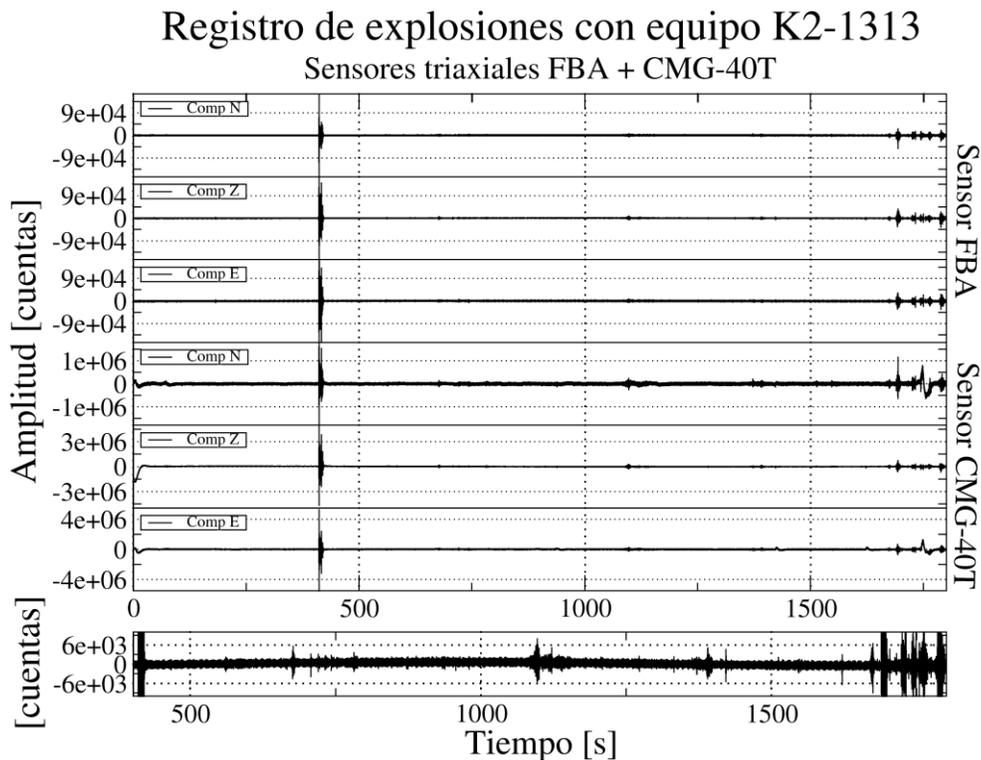


Figura 5.25.- Arriba: muestra típica de registro obtenido con registrador K2 y sensores triaxiales: FBA integrado y CMG-40T conectado externamente ubicado en el portal de entrada del túnel, correspondiente a 30 minutos de registro de explosiones. Abajo: ventana con poco mas de 1000 segundos de registro del segundo canal (FBA-vertical) con ganancia recortada.

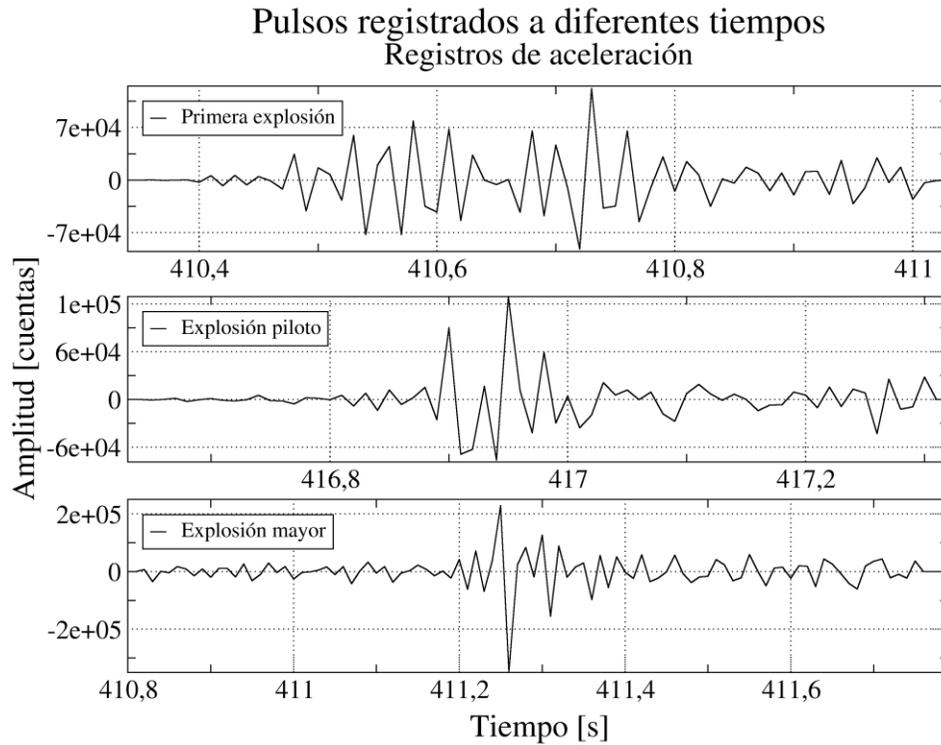


Figura 5.26.- Explosión mayor acompañada de dos pulsos menores registradas en el componente vertical del acelerómetro FBA-23.

En la Figura 5.26 se observa la comparación entre la primera explosión, la explosión piloto y la explosión mayor registradas en el componente vertical del acelerómetro FBA-23 cuya similitud es solo visible en las dos últimas. La primera exhibe una posible sucesión de dos explosiones mientras que la segunda y la tercera tienen una forma definida y comparable. En la Figura 5.27 se muestran los espectros de amplitud calculados para estas ventanas.

Espectros de Amplitud K2-1313 Registros de aceleración

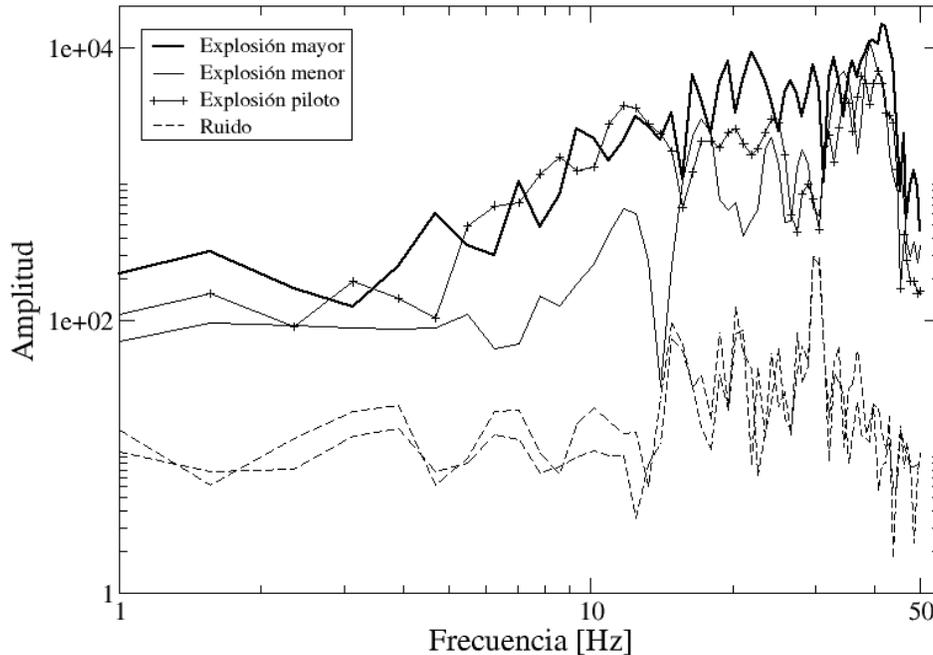


Figura 5.27.- Espectros de Amplitud correspondiente a la componente vertical del sensor FBA-23. Se incluyen la explosión mayor junto con dos menores además de dos segmentos de ruido aleatorio para comparación.

Con sensores de velocidad y periodo corto (1.0 seg) se realizaron 19 tomas con duración de 20 s y cadencia de 1000 muestras por segundo, registros que posteriormente fueron editados y unidos para lograr uno con duración de 380 [s]. Orientamos el sensor en la dirección longitudinal del túnel en el sentido del avance del mismo.

En la Figura 5.28 se presenta el registro obtenido; la primera traza corresponde con el componente vertical, la segunda al horizontal E-W y la tercera al horizontal N-S y se incluye además una ventana de 200 segundos con ganancia recortada en la que observamos presencia evidente de ruido. Notamos que las señales tienen una ganancia superior que satura el límite del sensor, por lo cual decidimos recortar la amplitud para mostrar correctamente la presencia de los demás pulsos. En este caso decidimos recortar la explosión mayor hasta hacerla comparable con las explosiones menores que sucedieron en los primeros segundos de registro; sin embargo, la amplitud en el ruido presente es muy notoria.

En el registro obtenido se logra identificar 34 explosiones y la mayor se localiza cerca de los 200 segundos después de iniciado el monitoreo.

Registro de explosiones con equipo DoReMi Sensor triaxial Lennartz

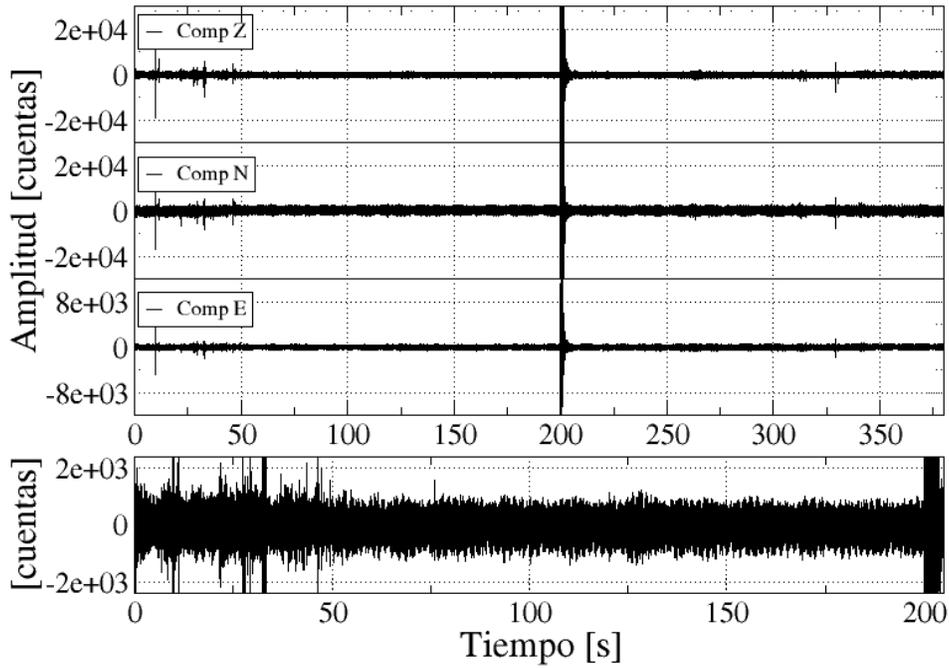


Figura 5.28.- Arriba: muestra típica de los registros obtenidos con equipo DoReMi + sensor triaxial Lennartz LE-3D. Abajo: Ventana con los primeros 200 segundos de registro del primer canal (vertical) con ganancia recortada.

Pulsos registrados a diferentes tiempos Registros de velocidad

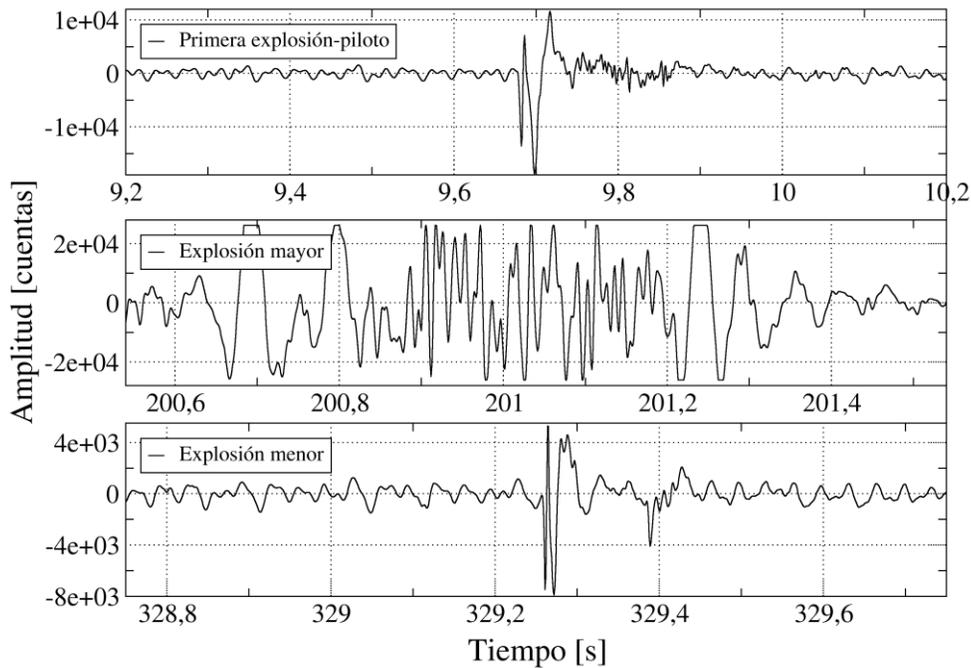


Figura 5.29.- Explosión mayor acompañada de dos pulsos menores registradas en el sísmómetro DoReMi.

Espectros de Amplitud DoReMi Registros de velocidad

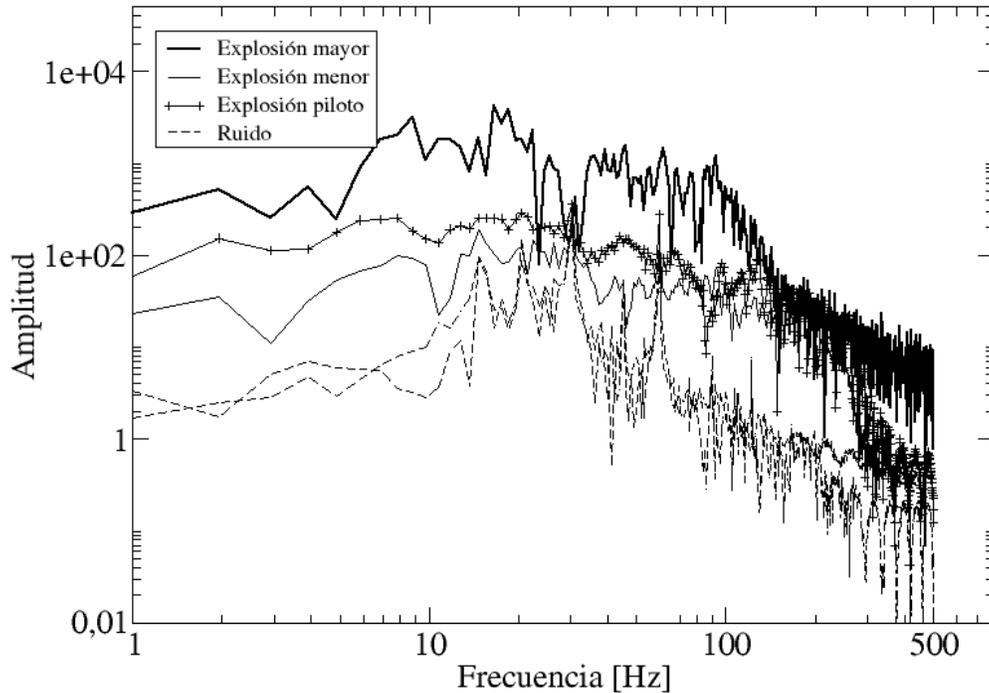


Figura 5.30.- Espectros de Amplitud correspondiente a la componente vertical del sensor LE-3D. Se incluyen la explosión mayor junto con dos menores además de dos segmentos de ruido aleatorio para comparación.

Hay similitud significativa entre señales correspondientes a explosiones diferentes. En efecto, se identificó que señales sísmicas emitidas desde el frente del túnel, separadas en tiempo y de tamaño diferente, son similares cuando se hacen comparables las amplitudes involucradas. No obstante, en este caso, el nivel de ruido presente en las señales adquiridas es de amplitud similar al de los pulsos apenas con unos pocos órdenes por debajo de estos.

Presentamos en la Figura 5.31 un segmento de 20 segundos sustraído de la Figura 5.22 que contiene dos pulsos que sirvieron para empatarse y corroborar su similitud visualmente. Estos pulsos se ubican en un segmento del registro del componente vertical obtenido con el sensor de aceleración durante la secuencia de explosiones, con duración de aproximadamente 1 segundo. Dos señales, asociadas a dos explosiones y separadas un poco más de cinco segundos, se han identificado sobre el componente vertical, debe notarse que la diferencia entre amplitudes de ambas señales identificadas es tal que sólo la primera de aquellas es notable (Figura 5.32).

Componente vertical sensor FBA-23

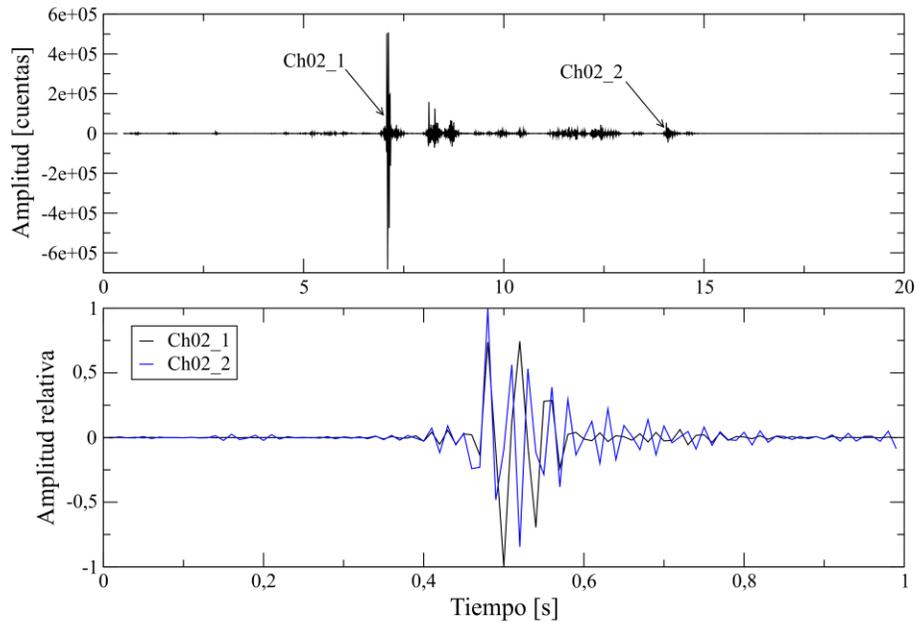


Figura 5.31.- Segmento de las señales obtenidas con equipo K2 + sensor FBA en el que se eligió los pulsos a empatar con separación de 5 segundos para comparar visualmente.

Basta con multiplicar la segunda señal por un factor de aproximadamente 1000 veces para lograr que el primer arribo tenga amplitudes parecidas en ambos registros, y así se encontrar que, al menos durante un ciclo, esto es aproximadamente los primeros 0.15 segundos, las señales son similares. Debe resaltarse aquí que este tiempo incluye dos fases: un primer arribo emergente y una segunda llegada más bien impulsiva.

Lo anterior sugiere que explosiones con diferente tamaño tienen patrón de radiación, y factores de trayecto, similares, por lo que pueden considerarse como estimación de la función de transferencia entre la fuente de ondas y el receptor.

Al comparar la explosión mayor con la más pequeña observada, notamos que tienen una forma muy parecida y que, al calcular sus espectros, no tienen diferencias marcadas. Para capturar las señales que son similares se calculó la correlación cruzada entre una señal patrón y todo el registro. Como la señal patrón se seleccionó aquella que tiene amplitud máxima en el registro. La Figura 5.34 consigna la imagen que muestra la correlación cruzada completa y la autocorrelación del pulso piloto.

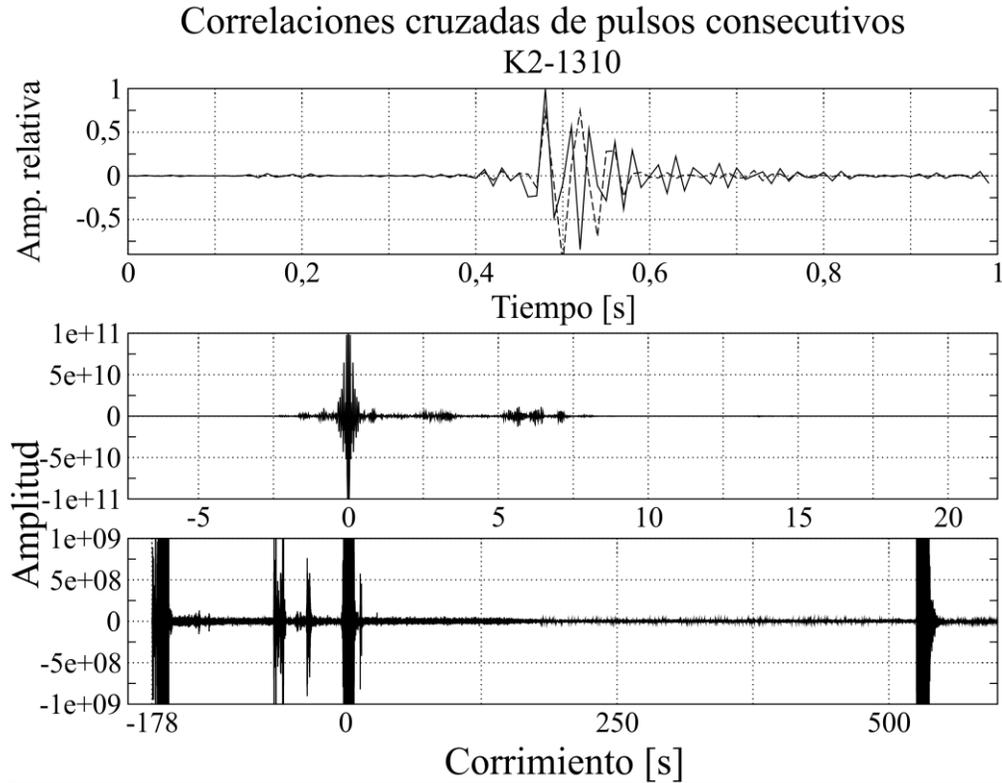


Figura 5.32.- Arriba: pulso mayor empatado con uno de menor amplitud. Abajo: autocorrelación y zoom de la crosocorrelación del pulso piloto con toda la señal registrada en el sensor FBA-23.

Cálculo de VPP

Mediante el Teorema de Parseval y el valor de amplitud rms (A_{rms}) aplicados a los espectros de amplitud estimados para las explosiones, decidimos calcular la velocidad de partícula pico (VPP) con la que vibra el entorno rocoso al detonar explosivos dentro de un túnel. Para ello empleamos la relación entre la velocidad pico y el valor rms del espectro de potencia $V_{peak} = 1.25 * P_{rms}$ (Peterson, 1993). Realizamos el cálculo para la explosión mayor observada en la componente vertical del equipo K2-1310, a partir de filtrar el espectro en un ancho de banda de 1/3 de octava con centro en 40.62 [Hz] y frecuencias de corte de 36.19 y 45.6 [Hz]. Ahí calculamos el valor de la potencia rms (recordemos que elevamos el espectro al cuadrado) y mediante el teorema obtuvimos que la velocidad es de $VPP = 0.132 \text{ m/s}$. Estos valores los comparamos con los establecidos por Baner y Calder (1971, citados por Jiménez Salas et al., 1980) y encontramos que se ubican por debajo del umbral recomendado para evitar el inicio de daño en la formación y posterior colapso. El cálculo se realizó de la siguiente manera.

$$a_{RMS}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T a(t)^2 dt = \int_{f_1}^{f_2} P(\omega) df \approx P \cdot (f_2 - f_1) \quad 5.11$$

$$a = a_{RMS} \cdot 1.25 = 1.25 \sqrt{P \cdot (f_2 - f_1)} \quad 5.12$$

$$VPP = 1.25 \cdot \sqrt{P_{RMS} \cdot (f_2 - f_1)} = 1.25 \cdot \sqrt{1.19906e-03 \cdot (45.6 - 36.19)} = 0.132777 \quad 5.13$$

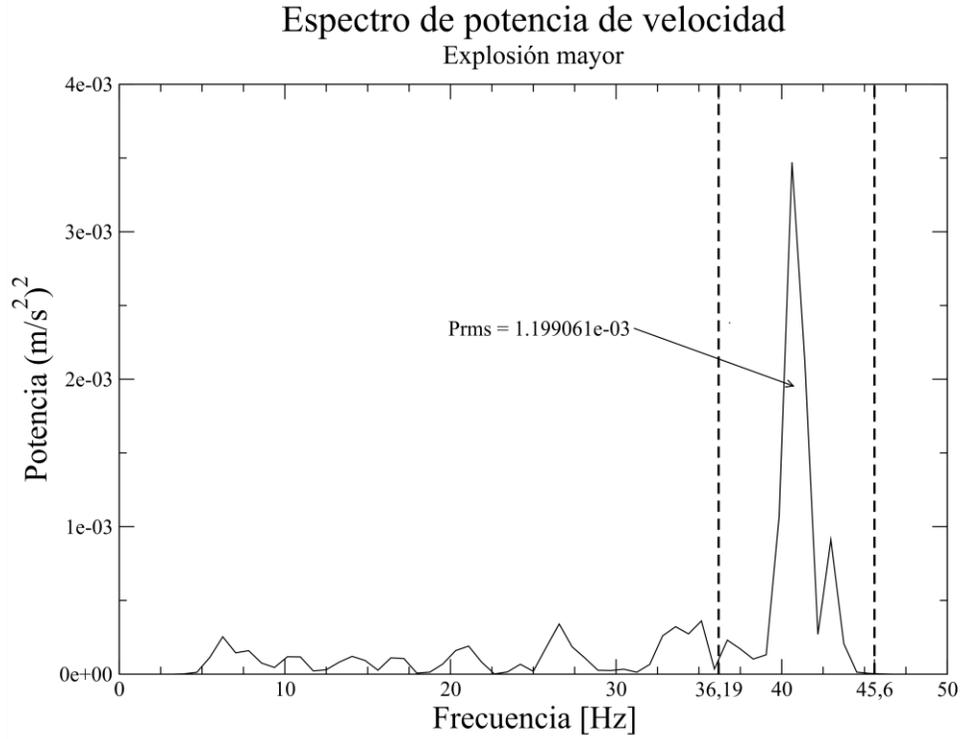


Figura 5.33.- Amplitud rms calculada en el espectro de potencia de velocidad para la explosión mayor.

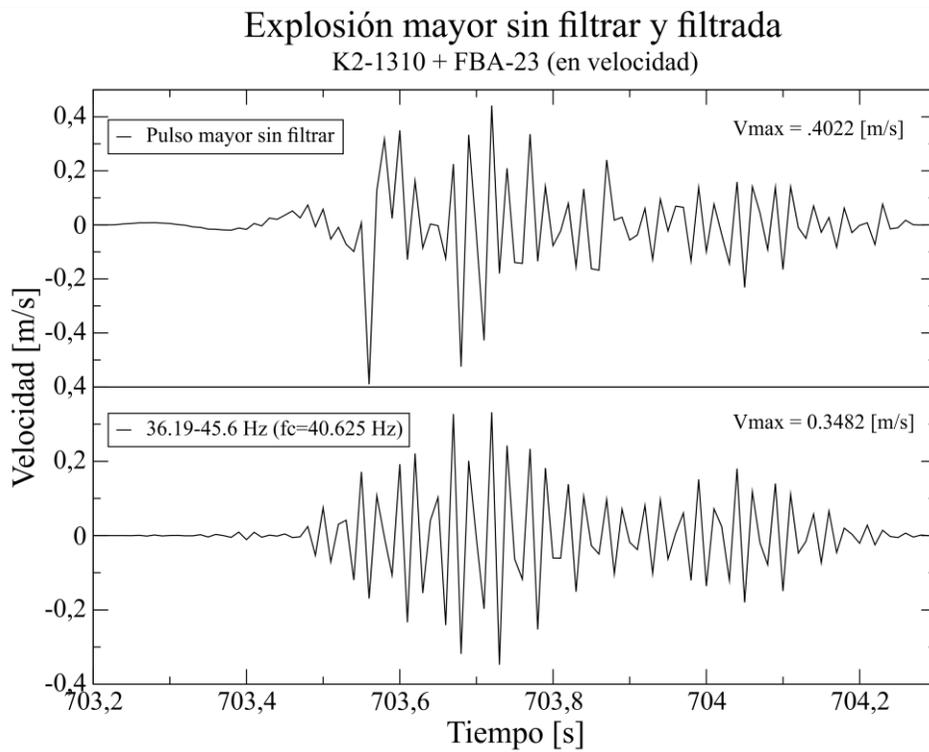


Figura 5.34.- Valores pico de velocidad observados en observados directamente en las señales sin filtrar (arriba) y filtradas (abajo).

Comparamos estos valores con los estimados directamente de las señales sin filtrar y filtradas y resulta menor por lo que verificamos que es una buena estimación (Figura 5.3)

Túnel “El Varal”.

El túnel El Varal presenta una litología semejante a la del túnel Cerro Los Becerros. Ubicado aproximadamente a unos 6 kilómetros de distancia de este último; realizamos experimentos para registrar el campo de ondas generado tanto por la máquina barrenadora como por los explosivos. La cantidad de instrumental que se empleó para estos experimentos fue menor debido a la logística de campo y la falta de tiempo.

Equipo utilizado.

Para el experimento que se llevó a cabo en este túnel se utilizaron 22 geófonos verticales de 4.5 [Hz] y 2 sondas con sensores omnidireccionales de 15 [Hz] en un solo arreglo lineal. El equipo de registro fue un sismógrafo típico de exploración somera con digitalizador de 24 bits marca GEODE, el acondicionador de la señal con ganancia variable y filtro anti-alias. Los registros se almacenan en el mismo ordenador que realiza la grabación, el proceso de adquisición y lleva el control de calidad de los datos adquiridos.

Esta configuración permitió obtener información pertinente a las frecuencias entre los 4.5 y los 125 [Hz].

Las especificaciones técnicas de los geófonos y sensores empleados en el arreglo lineal en este sitio se consignan en la Tabla 5.10 y las curvas de respuesta en el Anexo A.

Modelo geófono	Frecuencia Natural	Resistencia (Ω)	Sensitividad intrínseca (V/m/s)	Constante de amortiguamiento
Omni-2400	15 [Hz]	2400 Ω	52	2066
GS-11D	4.5 [Hz]	4000 Ω	32	762

Tabla 5.10.- Especificaciones técnicas correspondientes a los sensores de los geófonos verticales y las sondas (omnidireccionales).

Mediciones hechas con sensores de 4.5 y 15 [Hz].

Dentro del túnel El Varal se hizo un experimento con el que se midió el campo de ondas sísmicas generado por la maquina barrenadora. El campo de ondas sísmicas que induce la herramienta de corte durante la excavación de los barrenos en la formación geológica nos permite obtener información del entorno y hacia el frente del túnel.

Se instaló un arreglo lineal de geófonos muy cercano al frente de excavación con el que se adquirieron señales sísmicas generadas durante la operación de las perforadoras. La extensión del tendido fue de aproximadamente 92 metros colineal con el eje del túnel. El primer geófono se instaló aproximadamente a diez metros del frente y los geófonos restantes se instalaron con separación entre geófonos de cuatro metros.

Para este único experimento se pidió perforar dos oquedades en la pared lateral de la formación a 1.5 metros de altura respecto del piso del túnel y 2 metros de profundidad, en las que se empotraron las sondas que permitieron realizar mediciones con los sensores omnidireccionales mismos que se conectaron a los canales 3 y 6 por encima de los geófonos conectados a los canales 2 y 5 para comparar el movimiento del terreno en el piso con el movimiento en el entorno de la formación. La Figura 5.35 muestra la disposición de los geófonos y las sondas empotradas empleados dentro del túnel.

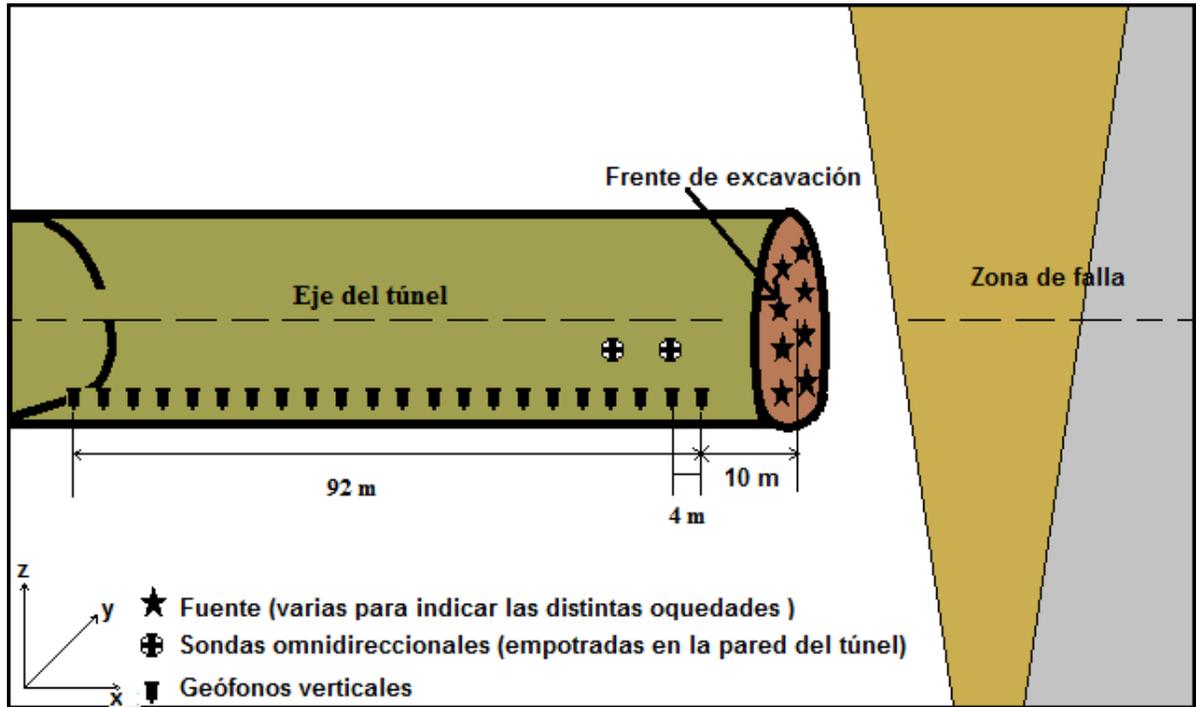


Figura 5.35.- Arreglo lineal de geófonos clavados en el piso dentro del túnel El Varal a 10 [m] de separación y 92 [m] de extensión total. Las cruces indican la posición lateral en que se situaron las sondas empotradas en la pared del túnel.

Las tomas de cada registro se realizaron a una cadencia de 250 muestras por segundo con una longitud de 60 segundos de registro por cada toma. Todos los canales trabajaron a ganancia baja entre los 24 y 36 decibelios. La grabación se inició un poco después de que empezó a operar la barrenadora y se obtuvieron 63 tomas con lo que se logró una base de datos de poco más de una hora de registro. En la Tabla 5.11 se consignan los parámetros básicos con que se adquirieron los datos en este experimento.

Experimento	F_s [Hz]	Separación fuente-receptor [m]	Δt [s]	Duración [s]	No de tomas
1	4.5 y 15	4	0.004	60	63

Tabla 5.11.- Parámetros básicos de adquisición del experimento realizado en el Túnel El Varal, adquiridos con el arreglo lineal de geófonos.

Así también una muestra típica de las tomas de registros obtenidos en este experimento se consigna en la Figura 5.36.

Registros adquiridos con equipo GEODE
Separacion entre trazas

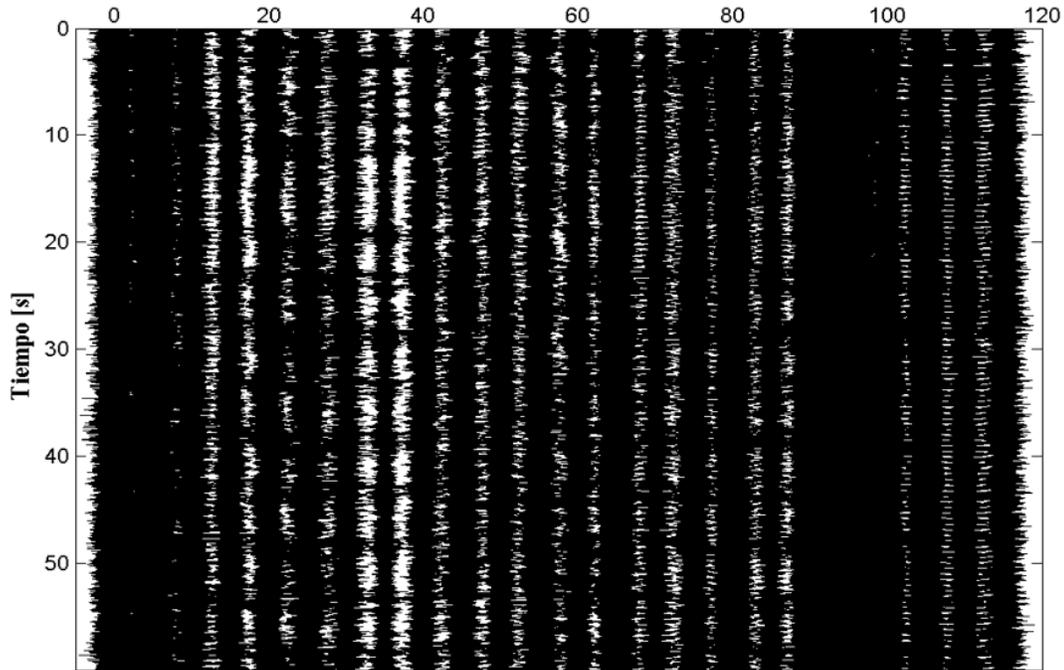


Figura 5.36.- Ejemplo de trazas adquiridas con equipo registrador GEODE dentro del túnel “El Varal”. Registro correspondiente a la primera toma.

A continuación, en la imagen de la Figura 5.37 se muestran los espectros de densidad de potencia para dos de las trazas registradas en los canales 2 y 3 (geófono y sonda) respectivamente; las imágenes de todas las trazas para una sola toma se consignan en el anexo B.

En la estimación de los espectros para las tomas del experimento se utilizó una ventana de 1 [s] con lo que se obtuvieron 60 ventanas sin traslape para cada toma de 60 [s]. Se aplicó un suavizamiento de tipo Hanning que acondicionó la señal para atenuar las discontinuidades en los bordes de la señal.

La imagen en la base de la Figura 5.37 muestra una mayor concentración de la energía en el ancho de banda entre los 10 y 115 [Hz] contenida en la señal. El espectro es atenuado drásticamente por manifestación de la frecuencia de Nyquist a frecuencias por encima de los 125 [Hz]. Se incluyen los modelos globales de ruido alto y bajo como referencia en líneas azules discontinuas.

En los espectros promedio de las tomas podemos observar un comportamiento creciente en la energía a partir de los 10 [Hz] y hasta los 60 [Hz] a partir de donde el comportamiento es más plano. Se exhiben múltiples máximos en el rango de los 10 a 45 [Hz] pero sin una clara definición. Se pueden identificar cinco máximos espectrales locales bien definidos, el primero cerca de 45 [Hz], el segundo en 60 [Hz], el tercero en 75 [Hz], el cuarto en 90 [Hz], el quinto máximo se ubica en 105 [Hz] y se observa un último máximo ubicado en 118 [Hz] disminuido por el filtro pasa-bajas de la frecuencia de Nyquist. Recalamos el máximo ubicado en la frecuencia de 90 [Hz] que impone un nivel de energía muy por encima de los demás. El espectro se sitúa por encima del modelo de ruido alto global en todo el rango

de frecuencias en que concuerdan ambos modelos (1-10 [Hz]) y por debajo de 1 [Hz] ya no es válido para nuestras estimaciones ya que esa es la mínima frecuencia recuperable para los geófonos.

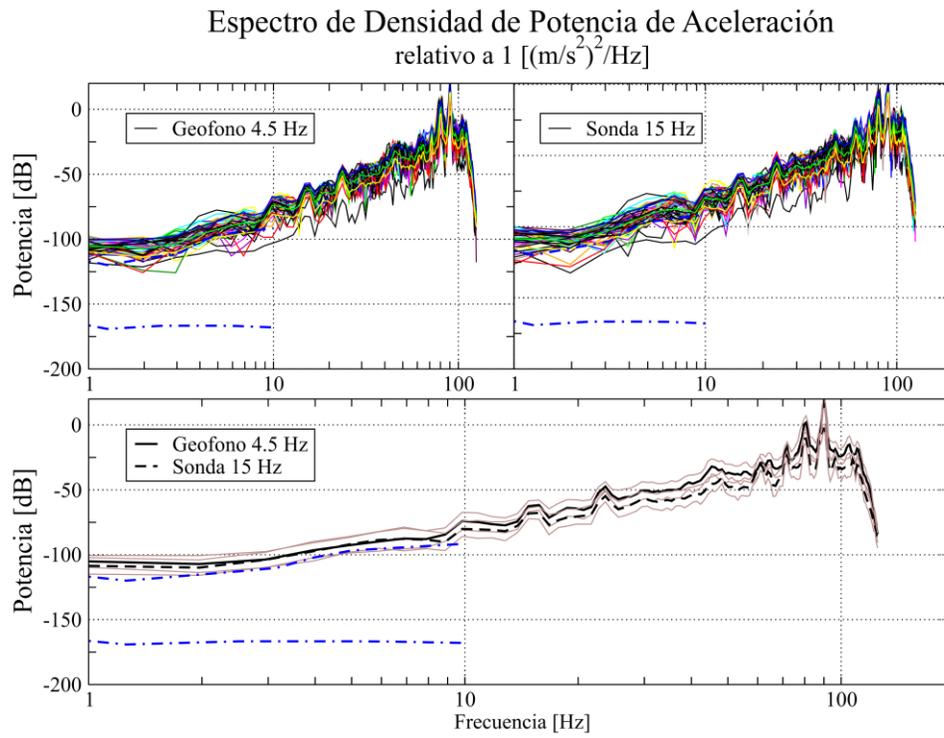


Figura 5.37.- Arriba izquierda: Espectro de densidad de potencia correspondiente a 60 ventanas del segundo canal con geófono de 4.5 [Hz]. Arriba derecha: Espectro de densidad de potencia correspondiente al tercer canal (sonda con sensor omnidireccional) empotrada en la pared justo arriba del primer geófono. Abajo: Promedio.

Las sondas exhiben un espectro de forma compatible con aquel observado en los espectros de los geófonos hincados en el piso con ligeras variaciones, 20 dB por debajo. En los espectros estimados para estas se observa una concentración de energía principalmente en el ancho de banda entre los 15 y 115 [Hz] y podemos distinguir máximos bien identificados ubicados en las frecuencias de 45, 60, 75, 90, 105 [Hz] y con menor definición encontramos máximos en los 15, 25, 51 y 111 [Hz]. Podemos destacar que en estas estimaciones el máximo preponderante perteneciente a la frecuencia de 90 [Hz] rebasa a los demás con una buena diferencia, además nuestro máximo más lejano se ve influenciado y disminuido debido a la frecuencia de Nyquist (125 [Hz] en este caso) que atenúa el espectro. El espectro estimado para estas señales encuentra ligeramente por encima del modelo de ruido alto global dentro del rango de frecuencias para el que el espectro es aceptable, pero recalcando el hecho de que las señales se registraron bajo condiciones exhaustivas de trabajo.

Los espectros de densidad son similares tanto en la sonda como en el geófono de fuera y difieren únicamente por un mínimo nivel en amplitud mayor en la sonda.

Velocidad de cortante en el entorno del túnel El Varal

También, replicando el procedimiento empleado en el túnel “Cerro Los Beceros” y usando las señales del campo de ondas de ruido sísmico ambiental registrado con el arreglo lineal de geófonos, estimamos la dispersión de velocidad de fase para posteriormente, mediante la inversión de dicha curva, obtener un modelo de velocidades de onda de corte que represente las propiedades de propagación de las ondas en el entorno rocoso de este túnel.

Procesado de datos.

Usando el mismo programa de procesamiento de señales sísmicas comercial realizamos la transformación al dominio de la velocidad de fase contra la frecuencia de las trazas adquiridas con el arreglo lineal y así identificar la curva de dispersión de la velocidad de fase. A continuación, en la Figura 5.38, se muestra la imagen de esta transformación. Las imágenes corresponden con los datos crudos obtenidos con el tendido lineal registrados a cadencia de 4 [ms], separación entre geófonos de 4 [m] y duración de 60 [s]. Las zonas en color azul que representan las amplitudes mayores nos indican la tendencia de los modos a picar. Identificamos nuestra curva de dispersión de la velocidad de fase que marcamos con puntos en blanco y supusimos que el modo fundamental se encuentra por encima de los 11 [Hz] en dicha imagen.

Mediante la inversión por mínimos cuadrados obtuvimos el modelo de velocidad de onda de cortante. El rango de validez de nuestra imagen como se indicó anteriormente se define por la relación $2\Delta L < \lambda < 2L$ y en este caso fue de 10 y 168 metros. Para la imagen en la Figura 5.38 nuestras velocidades de fase decrecen desde aproximadamente los 1000 [m/s] a 11 [Hz] hacia los 320 [m/s] en 29 [Hz]. Por otra parte, vemos que a periodos largos la velocidad de fase podría seguir creciendo hasta los 2000 [m/s] sin poder determinar un límite concreto.

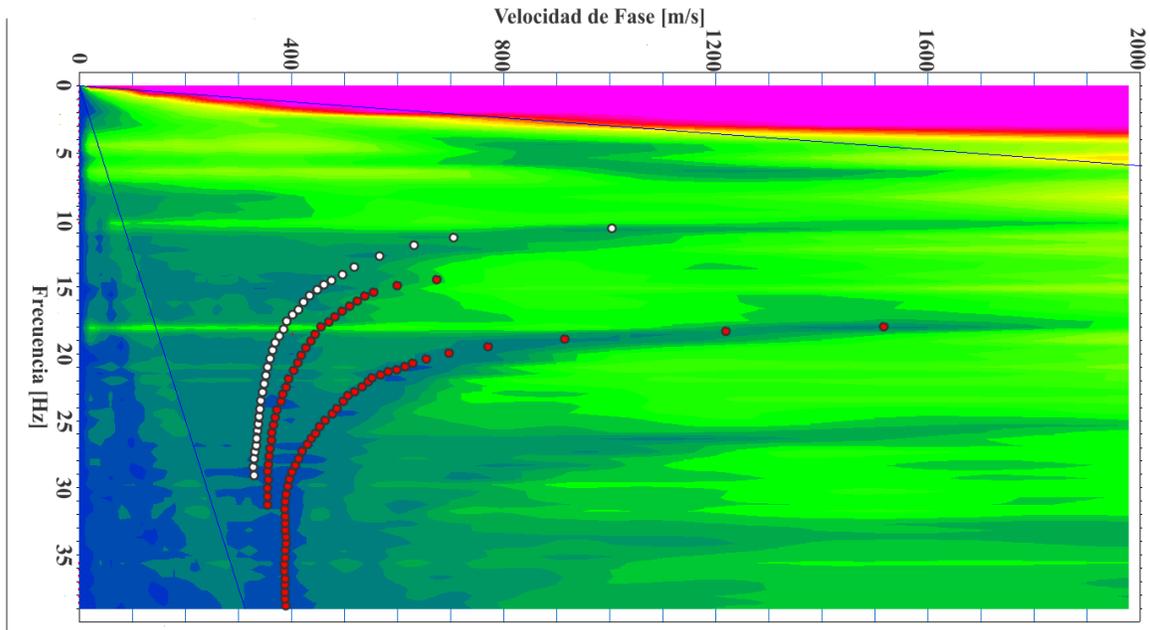


Figura 5.38.- Transformación al dominio de la velocidad de fase y la frecuencia para detectar la curva de dispersión de la velocidad de fase del modo fundamental de la onda indicada por los puntos blancos.

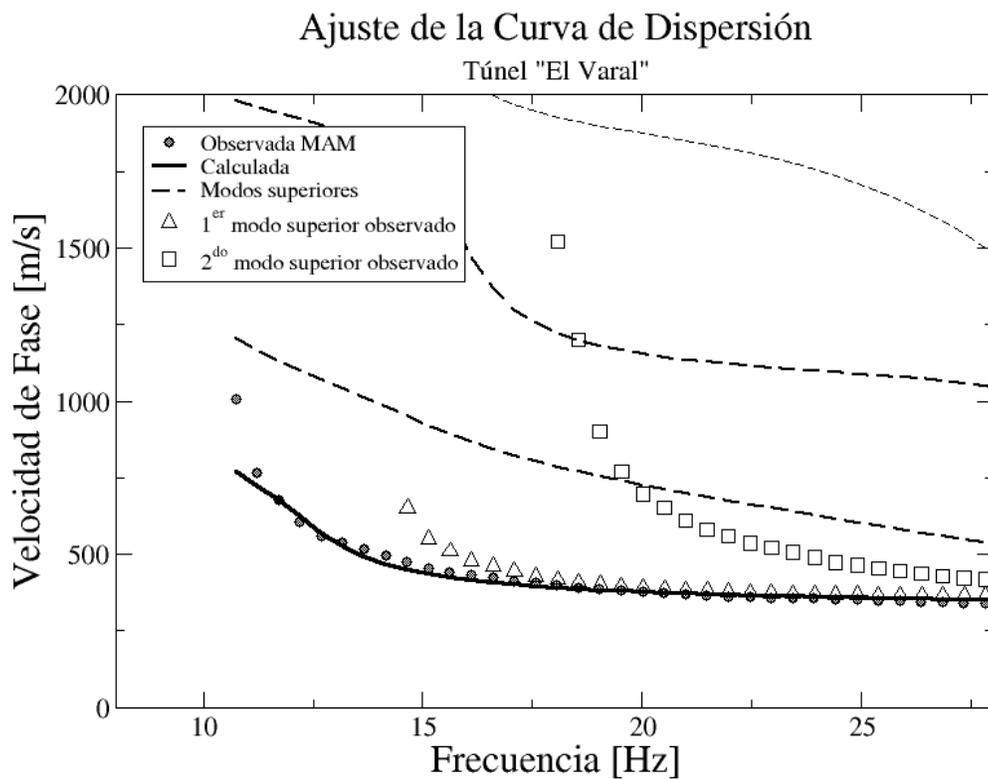


Figura 5.39.- Ajuste de la curva de dispersión correspondiente con el modo fundamental empleada para obtener el modelo de velocidad de onda de cortante en el piso del túnel "El Varal".

Empleando los mínimos cuadrados realicé la inversión de las curvas de dispersión para determinar una solución mediante la reducción del error en la estimación del modelo de velocidad de onda de cortante. Una vez que ese error se redujo al mínimo obtuvimos el modelo de velocidad de onda S representativo de las características de transmisión del entorno rocoso del túnel. El modelo obtenido al realizar la inversión del modo fundamental, indicado por los puntos blancos, junto con sus valores numéricos, se ilustra en la Figura 5.40. Asignamos tres capas y el semi-espacio al modelo.

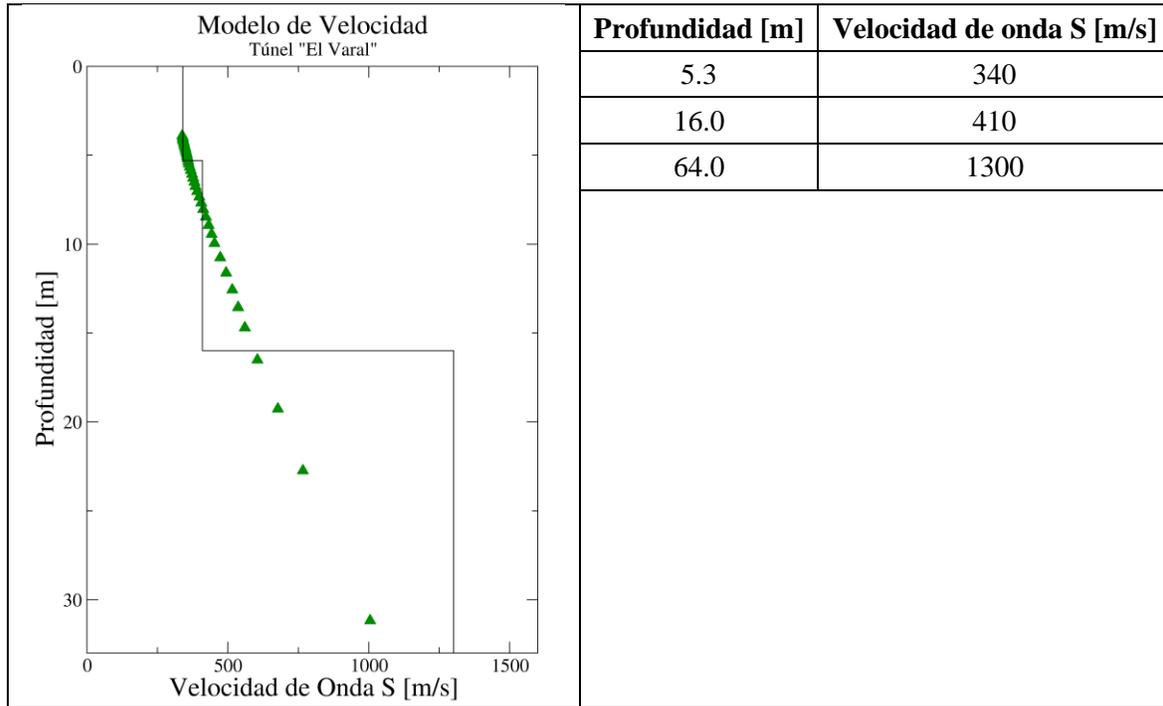


Figura 5.40.- Modelo de velocidad de onda de cortante calculado a partir de la inversión de la curva de dispersión de la velocidad de fase para el modo fundamental incluidos los valores numéricos. Las dos primeras capas tienen velocidades menores a 450 [m/s] y aumentan a 1300 [m/s] a partir de los 16 [m] de profundidad.

También para estos datos realicé mediciones de dispersión de las velocidades de fase y de grupo de los sismogramas virtuales calculados mediante la correlación cruzada de los registros del campo de ruido sísmico ambiental. Calculé las correlaciones cruzadas seleccionando una ventana de longitud $L=1$ [s] obteniendo 60 ventanas para la longitud completa de cada registro. De igual manera acondicionamos las señales quitando media y tendencia lineal a las señales filtradas para hacer el cálculo de las correlaciones cruzadas en el dominio del tiempo. Ya calculadas las correlaciones cruzadas asignamos a cada una su respectiva distancia de separación con respecto del primer sensor (piloto). Incluimos las autocorrelaciones promedio (fuente), ubicadas a un corrimiento de 0.0 metros de separación (Figura 5.41).

Acorde con el esquema seguido para los datos del túnel Los Becerros, después filtramos cada sismograma virtual en los anchos de banda siguientes: 3-9, 10-25, 32-55 y 65-110 [Hz] para formar secciones en estos cuatro diferentes anchos de banda. A cada sismograma se le calculo la envolvente de Hilbert y se incluyen sobrepuestas a su respectivo sismograma virtual en las Figuras 5.42, 5.43 y 5.44.

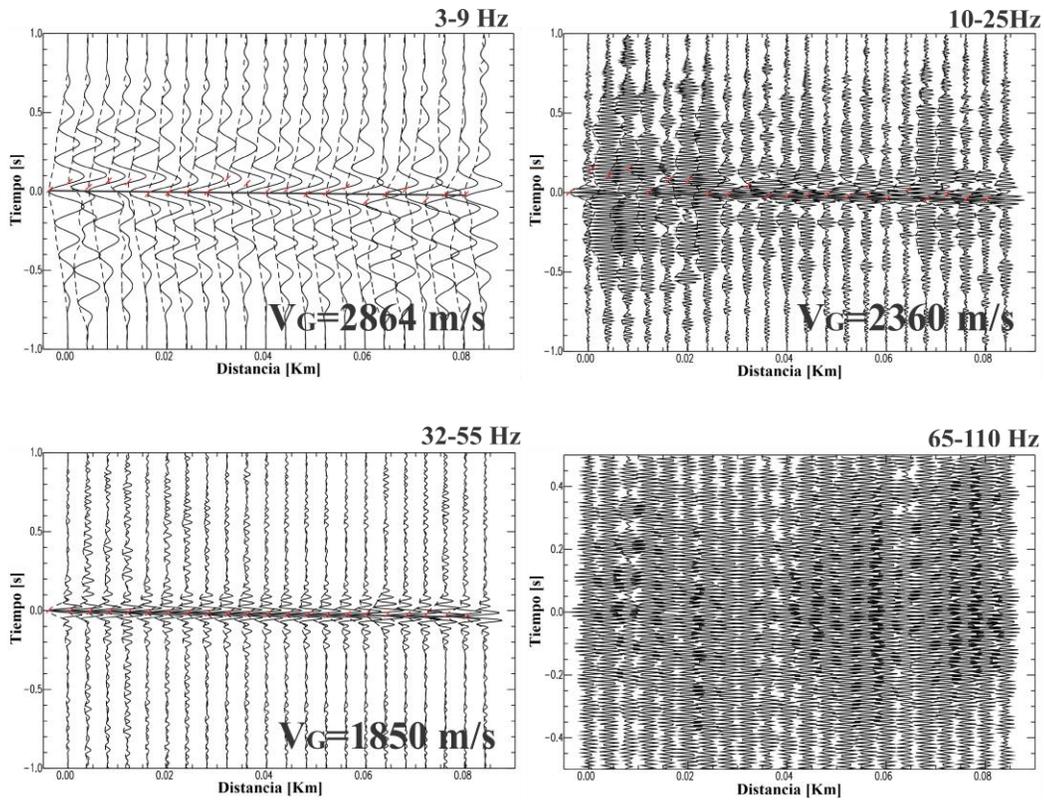


Figura 5.41.-

Figura 5.41.- Correlaciones cruzadas de los registros obtenidos con geófonos de alta frecuencia, calculadas en cuatro diferentes anchos de banda como se describe arriba con información en tres de ellos. Los máximos de las correlaciones se ubican a corrimientos positivos menores a 0.1 [s].

Notamos que existe información en tres anchos de banda en los que se puede seguir una fase casi hasta la longitud completa del tendido, sin embargo, para ser congruentes con el procedimiento seguido en el túnel “Cerro Los Beceros”, utilizamos las envolventes de los sismogramas virtuales en cada ancho de banda. Uní los máximos de las envolventes a través de todo el tendido en cada ancho de banda y encontré velocidades de grupo V_G asociadas a la frecuencia f_c en las bandas mencionadas. En este caso nuestras velocidades de grupo fueron de $V_G(f_c) = 2864 [m/s]$ entre 3 y 9 [Hz], $V_G(f_c) = 2360 [m/s]$ entre 10 y 25 [Hz] y $V_G(f_c) = 1850 [m/s]$ entre 32 y 55 [Hz] (Figura 5.41).

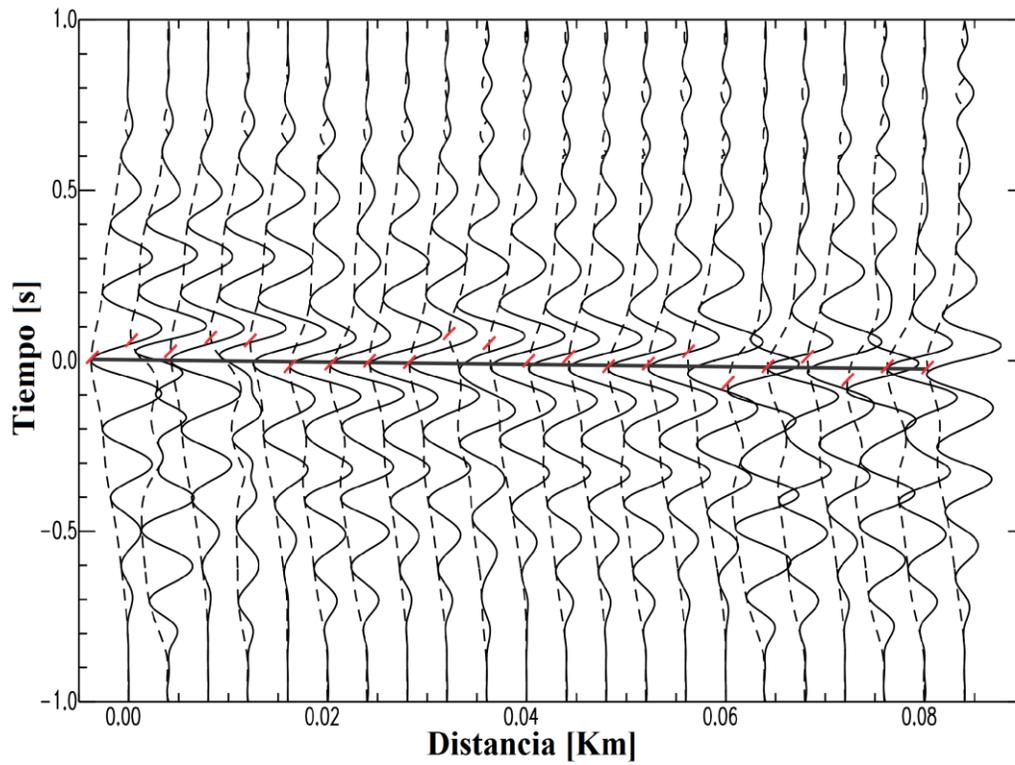


Figura 5.42.-Sismogramas virtuales obtenidos después de filtrar la correlación cruzada en el ancho de banda de 3 y 9 [Hz] con una señal predominante que recorre el tendido de geófonos a 2864 [m/s].

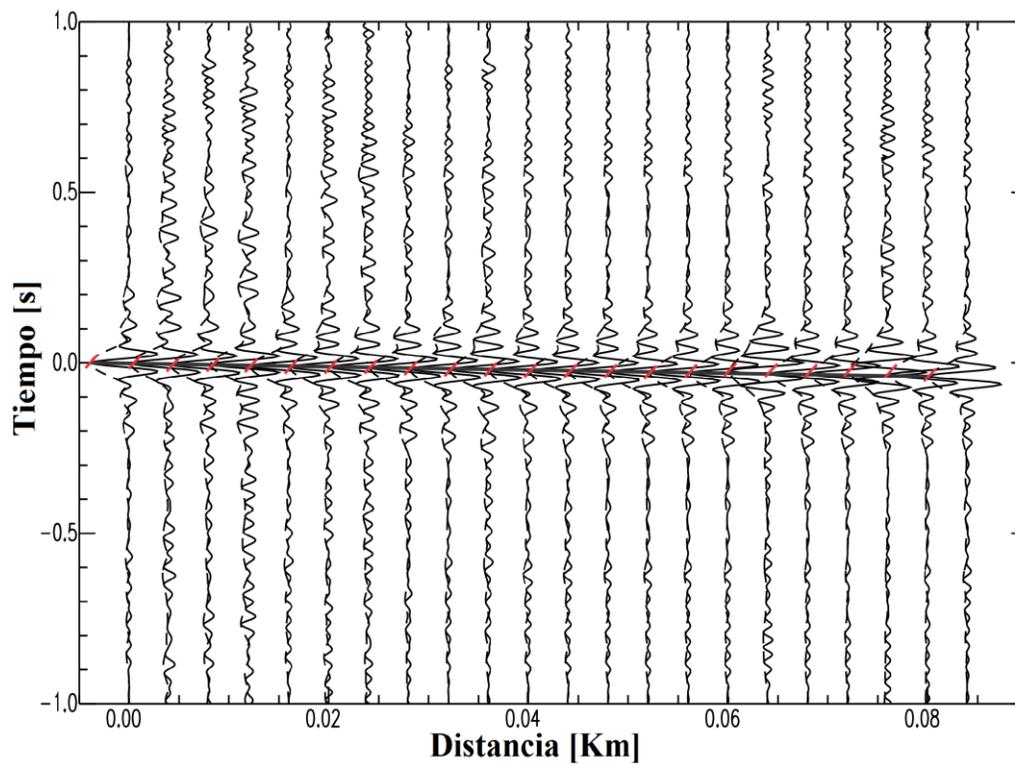


Figura 5.43.- Correlaciones cruzadas filtradas en el ancho de banda entre los 10 y los 25 [Hz] con una velocidad de 2360 [m/s].

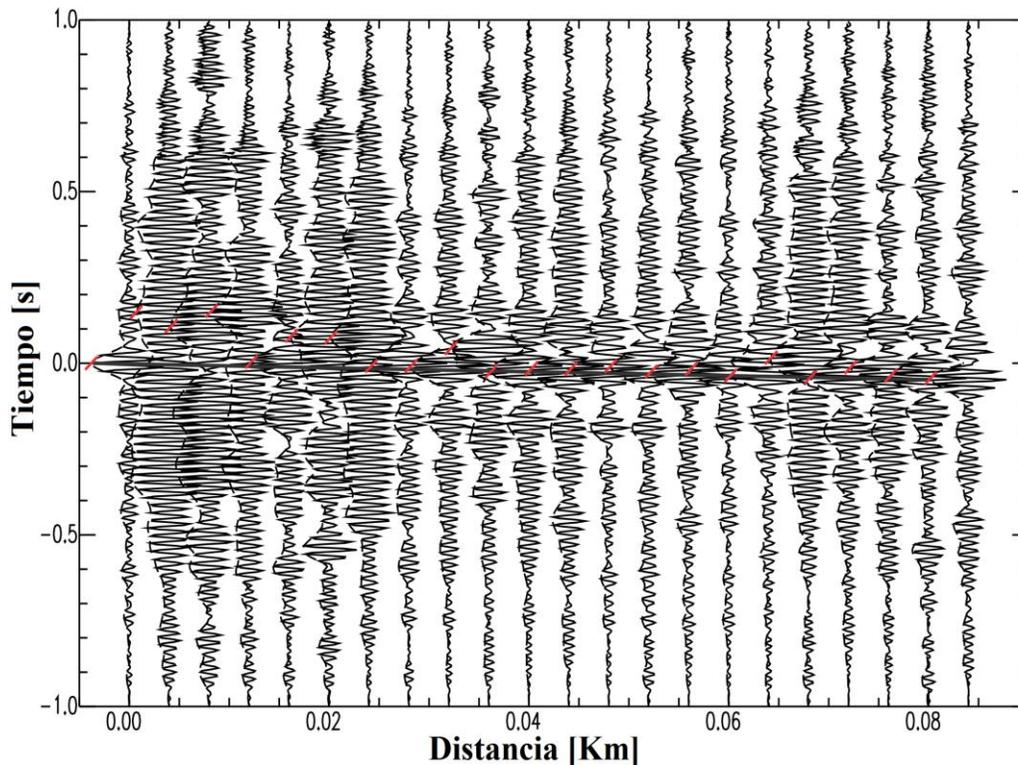


Figura 5.44.-Sismogramas virtuales obtenidos después de filtrar la correlación cruzada en el ancho de banda de 32-55 [Hz] con una señal predominante que recorre el tendido de geófonos a más o menos 1850 [m/s].

Medición del movimiento del terreno generado por explosiones dentro del túnel.

Continuando con el mismo flujo de trabajo en los experimentos, se registraron datos del campo de ondas sísmico generado a partir de detonaciones de explosivos dentro del túnel.

El equipo utilizado consistió en:

- 1 registrador tipo K2 marca Kinematics® con acelerómetro tipo FBA.
- 1 sismómetro triaxial de banda intermedia tipo CMG-40T de la empresa Güralp.
- 1 digitalizador DoReMi de la empresa SARA Electronics.
- 3 sensores triaxiales marca Lennartz.

Se realizaron mediciones solo dentro del túnel a unos 60 [m] del portal de entrada. Se tuvo la mayor cautela posible al colocar los equipos considerando la seguridad del instrumental, por lo que se pidió al personal encargado de la explosión recomendar una posición cercana y a la vez segura para instalarlos. Se cubrieron los equipos lo más cuidadosamente posible y se aseguraron de manera que no tuvieran interacciones externas o golpes.

El primer equipo que se instaló fue un sismómetro Güralp de banda intermedia acoplado al registrador K2-1310 aproximadamente a 150 metros del frente del túnel y a 60 metros del portal de entrada. Además, se instaló el equipo DoReMi acoplado con un sensor triaxial Lennartz, junto al registrador.

Mediciones con sensores de periodo intermedio (30 [s]-50 [Hz]).

Equipo: K2-1310+Guralp

Este equipo registró a una cadencia de 100 muestras por segundo y una longitud de registro de 1800 [s]. En este equipo se observaron 65 explosiones bien definidas, más de las que se registraron en el túnel Cerro Los Becerros. La Tabla 5.12 contiene la configuración básica que se usó para registrar con estos equipos.

Equipo	F₀ [Hz]	Δt [s]	Duración [s]	No de tomas
K2 +Guralp	50	0.01	1800	1

Tabla 5.12.- Parámetros básicos de adquisición de los equipos K2 dentro del túnel El Varal durante las detonaciones de explosivos.

Equipo	F_s [Hz]	Δt [s]	Duración [s]	No de tomas
DoReMi + Lennartz	1	0.001	20	58

Tabla 5.13.- Parámetros de adquisición básicos para el equipo DoReMi dentro del túnel El Varal durante las detonaciones de explosivos.

Una muestra típica de los registros obtenidos con en este experimento con los equipos anteriormente descritos se da en la Figura 5.45. Solo se plasman los resultados que pertenecen a canal 2 del registro correspondiente con la componente vertical del acelerómetro FBA, interno en el registrador. Como se puede observar estos registros exhiben perfectamente los pulsos generados a partir de las explosiones. No obstante, el pulso de mayor amplitud (que en realidad son varios pulsos muy juntos) impone un nivel mayor de energía por lo que los pulsos menores no son observables en las gráficas. También destacamos que la amplitud de dichas explosiones supero la capacidad del sismómetro Guralp.

Registro de explosiones con equipo K2-1310 Sensores triaxiales FBA + CMG-40T

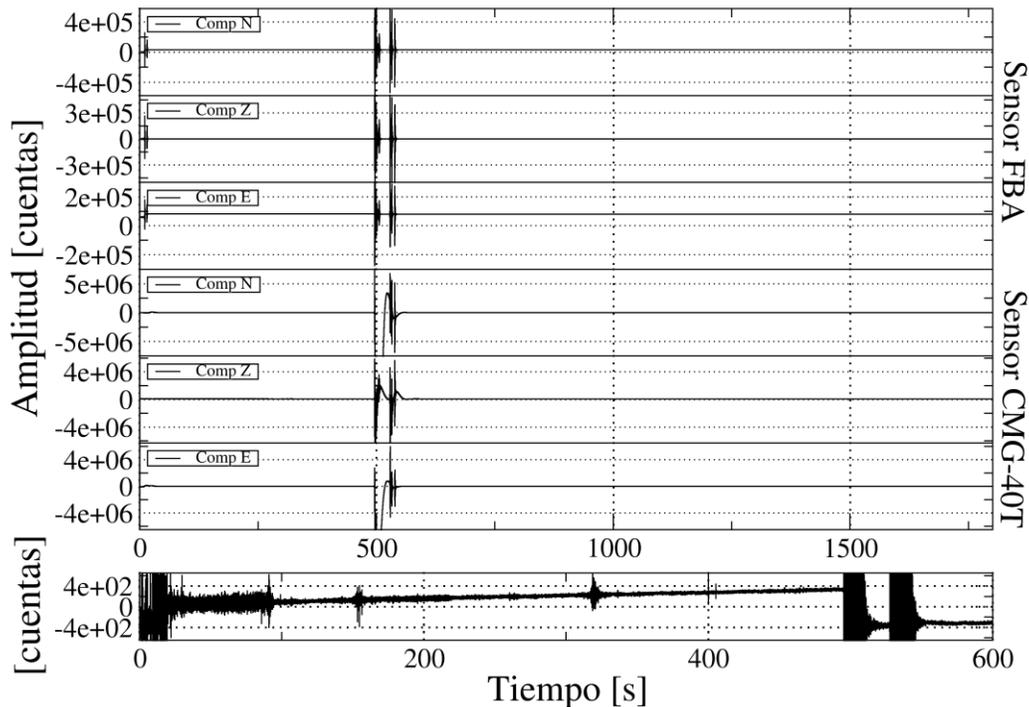


Figura 5.45.- Arriba: muestra típica de registro obtenido con registrador K2-1310+Guralp correspondiente a 30 minutos de registro de explosiones cerca del frente de excavación del túnel “ElVoral”. Los entrecuadros interiores indican el componente. Abajo: ventana con 600 segundos de registro del segundo canal (FBA-vertical) con ganancia recortada.

En la Figura 5.46 se observa la comparación entre tres explosiones registradas en el componente vertical del acelerómetro FBA-23, siendo la tercera la explosión mayor que se exhibe como una sucesión de pulsos. La primera y la segunda tienen una forma muy parecida un poco diferente de la tercera posiblemente por presentar varios pulsos.

Mostramos en la Figura 5.47 el cálculo de los espectros de amplitud ventaneados, estimados para los registros de explosiones adquiridos en el frente del túnel. La ventana empleada en este caso fue de 20 [s] lo que resultó en 87 ventanas sin traslape para la longitud completa de registro. Se obtuvieron las estimaciones de los espectros de amplitud asumiendo una señal de carácter periódico. Los espectros correspondientes a las componentes restantes se consignan en el Anexo B. En dicha imagen se muestra el espectro correspondiente a la componente vertical del sensor FBA acoplado al equipo K2-1310. Los máximos espectrales locales no se definen muy claramente sin embargo se pueden destacar aquellos situados en las frecuencias de 27, 30, 33 [Hz], una serie de máximos aleatorios entre los 34 y los 40 [Hz] para rematar con un último máximo en 42 [Hz]. Para estas señales los más representativos se observan en las frecuencias de 30 y 42 [Hz] frecuencia a partir de la cual comienza a decaer el espectro de la señal. Es de destacarse que en la estimación de estos espectros se obtuvieron resultados que varían en cuanto a definición en comparación con los obtenidos para el túnel Cerro Los Becerros. Esto quizás se deba a una mayor cantidad de pulsos registrados.

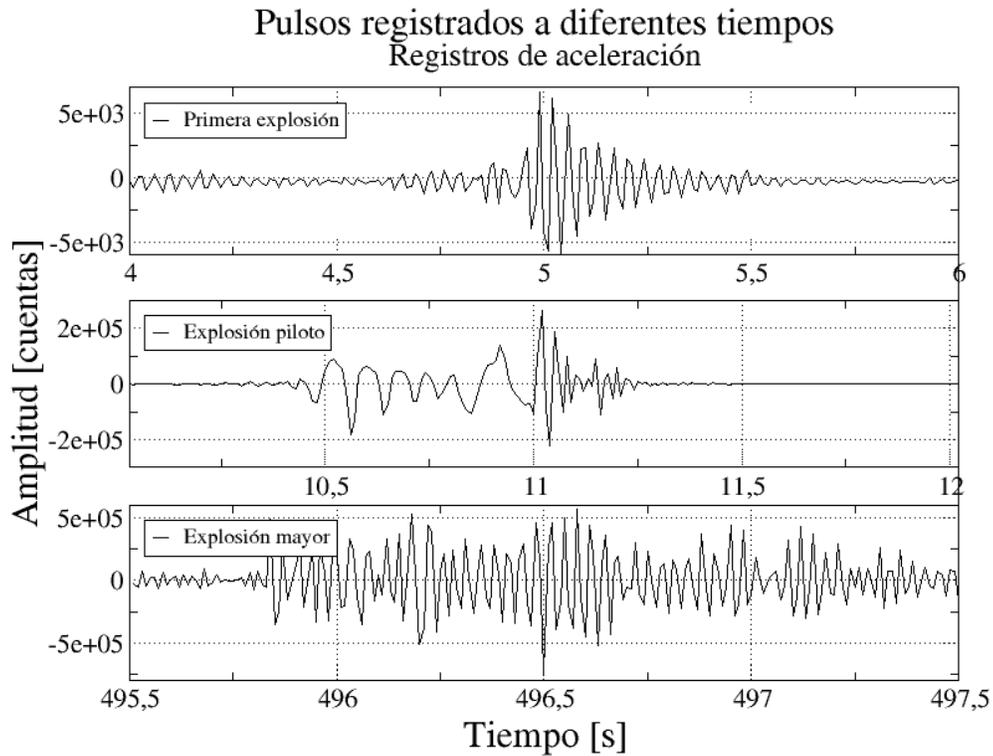


Figura 5.46.- Explosión mayor acompañada de dos pulsos menores registradas en el componente vertical del acelerómetro FBA-23.

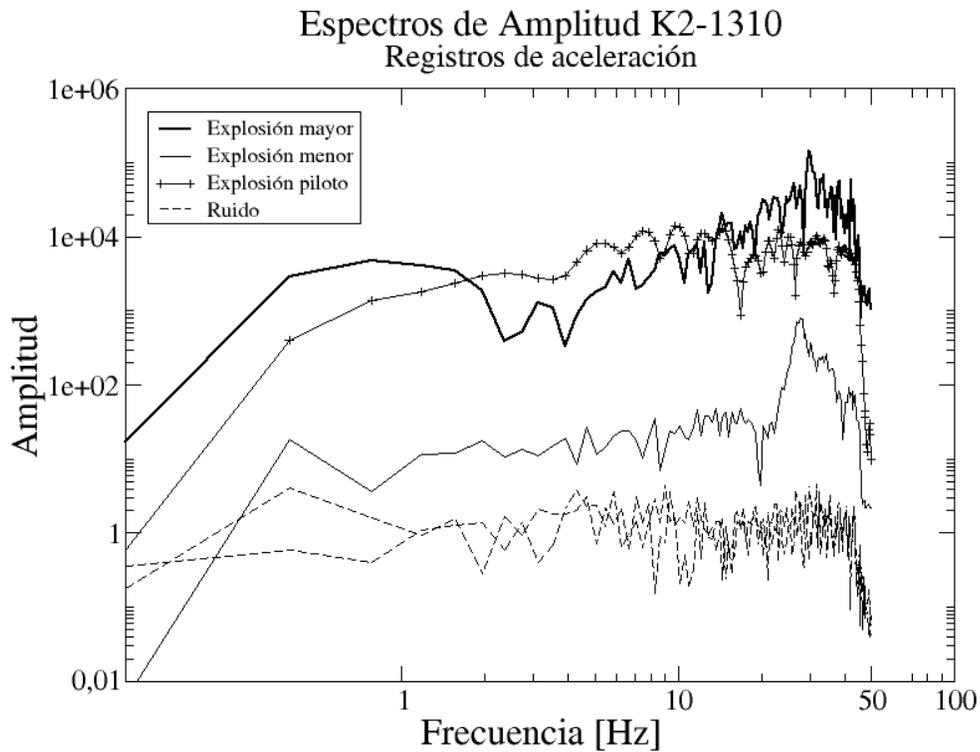


Figura 5.47.- Espectros de Amplitud correspondiente a 87 ventanas de la componente vertical del sensor FBA-23. Se incluyen la explosión mayor junto con dos menores además de dos segmentos de ruido aleatorio para comparación.

Mediciones con sensores de 1.0 [Hz]

DoReMi + Lennartz

También se acopló la componente vertical de tres sensores triaxiales de frecuencia natural 1 [Hz] al registrador DoReMi y los parámetros de adquisición para el equipo se consignan en la Tabla 5.13. Con este equipo se logran observar 42 explosiones. En la Figura 5.48 se presenta una muestra típica de las señales registradas con estos equipos. En este caso no es necesario indicar que las tres trazas representan a la componente vertical de cada uno de los sensores anteriormente mencionados. En las gráficas se observan diferentes amplitudes debido a que cada explosión pertenece a un determinado cartucho de explosivo.

Este equipo registró a una cadencia de 1000 muestras, la adquisición se hizo mediante registros individuales de 20 [s] que posteriormente se editaron y se unieron para lograr un solo registro continuo de 19 [min] y 20 [s].

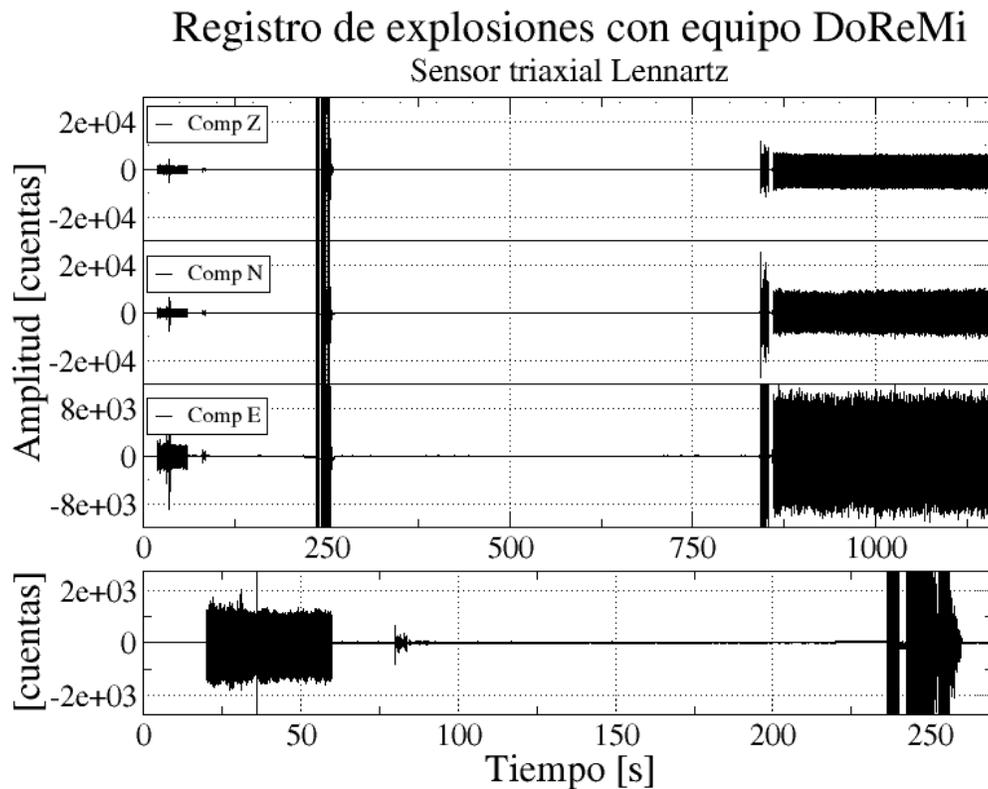


Figura 5.48.- Muestra típica de los registros obtenidos con equipo DoReMi + Lennartz correspondiente a poco más de 19 minutos de registro de explosiones dentro del túnel.

En la Figura 5.49 mostramos ejemplificados tres pulsos que representan las primeras explosiones en las cuales notamos una pobre definición cuyas similitudes no son observables.

Pulsos registrados a diferentes tiempos registros de velocidad

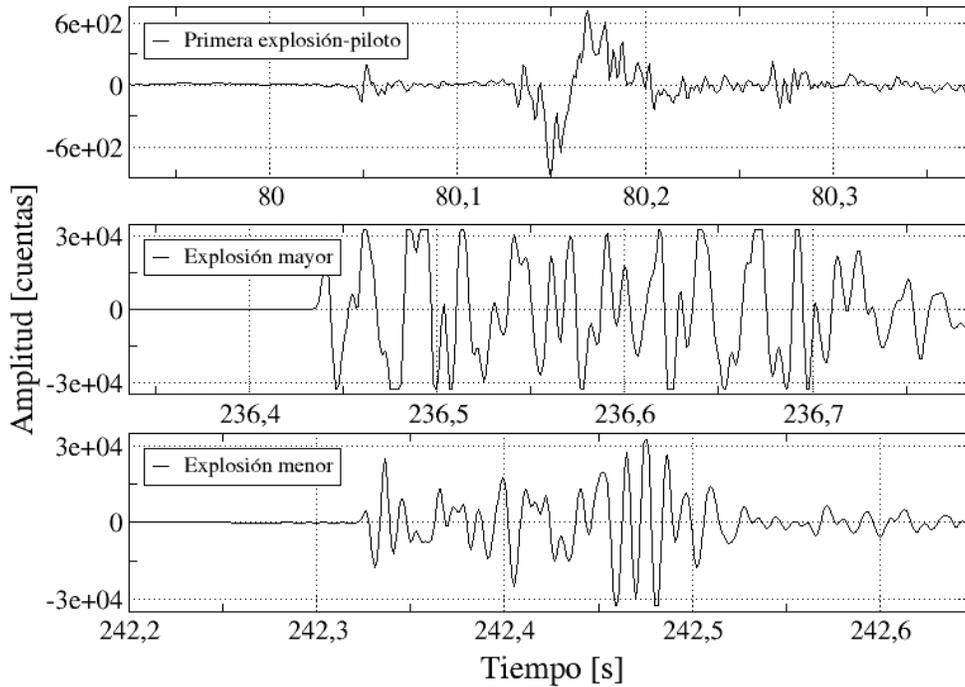


Figura 5.49.- Explosión mayor acompañada de dos pulsos menores registradas en el sismómetro DoReMi.

En la Figura 5.50 se muestra el espectro de amplitud calculado para la componente vertical del segundo sensor acoplado que corresponde con la segunda traza del registro (Figura 5.48). La ventana empleada en esta ocasión fue de 8 [s] para un total de 140 ventanas contenidas en la longitud total de registro.

Se observan máximos espectrales locales perfectamente bien definidos en las frecuencias de 60, 75, 90, 105, 135, 150, 178 y 210 [Hz] con unas pequeñas reverberaciones de menor amplitud ubicadas en 84, 96, 112, 120, 202, 236, 268, 302 y 405 [Hz]. Aquí los máximos más representativos se ubican en las frecuencias de 90 y 105[Hz].

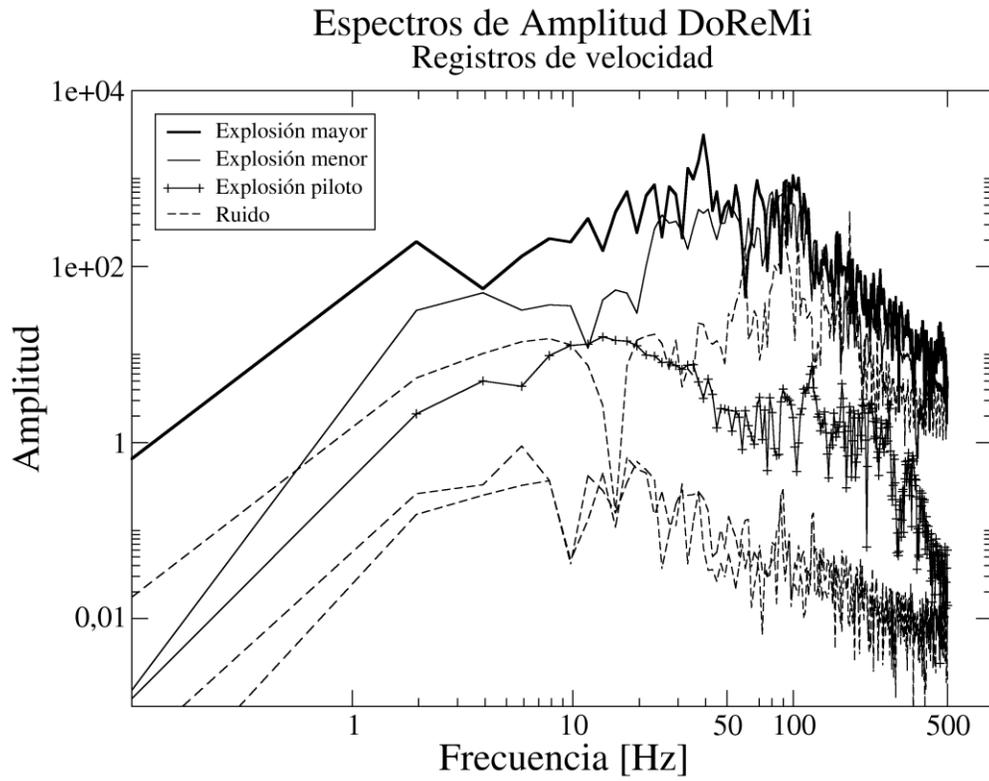


Figura 5.50.- Espectro de Amplitud correspondiente a 187 ventanas de la componente vertical del sensor LE-3D. Se incluyen la explosión mayor junto con dos menores además de tres segmentos de ruido aleatorio para comparación.

Correlaciones cruzadas.

Realizamos un empalme de ventanas que contienen los registros de explosiones sucesivas pertenecientes a un mismo archivo y que nos permite verificar la repetitividad de la fuente; primero comparamos “visualmente” dos pulsos consecutivos observados y registrados a diferentes retrasos de tiempo en las señales y posteriormente se empataron ventanas de tiempo con longitudes suficientes para contener un pulso. También realizamos el cálculo de las correlaciones cruzadas para cada toma hecha durante la detonación de explosivos y utilizamos el primer pulso observado como piloto. Con este proceso verificamos la repetitividad de la fuente de todas las detonaciones observadas en cada registro con los equipos usados.

Para realizar correctamente las correlaciones cruzadas se corrigió la señal de cada canal por media y tendencia únicamente y se omitió la aplicación de taper y ventaneo para evitar inconsistencias en los bordes de las señales a la hora de realizar el cálculo de las correlaciones cruzadas y así tener la señal completa para poder mostrarla de forma normalizada (amplitud relativa) para su visualización.

Mediciones con sensores de periodo intermedio (30 [s]-50 [Hz]).

Equipo: K2-1310+Güralp

La Figura 5.51 contiene un segmento de la señal obtenida con el equipo K2 durante la detonación de explosivos dentro del túnel donde se muestran dos pulsos registrados a diferentes tiempos.

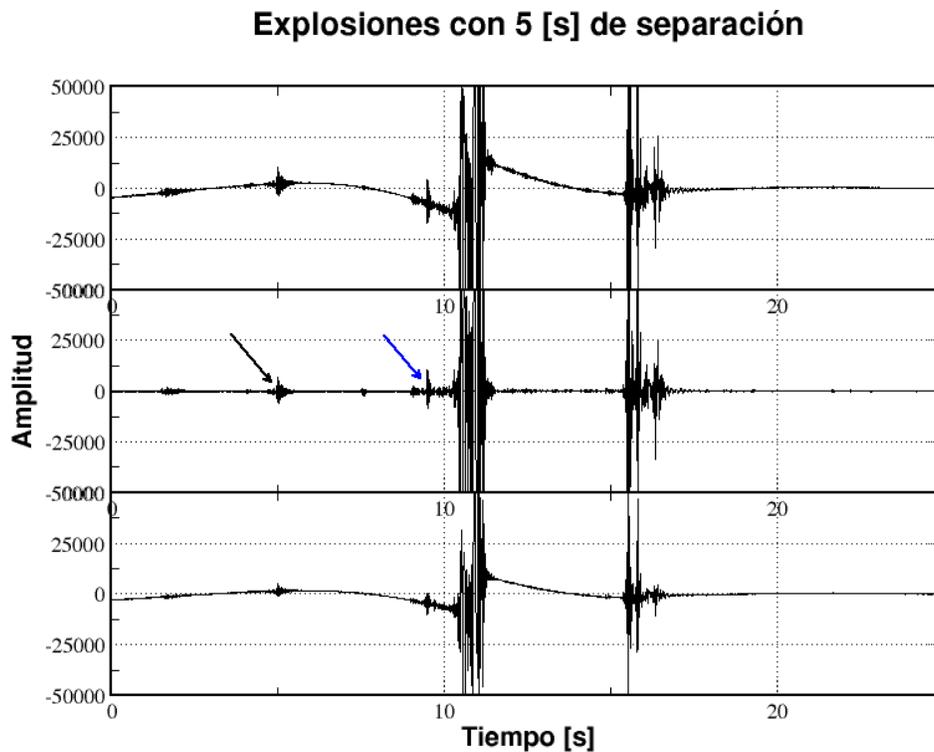


Figura 5.51.- Segmento de las señales obtenidas con equipo K2 + sensor FBA en el que se eligió los pulsos a empatar para comparar visualmente.

A continuación, en la Figura 5.50 consignamos la imagen generada con el empalmado manual de las ventanas que contienen los pulsos consecutivos sincronizando los tiempos de inicio de las dos ventanas. Nótese que la correspondencia se da con aproximadamente 1 [s] de longitud de registro. La separación de estos dos pulsos es de aproximadamente 5 [s].

Explosiones consecutivas con 5 [s] de separación

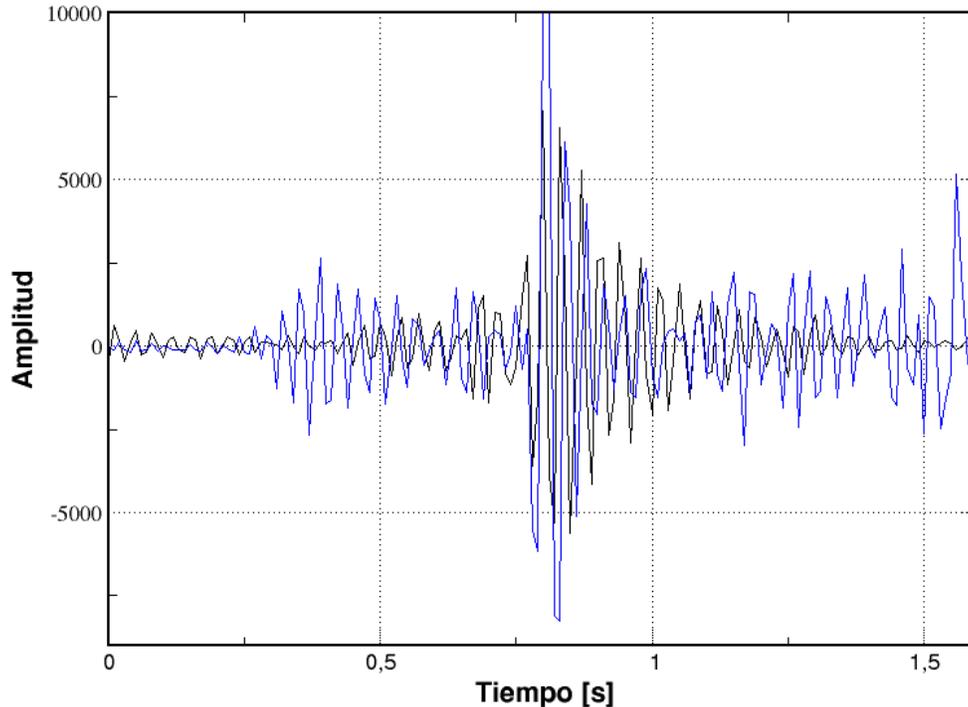


Figura 5.52.- Empalme entre dos pulsos con una separación entre ellos de 5 [s] aproximadamente y una correspondencia de al menos 1 [s].

Únicamente empleamos la componente vertical del acelerómetro FBA donde se extrajeron los dos pulsos que aparecen empalmados en la imagen y de esta forma verificar la repetitividad de la fuente. Vemos una vez más que la energía que imprimen los explosivos en el entorno rocoso nos sirve para determinar que cada pulso contenido en la señal representa la respuesta impulsiva de la roca a la excitación causada por dichas explosiones.

En la Figura 5.53 se consigna la imagen que muestra el pulso mayor empalmado con un pulso de menor amplitud acompañado de la correlación cruzada completa con el pulso. En estas figuras solo se consignan las imágenes correspondientes al sensor FBA-23 del registrador K2-1310 y se omiten los cálculos hechos para el sensor CMG-40T y para los sensores Lennartz los cuales se integran en el Anexo B.

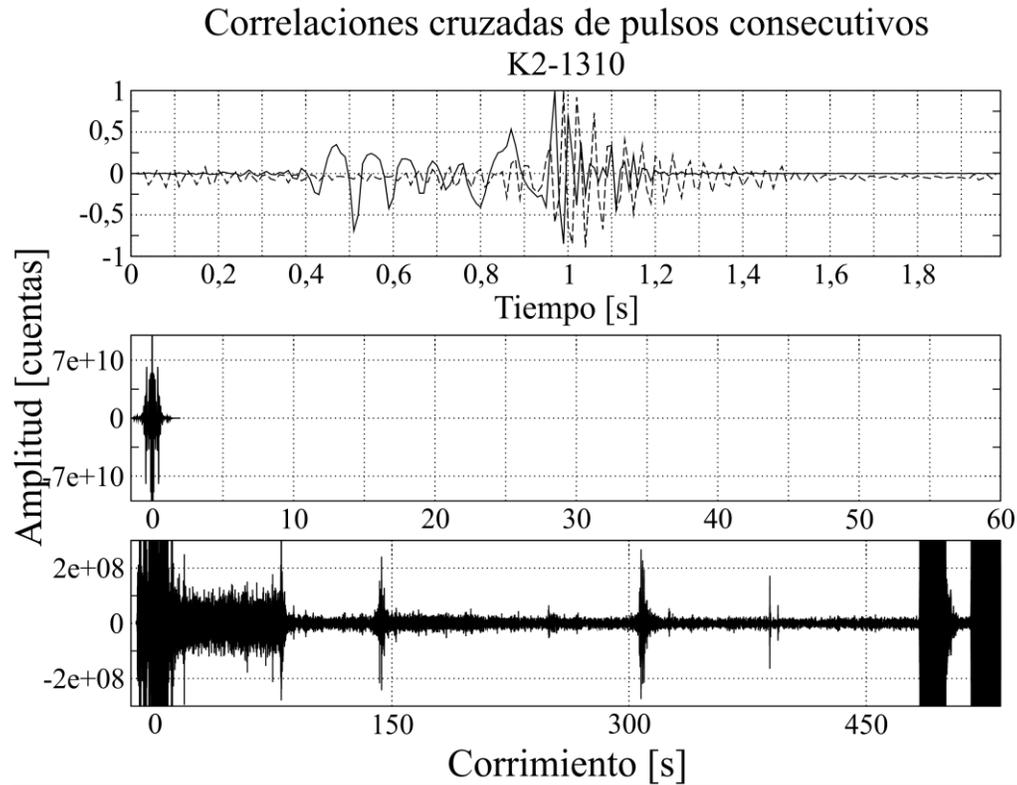


Figura 5.53.- Arriba: pulso mayor empatado con uno de menor amplitud. Abajo: autocorrelación y zoom de la croscorelación del pulso piloto con toda la señal registrada en el sensor FBA-23.

Cálculo de VPP

El cálculo de velocidad de partícula pico para el túnel El Varal fue de $VPP = 0.1384$ y se obtuvo en a partir del valor rms de la potencia del espectro estimado para la explosión mayor, en el ancho de banda compendio entre 26.46 y 33.34 [Hz] con frecuencia central de 29.7 [Hz] (Figura 5.54). Este valor también se encuentra por debajo del umbral recomendado por lo cual concluimos que los trabajos, al menos en el lapso en que se midió, fueron hechos de manera correcta. Al comparar los valores de velocidad extraídos directamente de las señales con el calculado, nuevamente observamos que la estimación es menor y mas confiable por lo que resaltamos que nuestra estimación usando la amplitud rms es mas confiable (Figura 5.55).

$$VPP = 1.25 \cdot \sqrt{P_{RMS} \cdot (f_2 - f_1)} = 1.25 \cdot \sqrt{4.044364e-04 \cdot (33.34 - 26.46)} = 0.0659 \quad 5.14$$

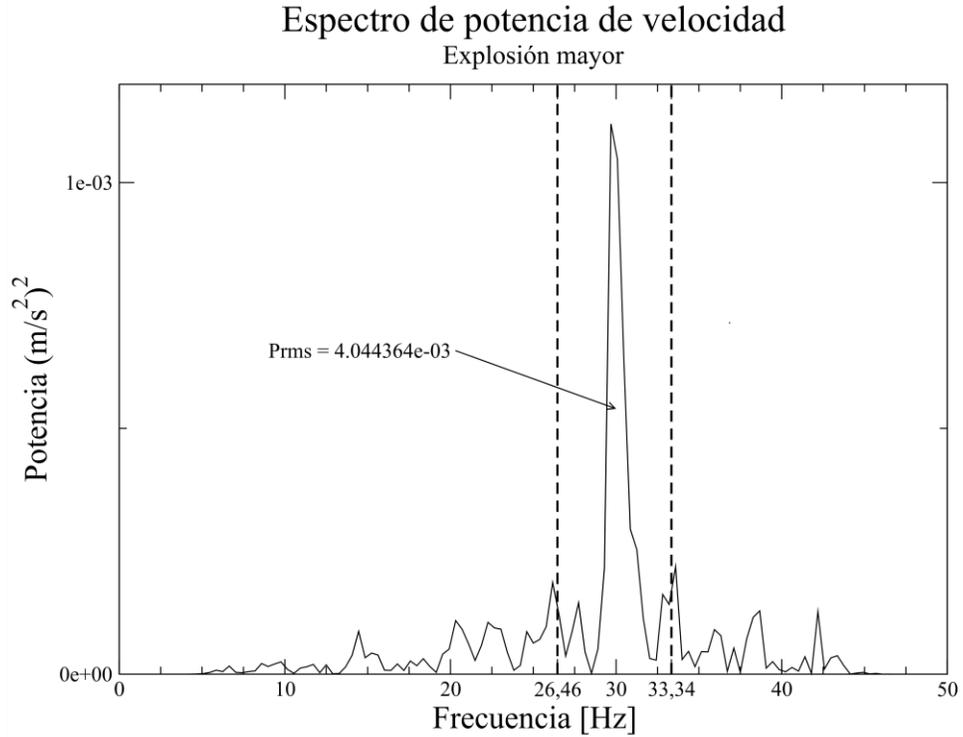


Figura 5.54.- Amplitud rms calculada en el espectro de potencia de velocidad para la explosión mayor.

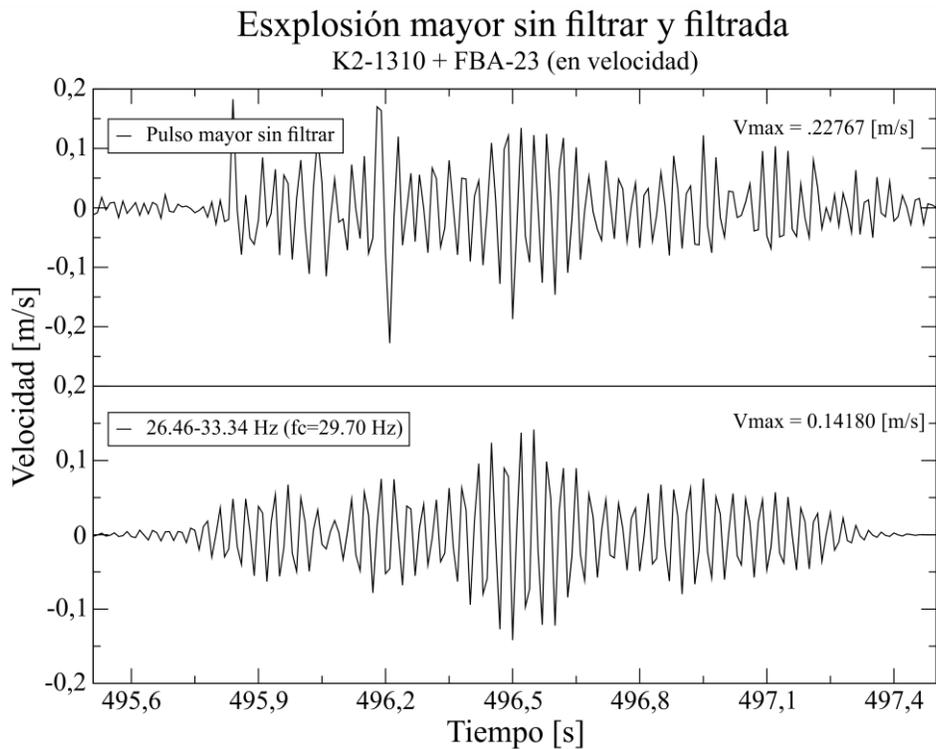


Figura 5.55.- Valores pico de velocidad observados en observados directamente en las señales sin filtrar (arriba) y filtradas (abajo).

Resultados y Análisis

Como finalidad del presente trabajo se pretendió exponer las características de propagación de las ondas sísmicas en el entorno rocoso de dos túneles prospectados durante la campaña de exploración realizada en el mes de junio de 2012. La metodología de análisis se diseñó de manera que resultara simple dividiéndola en túneles, tipo de fuente, espectros de densidad de potencia (EDP), cálculo de la estructura somera de velocidad de onda S y determinación de las velocidades de grupo en cuatro anchos de banda. También, mediante la técnica de dispersión de ondas superficiales, transformamos al dominio de la velocidad de fase y la frecuencia los registros del arreglo lineal para generar las curvas de dispersión de la velocidad de fase del modo fundamental y primeros modos de onda de Rayleigh, su posterior inversión para obtener sendos modelos de velocidad de onda de cortante, asociados al entorno rocoso de cada uno de los túneles. Por otro lado, se aplicaron correlaciones a los datos obtenidos al registrar las detonaciones de los explosivos para verificar la repetitividad de la fuente representada en los registros por los pulsos consecutivos observados. El tiempo de retraso entre pulsos similares fue del orden de milisegundos que puede interpretarse como manifestación del despliegue de estopines con diferente retraso.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los túneles aplicando los procesos antes mencionados.

Túnel “Cerro Los Becerros”. Barrenadora.

Para los arreglos lineales de geófonos implementados en el túnel “Cerro Los Becerros” se obtuvieron los espectros de densidad de potencia de aceleración para todos los canales (trazas) registradas en cada toma. En las imágenes obtenidas para la variante uno se muestran los dos primeros canales conteniendo a un geófono de 4.5 [Hz] y una sonda empotrada en la pared en la misma posición lateral con sensor de 15 [Hz], esto con el fin de comparar los cálculos en cada uno. Estos dos sensores muestran que la energía se concentra en el ancho de banda comprendido entre los 15 y 110 [Hz] donde comienza a decaer como consecuencia de la frecuencia de Nyquist la cual fue de 125 [Hz]. Los máximos espectrales locales en que coinciden ambos se localizan en 30, 40 y 60 [Hz] destacando el de 60 asociado a la línea de

transmisión de energía eléctrica necesaria para los trabajos exhaustivos dentro del túnel. Notamos aquí que el nivel de energía observado en el geófono se sitúa por encima del modelo de ruido alto global a partir de 1 [Hz] a diferencia de los Espectros de Densidad de Potencia (EDP) calculados para las sondas donde se observa un nivel más consistente y plano además de que están en mejor acuerdo con los niveles de ruido global por debajo del nivel observado para el geófono (Figura 5.5).

En el caso de la variante 2, los EDP se estimaron para los mismos canales con la diferencia de que en esta ocasión el geófono contiene un sensor de 28 [Hz] (alta frecuencia) y el intervalo de muestreo fue de 1000 muestras por segundo (frecuencia de Nyquist de 500 [Hz]). La energía en estas estimaciones se concentra en el ancho de banda comprendido entre 25 y 450 [Hz] para ambos canales; comienzan en ascenso y a partir de los 100 [Hz] adoptan la forma de una meseta. En este caso los máximos afines a ambos sensores más relevantes se ubican en 30, 50, 60, 102, 152, 202-204 [Hz] continuando con una serie de máximos en 250, 300, 350, 400 y 450. De forma relevante notamos una concordancia casi perfecta entre ambos sensores que quizá se deba a que las respuestas de ambos son muy similares. A pesar de que fue difícil comparar estos espectros con los niveles de ruido globales sino hasta 10 [Hz] inferimos que el espectro se ubica dentro de los niveles por debajo del modelo de ruido alto global (Figura 5.7).

Debe notarse que el límite espectral de frecuencias altas fue restringido por la respuesta de los geófonos más que por las fuentes sísmicas que operaron en la ocasión. Esto es notorio al indicarse que la frecuencia máxima de 110 [Hz] se identificó cuando se tenía una configuración entre el geófono y el registrador de 125 Hz de frecuencia de Nyquist; y de 450 [Hz] en el caso en que el equipo digitalizó con frecuencia de Nyquist de 500 Hz. En las estimaciones hechas para los sensores de 1 [Hz] vemos un incremento de energía entre las frecuencias 10 y 95 [Hz]. Los máximos espectrales locales se localizan en 18, 22, 28, 36, 42, 50, 60, 65 y 95 [Hz] (Figura 5.10). En estas estimaciones no es posible observar un máximo preponderante, pero destacamos que el EDP se encuentra dentro de los límites de los modelos de ruido global considerando que la tasa de muestreo fue de 200 muestras por segundo.

Por último, en las estimaciones hechas para los sensores de banda intermedia (FBA-23 y CMG-40T), en los que la tasa de muestreo fue de 100 muestras, encontramos para ambos sensores máximos locales en 4.5, 5.5, 9 y 10 [Hz] bien distinguidos y otros más con discrepancias marcadas ubicados en 25, 34.5 y 45 [Hz]. El sensor FBA se ubica por encima del modelo de ruido alto global mientras que el sensor CMG-40T mantiene una buena concordancia por debajo de este nivel (Figuras 5.13 y 5.14).

Los registros obtenidos mediante el arreglo de geófonos nos permitieron obtener información espectral confiable acerca de la energía que imprimen las barrenadoras en la formación al estar operando. En este punto es importante recalcar que la información proveniente de las sondas empotradas en la pared del túnel resulta con nivel de ruido menor, cerca de 50 dB, al compararse con aquellos niveles asociados a los sensores operando en el piso, esto muy probablemente asociado a que el ruido de la construcción está atenuado dentro de la sonda. A tasas de muestreo altas y sensores con respuesta nominal amplia a frecuencias altas, se puede generar información que mejor representen las características de propagación de las ondas sísmicas bajo las condiciones de trabajo durante la excavación de túneles.

Empleando los datos del arreglo lineal y mediante la inversión de las curvas de dispersión de velocidad de fase obtuvimos el modelo de velocidad de onda de cortante que asignamos al centro del tendido en el piso y asociado a la formación recosa circundante al túnel Los Becerras, para lograrlo se utilizó un modelo inicial de siete capas. Se hace notar que la estructura somera de la velocidad de cortante obtenida

se asocia a la curva de dispersión del modo fundamental que identificamos contenida en las correlaciones filtradas en la banda de frecuencia de 13 a 22 [Hz] (Figura 5.17). Nuestro modelo tiene velocidades de onda de cortante de 400 y 500 [m/s] hasta cerca de 11 metros que podría caracterizar una primera unidad sísmica y a su vez representar la zona de daño de excavación (EDZ), a partir de ahí nuestra velocidad aumenta a los 2550 [m/s] hasta la profundidad de investigación (Figura 5.17).

Por otro lado, al realizar las correlaciones cruzadas para los datos de las trazas registradas con el tendido lineal variante uno usando como piloto la primera, logramos construir una pseudo-sección sísmica (Figura 5.19). Para construir esta sección hicimos un barrido manual de filtrado en anchos de banda y seleccionamos la banda comprendida entre los 65-100 [Hz] con una frecuencia central de 80 [Hz] en la que identificamos que la velocidad de grupo V_G con la que las ondas sísmicas recorren la extensión total del tendido es de $V_G(f_c) = 2360 [m/s]$ asociada a cerca de 80 [Hz]. Adicionalmente identificamos que no es posible seguir una fase más allá de los 40 [m].

Siguiendo el mismo procedimiento aplicado ahora para las trazas registradas con cadencia de muestreo de 1000 muestras (variante dos) observamos que solo fue posible encontrar información en la banda de los 4 y 19 [Hz]. Siguiendo la misma fase en los sismogramas virtuales calculados en este caso podemos seguir un tren de ondas coherentes, pero a retrasos negativos hasta los 70 [m] del tendido debido a que las características de propagación de las ondas en ambas direcciones del tendido podrían ser diferentes (Figura 5.21). Una vez más empleando las envolventes obtuvimos una velocidad de grupo de $V_G(f_c) = 215 [m/s]$ (Figura 5.22).

Explosiones

Los resultados obtenidos con los ensayos hechos durante la detonación de explosivos dentro del túnel son los siguientes:

Para los registros obtenidos con sensores conectados al registrador K2-1310, que se ubicó aproximadamente a 50 metros del frente de excavación, en el cual se observan 56 explosiones, se estimaron espectros de amplitud a tres segmentos conteniendo una explosión cada uno. En las imágenes correspondientes se incluyen únicamente aquellos calculados para el canal 2 conectado a la componente vertical del sensor FBA-23. El espectro de amplitud indica que la energía se concentra principalmente entre los 10 y 45 [Hz], incrementándose desde los 10 [Hz] hasta los 40 [Hz], en donde la respuesta del sensor-registrador tiene el 80 % de su frecuencia de Nyquist (Figura 5.24). La forma que presenta el espectro de cada explosión es representativa y son similares entre sí, lo cual indica en efecto que los pulsos son repetitivos.

En el portal de entrada se ubicaron los equipos K2-1313 y DoRemi con sensores Lennartz, el primero permitió detectar 18 explosiones y el segundo 34. En el espectro estimado para los segmentos de la componente vertical del sensor FBA observamos que la energía se concentra en la banda de los 10 y los 45 [Hz], con algunos máximos por debajo. La ubicación de los máximos es errática, aunque la forma de los tres espectros es muy parecida. (Figura 5.27). Para el sensor Lennartz, vemos que se detectan 34 explosiones y que presentan un espectro de amplitud asociado con una concentración de energía entre 10 y 150 [Hz] donde comienza a decaer, aunque la cadencia de muestreo fue de 1000 muestras. No se

pueden identificar máximos definitivos puesto que el espectro contiene picos con casi los mismos niveles a pesar de que la forma es la misma para los tres segmentos (Figura 5.30).

En este análisis notamos que los espectros muestran los máximos espectrales locales con mejor definición con los sensores de dentro del túnel, el máximo local dominante está representado en la frecuencia de 30 [Hz] mayormente. También notamos que aun cuando la tasa de muestreo nos permitió observar bien el espectro dominante, nos quedamos cortos ya que a mayor tasa de muestreo se observa que la concentración de energía encuentra su límite superior por encima de los 100 [Hz] como pudimos constatar en el espectro calculado para el sensor Lennartz que registró una cadencia de 1000 muestras por segundo.

Las correlaciones cruzadas de los registros de explosiones consecutivas dentro del túnel nos permitieron verificar la repetitividad de la fuente que ya había sido intuida al superponer ventanas que contenían explosiones (pulsos) registradas a intervalos diferentes de tiempo (Figura 5.31). En este primer acercamiento vemos que las señales tienen una concordancia hasta por 0.2 [s] (Figura 5.32) lo que pudimos confirmar al realizar las correlaciones cruzadas (Figura 5.32).

Adicionalmente se calculó la velocidad pico de la partícula VPP de las explosiones a partir del teorema de Parseval aplicado a los espectros de amplitud, valor que se comparó con los límites de vibración propuestos por Baner y Calder (1971, citados por Jiménez, 1980) al realizar voladuras en taludes rocosos. La VPP calculada fue de 0.132 [m/s] valor por debajo del umbral recomendado para evitar el inicio de daño en la formación y posterior colapso.

Túnel “El Varal”. Barrenadora.

Los espectros de densidad de potencia se estimaron para dos de los canales del arreglo lineal de geófonos, específicamente aquellos anclados en el piso del túnel, que tienen conectados un geófono de 4.5 [Hz] en el canal 2 en el piso y una sonda empotrada en la pared, aproximadamente 1.5 m en la misma posición con sensor de 15 [Hz] en el canal 3 y los cuales registraron a 250 muestras por segundo. Los espectros promedio muestran que la energía se concentra en el ancho de banda de los 10 y los 110 [Hz] con máximos espectrales locales concordantes ubicados en 45, 60, 75, 90 y 105 [Hz], todos con tendencia ascendente a excepción del último siendo más relevante el de 90 [Hz] (Figura 5.37). Los espectros se ubican por encima del modelo de ruido alto global en el rango en que coinciden (1-10 [Hz]). Nuevamente el límite a frecuencias altas esta relacionado con la frecuencia de Nyquist del equipo.

De estos datos obtuve un modelo de velocidad de cortante a la que asignamos solo tres capas y el semiespacio con profundidad máxima de 64 metros. Las primeras dos capas tienen velocidades de 340 [m/s] y 410 [m/s] hasta los 16 metros de profundidad para aumentar, a partir de ahí hasta 1300 [m/s] hacia la profundidad de investigación estimada (Figura 5.39).

Además, en el ancho de banda de los 3 y 9 [Hz] con una frecuencia central en 5.2 [Hz] podemos seguir fácilmente la misma fase casi hasta los 84 m, esto es la longitud total del tendido. Uniendo los máximos de las envolventes de las correlaciones cruzadas a lo largo del tendido obtuve una velocidad de grupo de $V_G(f_c) = 2864 [m/s]$ asociada a la frecuencia central de 5.2 [Hz] (Figura 5.42). La segunda sección

construida con las señales filtradas entre 10 y 25 [Hz] con frecuencia central de 15.8 [Hz] indica que, a diferencia de la primera, en esta sección una misma fase se puede seguir únicamente después de 28 metros hasta 40 metros (Figura 5.43). De igual manera se realizó la estimación a corrimientos negativos y uniendo los máximos de las envolventes de los sismogramas virtuales logramos obtener una velocidad de grupo de $V_G(f_c) = 2360 [m/s]$ menor que la obtenida en la banda de frecuencia anterior (Figura 5.44). En el ancho de banda de 32 a 55 [Hz] obtuvimos una velocidad de grupo de $V_G(f_c) = 1850 [m/s]$ velocidad aún menor que las dos anteriores lo cual indica que la velocidad de grupo disminuye conforme aumenta la frecuencia.

Explosiones.

En este túnel se colocaron dos equipos registradores más o menos a 60 metros del frente de excavación. En el primer equipo configurado con tasa de 100 muestras por segundo se observaron un total de 65 explosiones aproximadamente. Los espectros de amplitud se estimaron para tres segmentos de la componente vertical, con una explosión cada uno de los sensores FBA-23 debido a que la amplitud supera la ganancia soportada por el CMG-40T. Los espectros indican que la energía se presenta principalmente en el ancho de banda comprendido entre los 10 y los 45 [Hz]. Concretamente es en el ancho de banda de 28-45 [Hz] donde podemos ubicar máximos espectrales locales bien definidos a frecuencias de 30 y 42 [Hz], debe resaltarse que el sensor CMG -40T además exhibe un máximo predominante ubicado en 40 [Hz] (Figuras 5.46 y 5.47). El segundo equipo fue un sensor Lennartz conectado a un registrador DoReMi que grabó a una cadencia de 1000 muestras y permitió observar 42 explosiones bien definidas. El espectro promedio muestra una concentración de energía entre los 10 y 300 [Hz] con máximos separados cerca de 15 [Hz] hasta los 90 [Hz] y de 25 [Hz] hasta 210 [Hz]. Los máximos están en 60, 75, 90, 105, 135, 150, 178 y 210 [Hz] siendo los de 90 y 105 [Hz] los predominantes (Figura 5.49).

Al observar los espectros calculados para este sensor, vemos que no existe casi ninguna concordancia con los dos anteriores que grabaron a menor tasa de muestreo. Por otra parte, el contenido de energía se concentra en un ancho de banda que es dos veces más amplio que aquel observado en el espectro estimado para el mismo sensor en el túnel “Cerro Los Becerros” lo que nos lleva a cuestionar si este hecho se debe al tipo de detonador que se emplea o tiene alguna correlación con las características de propagación del medio circundante en este túnel.

Al superponer las ventanas con registros de explosiones separadas a intervalos de tiempo más o menos considerables, observamos nuevamente el buen empalme entre los pulsos registrados con una concordancia de poco más de un segundo (Figura 5.51), además las correlaciones cruzadas de los registros de explosiones consecutivas nos permiten constatar este hecho de forma numérica (Figuras 5.52 y 5.53).

Por ultimo, la VPP calculada para niveles de vibración por voladuras fue de 0.0659 [m/s], también por debajo del umbral recomendado para voladuras en taludes rocosos.

Conclusiones

Al explorar usando prospección sísmológica en sitios como los túneles con niveles altos de ruido, el uso de metodologías no invasivas que además emplean este ruido como fuente, son una muy buena alternativa. Obtener información confiable y oportuna es un aspecto muy relevante a tomar en cuenta al realizar este tipo de exploración debido a que en lugares con exhaustivas labores de excavación y construcción no siempre es posible emplear fuentes activas para obtener información de las propiedades del entorno rocoso. Una de esas alternativas es la sísmica de dispersión de ondas superficiales la cual es una metodología que emplea el ruido sísmico como son la vibración ambiental y los microtemores generados por la maquinaria utilizada en las obras, fuentes en la que podemos encontrar información de ondas superficiales perfectamente reconocibles.

Pudimos en este aspecto, obtener información que nos permitió observar las propiedades del campo de ondas sísmicas en un túnel. Estas propiedades tienen que ver con el contenido espectral de las señales registradas, las características de propagación de las ondas como son velocidad de propagación, sentido de viaje de las ondas sísmicas, tipos de fuente, patrones de radiación, etc. Verificamos que al enterrar sensores (sondas) en la formación, registramos desde 50 [dB] hasta 90 [dB] por debajo del nivel de los geófonos y constatamos que el sonido dentro del túnel se atenúa y los registros obtenidos tienen relación señal a ruido alta. Por otra parte, nuestros análisis de las correlaciones de los registros de explosiones confirman el tipo de fuente impulsivo provocada por la detonación de explosivos, lo cual provee la posible función de Green que podríamos utilizar para realizar posteriores análisis utilizando un enfoque de sísmica de reflexión.

La propagación de las ondas sísmicas dentro de una estructura cilíndrica presenta características particulares referidas anteriormente por Stilke (1959). El estudio realizado por Stilke impone un criterio mediante el parámetro $w = \lambda/D$, que relaciona la longitud de onda y el diámetro del túnel. Para valores de $w > 1.6$, la velocidad de onda superficial tiende a la velocidad de cortante de la roca huésped lo cual indica que la propagación es preferencialmente de ondas S; para valores de $w < 0.8$, la velocidad de ondas de superficie es bastante menor que las velocidades de onda S con amplitudes grandes.

Estos valores varían en un rango de $\frac{\lambda}{D} = 5$ y de $\frac{\lambda}{D} = 4.5$ para los modelos invertidos de velocidades asociados a los túneles Los Becerros y El Varal respectivamente. La geología nos indica que el tipo de rocas son principalmente plutónicas y volcánicas. En nuestros perfiles de velocidad de onda S estimamos

velocidades máximas de 2500 m/s y 1300 m/s para Los Becerros y El Varal respectivamente, más allá de la zona de daño. Dichas velocidades nos indican el buen estado de la roca circundante a la hora de excavar y se confirma con las velocidades pico de partícula $VPP = 0.132 [m/s]$ y $VPP = 0.138 [m/s]$, respectivamente las cuales no rebasan los niveles recomendados antes de comenzar a colapsar.

Al realizar trabajos en sitios donde los trabajos de construcción son exhaustivos es necesario tener en cuenta el cuidado tanto personal como del equipo que se va a emplear, las condiciones de los sitios en donde se pretende explorar usando prospección sísmológica, que el equipo sea el adecuado y realizar una bitácora con todos los aspectos que se llevan a cabo durante las campañas de medición y a la hora del procesamiento. En nuestro caso contamos con el apoyo de personal asociado a la obra, así como asesoría que nos permitió realizar nuestras labores de una forma segura y sin exponer nuestra integridad ni las condiciones del equipo.

Se pretende ahondar en los análisis realizados para los datos usados en la realización de este trabajo además de generar un paquete de rutinas con las que poder generar información del entorno rocoso lo más eficientemente posible y con ello detectar zonas de posible debilidad en el frente de excavación de túneles.

Referencias

- Arroyo, J.L. et al. (2003). *Excelentes datos sísmicos de pozos*. Oilfield review 15, no. 1, 2-23.
- Artman, B., Draganov, D., Biondi, B. y Wapenaar, K., (2004). *Migration methods for passive Seismic data*. Stanford Exploration Project, Report 115, 391-399.
- Bohlen, T., Lorang, U., Rabbel, W., Müller, G., Giese, R., Lüth, S. y Jetschny, S., (2007). *Rayleigh-to-shear wave conversion at the tunnel face-from 3D-FD modeling to ahead-of-drill exploration*. Geophysics, 72, T67-T79.
- Borm, G., Giese, R. y Otto. P., (2003b). *Integrated seismic imaging system for geologic prediction ahead of a tunnel construction*. Presented at the 10th International Congress on Rock Mechanics.
- Breton, P. et al. (2002). *Mediciones sísmicas bien posicionadas*. Oilfield review 14, no. 2, 34-63.
- Brückl, E., Chwatal, W., Mertl, S. y Radinger, A., (2008). *Exploration Ahead of a Tunnel Face by using TSWD- Tunnel Seismic While Drilling*. Geomechanik und Tunnelbau, 1, 5.
- Claerbout, J. F., (1968). *Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response*. Geophysics, 33, 264-269.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S; (2005). *Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica*. BSGM, tomo LVII, núm. 3, 343-378. Recuperado de:
[http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/5703/\(5\)Ferrari.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/5703/(5)Ferrari.pdf)
- Gangi, A. F., (1987). *A theoretical study of the radiation patterns of a tunnel-boring machine (infinite medium)*. Final Report GL-87-20, Texas A & M University.
- Hardage, B. A., (1983). *Vertical Seismic profiling. Part A: Principles*. Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration, vol. 14A. Pergamon. 3Ed.
- Hardage, B. A., (2009). *Seismic-While-Drilling: Techniques using the Drill Bit as the Seismic Source*. Search and Discovery Article, 40411, Bureau of Economic Geology, The University of Texas at Austin.
- Jetschny, S., (2010). *Seismic prediction and imaging of geological structures ahead of a tunnel using surface waves*. Ph. D. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Jetschny, S., Bohlen, T. y De Nil, D., (2010). *On the propagation characteristics of tunnel surface-waves for seismic prediction*. Geophysical Prospecting, 58, 245-256.

- Jimenez, J. A., (1980). *Geotecnia y cimientos III. Cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la geotecnia. Primera parte*. Ed. Rueda.
- Lüth, S., Giese, R., Otto, P., Krüger, K., Mielitz, S., Bohlen, T., y Dickmann, T., (2007). *Seismic investigation of the Piora Basin using S-wave conversions at the tunnel face of the Piora adit (Gotthard Base Tunnel)*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.
- Malmgreen, L., Saiang, D., Töyrä, J. y Bodare, A., (2007). *The excavation disturbed zone (EDZ) at Kiirunavaara mine, Sweden-by seismic measurement*. Journal of Applied Geophysics, 61, 1-15.
- Morse, P. M. y Feshbach, H., (1953). *Methods of theoretical physics*. McGraw-Hill Book Company.
- Murayama, H., Niwa, H., Kuroda, T. y Noda, K., (2011). *Development and application of the shallow seismic reflection survey ahead of tunnel face using tunnel excavating blasts as the seismic source*. 8th International Joint Symposium of FMGM, Berlin, Germany.
- Peterson, J., (1993). *Observations and modeling of seismic background noise*. U.S. Department of Interior Geological Survey. Open-File Report 93-322.
- Petronio, L., Poletto, F., Schleifer, A. y Morino, A., (2003). *Geology prediction ahead of the excavation front by Tunnel-Seismic-While-Drilling (TSWD) method*. 73rd International Annual Meeting, SEG, Expanded Abstracts.
- Petronio, L., Poletto, F., Schleifer, A. y Morino, A., (2003). *Transmitted and reflected waves in Tunnel SWD*. 73rd International Annual Meeting, SEG, Expanded Abstracts.
- Poletto, F. y Miranda, F., (2004). *Seismic while drilling. Fundamentals of drill-bit seismic for exploration: Handbook of seismic exploration*. Elsevier Science Publishing Company Inc.
- Poletto, F. y Petronio, F., (2006). Seismic interferometry with a TBM source of transmitted and reflected waves. *Geophysics*, 71, 4, S185-S193.
- Rector III, J. W., (1990). *System for reducing drill string multiples in field signals*. U.S. Patent 4 862 423.
- Rector, III J. W. y Marion, B. P., (1991). *The use of drill-bit energy as a downhole seismic source*. *Geophysics*, 56, 628-634.
- Rickett, J. y Claerbout, J. F., (1999). *Passive seismic imaging applied to synthetic data*. Stanford Exploration Project, Report 92, 87-91.
- Rickett, J. y Claerbout, J. F., (1999). *Acoustic daylight imaging via spectral factorization: Helioseismology and reservoir monitoring*. *The Leading Edge*, 18(8), 957-960.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes (2012). *Libro blanco: Carretera Durango-Mazatlán*. Recuperado de:
http://www.sct.gob.mx/fileadmin/_migrated/content_uploads/LB__Carretera_Durango-Mazatlán.pdf
- Sattel, G., Sander, B. K., Amberg, F. y Kashiwa, T., (1996). *Tunnel seismic prediction-some case histories*. Extended colour reprint of Tunnels and Tunneling Article April 1996, Technical Article 18-20, Amberg Measuring Technique Ltd., Regensdorf, Switzerland.
- Schuster, K., Alheid, H. y Boddener, D., (2001). *Seismic investigation of the excavation damaged zone in opalinus clay*. *Engineering Geology*, 61, 189-197.
- Schuster, G. T., (2008). *Seismic Interferometry*. Cambridge University Press.

- Wapenaar, K., Draganov, D., Thorbecke, J. y Fokkema, J., (2002). *Theory of acoustic daylight imaging revisited*. 72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2269-2272.
- Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic data analysis, processing, inversion and interpretation of seismic data*. Vol. I y II, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, USA, 2027p.
- Yu, J. y Schuster, G. T., (2006). *Croscorelogram migration of inverse vertical seismic profile data*. Geophysics, 71, no.1, S1-S11.

<http://www.ambergtechnologies.ch/home>

<http://www.fujita.com>

<http://www.herrenknecht.com>

<http://www.iris.edu/files/sac-manual/>.

<http://www.iris.edu/NRL/>.

<http://www.geometrics.com/geometrics-products/seismographs/download-seismograph-software/>.

www.oyogeospace.com.

<http://www.slb.com/>.

Anexo A.

Respuesta nominal de los sensores triaxiales y geófonos tanto verticales como omnidireccionales empleados para registrar el campo de ondas sísmicas dentro del túnel.

Geófonos.

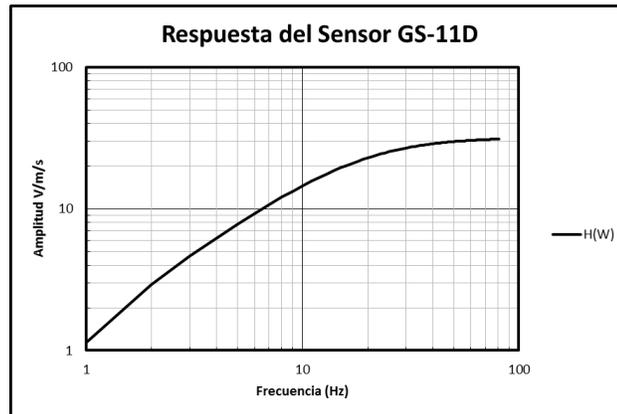


Figura A.1.- Respuesta nominal de sensor vertical (geófono) modelo GS-11D con frecuencia natural de 4.5 [Hz]

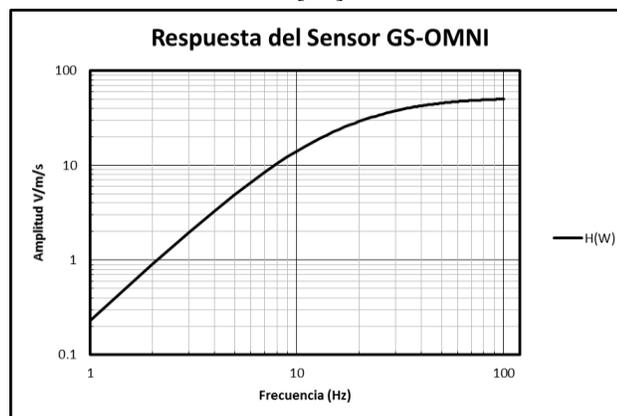


Figura A.2.- Respuesta nominal de sensor omnidireccional (sonda) modelo GS-OMNI con frecuencia natural de 15 [Hz].

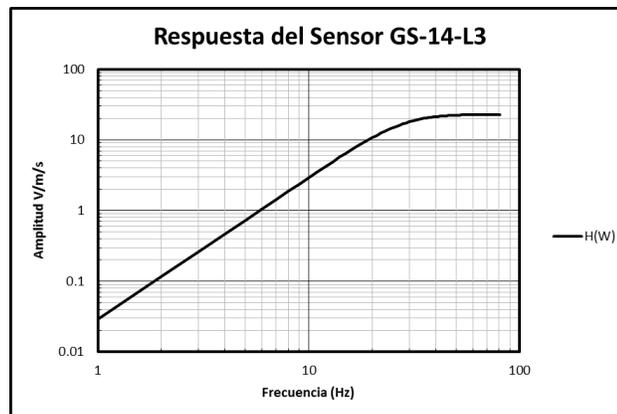


Figura A.3.- Respuesta nominal de sensor vertical de alta frecuencia modelo GS-14-L3 con frecuencia natural de 28 [Hz].

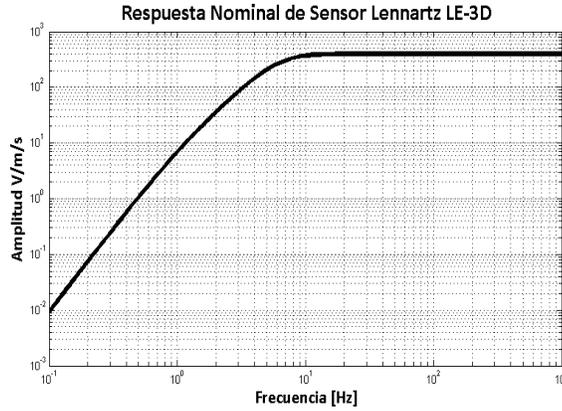


Figura A.4.- Respuesta nominal del sensor triaxial modelo LE-3Dlite con frecuencia natural 1 [Hz].

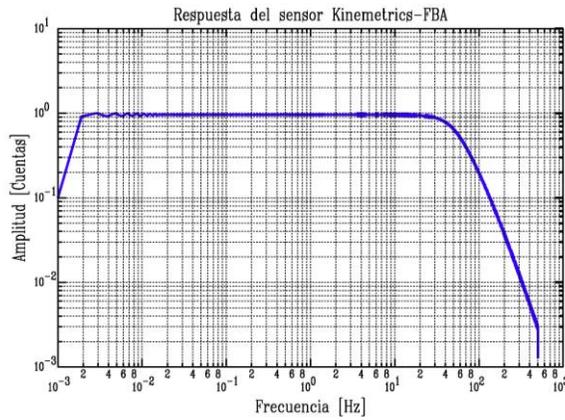


Figura A.5.- Respuesta nominal del sensor de aceleración de tres componentes modelo FBA-23 integrado en el registrador K2 con frecuencia natural de 50 [Hz].

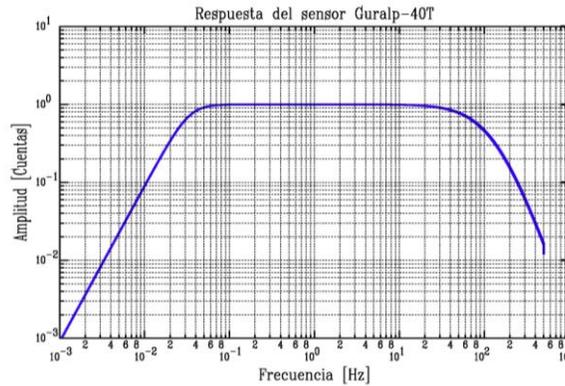


Figura A.6 Respuesta nominal del sensor de velocidad triaxial modelo CMG-40T con frecuencia natural de 50 [Hz].

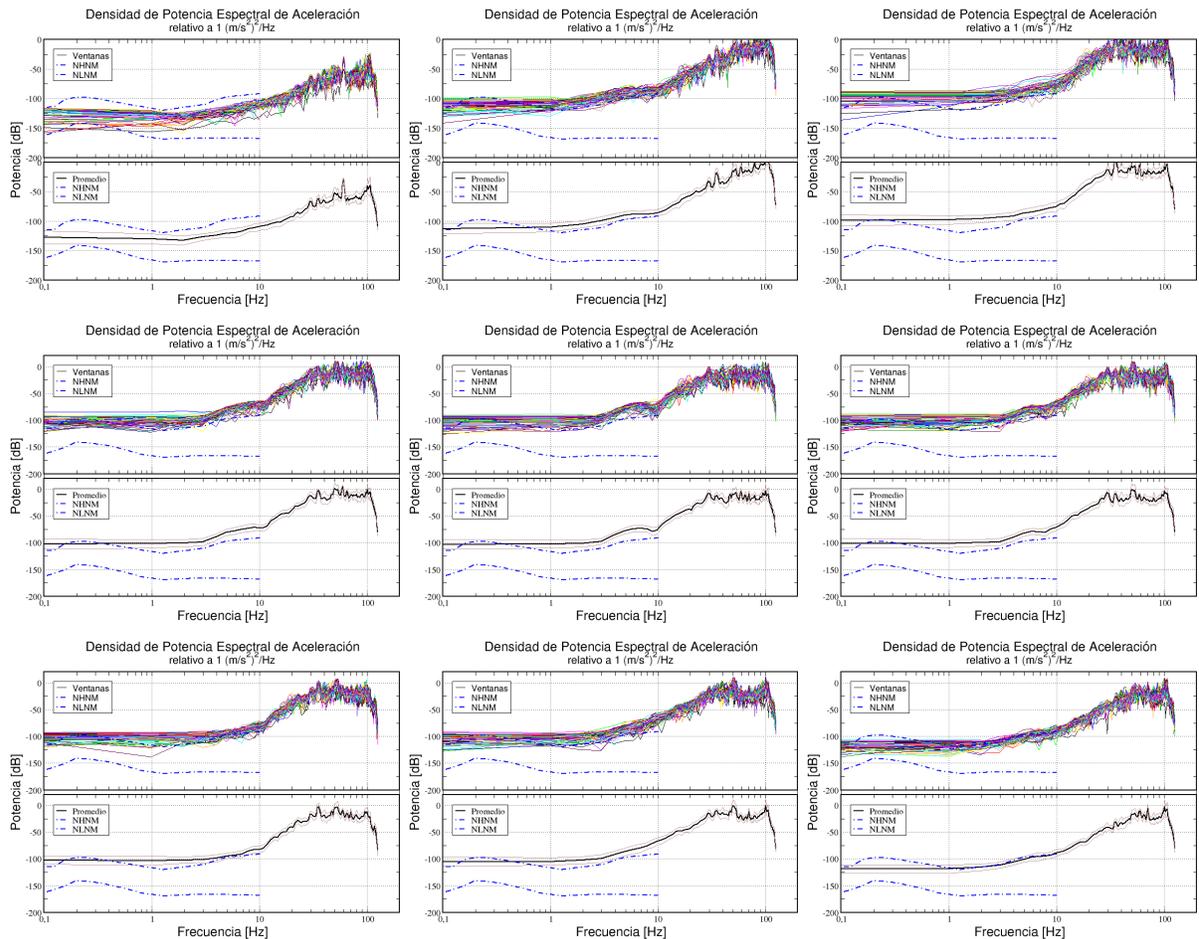
Anexo B.

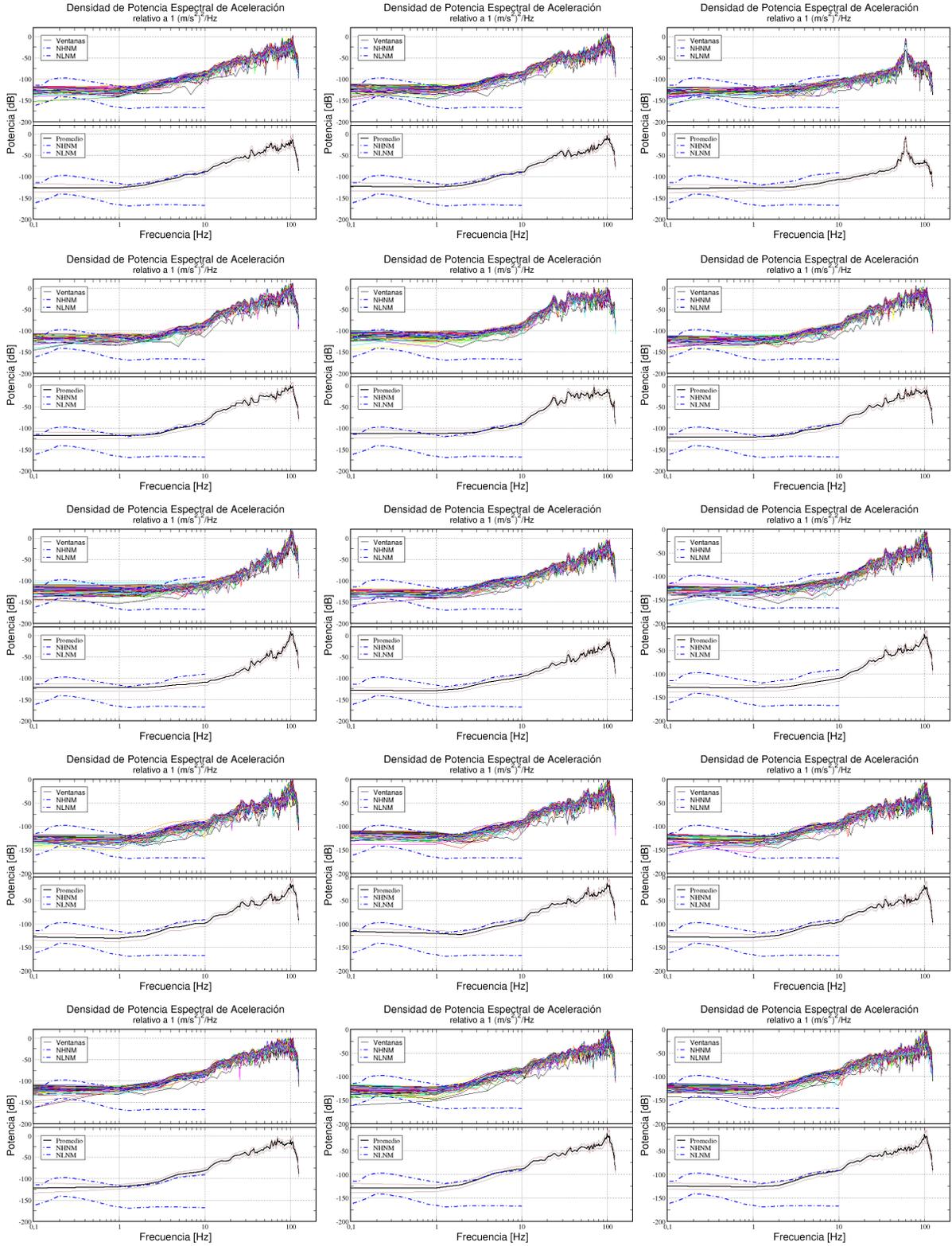
Túnel “Cerro Los Becerros”.

Barrenadora

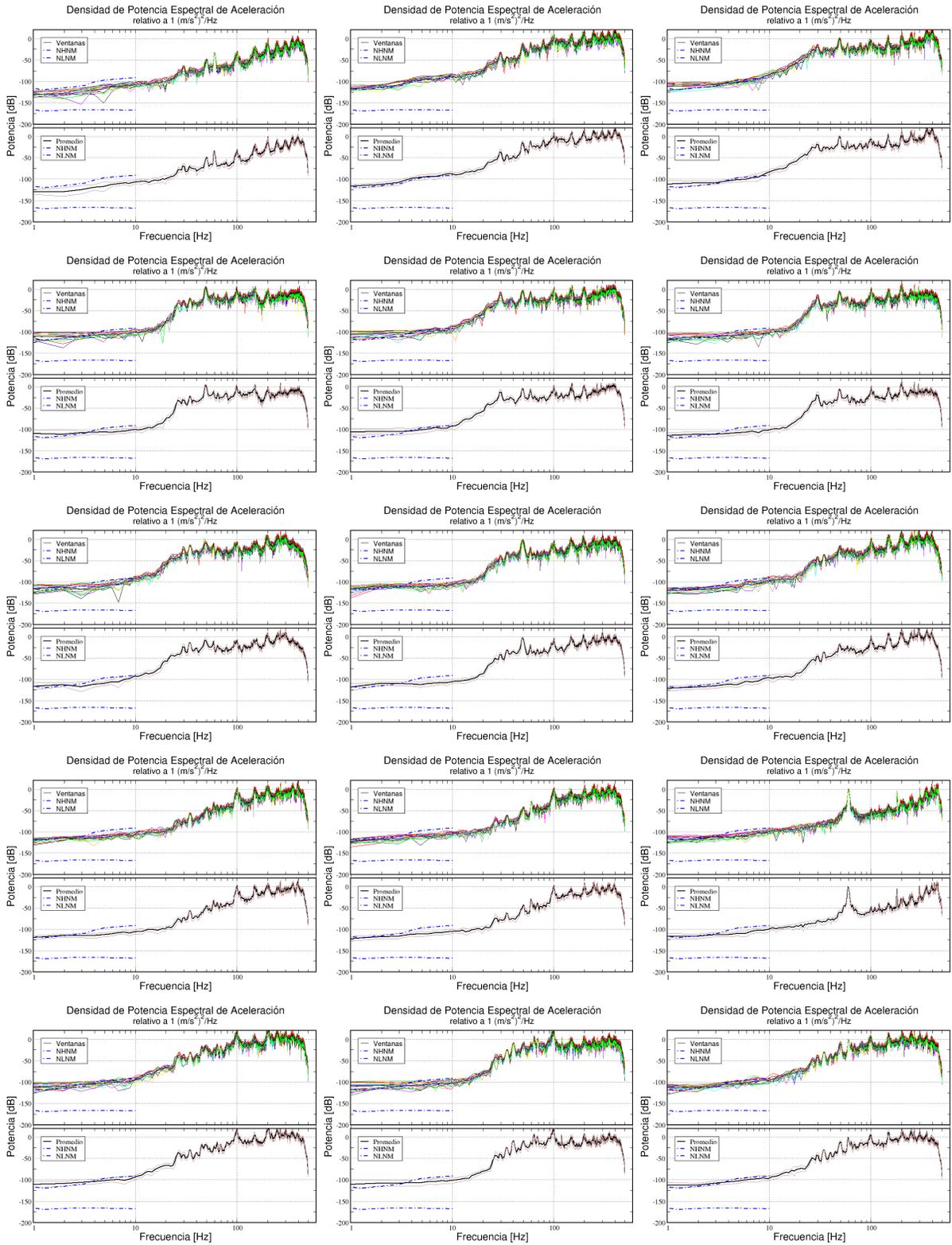
A continuación, se presentan las imágenes que contienen los espectros de densidad de potencia de aceleración para cada uno de los experimentos realizados dentro del túnel y en el portal de entrada durante la operación de la barrenadora. Incluimos los cálculos realizados para las dos variantes de arreglos lineales de geófonos, así como los registros adquiridos con los sensores de banda intermedia FBA y CMG-40T (50 [[Hz]]) y los sensores de 1 [Hz] Lennartz implementadas en el túnel “Cerro Los Becerros”.

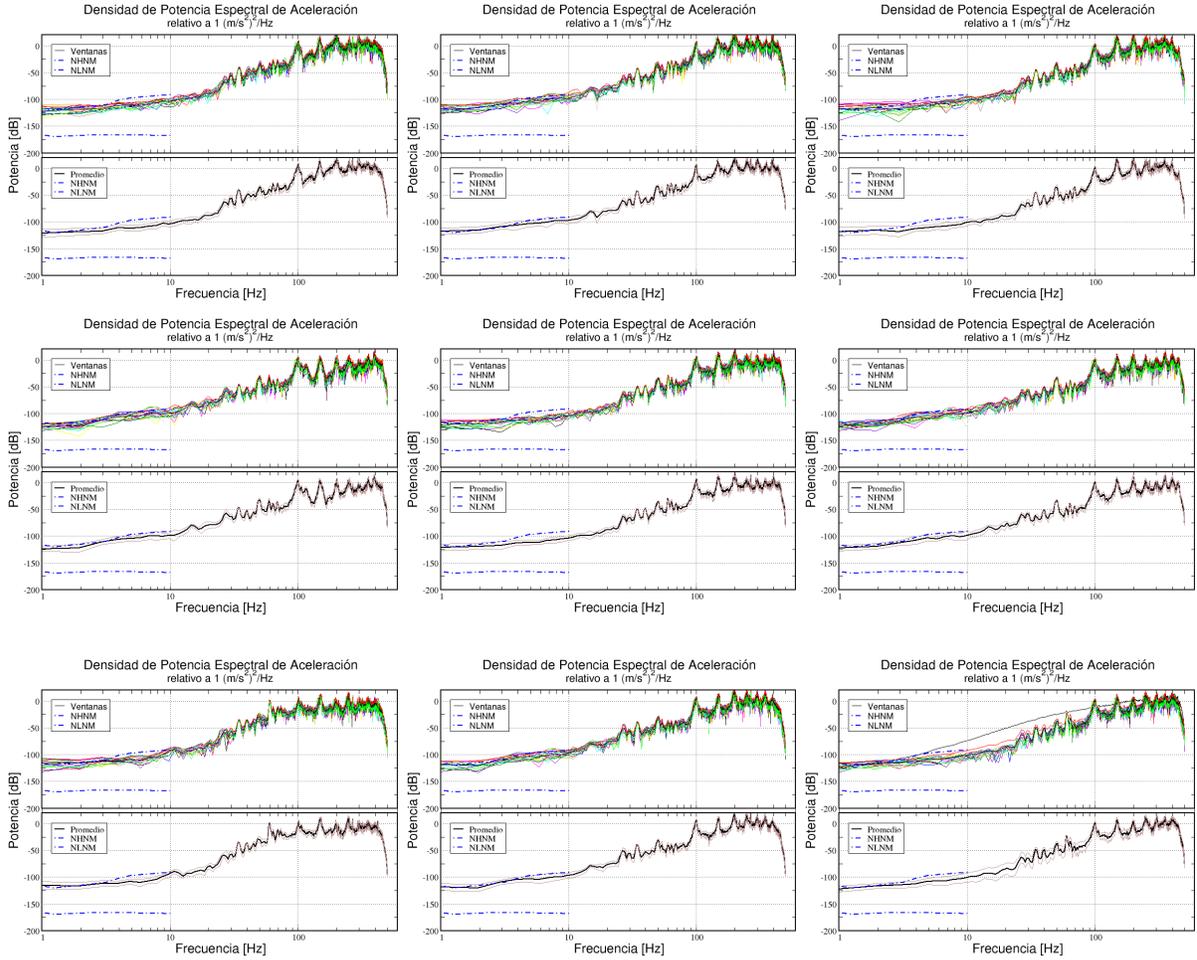
Arreglo lineal de geófonos variante 1.



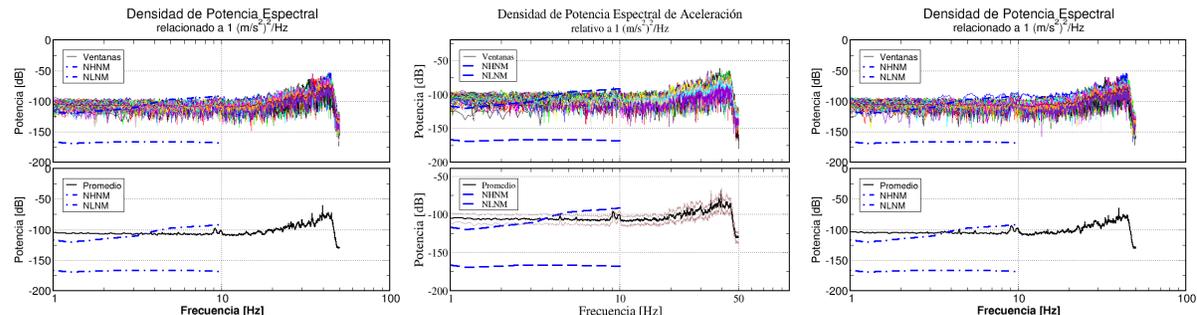


Variante 2.

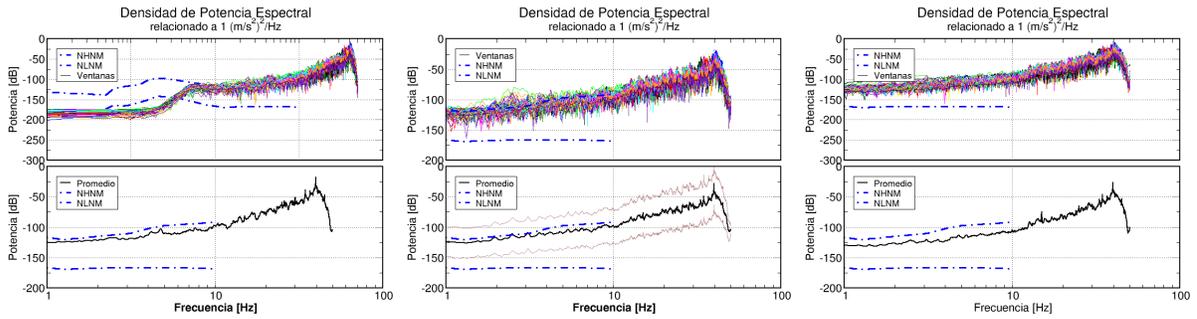




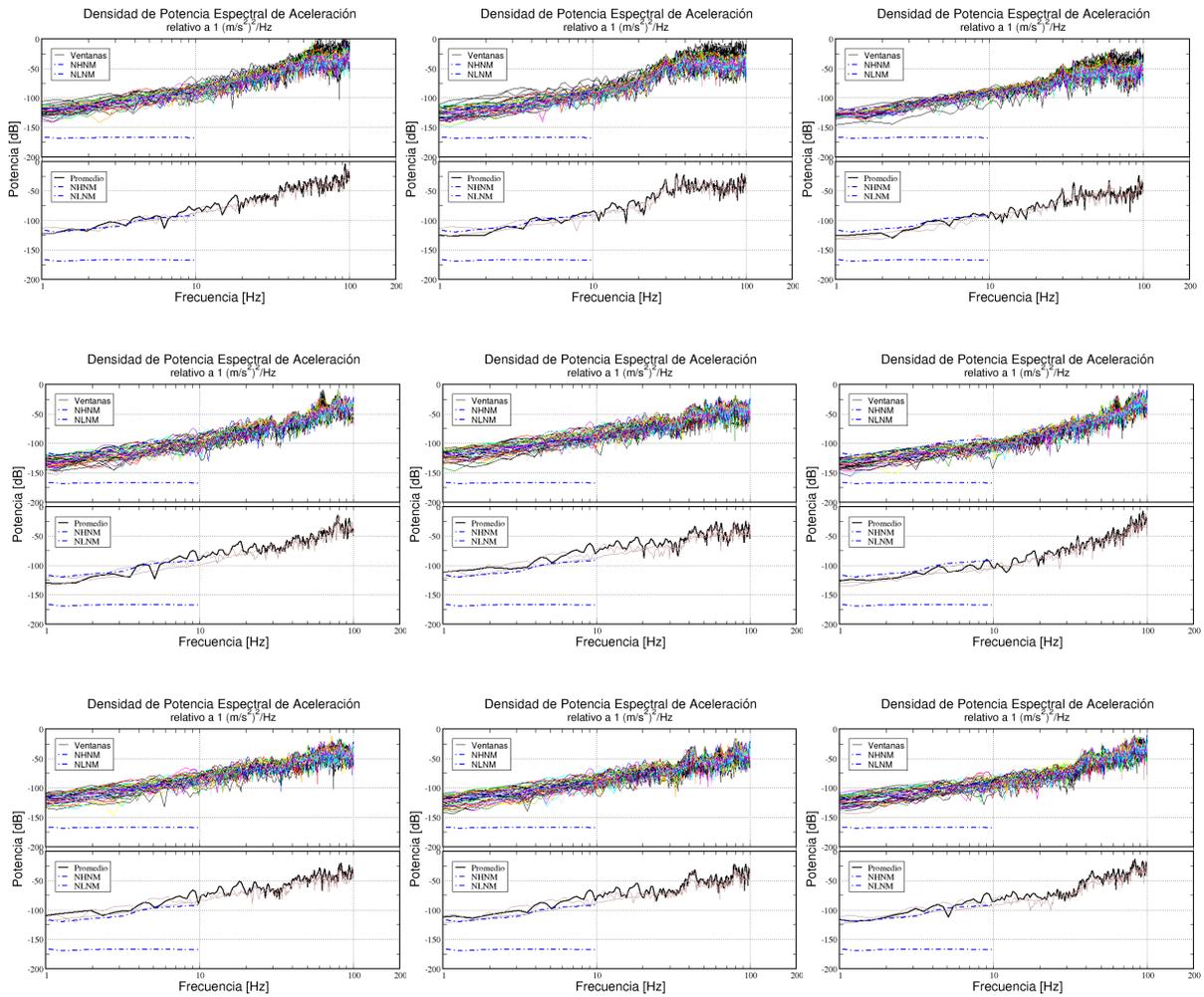
Sensores de banda intermedia (50 [Hz]): FBA-23 y CMG-40T acoplados a registrador K2.
 Sensor FBA-23



Sensor CMG-40T



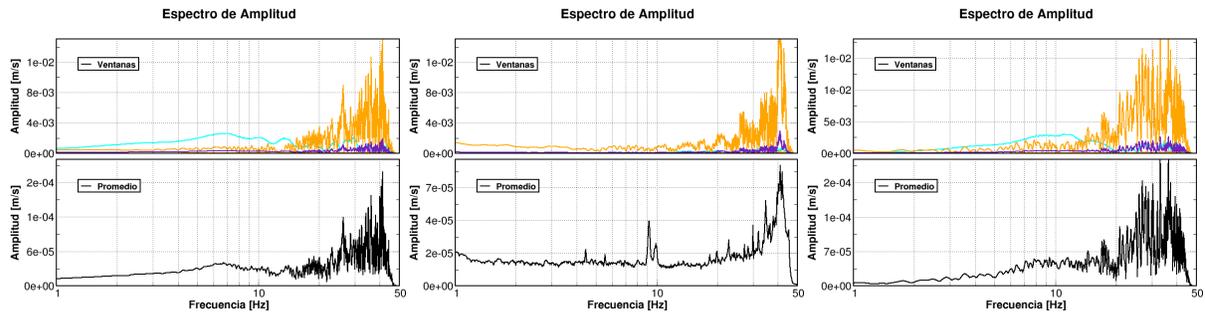
Sensores de 1 [Hz] Lennartz conectados a registrador DoReMi.



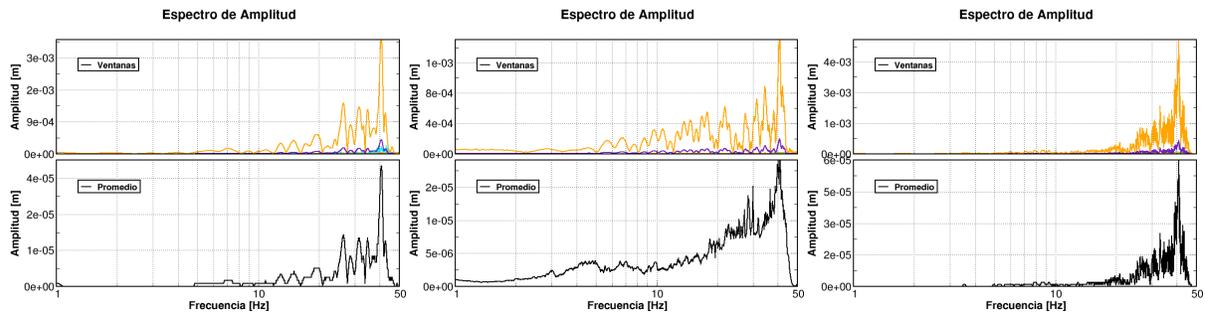
Explosiones

Ahora presentamos los espectros de amplitud estimados para cada uno de los experimentos llevados a cabo dentro del túnel durante la detonación de explosivos.

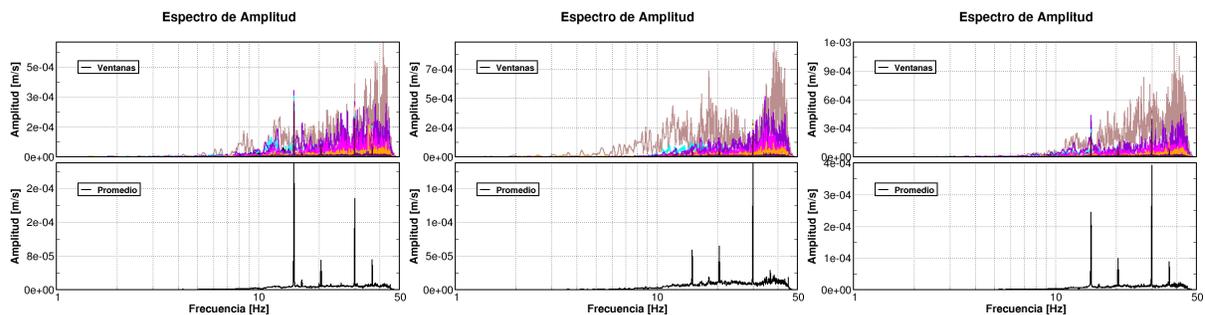
Frente de excavación. Equipo K2-1310 + Guralp.
Sensor FBA-23.



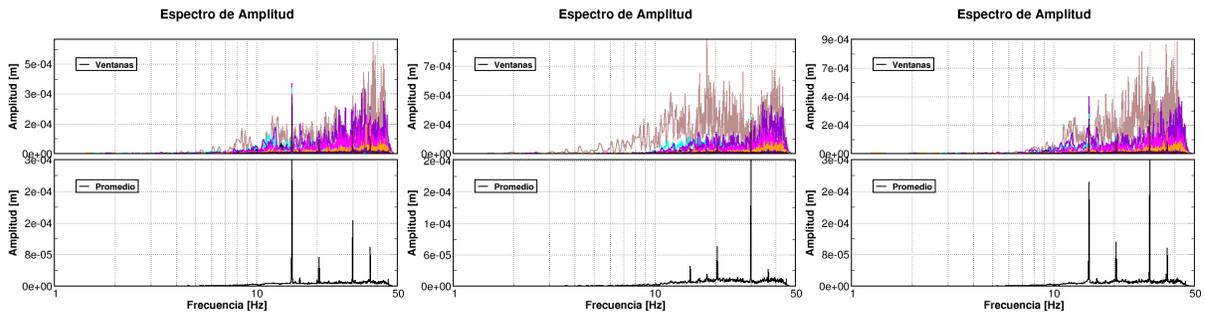
Sensor CMG-40T



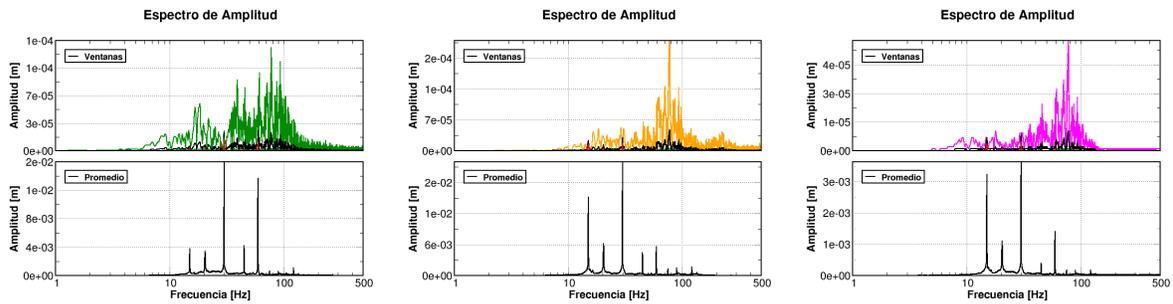
Portal de entrada. Equipo K2-1313 + Guralp.
Sensor FBA-23



Sensor CMG-40T.



Sensor Lennartz

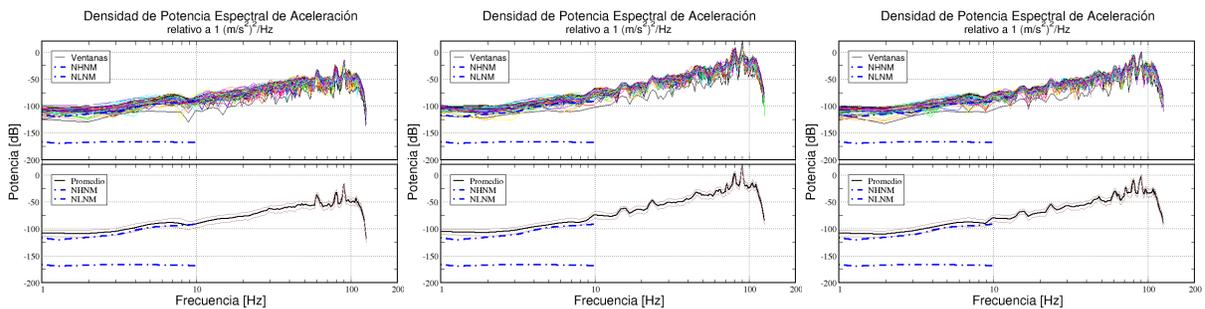


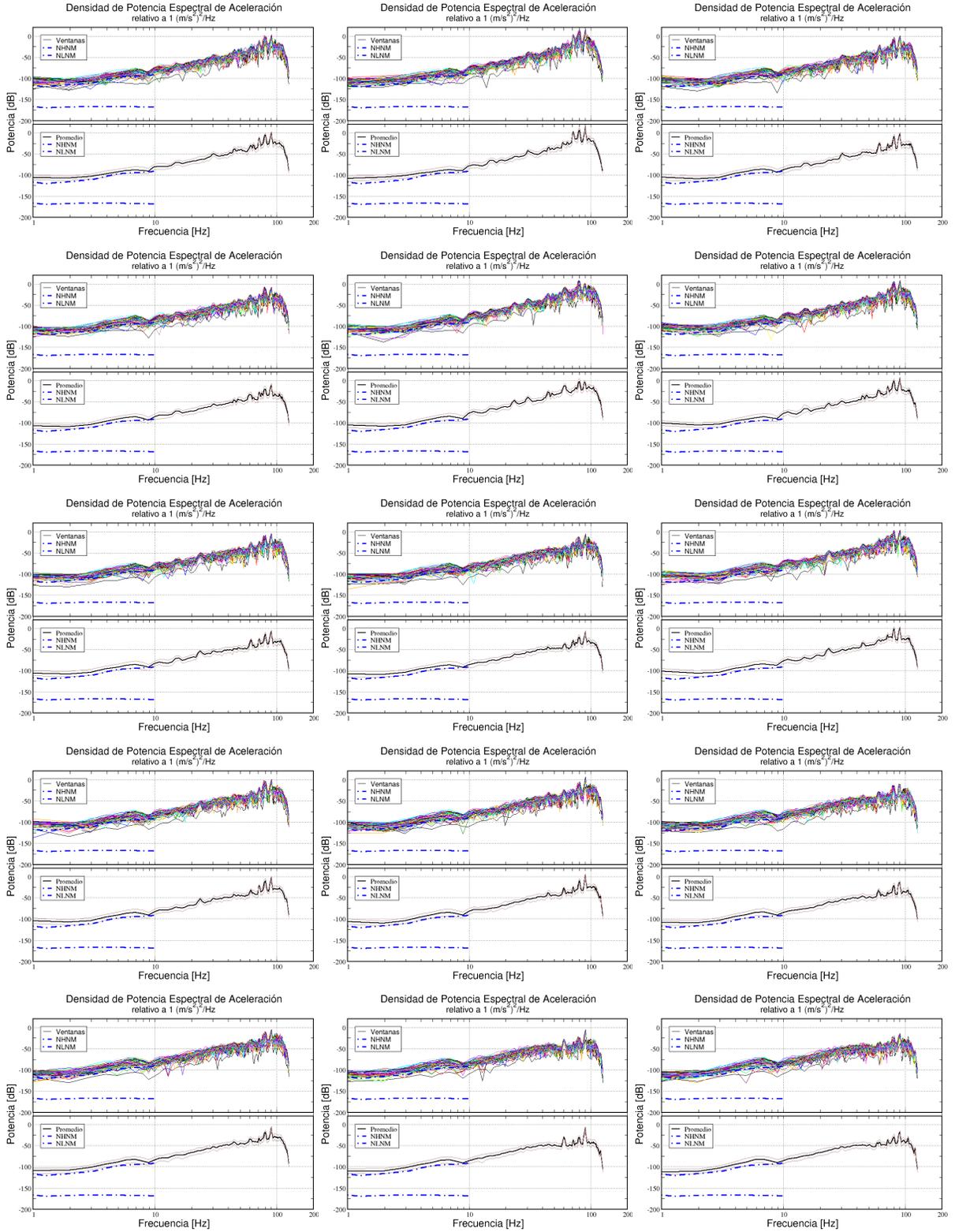
Túnel “El Varal”.

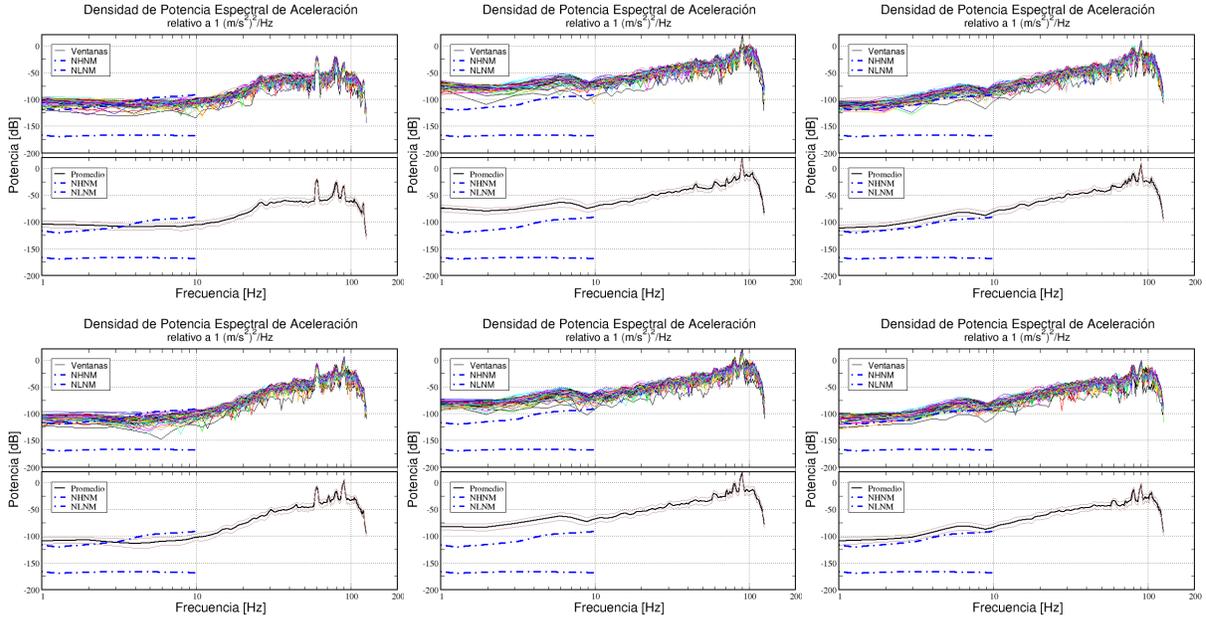
Presentamos las imágenes que contienen las densidades de potencia espectral de aceleración para los experimentos realizados dentro del túnel durante la operación de la barrenadora. Van incluidos los cálculos realizados para el arreglo lineal de geófonos, así como los registros adquiridos con los sensores de banda intermedia FBA y CMG-40T (50 [Hz]) y los sensores de 1 [Hz] Lennartz implementadas en el túnel “El Varal”.

Barrenadora.

Arreglo lineal de geófonos.



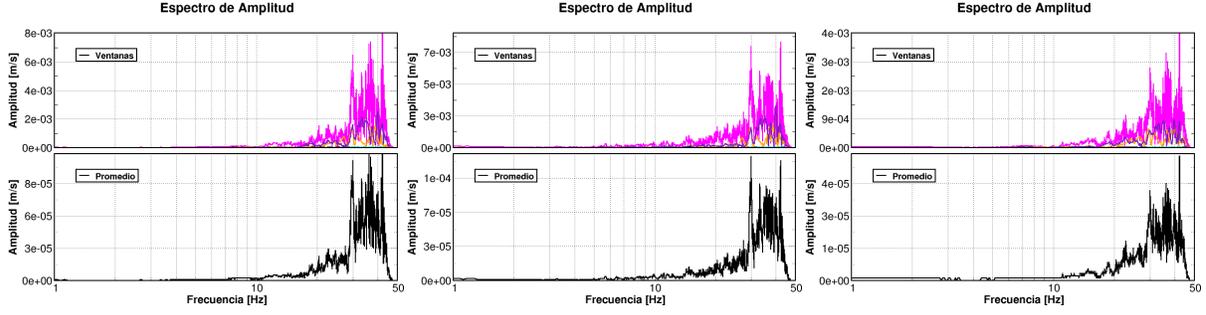




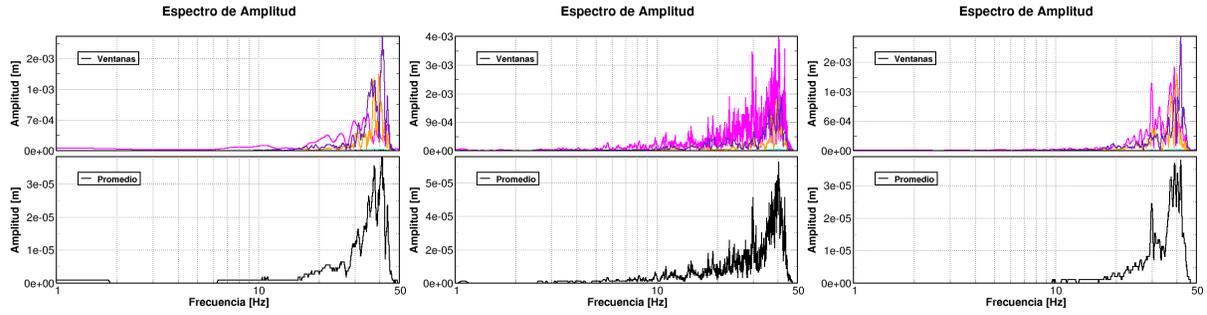
Explosiones

Presentamos ahora los espectros de amplitud estimados para cada uno de los experimentos llevados a cabo dentro del túnel durante la detonación de explosivos.

Equipo K2-1310 + Guralp.
Sensor FBA-23.



Sensor CMG-40T.



Sensor Lennartz.

