



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE PRE-  
PROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS EN TÚNELES UTILIZANDO  
FUENTES SÍSMICAS CONTROLADAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

GERARDO ANDRÉS PEÑA ÁLVAREZ

PROFESOR GUÍA  
MARCOS DIAZ QUEZADA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
DIANA COMTE SELMAN  
JORGE SILVA SÁNCHEZ

SANTIAGO DE CHILE  
2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Eléctrico  
**POR:** Gerardo Andrés Peña Álvarez  
**FECHA:** Enero 2017  
**PROFESOR GUÍA:** Marcos Díaz Quezada  
**PROFESOR CO-GUÍA:** Diana Comte Selman

## **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE PRE-PROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS EN TÚNELES UTILIZANDO FUENTES SÍSMICAS CONTROLADAS**

Las crecientes necesidades energéticas, de conectividad y de extracción de minerales, además del aumento de las exigencias medioambientales hacen del uso de túneles una buena alternativa al momento de desarrollar un proyecto. Construir túneles no es una tarea fácil, el riesgo que conlleva el excavar en roca y mantener la estructura sin que se colapse por el peso del sitio, requiere de estudios acabados de la geología del lugar antes y durante la construcción del túnel. Es en estos estudios donde se utilizan sondajes junto con las técnicas de prospección sísmica.

En este trabajo de título se estudió un método de prospección sísmica el cual utiliza cargas explosivas como fuentes sísmicas controladas y acelerómetros para registrar las ondas reflejadas por estructuras geológicas que se encuentran más adelante de la cara del túnel, método probado y utilizado por una empresa privada, la cual no entrega información a fondo del funcionamiento del sistema por motivos comerciales.

Durante el estudio del método, se generó un algoritmo de pre-procesamiento de trazas sísmicas obtenidas en túneles que hace filtrados secuenciales de las señales y las prepara para aplicarles tomografía y estimar las estructuras geológicas en la sección del túnel que no ha sido excavada.

El algoritmo de pre-procesamiento generado se aplicó a dos conjuntos de datos sísmicos obtenidos en un túnel, en dos niveles de avance consecutivos. Los resultados obtenidos se compararon con un software comercial obteniéndose en la mayoría de los pasos aplicados resultados similares o mejores al software comercial, lo cual indica que el estudio realizado puede ser utilizado para desarrollar un nuevo producto, que entregue de manera confiable y segura, la información que los profesionales necesitan durante la construcción de túneles modernos.

Finalmente, se deja a libre disposición de la comunidad docente y estudiantil el algoritmo diseñado, el cual da un primer paso en estudio del área de procesamiento de señales sísmicas en túneles y se motiva a la comunidad a continuar y perfeccionar el trabajo realizado, con el objetivo futuro de diseñar el hardware y software necesario para realizar las mediciones en terreno y representar los resultados de manera clara y transparente al operador.

*Dedicado a mi familia y a cada uno de los que fueron parte de este ciclo...*

# Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a Dios, pues es él es la guía de mi vida, el apoyo y la fuerza para cumplir mis metas y salir adelante.

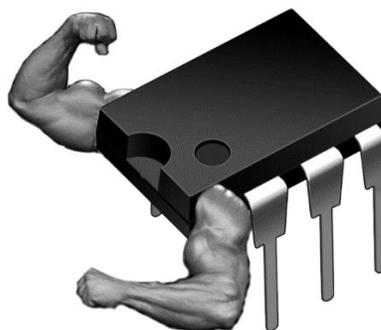
Gracias a mis padres Gloria y Gerardo, por la crianza que me dieron, por el esfuerzo que hacen cada día para entregarnos a mí y a mis hermanos lo mejor. Sin ustedes, yo no hubiera logrado nada de lo que tengo. A mis hermanos Jaime y Gabriel, por el apoyo, los consejos y la niñez que tuvimos y que casi todos los días seguimos teniendo.

Gracias a mi Profesor Guía, Marcos Díaz, por todas las sugerencias y apoyo en el trabajo. A mi Profesora Co-Guía, Diana Comte, por creer en mí y permitirme trabajar a su lado, por sugerir el tema del trabajo de título y aportar con su sabiduría en todas las correcciones, tanto técnicas como de forma. Y Gracias también al profesor Jorge Silva por aceptar pertenecer a la comisión docente.

Quiero agradecer también a mis amigos de la iglesia, Pepe, Roberto, Guille, Pedro, Wely, gracias por estar en las buenas y en las malas conmigo, por los consejos, las risas y los retos cuando me los merecía, gracias por estar cerca aunque a veces las distancias geográficas nos separen. También hago mención especial al grupo de los Ratitas, por el apoyo en momentos difíciles y por los momentos de alegría cuando el estrés nos pesaba.

Gracias a mis compañeros y amigos de eléctrica, Romina, Carolina, Joaquín, Vikingo, Pelao y a todos los del grupo de los OPAMPs musculosos, por esas amanecidas estudiando, por las risas, cafés, pasteos y en general por el apoyo mutuo que nos tenemos tanto en lo académico como en lo personal, sin ustedes la u hubiera sido mucho más difícil. Gracias también a los integrantes del laboratorio SPEL, por recibirme, aceptarme y darme un espacio en el cual trabajar y por las guías entregadas tanto en este trabajo, como en los otros ramos de la carrera.

Como mensaje final, quiero decirles que si uno se propone una meta en la vida, puede que en un principio el camino se vuelva largo, hayan obstáculos que sean difíciles de pasar y uno falle varias veces, pero aunque la frustración llegue, hay que ponerse de pie, creer en uno mismo e intentarlo otra vez hasta lograr terminar, pues la recompensa que llega al final es mucho más grande que la dificultad del camino.



# Tabla de Contenido

Agradecimientos.....	iii
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1    Objetivos.....	1
1.1.1    Objetivos Generales.....	2
1.1.2    Objetivos Específicos .....	2
1.2    Estructura de la Memoria.....	2
Capítulo 2: Revisión Bibliográfica y Contextualización.....	3
2.1    Marco Teórico.....	3
2.1.1    Onda sísmica .....	3
2.1.2    Ondas internas (de cuerpo).....	4
2.1.3    Medio de propagación .....	5
2.1.4    Dispersión Geométrica .....	5
2.1.5    Atenuación.....	5
2.1.6    Absorción .....	5
2.1.7    Reflexión .....	6
2.1.8    Refracción.....	6
2.1.9    Factor de Atenuación.....	6
2.1.10    Coeficiente de Absorción .....	6
2.1.11    Filtro de Atenuación Inversa .....	7
2.1.12    Reflector .....	7
2.1.13    Frente del Túnel.....	7
2.1.14    Fuente Sísmica Controlada.....	7
2.1.15    Traza.....	8
2.1.16    Matriz de Rotación .....	8
2.1.17    Amplitud Espectral.....	8
2.1.18    Onda de Choque Aérea.....	8
2.1.19    Filtro Pasa-Bajo .....	9
2.1.20    Filtro Pasa-Banda .....	9
2.1.21    Ajuste de Curvas (norma L2) .....	9
2.1.22    Transformada de Fourier .....	9
2.1.23    Transformada de Radón.....	9
2.1.24    Principio de Fermat .....	10
2.1.25    Ruido .....	10

2.1.26	Jumbo .....	10
2.2	Nociones básicas de construcción de túneles.....	10
2.2.1	Excavado Convencional .....	10
2.2.2	Excavado Mecánico.....	12
2.3	Estado del Arte: Pronóstico de Estructuras Geológicas Previo al Avance de la Construcción de un Túnel.....	14
2.3.1	<i>Sonic Softground Probing</i> .....	14
2.3.2	<i>Tunnel Seismic While Drilling</i> .....	14
2.3.3	<i>Tunnel Look-Ahead Prediction Using Surface Waves</i> .....	14
2.3.4	<i>Tunnel Seismic Prediction (TSP)</i> .....	14
2.4	Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM) .....	15
Capítulo 3:	Implementación de un Algoritmo de Pre-Procesamiento de Datos Sísmicos .....	16
3.1	Plataforma de trabajo utilizada .....	16
3.2	Pasos del Pre-procesamiento .....	16
3.2.1	Extracción y Caracterización de Datos Sísmicos .....	16
3.2.2	Modelo Geométrico del Túnel.....	16
3.2.3	Determinación de Distancia Fuente sísmica Controlada-Sensores .....	18
3.2.4	Normalización de los Sistemas de Referencia Entre los Sensores y el Modelo Geométrico del Túnel.....	19
3.2.5	Corrección de los Sistemas de Referencia de los Sensores Sísmicos.....	20
3.2.6	Determinación de la Ventana Temporal.....	22
3.2.7	Aplicación de un Filtro Pasa-Bajo con Frecuencia de Corte Variable en el Tiempo 22	
3.2.8	Aplicación de un Filtro Pasa-Banda Para Respetar los Rangos Dinámicos del Sensor 23	
3.2.9	Determinación de los Tiempos de Llegada de la Onda P.....	24
3.2.10	Verificación de los Tiempos de Llegada de la Onda P Determinados y Cálculo de Velocidad de Onda P Promedio .....	24
3.2.11	Alineación de Trazas a Línea de Tendencia de Tiempos de Llegada de Onda P Directa 25	
3.2.12	Normalización de la Energía de Fuentes Sísmicas Controladas.....	25
3.2.13	Estimación del Factor de Atenuación en Medio.....	26
3.2.14	Extracción de las Ondas Reflejadas de los Datos Procesados.....	26
Capítulo 4:	Análisis de los Resultados en Función de los Obtenidos por un <i>Software</i> Comercial 29	
4.1	Descripción de los datos usados .....	29
4.1.1	Ubicación Geográfica del Túnel y Condiciones de las Pruebas.....	29

4.2	Análisis y Discusión de Resultados .....	31
4.2.1	Modelo Geométrico del Túnel.....	31
4.2.2	Determinación de Distancia Fuente Sísmica Controlada-Sensores.....	35
4.2.3	Normalización de los Sistemas de Referencia Entre los Sensores y el Modelo Geométrico del Túnel.....	36
4.2.4	Corrección de los Sistemas de Referencia de los Sensores Sísmicos.....	36
4.2.5	Determinación de Ventana Temporal.....	37
4.2.6	Aplicación de un Filtro Pasa-Bajo con Frecuencia de Corte Variable en el Tiempo	37
4.2.7	Aplicación de un Filtro Pasa-Banda Para Respetar los Rangos Dinámicos del Sensor	41
4.2.8	Determinación de los Tiempos de Llegada de la Onda P.....	45
4.2.9	Verificación de los Tiempos de Llegada de la Onda P Determinados y Cálculo de Velocidad de Onda P Promedio .....	47
4.2.10	Alineación de Trazas a Línea de Tendencia de Tiempos de Llegada de Onda P Directa	48
4.2.11	Normalización de la Energía de Fuentes Sísmicas Controladas.....	49
4.2.12	Estimación del Factor de Atenuación en Medio.....	51
4.2.13	Extracción de las Ondas Reflejadas de los Datos Procesados.....	52
Capítulo 5:	Conclusiones y Recomendaciones .....	58
5.1	Conclusiones .....	58
5.2	Recomendaciones .....	59
Bibliografía.....		60

# Índice de Tablas

Tabla 1: Identificadores de los elementos a posicionar en las grillas.....	17
Tabla 2: Tabla de unificación de sistemas de referencia en túnel .....	19
Tabla 3: Parámetros del filtro pasa-bajo dsp.VariableBandwidthFIRFilter .....	23
Tabla 4: Parámetros del filtro pasa-banda dsp.VariableBandwidthFIRFilter .....	24
Tabla 5: Condiciones de la adquisición de datos en terreno.....	30
Tabla 6: Frecuencias de corte del filtro pasa-banda usado en cada prueba.....	41
Tabla 7: Aciertos y fallas al detectar los tiempos de llegada de la onda P directa en la Primera prueba con dos niveles de filtrado distintos .....	46
Tabla 8: Aciertos y fallas al detectar los tiempos de llegada de la onda P directa .....	46
Tabla 9: Velocidades promedio de la onda P calculadas para cada sensor. ....	47
Tabla 10: Comparación de resultados de estimación del factor de atenuación en TSP y en Matlab .....	52
Tabla 11: Valor de tiempo mínimo utilizado para el filtro en dominio Radón .....	52
Tabla 12: Parámetros utilizados en la aplicación del filtro de atenuación inversa.....	55

# Índice de Figuras

Figura 1: Ejemplo de registro de un sismo. Se ven los tiempos de llegada de las ondas P y S. [1]	3
Figura 2: Vista gráfica del movimiento de las partículas al paso de ondas P (imagen superior) y S (imagen inferior). (Imágenes obtenidas del sitio <a href="http://csdelatierra2011profffaustto.blogspot.cl">http://csdelatierra2011profffaustto.blogspot.cl</a> , 2016) [3]	5
Figura 3: Esquema de excavado convencional: 1) Perforado, 2) carga de explosivos, 3) tronadura, 4) ventilación 5) limpieza.	11
Figura 4: Patrón esquemático de las perforaciones hechas en la cara del túnel codificadas en color con respecto a las etapas de detonación: 1° amarillo, 2° rojo, 3° verde y 4° azul. Los círculos blancos denotan agujeros sin carga que sirven para disminuir la formación de tensiones. Las cargas explosivas son cableadas a un detonador externo. (Imagen obtenida de S. Jetschny, « <i>PhD. Dissertation. Seismic prediction and imaging of geological structures ahead of a tunnel using surface waves.</i> » [11]).	11
Figura 5: Excavado convencional. A la izquierda la perforación para insertar cargas explosivas y a la derecha se ven los escombros que quedan luego de la tronadura. (Imagen obtenida de S. Jetschny, « <i>PhD. Dissertation. Seismic prediction and imaging of geological structures ahead of a tunnel using surface waves.</i> » [11]).	12
Figura 6: Máquina tuneladora. La rueda tiene un diámetro de 13.3 m. (Imagen obtenida de S. Jetschny, « <i>PhD. Dissertation. Seismic prediction and imaging of geological structures ahead of a tunnel using surface waves.</i> » [11]).	13
Figura 7: Esquema general de una tuneladora con cada una de sus secciones.	13
Figura 8: Esquema del proyecto (Imagen obtenida del sitio <a href="http://www.altomaipo.com">http://www.altomaipo.com</a> , 2016) [12]	15
Figura 9: Corte vertical de las grillas del modelo geométrico: La grilla fina queda insertada dentro de la grilla gruesa.	17
Figura 10: Sistemas de referencia de los sensores (en verde) y sistema de referencia general del túnel (en rojo)	19
Figura 11: Corte transversal del túnel mostrando las desviaciones de los sistemas de referencia de los sensores (en verde) con respecto al general (en rojo).	20
Figura 12: Corte longitudinal del túnel mostrando las desviaciones de los sistemas de referencia de los sensores (en verde) con respecto al general (en rojo).	21
Figura 13: Esquema mostrando las desviaciones de los sistemas de referencia de los sensores (en verde) con respecto al general (en rojo).	21
Figura 14: Superposición del plano de construcción del túnel con la vista aérea tomada desde Google Earth. La sección marcada en rosado es el túnel donde se hicieron las pruebas sísmicas.	29
Figura 15: Corte transversal del modelo geométrico del túnel.	31
Figura 16: Vista superior del modelo geométrico del túnel con posiciones de sensores y fuentes sísmicas (V1 0+873.8). Los puntos rojos representan a los sensores: Sensores 1 y 2 en la parte superior, 3 y 4 en la parte inferior. Los puntos verdes representan las 24 fuentes sísmicas controladas.	31
Figura 17: Vista superior del modelo geométrico del túnel con posiciones de sensores y fuentes sísmicas (V1 0+977.7). Los puntos rojos representan a los sensores: Sensores 1 y 2 en la parte superior, 3 y 4 en la parte inferior. Los puntos verdes representan las 24 fuentes sísmicas controladas.	32
Figura 18: Diferencia de posición de elementos entre túnel real y el modelado en Matlab (V1 0+873.8). Para mostrar más detalles, se acotaron los límites del eje Y.	33

Figura 19: Diferencia de posición de elementos entre túnel real y el modelado en TSP (V1 0+873.8)	33
Figura 20: Diferencia de posición de elementos entre túnel real y el modelado en Matlab (V1 0+977.7). Para mostrar más detalles, se acotaron los límites del eje Y.	34
Figura 21: Diferencia de posición de elementos entre túnel real y el modelado en TSP (V1 0+977.7)	34
Figura 22: Diferencia de distancia calculada emisor-fuente sísmica entre Matlab y TSP (V1 0+873.8)	35
Figura 23: Diferencia de distancia calculada emisor-fuente sísmica entre Matlab y TSP (V1 0+977.7)	36
Figura 24: Curva de frecuencia de corte del filtro pasa-bajo variable en el tiempo. (Al graficar se cambió el orden de los ejes para tener concordancia con los espectrogramas de las imágenes siguientes).	37
Figura 25: Espectrograma señales en Matlab previo a aplicación del filtro (V1 0+873.8)	38
Figura 26: Espectrograma señales en Matlab posterior a aplicación del filtro (V1 0+873.8)	38
Figura 27: Espectrograma señales en TSP previo a aplicación del filtro (V1 0+873.8)	39
Figura 28: Espectrograma señales en TSP posterior a aplicación del filtro (V1 0+873.8)	39
Figura 29: Comparación de una traza previa y posterior a la aplicación del filtro pasa-bajo variable en el tiempo en Matlab y en TSP. Análogo para ambas pruebas.	40
Figura 30: Espectrograma señales en Matlab posterior a aplicación del filtro (V1 0+873.8)	42
Figura 31: Espectrograma señales en TSP posterior a aplicación del filtro (V1 0+873.8)	42
Figura 32: Trazas sísmicas antes de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+873.8)	43
Figura 33: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+873.8). Frecuencia de corte superior de 4320 Hz.	43
Figura 34: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+873.8). Frecuencia de corte superior de 1500 Hz.	43
Figura 35: Espectrograma señales en Matlab posterior a aplicación del filtro (V1 0+977.7)	44
Figura 36: Espectrograma señales en TSP posterior a aplicación del filtro (V1 0+977.7)	44
Figura 37: Trazas sísmicas antes de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+977.7)	45
Figura 38: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+977.7)	45
Figura 39: Trazas desplazadas coincidiendo con la tendencia calculada (línea azul)	48
Figura 40: Amplitud espectral promedio v/s Distancia Sensor - fuente sísmica previo al balance de energía (Matlab V1 0+873.8, sensor 1)	49
Figura 41: Amplitud espectral promedio v/s Distancia Sensor - fuente sísmica posterior al balance de energía (Matlab V1 0+873.8, sensor 1)	50
Figura 42: Amplitud espectral promedio v/s Distancia Sensor - fuente sísmica previo al balance de energía (TSP V1 0+873.8, sensor 1)	50
Figura 43: Amplitud espectral promedio v/s Distancia Sensor - fuente sísmica posterior al balance de energía (TSP V1 0+873.8, sensor 1)	51
Figura 44: Trazas con ventana temporal marcada (caja roja)	51
Figura 45: Trazas sísmicas antes de aplicar el filtro en dominio Radón (V1 0+873.8)	53
Figura 46: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro en dominio Radón (V1 0+873.8)	53
Figura 47: Trazas sísmicas antes de aplicar el filtro en dominio Radón (V1 0+873.8). Tendencia de las llegadas marcadas con líneas verdes.	54
Figura 48: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro en dominio Radón (V1 0+873.8). Tendencias de las llegadas marcadas con líneas rojas.	54
Figura 49: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro de atenuación inversa en Matlab (V1 0+873.8)	55

Figura 50: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro de atenuación inversa en TSP (V1 0+873.8).	56
Figura 51: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro de atenuación inversa en Matlab (V1 0+977.7).	56
Figura 52: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro de atenuación inversa en TSP (V1 0+977.7).	57

# Capítulo 1: Introducción

Con las crecientes necesidades energéticas, de conectividad y de extracción de minerales, junto con las exigencias de tener un mínimo impacto ambiental posible, la construcción de túneles es una de las opciones tomadas al momento de desarrollar proyectos hidroeléctricos, de vías para el transporte urbano e interurbano y para los proyectos mineros, respectivamente, entre otras aplicaciones.

Construir un túnel es una tarea complicada y riesgosa, pero con los conocimientos adquiridos a lo largo del tiempo y con el desarrollo de técnicas nuevas de construcción se ha podido implementar de manera exitosa. Uno de los datos que se tienen que manejar al momento de proyectar y llevar a cabo el túnel es saber el tipo de roca que se va a perforar y la existencia de fallas u otras estructuras geológicas que pueden influir en este proceso. Una forma de enfrentar este problema es hacer sondajes verticales u horizontales en el proceso de construcción del mismo, sin embargo, el realizar estos sondajes resulta costoso y es una metodología lenta, volviéndose inviables en casos donde el túnel debe pasar por una montaña, con cientos de metros de roca sobre él, y puede ocurrir que dichas perforaciones no alcancen a llegar a la ruta proyectada. Principalmente en estos casos usar herramientas de prospección sísmica es una de las alternativas atractivas a las que se recurre para complementar el uso de sondajes.

En esta investigación se estudió un método de prospección sísmica que utiliza cargas explosivas como fuentes sísmicas controladas y acelerómetros para registrar las ondas reflejadas por estructuras geológicas que se encuentran más adelante del frente del túnel, con el objetivo de tener un conocimiento *a priori* sobre estas estructuras y que ayudan al constructor a tomar decisiones que permitan un desarrollo de la obra seguro y eficiente, sin tener que detenerla por periodos prolongados.

Existe una metodología que es utilizada por una empresa privada, la cual vende y presta soporte a altos precios, por lo que no hay descripción de la metodología y sólo se limita a describir los aspectos básicos del funcionamiento para que un operario local pueda hacerlo funcionar. El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una aplicación alternativa de la etapa de pre-procesamiento a partir de la interpretación e investigación bibliográfica pertinente de cada una de las fases y dar un primer paso para crear nuevos métodos más seguros tanto para el usuario, como para los operadores que ayudan en la prueba sísmica, además de entregarla a la comunidad docente y estudiantil.

## 1.1 Objetivos

El objetivo principal del trabajo es generar un algoritmo que permita, a partir de filtros, hacer un pre-procesamiento de las trazas sísmicas obtenidas en túneles y dejarlas preparadas para una posterior tomografía y estimación de estructuras geológicas en la sección de avance del túnel que aún no ha sido excavada.

A continuación, se detallan los objetivos generales y específicos de este trabajo.

### 1.1.1 Objetivos Generales

- Generar un algoritmo de pre-procesamiento semi-automático de trazas sísmicas obtenidas en túneles utilizando fuentes sísmicas controladas.
- Analizar el desempeño comparando los resultados obtenidos entre el algoritmo generado y un software comercial.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Pre-procesar trazas sísmicas utilizando filtros pasa-bajo, pasa-banda, herramientas en el dominio de frecuencia como la Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*), Transformada de Radón y detección de los tiempos de llegada de onda P directa utilizando fractales.
- Ajustar los métodos de pre-procesamiento para mejorar el desempeño de cada una de las etapas.
- Comparar los resultados de cada etapa del pre-procesamiento del algoritmo generado con los obtenidos por un software comercial.

## 1.2 Estructura de la Memoria

La estructura de la memoria está compuesta de cinco capítulos; En el capítulo 1, se introduce el tema explicando la motivación que lleva a tratarlo y se definen objetivos generales y específicos. En el capítulo 2, se entregan las definiciones básicas necesarias para entender el tema, además de hacer una revisión sobre el estado del arte del tema a tratar. En el capítulo 3, se detalla cada uno de los pasos que componen el algoritmo diseñado. En el capítulo 4, se revisan los conjuntos de datos utilizados y los resultados luego de la aplicación del algoritmo en dos conjuntos de datos distintos, comparándolos con un sistema comercial. En el capítulo 5, se desarrollan las conclusiones finales sobre el trabajo realizado y se proponen sugerencias para un trabajo futuro, como continuación a este trabajo de título.

## Capítulo 2: Revisión Bibliográfica y Contextualización

El presente capítulo tiene por objetivo realizar una revisión bibliográfica y estado del arte asociado al tema en el cual se desarrolla este trabajo de título, entregando los antecedentes previos y necesarios para su contextualización.

### 2.1 Marco Teórico

#### 2.1.1 Onda sísmica

Las ondas sísmicas son ondas mecánicas que viajan por el interior de la Tierra y pueden ser el resultado de terremotos, explosiones o actividad volcánica que generan ondas de cuerpo de baja frecuencia, que pueden ser registradas por un sismómetro, un hidrófono o un acelerómetro.

La velocidad de propagación de las ondas sísmicas depende de varios parámetros como la densidad, las constantes elásticas del medio, la porosidad, la litología, y la profundidad, siendo menor en la corteza terrestre y mayor en el manto más profundo.

Los sismos generan distintos tipos de ondas con velocidades de propagación diferentes, que se utilizan por ejemplo para la determinación hipocentral de los sismos. La reflexión y refracción de las ondas sísmicas son usadas para investigar la estructura del subsuelo, para lo cual se deben generar vibraciones de forma artificial utilizando explosivos o maquinaria pesada especializada.

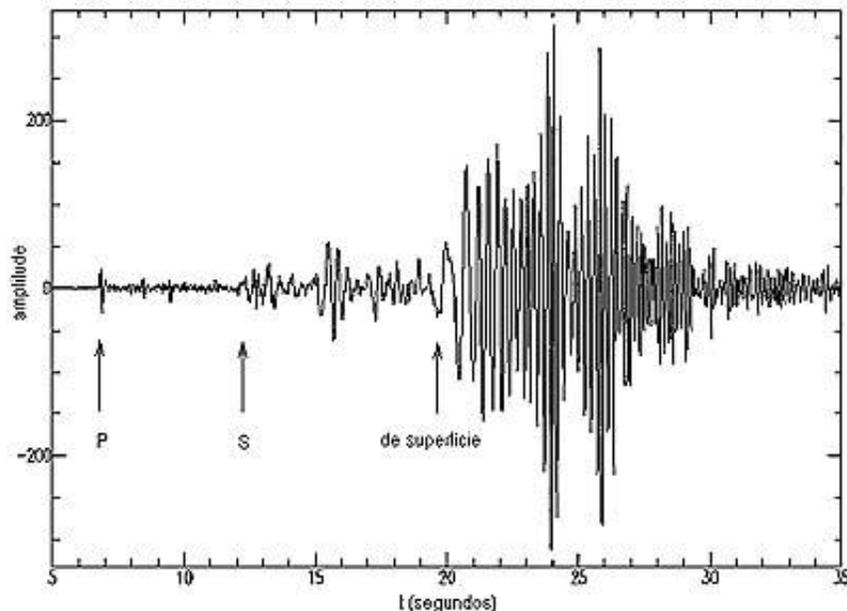


Figura 1: Ejemplo de registro de un sismo. Se indican los tiempos de llegada de las ondas P y S.  
[1]

## 2.1.2 Ondas internas (de cuerpo)

Son ondas que viajan por el interior de la Tierra. Sus trayectorias son refractadas por los cambios de velocidad asociados a las heterogeneidades del interior de la Tierra, siguiendo caminos curvos teniendo un efecto similar al de la refracción de ondas de luz. Existen dos tipos de ondas internas: las primarias, ondas P, y las secundarias, ondas S (Figura 1).

### 2.1.2.1 Onda P

Es una onda longitudinal en la cual el movimiento de las partículas del medio es paralelo a la dirección de propagación de la onda, lo que genera movimientos de dilatación y compresión. Se le llama onda P pues usualmente es la primera llegada que se registra en un sismo. Su velocidad está dada por la ecuación 2.1-1:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad 2.1-1$$

Donde:

- $\alpha$  es la velocidad de la onda P
- $\lambda$  y  $\mu$  son las constantes de Lamé
- $\rho$  es la densidad del medio

La velocidad de la onda P en rocas sedimentarias saturadas de agua varía generalmente entre 1.5 y 6.5 km/s, aumentando con la pérdida de porosidad, profundidad y edad. La velocidad en agua es de aproximadamente 1.5 km/seg y decrece cuando un gas reemplaza al líquido como fluido intersticial. La disminución de velocidad producto del reemplazo del agua por un gas es mayor cerca de la superficie, en general sobre el nivel del agua subterránea donde una capa de baja velocidad tiene típicamente una velocidad de entre 0.4 y 0.8 km/s, en unas ocasiones esta velocidad puede ser tan baja como 150 m/s y otras tan alta como 1.2 km/s. [2]

### 2.1.2.2 Onda S

Es una onda transversal en la cual el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Se le llama onda S pues usualmente es la segunda llegada que se registra de un sismo. Su velocidad está dada por la ecuación 2.1-2:

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad 2.1-2$$

Relacionándolo con la velocidad de la onda P, como las constantes elásticas son siempre positivas,  $\alpha$  siempre es mayor que  $\beta$ , la velocidad de la onda S puede variar hasta un 70% de la velocidad de la onda P. En los fluidos,  $\mu$  es cero, lo que genera que las ondas S no se propaguen en ellos.

En la práctica, el movimiento de las ondas S se descompone en una parte paralela y otra perpendicular a la superficie del suelo, conociéndose como ondas SH y SV respectivamente.

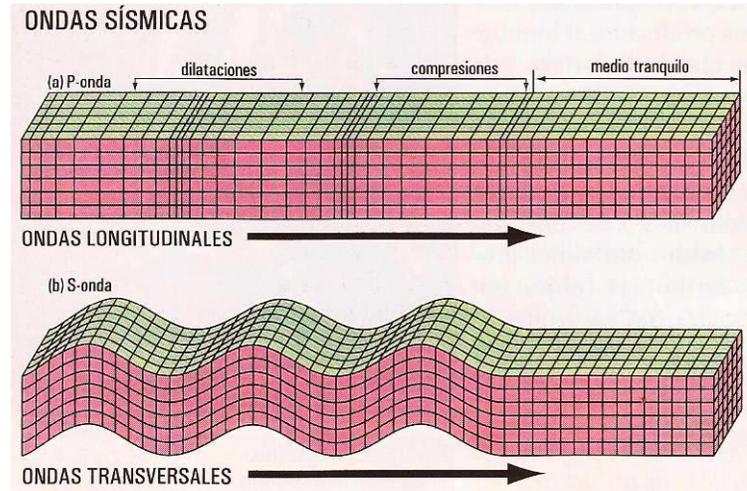


Figura 2: Vista gráfica del movimiento de las partículas al paso de ondas P (imagen superior) y S (imagen inferior). (Imágenes obtenidas del sitio <http://csdelatierra2011proffaustto.blogspot.cl>, 2016) [3]

En casos donde el medio no es homogéneo ni isotrópico, resulta complejo resolver el movimiento ondulatorio en ondas P y S separadas. Sin embargo, las inhomogeneidades y la anisotropía de la Tierra son suficientemente pequeñas como para que el supuesto de ondas P y S separadas sea válido. [2]

### 2.1.3 Medio de propagación

Material (sólido, líquido o gaseoso) a través del cual viajan las ondas sísmicas. Ejemplos de medios de propagación son la roca, agua o el aire.

### 2.1.4 Dispersión Geométrica

Fenómeno en el cual la energía de un frente de onda esférico producido desde una fuente puntual es distribuido de forma uniforme en una superficie esférica que incrementa su tamaño progresivamente a medida que el frente avanza por el medio. [4]

### 2.1.5 Atenuación

Decrecimiento en la amplitud de una onda al viajar por un medio producto de la Dispersión Geométrica, Absorción y la dispersión producto de heterogeneidades en la Tierra (fallas o cuerpos geológicos) [5].

### 2.1.6 Absorción

Proceso en el cual parte de la energía de la onda sísmica es disipada en el medio en forma de calor, producto del movimiento de las partículas.

### 2.1.7 Reflexión

Proceso en el que una onda cambia de dirección en la interfase entre un medio y otro. La onda reflejada se devuelve al medio en donde se originó. El ángulo de reflexión de la onda es igual al ángulo de incidencia con respecto a la normal en la interfase de dos medios adyacentes [5].

### 2.1.8 Refracción

Proceso en el que una onda desvía su camino producto de un cambio de velocidades del medio. La relación entre los índices de refracción de los medios determina el cambio de dirección según lo dice la Ley de Snell (ecuación 2.1-3).

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{n_2}{n_1} \quad 2.1-3$$

Donde:

- $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos de incidencia y refracción respectivamente
- $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de los medios de entrada y salida de la onda.

### 2.1.9 Factor de Atenuación

El factor de atenuación ( $Q^{-1}$ ) es un factor que cuantifica la distorsión que tienen las ondas causada por los efectos de disipación en la Tierra. Para una onda plana viajando por un material visco-elástico, la disipación se refiere a la razón entre la energía perdida por ciclo ( $\Delta W$ ) con respecto a la máxima energía al inicio del ciclo ( $W$ ) [6], lo que se define en la ecuación 2.1-4:

$$\frac{1}{Q} = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \frac{\Delta W}{W} \quad 2.1-4$$

### 2.1.10 Coeficiente de Absorción

El coeficiente de absorción  $A$  representa la capacidad de absorción que tiene un medio [6], la cual se relaciona con la ecuación 2.1-5:

$$E_d = E_0 \exp(-Ad) \quad 2.1-5$$

Donde:

- $E$  Amplitud de la onda
- $d$  es la distancia recorrida por la onda en el medio

El coeficiente de absorción también está relacionado con el Factor de Atenuación según la ecuación 2.1-6:

$$A = \left(\frac{\omega}{2v}\right) \frac{1}{Q} \quad 2.1-6$$

Donde:

- $\omega$  es la frecuencia angular de la onda
- $v$  es la velocidad de propagación en el medio

#### 2.1.11 Filtro de Atenuación Inversa

El filtro de atenuación inversa es un filtro que permite revertir los efectos de atenuación y dispersión que sufre una onda al viajar por un medio.

El filtro contiene dos componentes: una de compensación de fase y una de compensación de amplitud. Mientras la componente de fase es incondicionalmente estable, la componente de amplitud es una función exponencial de la frecuencia y el camino recorrido por la onda, lo que genera valores indeseados en las trazas si no es correctamente compensado. Para evitar el fenómeno anterior, se utiliza un filtro que contiene un factor de estabilización que limita la ganancia máxima que se le entrega a las trazas atenuadas [6].

El conjunto de ecuaciones que definen el filtro de atenuación inversa se encuentra en [6] págs. 59-68.

#### 2.1.12 Reflector

Interfaz entre dos medios elásticos con diferentes propiedades que originan la reflexión de ondas sísmicas [5].

#### 2.1.13 Frente del Túnel

También llamado “Cara del Túnel” es el sector del túnel construido más recientemente y que define la dirección de avance del mismo.

#### 2.1.14 Fuente Sísmica Controlada

Una fuente sísmica controlada es un dispositivo que genera una cantidad acotada de energía que es utilizada para realizar pruebas sísmicas de reflexión o refracción. Estas fuentes pueden entregar pulsos unitarios o distribuidos de energía, las que generan ondas sísmicas que viajan a través de un medio como por ejemplo: agua o roca.

Ejemplos de fuentes sísmicas controladas son los explosivos, en los que se puede controlar la cantidad de energía liberada dependiendo de la cantidad de material que se use en la detonación y la forma y lugar en donde se acopla. Predominantemente los explosivos generan ondas de dilatación y compresión (P). Otro ejemplo es el *Vibroiseis*, que consiste en un vibrador hidráulico montado en un camión el cual genera de forma controlada impulsos en un rango de frecuencias acotado [2].

### 2.1.15 Traza

Curva grabada por un sismógrafo u otro dispositivo de registro digital y que representa la respuesta de un medio elástico a una perturbación que viaja desde una fuente sísmica. Corresponde a la amplitud de la velocidad (o aceleración) versus el tiempo.

### 2.1.16 Matriz de Rotación

Una matriz de rotación es tal que permite hacer una rotación del espacio euclídeo según el ángulo que se le especifique. Para generar una rotación de los ejes coordenados X, Y, Z en los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  respectivamente se necesitan las matrices de rotación de las ecuaciones 2.1-7, 2.1-8 y 2.1-9 [7]:

$$Rx(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad 2.1-7$$

$$Ry(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad 2.1-8$$

$$Rz(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.1-9$$

La aplicación de las matrices de rotación para un conjunto de trazas sísmicas  $v$  se implementa según la ecuación 2.1-10:

$$v' = Av = Rz(\gamma)Ry(\beta)Rx(\alpha)v \quad 2.1-10$$

Lo que genera el conjunto de trazas rotadas  $v'$ .

### 2.1.17 Amplitud Espectral

La amplitud espectral se define en términos de la transformada de Fourier de una señal temporal  $x(n)$  medida en volts como se representa en la ecuación 2.1-11:

$$S(f) = 2|X(f)| \quad 2.1-11$$

Donde  $X(f)$  es la transformada discreta de Fourier de  $x(n)$  para una frecuencia  $f$ . [8] Considerando que se está trabajando con señales discretizadas en lugar de continuas, la unidad de medida de la amplitud espectral es volts.

### 2.1.18 Onda de Choque Aérea

Onda que se genera en el interior del túnel asociada a la parte de la energía liberada por el explosivo que se transmite al aire en lugar de la roca. Al viajar por el aire, se transmite de forma más lenta que en la roca y llega de forma más tardía a los sensores.

### 2.1.19 Filtro Pasa-Bajo

Filtro que permite el paso de frecuencias por debajo de una determinada frecuencia de corte y atenúa las frecuencias más altas. [9]

### 2.1.20 Filtro Pasa-Banda

Filtro que permite el paso de frecuencias dentro de una ventana definida por frecuencias de corte alta y baja y atenúa las frecuencias fuera de la ventana. [9]

### 2.1.21 Ajuste de Curvas (norma L2)

Aproximación de un conjunto de datos a una curva de tendencia tal que la suma de los cuadrados de las distancias entre los puntos del conjunto y la curva sea mínima. [5]

### 2.1.22 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una operación matemática lineal que permite descomponer una señal temporal en el conjunto de frecuencias que la conforman, obteniendo una representación de la señal original en el dominio de frecuencias. Para una señal discreta  $f(n)$  muestreada a un intervalo de tiempo uniforme, la transformada discreta de Fourier está definida por la ecuación 2.1-12:

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n)e^{-j\omega n} \quad 2.1-12$$

Con lo que la señal  $f(n)$  se representa como una superposición de exponenciales complejas y  $F(\omega)$  representa la amplitud de la exponencial compleja para cada frecuencia  $\omega$ .

### 2.1.23 Transformada de Radón

La transformada de Radón es una operación que, aplicada junto con un filtro a las trazas sísmicas, permite la atenuación de múltiplos de onda, obteniendo como resultado sólo las ondas reflejadas de forma primaria. [9]

Una forma de aplicar la transformada de Radón es el *slant-stacking*, que consiste en definir una traza de referencia, hacer una traslación lineal de las trazas en el tiempo con respecto a la distancia emisor-fuente sísmica y sumar las trazas, con lo que se obtiene una nueva representación de las trazas sísmicas.

El conjunto de ecuaciones que definen la Transformada de Radón y su inversa aplicadas como *slant-stacking* se encuentra en [10] págs. 291-304.

#### 2.1.24 Principio de Fermat

El principio de Fermat indica que el camino recorrido por una onda para viajar entre dos puntos es tal que el tiempo empleado para recorrerlo es mínimo.

#### 2.1.25 Ruido

Perturbaciones causadas por agentes naturales (como por ejemplo: viento, movimiento del mar, aguas subterráneas, paso de animales) o artificiales (como por ejemplo tráfico de vehículos, maquinaria), incluyendo también fuentes internas de los instrumentos (ruido instrumental producto de componentes internos, sensores o digitalización).

El ruido puede ser reducido utilizando filtros de acuerdo a los parámetros dinámicos de los sensores o instalando los instrumentos en lugares apartados de las fuentes que lo produzcan.

#### 2.1.26 Jumbo

Maquinaria pesada utilizada en la construcción de túneles. Consiste en un vehículo que tiene uno o más brazos equipados con perforadoras para roca. Se utiliza para realizar perforaciones que alojen tanto pernos de sustentación como explosivos destinados a avanzar el túnel.

### 2.2 Nociones básicas de construcción de túneles

Junto con el aumento de la explotación de recursos naturales en la revolución industrial, se necesitó tener una mejor conectividad entre las localidades remotas y las zonas urbanas. Así como se construyen puentes para pasar ríos y valles, los túneles son construidos para atravesar colinas, montañas e interconectar distintas zonas de una ciudad donde construir un puente no es viable. Los conocimientos adquiridos de la minería son utilizados en su construcción, en los cuales una variable principal es el tiempo que el material puede estar sostenido por sí mismo de forma segura. Antiguamente solo era posible construir túneles en roca dura, por su largo tiempo de sustentación sin necesidad de construir estructuras internas de refuerzo, siendo construidos con el método convencional de excavación.

Con el desarrollo de nuevos métodos activos de soporte, los túneles pueden ser construidos en terrenos donde el material es más blando y la sustentación es menor. Además, se han desarrollado máquinas excavadoras que permiten avanzar de forma más rápida en la construcción pero que requieren de análisis más exhaustivos en los momentos previos y durante el desarrollo de la obra para evitar inconvenientes. A continuación, se describen los dos métodos de excavación más usados en la construcción de túneles.

#### 2.2.1 Excavado Convencional

Es la forma más antigua de excavar túneles, la cual sigue en uso. Se basa en romper la roca usando cargas explosivas en perforaciones hechas previamente. Los pasos que se siguen son los siguientes: perforado, carga de explosivos, tronadura, ventilación y limpieza los cuales se pueden observar en la Figura 3. Primero se hacen perforaciones en la cara del túnel por una máquina que puede hacer una o varias de forma simultánea y se distribuyen en un patrón específico (Figura 4).

Una vez perforado el frente se instalan las cargas explosivas y se efectúa la tronadura. Finalmente, y luego de esperar un periodo de ventilación, se retiran los escombros derivados de la tronadura y se continúa con el proceso.

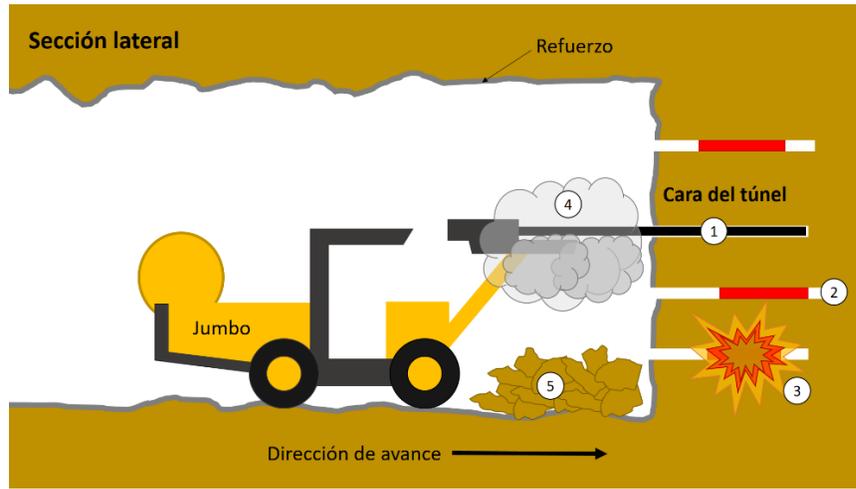


Figura 3: Esquema de excavado convencional: 1): perforado, 2) carga de explosivos, 3) tronadura, 4) ventilación 5) limpieza.

En general, el excavado convencional es un método seguro, confiable y bien desarrollado, pero, aun así, tiene desventajas. Debido a las tronaduras las paredes del túnel son rugosas y necesitan de alineamiento posterior para una mejor terminación (Figura 5). Aunque ha habido mejoras constantes, la velocidad promedio de construcción es máximo de 5 m/día la cual sigue siendo menor a los 8 m/día obtenidos con el excavado mecánico. Otra cosa importante es que en las zonas urbanas no está permitido el uso de cargas explosivas debido a que las ondas emitidas de las explosiones pueden causar daños a los edificios vecinos. Aun considerando las desventajas, el método convencional es mejor para construir túneles cortos debido a sus bajos costes.

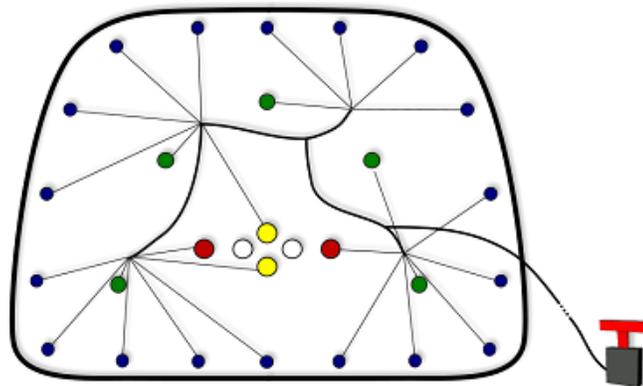


Figura 4: Patrón esquemático de las perforaciones hechas en la cara del túnel codificadas en color con respecto a las etapas de detonación: 1º amarillo, 2º rojo, 3º verde y 4º azul. Los círculos blancos denotan agujeros sin carga que sirven para disminuir la formación de tensiones. Las cargas explosivas son cableadas a un detonador externo. (Imagen obtenida de S. Jetschny, «PhD. Dissertation. Seismic prediction and imaging of geological structures ahead of a tunnel using surface waves.» [11]).



Figura 5: Excavado convencional. A la izquierda la perforación para insertar cargas explosivas y a la derecha se ven los escombros que quedan luego de la tronadura. (Imagen obtenida de S. Jetschny, «*PhD. Dissertation. Seismic prediction and imaging of geological structures ahead of a tunnel using surface waves.*» [11])

### 2.2.2 Excavado Mecánico

En el excavado mecánico de túneles se usan máquinas que, en teoría, pueden excavar de forma continua. Las máquinas, llamadas “tuneladoras”, tienen proporciones gigantescas pudiendo alcanzando más de cien metros de largo y llenar completamente el túnel, además de superar las 400 toneladas. Las tuneladoras tienen una rueda de corte frontal y pueden excavar el diámetro entero del túnel al mismo instante no estando limitadas por formaciones de roca en específico, teniendo un comportamiento flexible frente a cambios geológicos. Son de prioridad al momento de ser elegidas para excavar un túnel urbano debido a su perforado prácticamente continuo y la baja distorsión que le genera a la roca, es decir, menos golpes emitidos a las rocas que rodean la construcción.



Figura 6: Máquina tuneladora. La rueda tiene un diámetro de 13.3 m. (Imagen obtenida de S. Jetschny, «PhD. Dissertation. Seismic prediction and imaging of geological structures ahead of a tunnel using surface waves.» [11])

Las tuneladoras consisten en dos grandes secciones. La primera contiene la rueda y la cámara de excavación, la cual corta, remueve el material y, si es necesario, estabiliza la cara del túnel. La segunda parte es el tren de propulsión que contiene los mecanismos de soporte, bombas, generadores, sistemas de control, alineamiento y remoción de material. Se muestra una foto real y un esquema de la tuneladora en la Figura 6 y Figura 7.

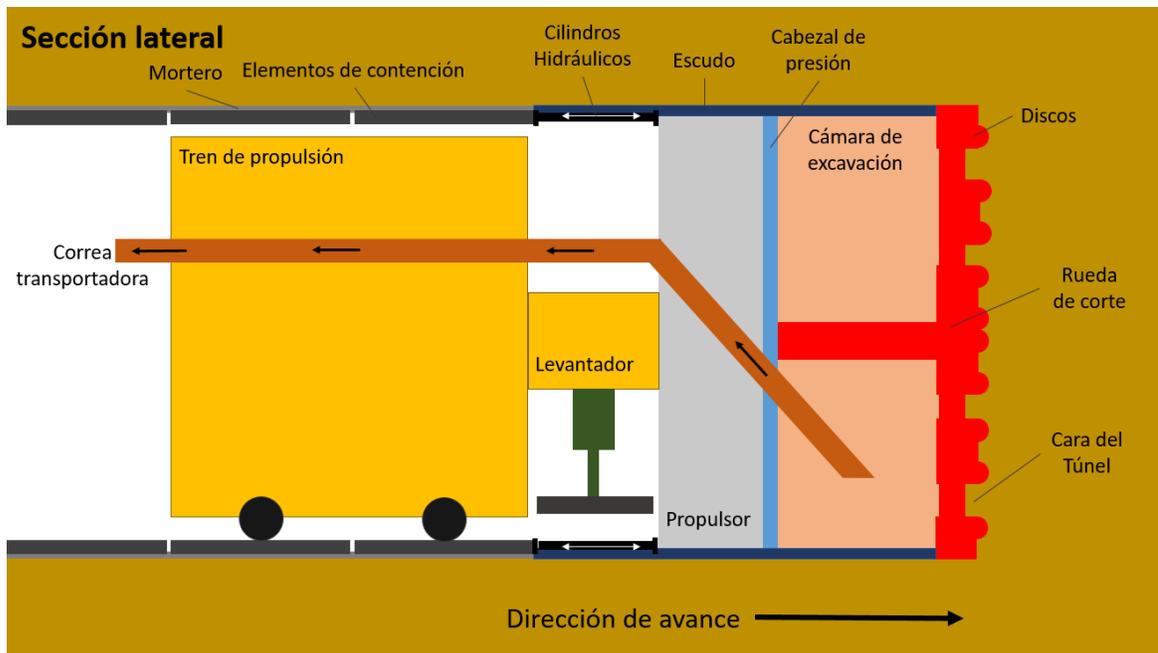


Figura 7: Esquema general de una tuneladora con cada una de sus secciones.

## **2.3 Estado del Arte: Pronóstico de Estructuras Geológicas Previo al Avance de la Construcción de un Túnel**

En el mercado existen diversos sistemas que se basan en técnicas sísmicas para pronosticar el estado del macizo rocoso hacia adelante en el sentido de construcción del túnel. Algunos de estos sistemas se describen a continuación.

### *2.3.1 Sonic Softground Probing*

Este método es utilizado cuando se excava con máquinas tuneladoras, se basa en un agitador incluido en la rueda de corte de la tuneladora para generar ondas sísmicas en la cara del túnel. Las reflexiones son recibidas por acelerómetros ubicados también en la rueda de corte de la tuneladora. La interpretación de los datos recibidos se basa en la detección y separación de las ondas P.

### *2.3.2 Tunnel Seismic While Drilling*

Este método usa el ruido generado por la tuneladora al perforar como señal de excitación. Las señales son recibidas por sensores ubicados en el túnel al nivel del tren de propulsión, lejos de la rueda de corte. Una señal piloto es grabada por un sensor colocado cerca de la rueda de corte. La interpretación de los datos se genera por la correlación cruzada entre la señal piloto y las señales grabadas por los sensores ubicados en el tren de respaldo.

### *2.3.3 Tunnel Look-Ahead Prediction Using Surface Waves*

Este método consiste en un sistema de generación y detección de ondas superficiales usando como fuente un martillo neumático instalado en la parte trasera de la máquina tuneladora, el cual induce ondas en la pared del túnel y generalmente se activa en los periodos de mantenimiento de la máquina. Los receptores son de tres componentes y se instalan en las perforaciones de mantenimiento de la pared del túnel. El estudio se basa en la reflexión de las ondas S y en la combinación de éstas con las ondas superficiales (*Tunnel-Surface waves*) para estimar la ubicación de fallas delante de la cara del túnel.

### *2.3.4 Tunnel Seismic Prediction (TSP)*

Es un método que utiliza 24 cargas explosivas pequeñas instaladas en perforaciones a lo largo de la pared del túnel como fuente sísmica. Estas cargas no son destructivas y se van detonando en forma secuencial. Previo a las cargas se instalan cuatro acelerómetros de 3 canales para recibir las ondas sísmicas generadas. El estudio se basa en la reflexión de las ondas P y S para estimar la posición de discontinuidades en el macizo rocoso hasta 200 metros delante de la cara del túnel. A diferencia de los métodos anteriormente descritos, éste no se limita a ser utilizado sólo en excavado mecánico, sino que también puede ser usado en excavado convencional.

## 2.4 Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM)

El PHAM es un proyecto hidroeléctrico que contempla la producción de 531 MW de potencia a partir de las centrales de pasada Las Lajas y Alfalfal II, a instalarse en el sector del Cajón del Maipo, en la Región Metropolitana de Santiago.

Para esto, se contempla la construcción de 67 km de túneles los cuales llevarán las aguas desde el sector de La Engorda, el Embalse El Yeso y las de salida de la estación Alfalfal I hasta las estaciones nombradas anteriormente. La descarga se realizará en el Río Maipo, en el sector de El Canelo. En la Figura 8 se puede observar un esquema simplificado de la localización geográfica y los túneles a construir.

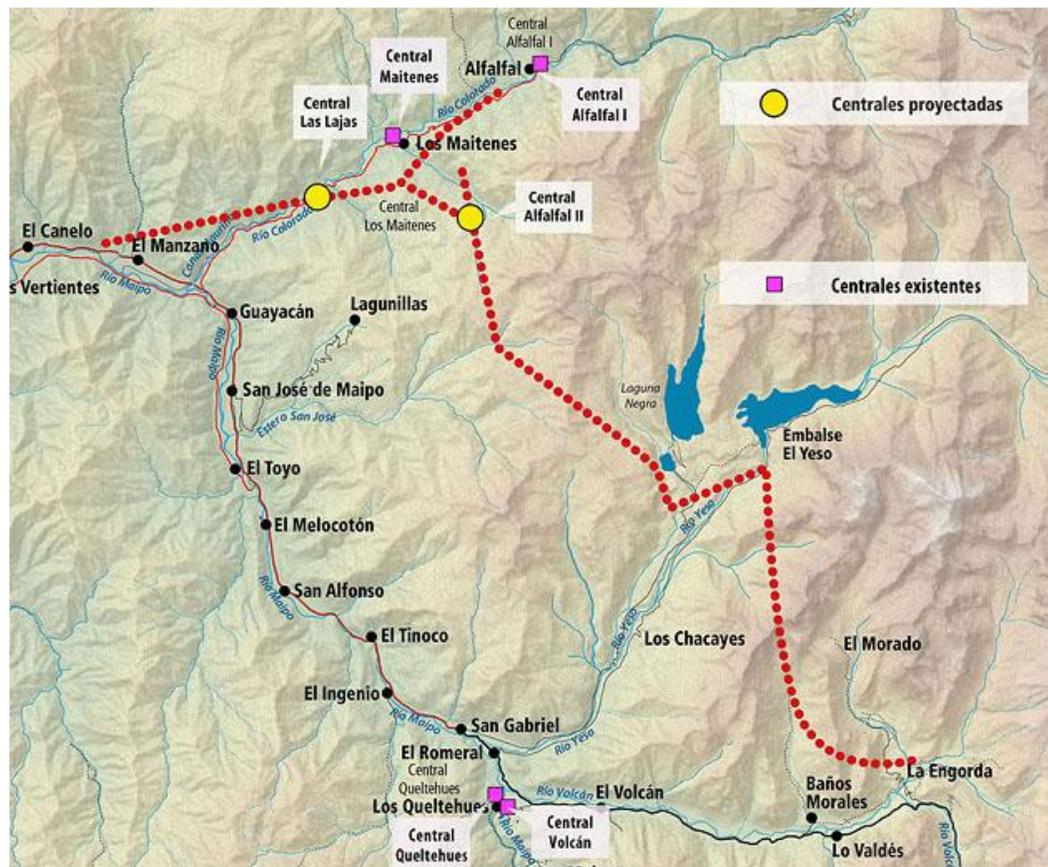


Figura 8: Esquema del proyecto (Imagen obtenida del sitio <http://www.altomaipo.com> ,2016)

[12]

# Capítulo 3: Implementación de un Algoritmo de Pre-Procesamiento de Datos Sísmicos

## 3.1 Plataforma de trabajo utilizada

Como plataforma de trabajo, se utilizaron indistintamente dos computadores personales con procesadores Intel Core i7-3770 con 4 núcleos de 3.4GHz y 8GB de RAM e Intel Core i7-2670QM con 4 núcleos de 2.2GHz y 16GB de RAM respectivamente, ambos con sistema operativo Windows 10 y corriendo MATLAB.

La metodología de trabajo usada al momento de la programación de los algoritmos fue analizar cada uno de los pasos del TSP en forma separada, entendiendo como funcionan de forma general con la experiencia adquirida en la fase de entrenamiento en el programa y revisando bibliografía asociada para entender de forma específica cada paso y escribir el correspondiente script en MATLAB.

## 3.2 Pasos del Pre-procesamiento

### 3.2.1 Extracción y Caracterización de Datos Sísmicos

Para acceder a los datos de las trazas sísmicas se creó un *script* que navega en los directorios internos de la carpeta de procesamiento del TSP y extrae los parámetros necesarios, los cuales son detallados en la siguiente lista:

- Frecuencia de muestreo
- Tiempo muestreado
- Número de muestras por canal
- Pared del túnel donde está ubicado el sensor
- Nombre del sensor
- Camino directo sensor-fuente sísmica
- Trazas sísmicas en los canales X, Y, Z

Con lo anterior se genera una estructura que se completa con los resultados de cada uno de los pasos de procesamiento sin sobrescribir los datos del paso anterior, los cuales serán detallados a lo largo de este capítulo.

### 3.2.2 Modelo Geométrico del Túnel

Con el objetivo de generar un modelo geométrico del túnel, el cual es utilizado para posicionar los elementos (sensores y fuentes sísmicas), se creó una función que accede a una plantilla de Excel que contiene las posiciones, medidas de los elementos y la forma del túnel.

Para posicionar los elementos se generaron dos tipos de grillas 3D: Una gruesa de 200 m x 100 m x 100 m equiespaciada a 1 m, destinada al proceso de migración, y una fina de 60 m x 10 m

x 10 m equiespaciada a 5 cm, destinada a contener la forma del túnel y posicionar los elementos de la prueba. El eje de avance del túnel pasa por el centro y la grilla fina queda insertada dentro de la gruesa. La Figura 9 muestra un corte vertical de las grillas:

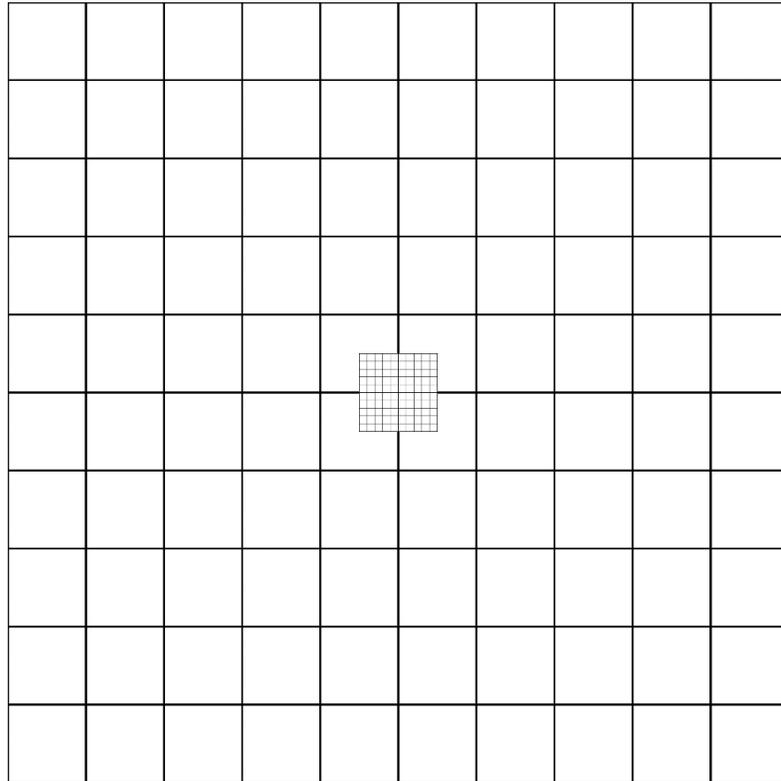


Figura 9: Corte vertical de las grillas del modelo geométrico: La grilla fina queda insertada dentro de la grilla gruesa

La posición de los elementos está definida con los identificadores descritos en la Tabla 1:

Tabla 1: Identificadores de los elementos a posicionar en las grillas

Identificador	Estructura o elemento
0	Aire
1	Roca (grilla gruesa)
2	Roca (grilla fina)
3	Receptor (en la pared del túnel)

4	Receptor de referencia (en roca)
5	Receptor (en roca)
6	Fuente sísmica (en la pared del túnel)
7	Fuente sísmica (en roca)

El algoritmo que posiciona los elementos opera de la siguiente forma:

- Las grillas contienen inicialmente el valor 1 para cada celda.
- Se define el radio de curvatura del eje de avance del túnel (996.35 m según planos de obra civil)
- Se genera la silueta del túnel, la cual es un arco de medio punto con valores definidos en la hoja de terreno, generando el espacio que contiene aire.
- Se posiciona cada uno de los sensores y fuentes sísmica.

La hoja de terreno también contiene los gramos de explosivo usado en cada uno de los tiros, los cuales junto con las grillas son agregados en una estructura de datos que contiene el modelo geométrico de la prueba.

### 3.2.3 Determinación de Distancia Fuente sísmica Controlada-Sensores

En esta etapa se determina la distancia mínima que recorren las ondas entre el sensor y las fuentes sísmicas. Tomando en cuenta el principio de Fermat y debido a que las ondas mecánicas se mueven de forma más rápida por la roca que por el aire, se considera solamente el camino directo a recorrer por roca.

El algoritmo opera de la siguiente forma:

- Si el par sensor-fuente sísmica están ubicados en la misma pared del túnel, se calcula la distancia euclidiana entre ambos.
- Si el par sensor-fuente sísmica están ubicados en paredes opuestas, se calcula el camino mínimo considerando que las ondas viajan por debajo del túnel, pues así no hay cambio de medio.

Una vez realizado el proceso anterior para cada par, los resultados se guardan en la estructura de datos del modelo geométrico.

### 3.2.4 Normalización de los Sistemas de Referencia Entre los Sensores y el Modelo Geométrico del Túnel

Debido a que no hay una diferencia funcional entre los sensores que van en la pared izquierda y los que van en la pared derecha del túnel, permitiéndoles ser intercambiables, es necesario normalizar los sistemas de referencia de cada uno, además de definir una referencia general. Todo esto se realiza con el objetivo de mantener la coherencia de los datos obtenidos de los sensores. La Figura 10 muestra la disposición de los sistemas de referencia de los sensores una vez instalados en el túnel:

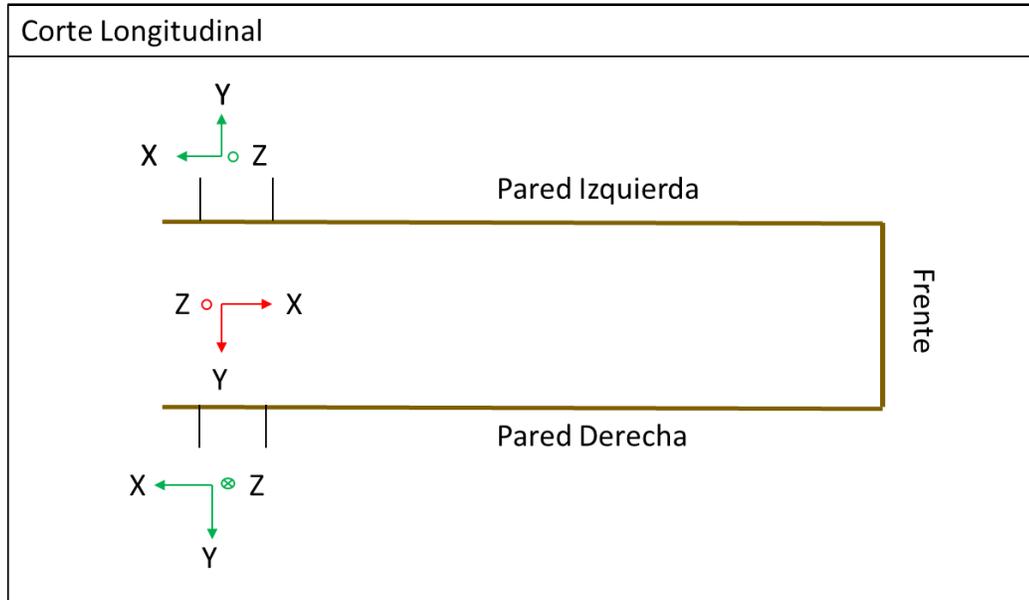


Figura 10: Sistemas de referencia de los sensores (en verde) y sistema de referencia general del túnel (en rojo)

El algoritmo lo que hace es cambiar las polaridades de las trazas según la Tabla 2:

Tabla 2: Tabla de unificación de sistemas de referencia en túnel

General	Pared Izquierda	Pared Derecha
X	-X	-X
Y	-Y	Y
Z	Z	-Z

Los resultados obtenidos se guardan en la estructura de datos de sensores.

### 3.2.5 Corrección de los Sistemas de Referencia de los Sensores Sísmicos

Este paso tiene como finalidad corregir las desviaciones en la alineación de los sistemas de coordenadas producto de la instalación inclinada vertical, horizontal o rotada de los sensores.

Figura 11, se pueden observar gráficamente las desviaciones que tienen los sistemas de referencia de los sensores, representados en color verde, con respecto al general, en rojo. Los ángulos de inclinación  $\alpha$  y  $\alpha'$  que tienen las perforaciones de alojamiento de los sensores permiten el drenaje de agua o fragmentos de roca que impidan la correcta instalación del mismo.

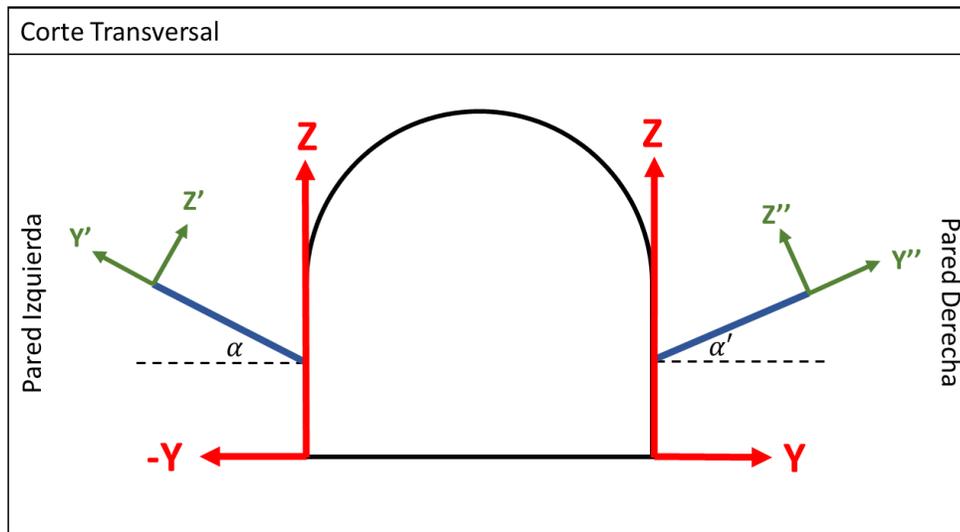


Figura 11: Corte transversal del túnel mostrando las desviaciones de los sistemas de referencia de los sensores (en verde) con respecto al general (en rojo).

Tomando en cuenta la sección longitudinal del túnel, mostrada en la Figura 12 los ángulos  $\beta$ ,  $\beta'$  y  $\beta''$  corresponden a la desviación horizontal de los ejes de referencia de los sensores con respecto al general y pueden originarse debido a la forma en que el operador posiciona el brazo del Jumbo al hacer la perforación.

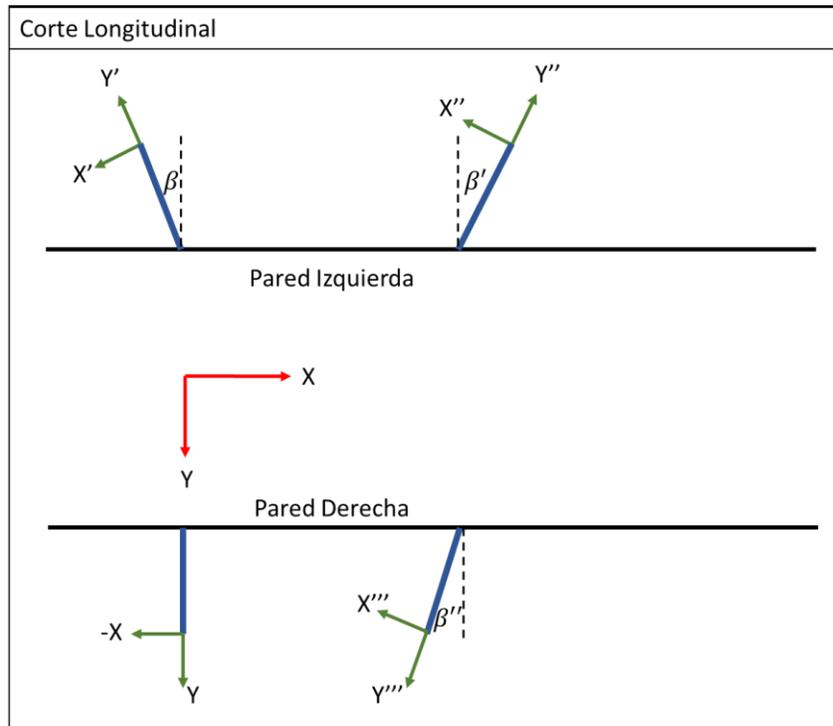


Figura 12: Corte longitudinal del túnel mostrando las desviaciones de los sistemas de referencia de los sensores (en verde) con respecto al general (en rojo).

En la Figura 13 se pueden observar las desviaciones de los sistemas de referencia de los sensores con respecto al general producto de una instalación girada del sensor (ángulos  $\gamma$  y  $\gamma'$ ).

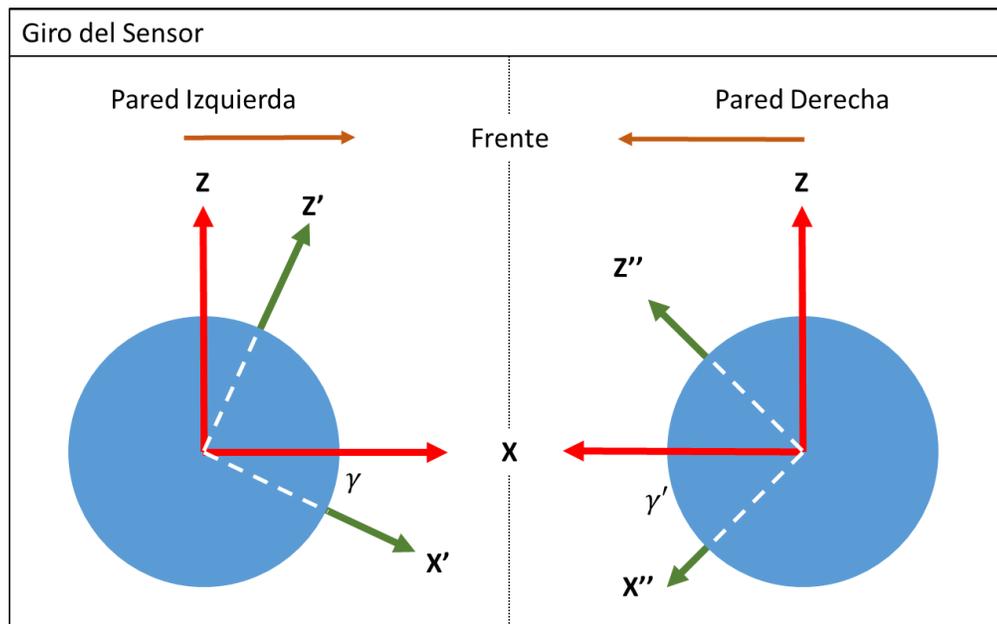


Figura 13: Esquema mostrando las desviaciones de los sistemas de referencia de los sensores (en verde) con respecto al general (en rojo).

La corrección se hace aplicando la Matriz de Rotación a los datos usando los ángulos de desviación medidos en cada sensor y registrados en la hoja de terreno.

Como resultado se obtiene un nuevo conjunto de trazas que es guardado en la estructura de datos de sensores.

### 3.2.6 Determinación de la Ventana Temporal

En este paso el programa permite definir un largo máximo de datos a ser procesados, con el objetivo de reducir el tiempo de procesamiento y la memoria usada por el programa. Además, es posible anular una ventana ruido al inicio de las trazas el cual es originado en el equipo al iniciar la descarga del explosivo.

Los parámetros de entrada son el largo máximo de los datos y la ventana de ruido a eliminar (en segundos) y como salida entrega un nuevo conjunto de trazas procesadas en la estructura de datos de sensores.

En el manual de operación del TSP se sugiere usar la ecuación 3.2-1 para definir el largo máximo de los datos [13]:

$$t_{max} = \frac{2 \cdot 2.5 \cdot R_{Inv}}{V_p} \quad 3.2-1$$

Donde:

- $t_{max}$  es el tiempo máximo de los datos medido en segundos
- $R_{Inv}$  es el radio de investigación deseado en metros
- $V_p$  es la velocidad de transmisión de la onda P en la roca (medida en metros/segundo)
- $2 \cdot 2.5$  son factores relacionados al camino de ida y vuelta de la onda y un factor de seguridad respectivamente.

La aplicación de la ventana de ruido a eliminar consiste en asignar el valor 0 a todas las trazas desde el principio de la medición hasta el valor en segundos definido por el usuario. El objetivo de este paso es eliminar el primer *spike* producido por el instrumento al iniciar la grabación y no eliminar completamente el ruido desde el inicio hasta la llegada de la onda P.

Como resultado se obtiene un nuevo conjunto de trazas que es guardado en la estructura de datos de sensores.

### 3.2.7 Aplicación de un Filtro Pasa-Bajo con Frecuencia de Corte Variable en el Tiempo

Este paso tiene como objetivo eliminar el ruido de alta frecuencia generado en las trazas por la onda de choque que viaja por el aire luego de la detonación de la carga explosiva.

Debido a que las ondas mecánicas viajan con una velocidad más lenta por el aire que por un medio sólido (en este caso, la roca), la llegada de la onda de choque se produce después que la

de la onda P directa, por lo que las primeras muestras no se ven afectadas por este fenómeno y es posible aplicar una frecuencia de corte más alta, manteniendo una mayor cantidad de componentes de frecuencia en esa ventana de tiempo. Conforme aumenta el tiempo de grabación de la traza, se restringe el límite de corte eliminando el ruido producido por la onda de choque.

El filtro se implementó utilizando la función *dsp.VariableBandwidthFIRFilter* con los parámetros mostrados en la Tabla 3. Las frecuencias de corte máximas y mínimas pueden ser modificadas por el usuario y se aplican en un espaciado uniforme inversamente proporcional al tiempo utilizando ventanas de 500 muestras.

Tabla 3: Parámetros del filtro pasa-bajo *dsp.VariableBandwidthFIRFilter*

<i>'SampleRate'</i>	Frecuencia de muestreo de las trazas
<i>'CutoffFrequency'</i>	Máxima frecuencia de corte indicada por el usuario

Para mantener la fase de la señal, se utilizó la función *filtfilt*, la cual aplica el filtro a la señal en ambas direcciones con respecto al tiempo, evitando así el desfase producido en la aplicación del filtro [14].

Como resultado se obtiene un nuevo conjunto de trazas que es guardado en la estructura de datos de sensores.

### 3.2.8 Aplicación de un Filtro Pasa-Banda Para Respetar los Rangos Dinámicos del Sensor

Si bien el TSP permite elegir frecuencias de muestreo de 12 kHz, 24 kHz y 48 kHz, los acelerómetros utilizados para hacer las mediciones tienen un rango de frecuencias limitado en el que el error entre el valor de aceleración medido y el real es mínimo. En la hoja de datos del sensor, se expresa que el rango es de 0.5 Hz a 5 kHz.

En este paso, se aplicó un filtro pasa-banda para acotar las componentes de frecuencia de la señal al rango dinámico del sensor, lo que reduce el ruido inducido en las trazas sísmicas producto de los registros que están fuera de ese rango. Las frecuencias de corte del filtro pueden ser editadas si en el espectro se deja de ver una correlación entre las amplitudes de las componentes de un sensor a partir de una frecuencia dada.

Para implementarlo, se usó la función *dsp.VariableBandwidthFIRFilter*, la cual diseña un filtro digital FIR con los valores dados por el usuario para las frecuencias de corte superior e inferior. Los parámetros introducidos en la función se muestran en Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros del filtro pasa-banda dsp.VariableBandwidthFIRFilter

<i>'FilterType'</i>	<i>'Bandpass'</i>
<i>'SampleRate'</i>	Frecuencia de muestreo de las trazas
<i>'CenterFrequency'</i>	$Frec_{min} + \frac{Frec_{max} - Frec_{min}}{2}$
<i>'Bandwidth'</i>	$\frac{Frec_{max} - Frec_{min}}{2}$

Donde  $Frec_{min}$  y  $Frec_{max}$  son las frecuencias de corte mínima y máxima respectivamente. Así como se hizo en el paso 3.2.7 con el filtro pasa-bajo, el filtro pasa-banda se aplicó con la función *filtfilt* para evitar desfases en las trazas sísmicas a la salida del filtro.

Como resultado se obtiene un nuevo conjunto de trazas que es guardado en la estructura de datos de sensores.

### 3.2.9 Determinación de los Tiempos de Llegada de la Onda P

La determinación de los tiempos de llegada de la onda P directa tiene como fin estimar la velocidad promedio con la cual la onda P se transmite en el medio. Para lograrlo, se utilizó el método de Dimensión Fractal descrito en Chi (2015) [15]. El método calcula el variograma de la señal en una ventana de tiempo de 110 muestras y busca el mínimo entre el logaritmo del variograma y el logaritmo de los retardos usados para calcular este último.

Tomando en cuenta que el procedimiento es análogo para cada componente de los sensores, se utilizó sólo la componente X de cada sensor para aplicar el método y obtener los tiempos de llegada, los cuales una vez obtenidos se guardan en la estructura de datos de sensores.

### 3.2.10 Verificación de los Tiempos de Llegada de la Onda P Determinados y Cálculo de Velocidad de Onda P Promedio

Con el objetivo de revisar el funcionamiento del paso anterior y permitir una correcta aproximación de la velocidad de la onda P directa, se revisa de forma visual los tiempos de llegada de la onda P directa para cada una de las trazas y sensores, los cuales fueron detectados en el paso 3.2.9.

El procedimiento consiste en graficar las trazas del eje X para cada uno de los sensores y verificar que el marcador (\*) mostrado coincida con la llegada de la onda P directa. Si la detección no coincide, se puede usar el cursor para identificar el tiempo de llegada correcto, el cual se debe introducir en una matriz que contenga el sensor, traza y tiempo correspondientes a ser modificados.

Una vez obtenidos los tiempos de llegada correctos, se calcula una tendencia lineal de las llegadas con respecto a la distancia sensor-fuente sísmica utilizando la función *polyfit* y se calcula la velocidad de llegada de la onda P directa como el inverso de la pendiente de la línea de tendencia. Adicionalmente, se puede estimar la velocidad promedio de la onda S directa utilizando una razón  $V_p/V_s$  introducida por el usuario tomando en cuenta el tipo de roca en el cual se está haciendo la medición.

Como resultado se obtienen los tiempos de llegada revisados para cada traza, la velocidad de onda P directa calculada y la de S directa estimada a partir de la onda P, los cuales se guardan en la estructura de datos de sensores.

### 3.2.11 Alineación de Trazas a Línea de Tendencia de Tiempos de Llegada de Onda P Directa

Para evitar una desviación entre los tiempos de llegada de la onda P directa en las trazas y la línea de tendencia calculada en el paso 3.2.10, fenómeno que ocurre pues el medio no es completamente isotrópico. Se mueven las trazas de forma completa para alinear los tiempos de llegada a la línea de tendencia.

El procedimiento se hace calculando la diferencia entre el tiempo de llegada calculado y el estimado en la línea de tendencia y luego se mueve la traza en el tiempo haciendo coincidir la llegada con la tendencia calculada.

Como resultado se obtiene un nuevo set de trazas para cada sensor y componente, el cual se guarda en la estructura de datos de sensores.

### 3.2.12 Normalización de la Energía de Fuentes Sísmicas Controladas

La cantidad de energía liberada por la fuente sísmica y recibida por el sensor varía dependiendo de la cantidad de explosivo usado, su composición, el acople del explosivo con la roca en la perforación en la roca, la composición de la misma (composición, porosidad, entre otras) [13].

Como en el registro de datos fue necesario usar distintas cantidades de explosivo, ya que se debió aumentar la cantidad a medida que la distancia emisor-fuente sísmica aumentó, es necesario normalizar la energía liberada para que esta diferencia no influya en el paso de caracterización. Para realizar esta tarea, se implementó el siguiente algoritmo el cual se basa en uniformizar la atenuación que tienen las ondas con respecto al camino recorrido entre emisor y fuente sísmica.

Tomando en cuenta una ventana de cálculo de 100 ms desde la llegada de la onda P directa en las trazas:

- Se determina la amplitud espectral promedio para cada traza
- Se genera una curva de tendencia exponencial de las amplitudes espectrales promedio y la distancia sensor-fuente sísmica.

- A partir de la curva de tendencia se calculan factores de ajuste parciales para cada una de las trazas en el tiempo, con el fin de mantener los cambios de amplitud producto del paso de las ondas por el medio, para esto se consideran dos factores:
  - Factor de carga: Normaliza la cantidad de carga explosiva usada en cada una de las fuentes.
  - Factor de peso: Las amplitudes más lejanas a la curva de tendencia se ajustan en menos a la curva de tendencia que las más cercanas a ésta.
- Se aplican los factores obtenidos anteriormente multiplicándolos por las trazas en el tiempo.

Como resultado se obtiene un nuevo set de trazas para cada sensor y componente, el cual se guarda en la estructura de datos de sensores.

### 3.2.13 Estimación del Factor de Atenuación en Medio

Una vez normalizada la energía liberada por las fuentes sísmicas controladas, es necesario estimar el factor de atenuación en el medio, el cual es necesario en un paso siguiente para aplicar el Filtro de Atenuación Inversa. Para hacer la estimación, se utiliza el método de Relación de Espectro Logarítmica (*Logarithmic Spectral Ratio*) Wang 2008 [6].

Tomando en consideración una ventana temporal cuyo largo abarque sólo la longitud de onda de la onda P directa:

- Se calcula la amplitud espectral máxima para cada traza y su frecuencia asociada, considerar la componente DC.
- Se genera una curva de tendencia exponencial de las amplitudes espectrales máximas calculadas anteriormente y la distancia sensor-fuente sísmica y se extraen los coeficientes que la definen.
- Para cada componente y sensor, se calcula un factor de atenuación a partir del coeficiente exponencial de la curva de tendencia, la frecuencia asociada a la amplitud espectral máxima y la velocidad de la onda P directa.
- Se calculan factores de atenuación promedio para cada sensor y componente espacial, generando factores de atenuación candidatos.
- Si el máximo factor de atenuación calculado está en el rango de 20 a 50, se toma como factor de atenuación global.
- Si el máximo factor de atenuación calculado es menor a 20 se usa este valor como factor de atenuación global. En el caso que sea mayor a 50, se toma el caso análogo. [13].

El factor de atenuación obtenido es guardado en la estructura de datos del modelo geométrico de la prueba.

### 3.2.14 Extracción de las Ondas Reflejadas de los Datos Procesados

Debido a que el TSP trabaja a modo de sonar, son las ondas sísmicas reflejadas desde las estructuras externas al túnel las que contienen la información necesaria para hacer la estimación de la geología circundante y deben ser extraídas para ser usadas en el proceso de migración. La extracción se hace con un filtro aplicado a la Transformada de Radón de las trazas.

Adicionalmente, para mejorar la resolución de las ondas extraídas, se aplica el filtro de atenuación inversa utilizando el factor estimado en 3.2.13 el cual devuelve parcialmente la amplitud de las ondas más lejanas al receptor.

### 3.2.14.1 Aplicación de la Transformada de Radón

La aplicación de la transformada de Radón a las trazas se hace en tres pasos:

- Aplicación de la transformada de Radón directa
- Filtrado en el dominio  $\tau$ -p
- Aplicación de la transformada de Radón inversa

Para hacer la aplicación directa y llevar las trazas al dominio  $\tau$ -p, se implementó el algoritmo de la Transformada de Radón por definición, lo que se consigue utilizando *slant stacking* como es descrito en 2.1.23. Se definió la traza central como referencia para el cálculo de la transformada. En Sarjaevi (2010) [16], se determina el paso que debe tener el vector p para evitar el *aliasing* en la señal, el cual está definido por la ecuación 3.2-2:

$$\Delta p = \frac{1}{2 \cdot Frec_{max} \cdot \Delta x_{max}} \quad 3.2-2$$

Donde:

- $\Delta p$  es el paso del vector de lentitud (*slowness*) p, medido en s/m
- $\Delta x_{max}$  es la distancia emisor-fuente sísmica máxima entre la traza central y la más lejana.

Con esto se asegura que todas las muestras de las trazas más lejanas queden debidamente mapeadas. El rango en el que opera el vector p es definido en [13] según la ecuación 3.2-3:

$$\frac{-0.01248}{\Delta x_{max}} \leq p \leq \frac{0.01248}{\Delta x_{max}} \quad 3.2-3$$

Para disminuir el tiempo de procesamiento y el uso de memoria RAM, antes de hacer la transformación, se baja la frecuencia de muestreo de las trazas de 48 kHz al valor definido por  $2 \cdot Frec_{max}$  utilizando la función *resample*.

El filtrado de la transformación se consigue anulando los valores de esta misma en un rango de p que no es de interés para la migración. El vector p tiene directa relación con la porción de la transformada de Radón que contiene las ondas reflejadas (Claerbout 1989) [10]. El usuario puede elegir un tiempo que describe el valor de p mínimo ( $t_{min}$ ) para realizar el filtrado, definiendo el rango de interés de la transformada, expresado en la ecuación 3.2-4:

$$\frac{t_{min} [s]}{\Delta x_{max}} \leq p \leq \frac{0.01248}{\Delta x_{max}} \quad 3.2-4$$

Una vez filtradas las trazas, se aplica la transformada de Radón inversa, la cual fue implementada por definición según fue descrito en 2.1.23 y se devolvió la frecuencia a 48 kHz

usando la función *resample*, para obtener finalmente un nuevo conjunto el cual es guardado en la estructura de datos de sensores.

#### 3.2.14.2 Aplicación del Filtro de Atenuación Inversa

Para revertir parcialmente la atenuación que sufren las ondas y que se registra como una disminución en la amplitud de las trazas, se aplica el filtro de atenuación inversa descrito en Wang (2008) [6], en el cual se propone un método estabilizado para la aplicación de este último. El algoritmo permite al usuario definir el factor de atenuación, el cual fue estimado en 3.2.13 y una ganancia máxima a aplicar a las trazas con el fin de estabilizar el filtro.

Para cada una de las trazas el filtro se aplica como sigue:

- Utilizando el factor de atenuación y la ganancia máxima se genera la matriz filtro.
- Se aplica la matriz filtro pre multiplicándola con la transformada de Fourier de las trazas obteniendo nuevas trazas en el dominio del tiempo con el filtro aplicado.

La parte real de las trazas es guardado como un nuevo conjunto en la estructura de datos de sensores.

## Capítulo 4: Análisis de los Resultados en Función de los Obtenidos por un *Software* Comercial

En este capítulo, se hará una revisión de los resultados obtenidos en las etapas de pre-procesamiento que fueron explicadas en el capítulo 3, con el objetivo de analizar su desempeño con datos reales teniendo como punto de comparación un *software* comercial.

Para hacer la comparación se usaron dos conjuntos de datos, los cuales corresponden a dos pruebas consecutivas hechas en el mismo túnel, pero con dos niveles de avance distintos.

### 4.1 Descripción de los datos usados

#### 4.1.1 Ubicación Geográfica del Túnel y Condiciones de las Pruebas

El túnel dentro del cual se tomaron los datos se ubica en el sector del Cajón del Maipo en la Región Metropolitana de Santiago, cercano al Monumento Nacional El Morado y tiene como fin llevar las aguas captadas de las bocatomas del sector de La Engorda y llevarlas al sector cercano al embalse El Yeso. Internamente en el PHAM el túnel se conoce como V1 (Ventana 1), ventana donde se inicia su construcción (km 0.5) en dirección Este-Oeste. En la Figura 14 se hizo una superposición del plano de construcción del túnel con una vista aérea obtenida desde Google Earth.

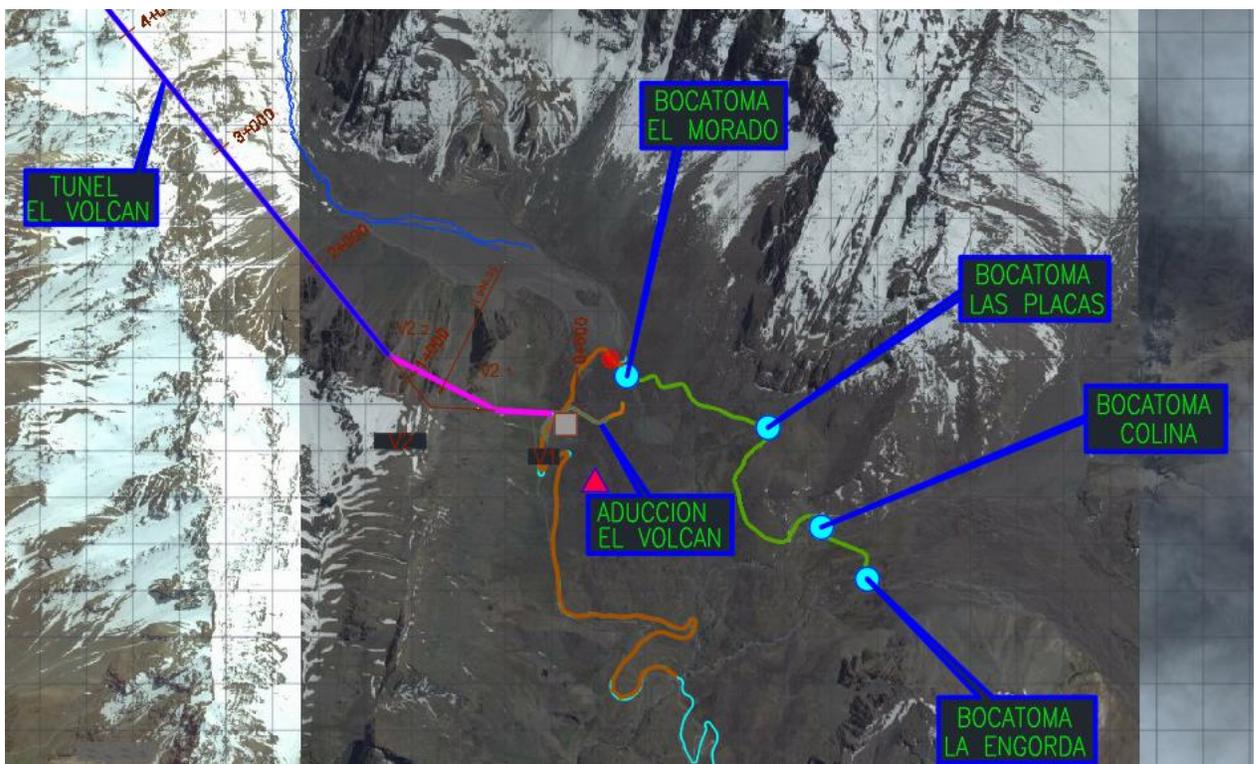


Figura 14: Superposición del plano de construcción del túnel con la vista aérea tomada desde Google Earth. La sección marcada en rosado es el túnel donde se hicieron las pruebas sísmicas.

Para las dos pruebas se utilizaron explosivos basados en dinamita gelatinosa con una velocidad de detonación de 6000 m/s [17]. Por cada prueba se realizaron 24 detonaciones con cantidades de carga que variaron progresivamente desde 30 gramos hasta 130 gramos de explosivo en función de la distancia entre los sensores y la perforación en donde se realizaba la detonación. El manejo de los explosivos se hizo por personal calificado y con licencia de manejo de explosivos.

Para detectar la ignición del explosivo, se conectó un cable alrededor del detonador el cual se rompía enviando una señal al registrador para iniciar la grabación de las trazas durante 0.5 segundos. La Tabla 5 muestra un resumen de las condiciones de ambas pruebas:

Tabla 5: Condiciones de la adquisición de datos en terreno

<b>Prueba</b>	<b>V1 0+873.8 (Primera prueba)</b>	<b>V1 0+977.7 (Segunda prueba)</b>
<b>Fecha</b>	31-03-2016	12-05-2016
<b>Avance del túnel (posición del frente) [m]</b>	873.8	977.7
<b>Detonaciones efectivas</b>	21	23
<b>Detonaciones fallidas</b>	3	1
<b>Diámetro de las perforaciones [mm]</b>	51	51
<b>Duración de la prueba</b>	2 horas 48 minutos	2 horas 33 minutos
<b>Cantidad de explosivo usada [g]</b>	1280	1210

Si bien en ambas pruebas hubo detonaciones fallidas, la cantidad de datos tomados fue suficiente para realizar el proceso completo de estimación.

## 4.2 Análisis y Discusión de Resultados

### 4.2.1 Modelo Geométrico del Túnel

En las Figuras 15, 16 y 17 se pueden observar esquemas de contorno de la sección transversal del túnel (común para ambos sets de datos) y las vistas superiores en las que se puede observar como puntos las posiciones en roca de los sensores y las fuentes sísmicas además de graficar la curvatura que tiene el túnel en el eje de avance.

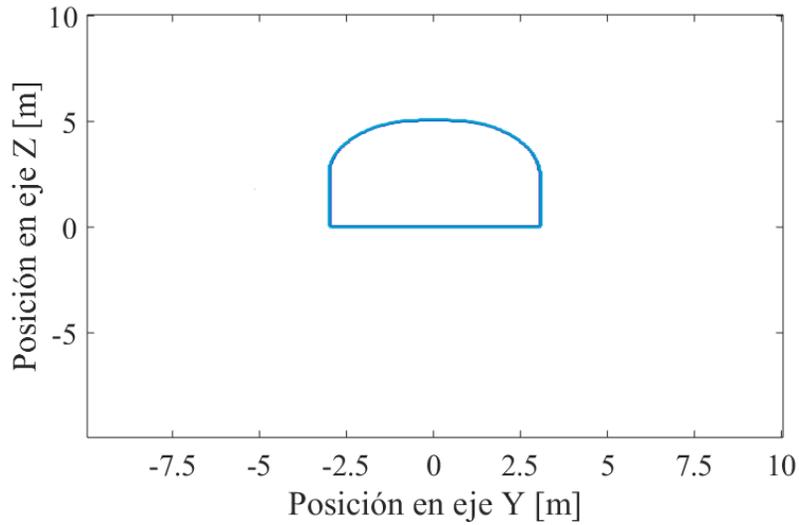


Figura 15: Corte transversal del modelo geométrico del túnel

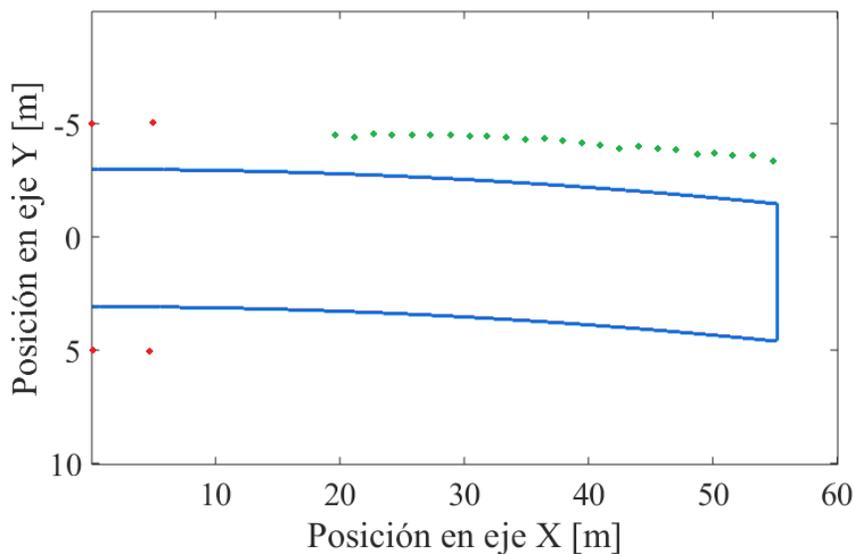


Figura 16: Vista superior del modelo geométrico del túnel con posiciones de sensores y fuentes sísmicas (V1 0+873.8). Los puntos rojos representan a los sensores: Sensores 1 y 2 en la parte superior, 3 y 4 en la parte inferior. Los puntos verdes representan las 24 fuentes sísmicas controladas.

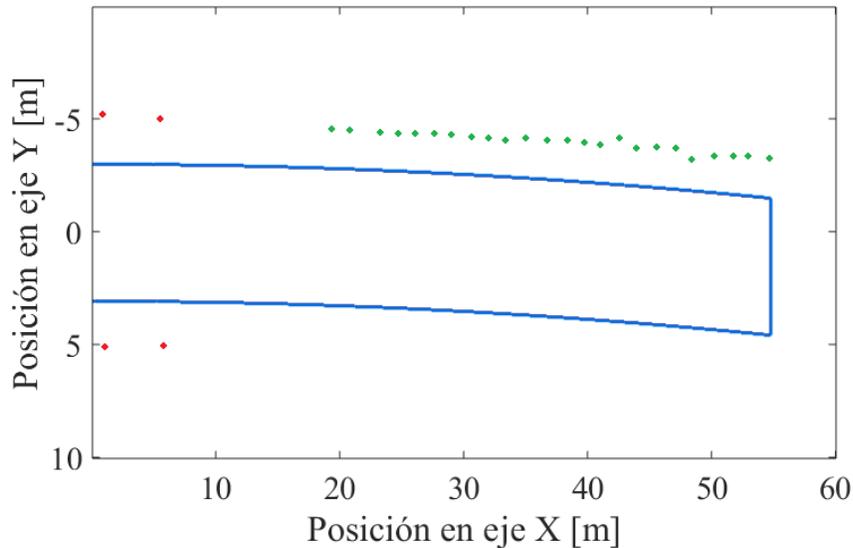


Figura 17: Vista superior del modelo geométrico del túnel con posiciones de sensores y fuentes sísmicas (V1 0+977.7). Los puntos rojos representan a los sensores: Sensores 1 y 2 en la parte superior, 3 y 4 en la parte inferior. Los puntos verdes representan las 24 fuentes sísmicas controladas.

En el gráfico de la Figura 18, se representa la diferencia entre la posición real de los elementos, la cual fue medida en el túnel y registrada en la hoja de terreno, y la posición de los elementos en el modelo geométrico realizado en Matlab. Se puede observar que la máxima desviación se encontró en las posiciones de las fuentes sísmicas 8, 13 y 14 con 10 cm de diferencia, lo que es una diferencia aceptable debido a que las distancias entre emisor y fuente sísmica varían entre 15 m a 55 m aproximadamente y las diferencias obtenidas no generan un gran impacto en la determinación de las velocidades de la onda P directa.

En el gráfico de la Figura 19, se representa la diferencia entre la posición real y la instalada en el modelo geométrico generado por el TSP. Se puede observar una diferencia máxima del orden de 75 cm en la posición de la fuente sísmica 1 y en general se obtienen diferencias promedio de aproximadamente 40 cm en el eje X, lo que puede impactar en la determinación de las velocidades de la onda P directa. Estas diferencias también se pueden atribuir a un error del operador al ingresar los datos de forma manual al sistema. Si al momento de determinar las velocidades de la onda P directa se obtienen diferencias muy grandes, se recomienda hacer una revisión de las posiciones de los sensores y fuentes sísmicas introducidas en la hoja de terreno o, si es posible, medir nuevamente las posiciones en el túnel.

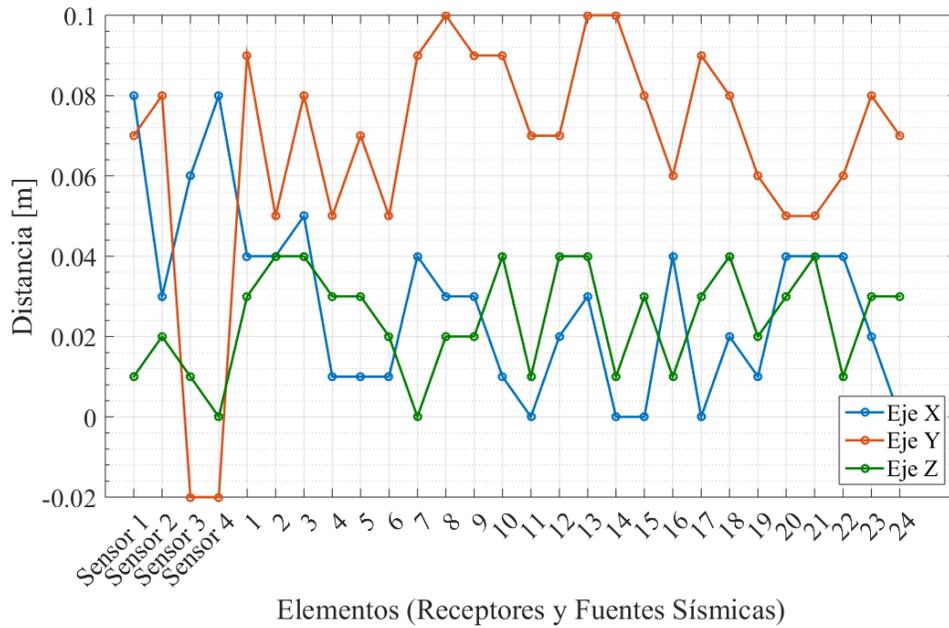


Figura 18: Diferencia de posición de elementos entre túnel real y el modelado en Matlab (V1 0+873.8). Para mostrar más detalles, se acotaron los límites del eje Y.

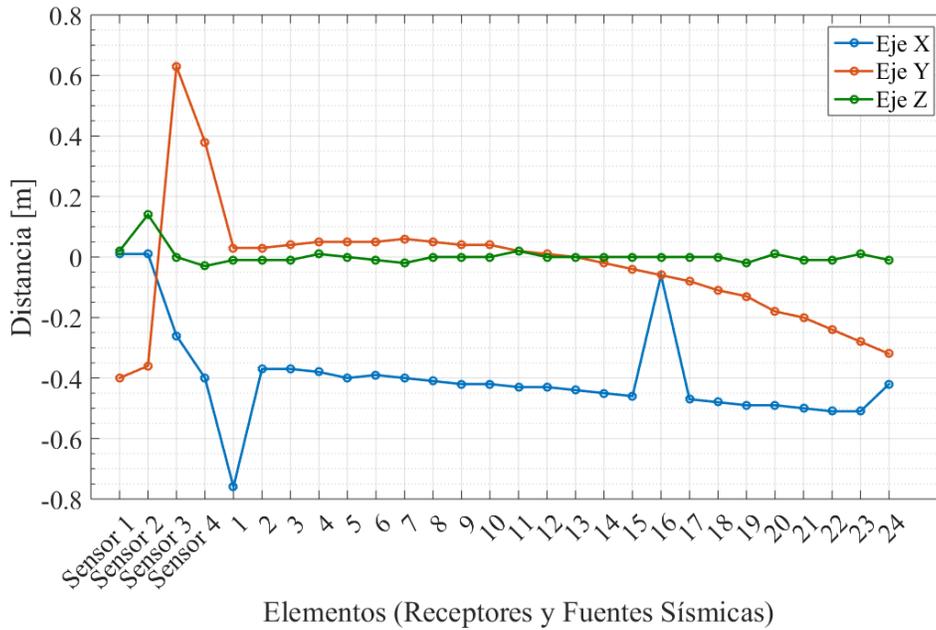


Figura 19: Diferencia de posición de elementos entre túnel real y el modelado en TSP (V1 0+873.8)

En los gráficos de la Figura 20 y Figura 21 se observan las mismas escalas de diferencia de las Figuras 18 y 19 respectivamente, por lo que se puede concluir que el modelo geométrico desarrollado en Matlab posiciona los elementos con mayor precisión que el modelo generado con el TSP.

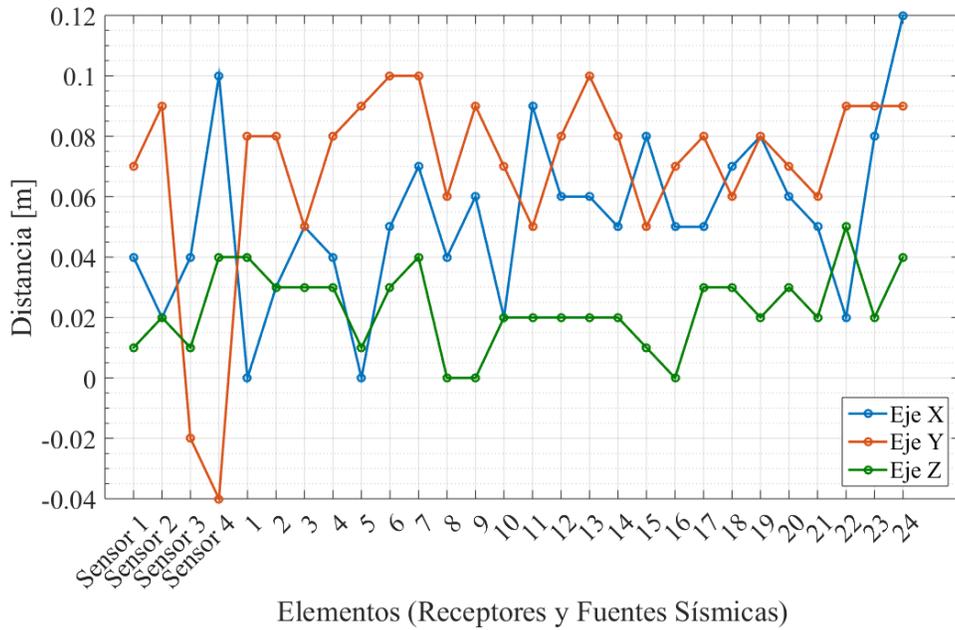


Figura 20: Diferencia de posición de elementos entre túnel real y el modelado en Matlab (V1 0+977.7). Para mostrar más detalles, se acotaron los límites del eje Y.

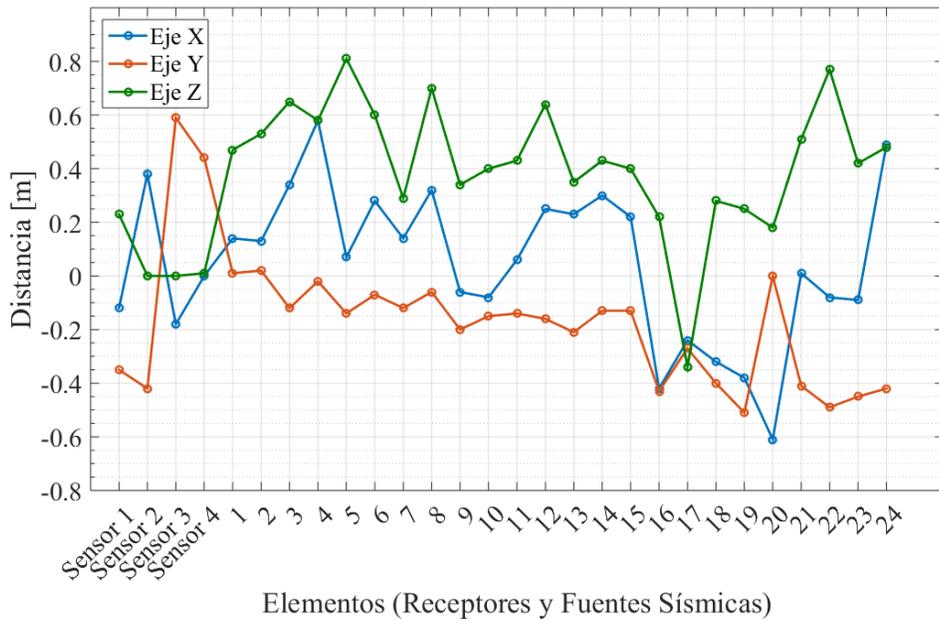


Figura 21: Diferencia de posición de elementos entre túnel real y el modelado en TSP (V1 0+977.7)

En la sección 4.2.2 se analizará el impacto que pueden tener las diferencias de posición de los elementos con las distancias emisor-fuente sísmica calculadas en Matlab.

#### 4.2.2 Determinación de Distancia Fuente Sísmica Controlada-Sensores

En la Figura 22 se representa gráficamente la diferencia entre las distancias sensor-fuentes sísmicas controladas calculadas en el TSP y las calculadas con Matlab en la prueba 1. Si bien la diferencia máxima de distancia es de 78 cm entre el sensor 2 y la fuente sísmica 1, en promedio se obtiene una diferencia de 23 cm lo que es un error aceptable si se considera que las distancias sensor – fuentes sísmicas varían aproximadamente entre 15 m a 55 m. Las desviaciones de las tendencias vistas para las fuentes sísmicas 1 y 16 pueden deberse a un error del operador en la introducción de los valores al TSP desde la hoja de terreno.

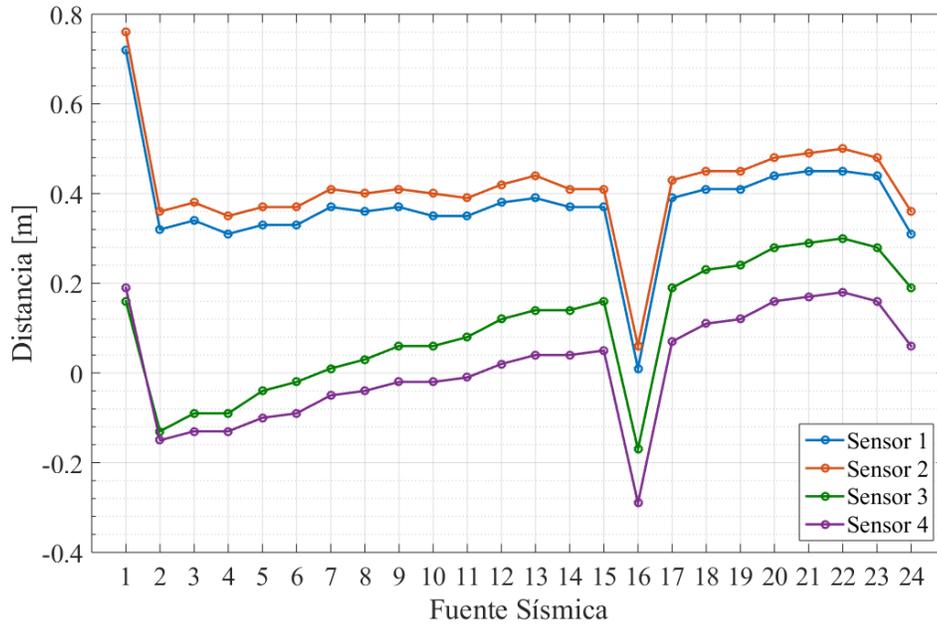


Figura 22: Diferencia de distancia calculada emisor-fuente sísmica entre Matlab y TSP (V1 0+873.8)

En la Figura 23 se representa gráficamente la diferencia entre las distancias sensor-fuentes sísmicas controladas calculadas en el TSP y las calculadas con Matlab en la prueba 2. En este caso, la diferencia máxima de distancia encontrada fue 1.02 m entre el sensor 3 y la fuente sísmica 4. Si bien es una diferencia de distancia grande, en promedio se compensa teniendo una diferencia de 37 cm para el sensor 3.

En el gráfico se evidencia también que en el TSP hubo un estiramiento de las dimensiones generales de la prueba, esto pues se observa que para los sensores 1, 2 y 4 las primeras fuentes sísmicas están más cerca (diferencia negativa) y las últimas están más lejos (diferencia positiva), lo que puede hacer variar el cálculo de la velocidad promedio de la onda P directa.

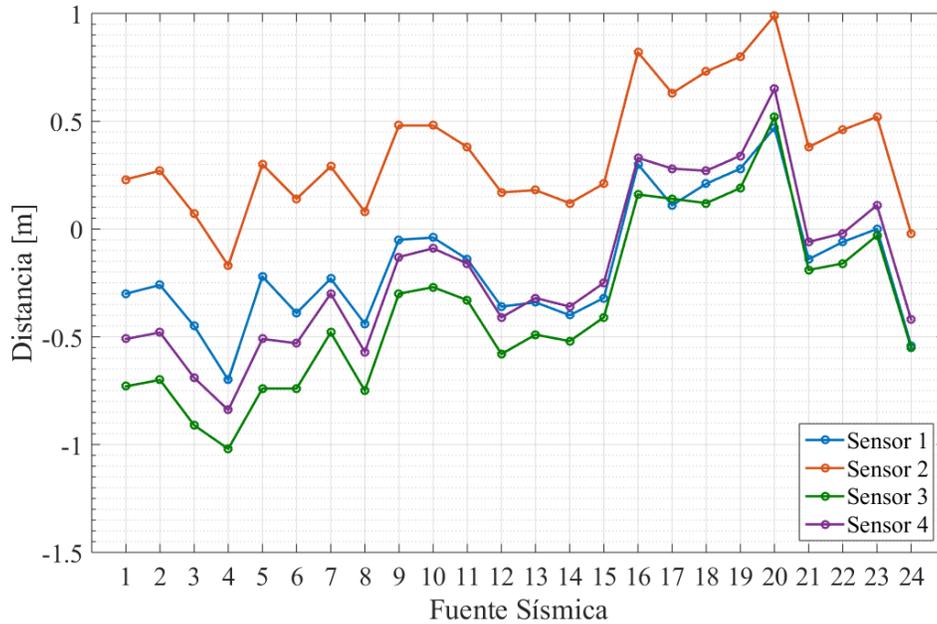


Figura 23: Diferencia de distancia calculada emisor-fuente sísmica entre Matlab y TSP (V1 0+977.7)

#### 4.2.3 Normalización de los Sistemas de Referencia Entre los Sensores y el Modelo Geométrico del Túnel

Dirigiendo el trabajo hacia las trazas sísmicas, la aplicación de la normalización de las trazas dio resultados satisfactorios al hacer los cambios de polaridad a las trazas según la posición de los sensores. Considerando los resultados de salida del TSP en este paso y los realizados en Matlab, al comparar ambos resultados se obtuvo una correlación de 100%, lo que indica que los resultados de ambos métodos son idénticos.

Este paso tiene como principal objetivo tener una identificación exacta de las trazas procesadas en TSP y permitir la comparación de forma más directa con las trazas procesadas en Matlab, ya que el TSP genera un sistema de referencia adicional, el cual se encuentra rotado con respecto al sistema general descrito en la sección 3.2.4 y trasladado hacia el frente del túnel. El algoritmo diseñado en Matlab no usa este sistema de referencia.

#### 4.2.4 Corrección de los Sistemas de Referencia de los Sensores Sísmicos

En cuanto a la corrección de los sistemas de referencia considerando los ángulos horizontales, verticales y de giro de los sensores cuando fueron instalados en las paredes del túnel, en la comparación entre los resultados del TSP y los obtenidos en Matlab se obtienen correlaciones que en promedio van desde 0.79 y 0.77 a 0.98 y 0.94 para la prueba 1 y prueba 2 respectivamente. Debido a que en los modelos geométricos hubo diferencias en el posicionamiento de los sensores, es esperable que los resultados en este paso difieran entre los dos métodos, pero, aun así, los niveles

de correlación evidenciados son altos y demuestran una cercanía en la aplicación de ambos métodos.

#### 4.2.5 Determinación de Ventana Temporal

Considerando un largo máximo de muestras a procesar de 0.3 segundos, en Matlab se obtuvo un largo de 14400 muestras por traza, coincidiendo con el largo obtenido con el TSP. En cuanto a la ventana de ruido a eliminar los resultados son similares, pues considerando una ventana de 0.00012 segundos, en Matlab se anulaban las primeras 7 muestras igualando lo obtenido con el TSP. Estos valores se repiten para los dos conjuntos de datos por lo que se considera que al aplicar la determinación de la ventana temporal se encontraron resultados satisfactorios.

#### 4.2.6 Aplicación de un Filtro Pasa-Bajo con Frecuencia de Corte Variable en el Tiempo

En el gráfico de la Figura 24 se muestra la función que describe la frecuencia de corte del filtro pasa-bajo en función del tiempo. Al inicio el filtro es más permisivo teniendo una frecuencia de corte de 6000 Hz y progresivamente se torna más restrictivo teniendo al final una frecuencia de corte de 800 Hz.

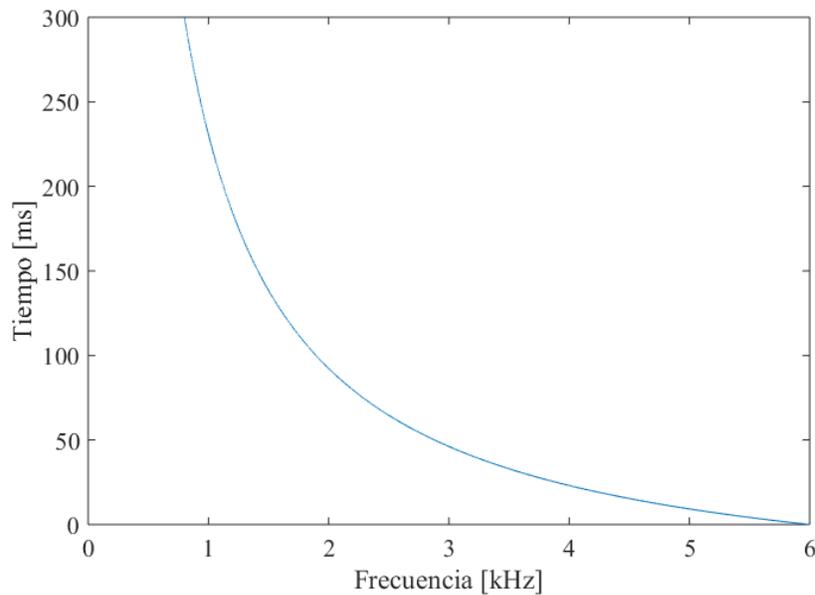


Figura 24: Curva de frecuencia de corte del filtro pasa-bajo variable en el tiempo. (Al graficar se cambió el orden de los ejes para tener concordancia con los espectrogramas de las imágenes siguientes).

En los gráficos de las Figuras 25 y 26 se representan los espectrogramas del promedio de las trazas de la componente Y del sensor 4 obtenidas desde Matlab. Este sensor es uno de los que se vio más afectado debido al ruido generado por la onda de choque aérea. La Figura 25 muestra el contenido inicial de frecuencias previo a la aplicación del filtro y la Figura 26 muestra el contenido de frecuencias después de la aplicación del filtro, donde se puede observar la disminución de las componentes de alta frecuencia después de los 50ms en comparación con la señal sin la aplicación del filtro.

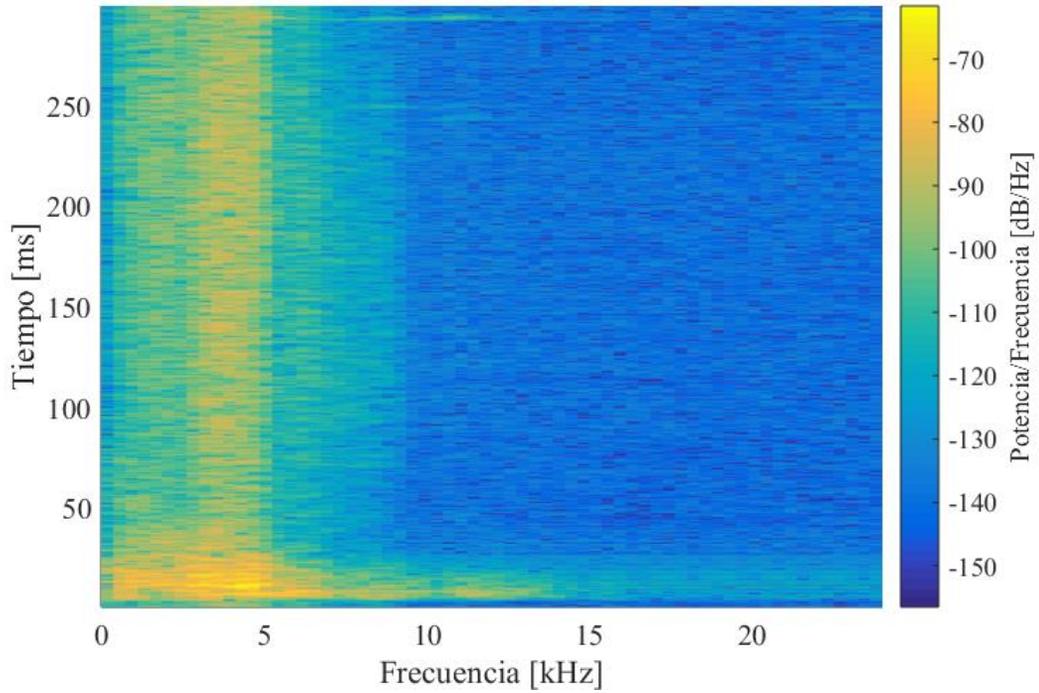


Figura 25: Espectrograma señales en Matlab previo a aplicación del filtro (V1 0+873.8).

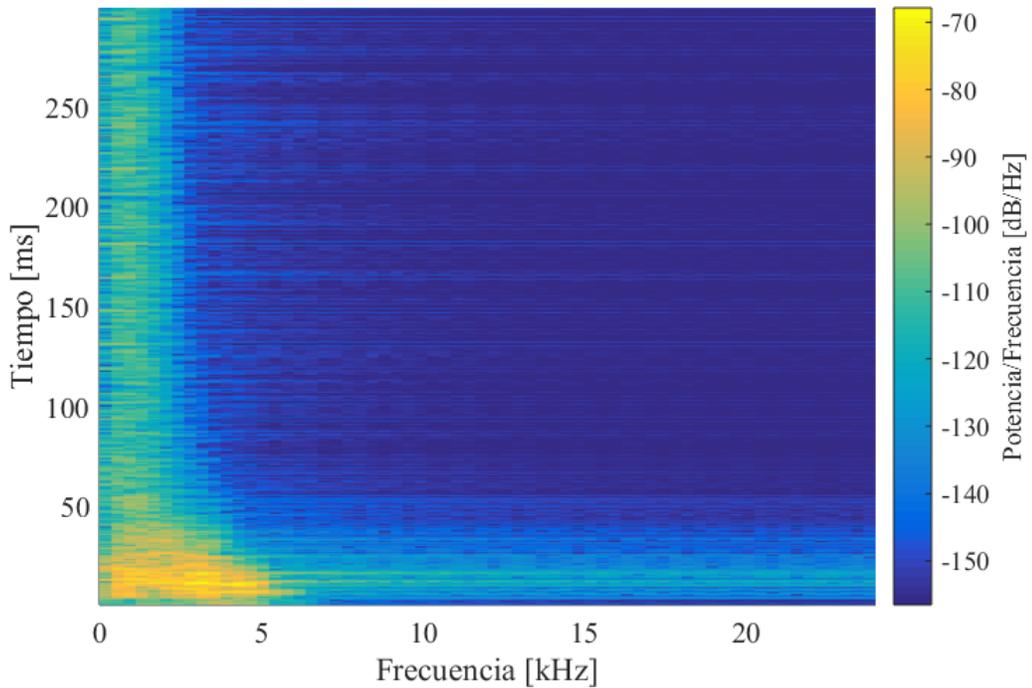


Figura 26: Espectrograma señales en Matlab posterior a aplicación del filtro (V1 0+873.8).

Las Figuras 27 y 28 representan los espectrogramas del promedio de las trazas de la componente Y del sensor 4 obtenidas desde TSP. Se puede observar un resultado similar al

obtenido en Matlab al aplicar el filtro, luego del cual se disminuyen las componentes de alta frecuencia después de los 50 ms.

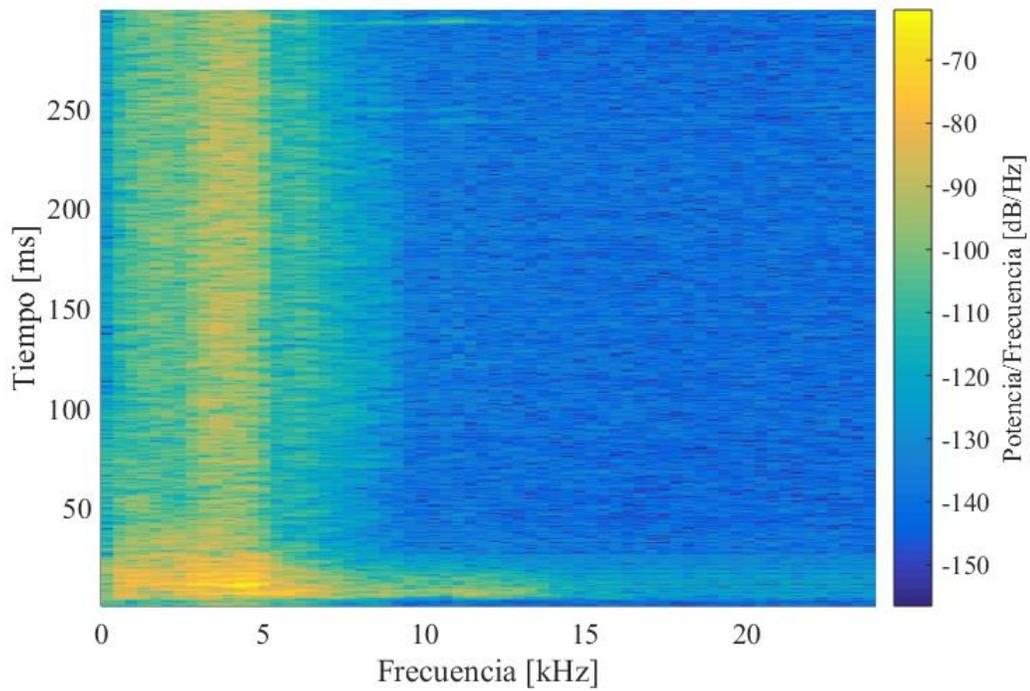


Figura 27: Espectrograma señales en TSP previo a aplicación del filtro (V1 0+873.8).

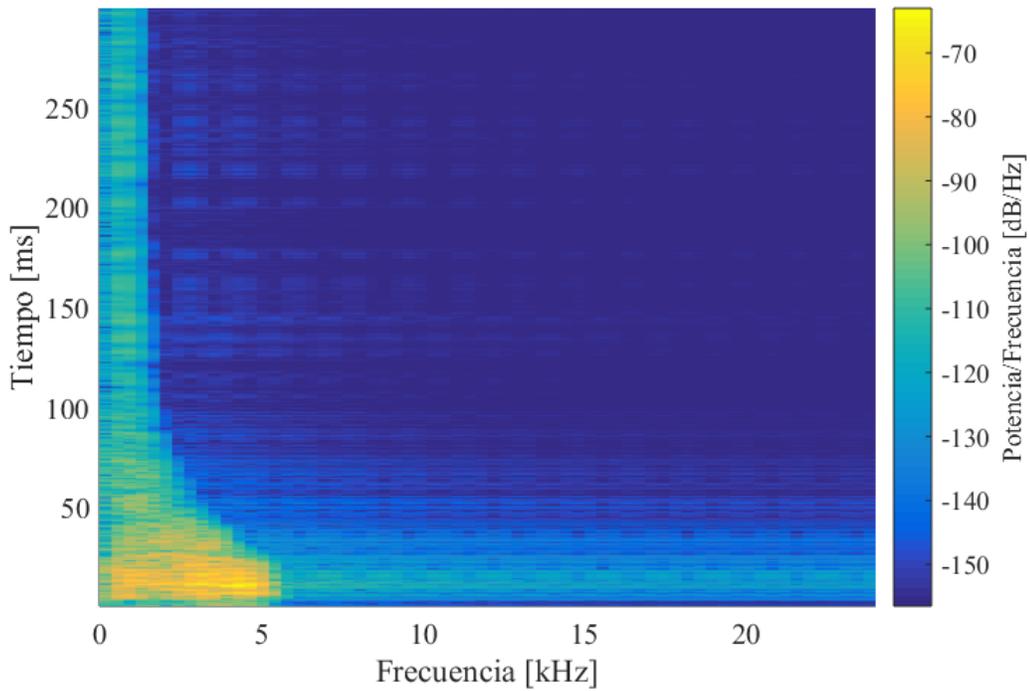


Figura 28: Espectrograma señales en TSP posterior a aplicación del filtro (V1 0+873.8).

En la Figura 29 se puede observar cómo se elimina la onda de choque aérea en una de las trazas sísmicas tanto en Matlab como en TSP sin afectar la señal principal.

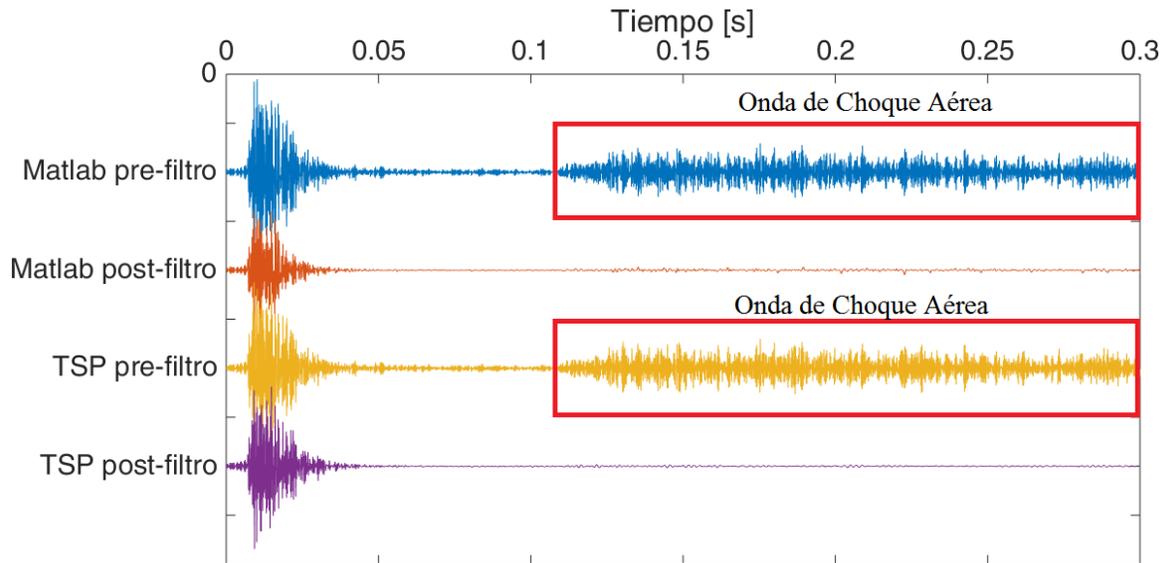


Figura 29: Comparación de una traza previa y posterior a la aplicación del filtro pasa-bajo variable en el tiempo en Matlab y en TSP. Análogo para ambas pruebas.

En conclusión, la aplicación del filtro se realizó de manera satisfactoria obteniendo resultados similares entre las pruebas procesadas en TSP y en Matlab, afirmando también que el filtro pasa-bajo con frecuencia de corte variable en el tiempo es una buena herramienta para eliminar el ruido generado por la onda de choque aérea.

#### 4.2.7 Aplicación de un Filtro Pasa-Banda Para Respetar los Rangos Dinámicos del Sensor

Para la aplicación del filtro pasa banda se consideraron las frecuencias de corte usadas en el procesamiento en TSP para tener comparaciones más directas. La Tabla 6 muestra las frecuencias de corte usadas para cada set de datos:

Tabla 6: Frecuencias de corte del filtro pasa-banda usado en cada prueba

<b>Prueba</b>	<b>V1 0+873.8 (Primera prueba)</b>	<b>V1 0+977.7 (Segunda prueba)</b>
<b>Frecuencia de corte inferior [Hz]</b>	62.5	62.5
<b>Frecuencia de corte superior [Hz]</b>	4320	1500

Cabe destacar que la frecuencia de corte superior debe ser menor o igual a la máxima frecuencia de corte utilizada al aplicar el filtro pasa-bajo con frecuencia variable en el tiempo, de lo contrario, la aplicación del filtro pasa-banda inducirá ruido en la señal en lugar de limpiarla.

En las Figuras 30 y 31 se pueden observar respectivamente los espectrogramas del promedio de las trazas de la componente Y del sensor 4 obtenidas desde Matlab y TSP ya aplicado el filtro pasa-banda en la primera prueba, en los cuales se ve una similitud en los espectros, los cuales también tienen similitud con los espectros de las Figuras 26 y 28 respectivamente.

Al observar las trazas de las Figuras 32 y 33, no se aprecia una disminución significativa en el ruido de las señales, lo que pudo suceder debido a la elección una frecuencia muy alta para la frecuencia de corte superior. En la Figura 34, se observan las trazas luego de modificar la frecuencia de corte superior utilizada en la primera prueba a 1500 Hz, obteniendo trazas con un nivel de ruido notoriamente disminuido en comparación a la Figura 33, por lo que se concluye que este último valor es el adecuado para usar como frecuencia de corte superior.

Para la segunda prueba, el espectrograma de la Figura 35 muestra una menor atenuación de las componentes de frecuencia que se encuentran sobre la frecuencia de corte alta con respecto al espectrograma obtenido de las trazas procesadas en TSP (Figura 36). Aun así, los resultados de la aplicación del filtro pasa banda son satisfactorios comparando el ruido que tienen las trazas de la Figura 37, a las cuales no se les aplicó el filtro pasa-banda y las trazas de la Figura 38, que ya tienen el filtro aplicado.

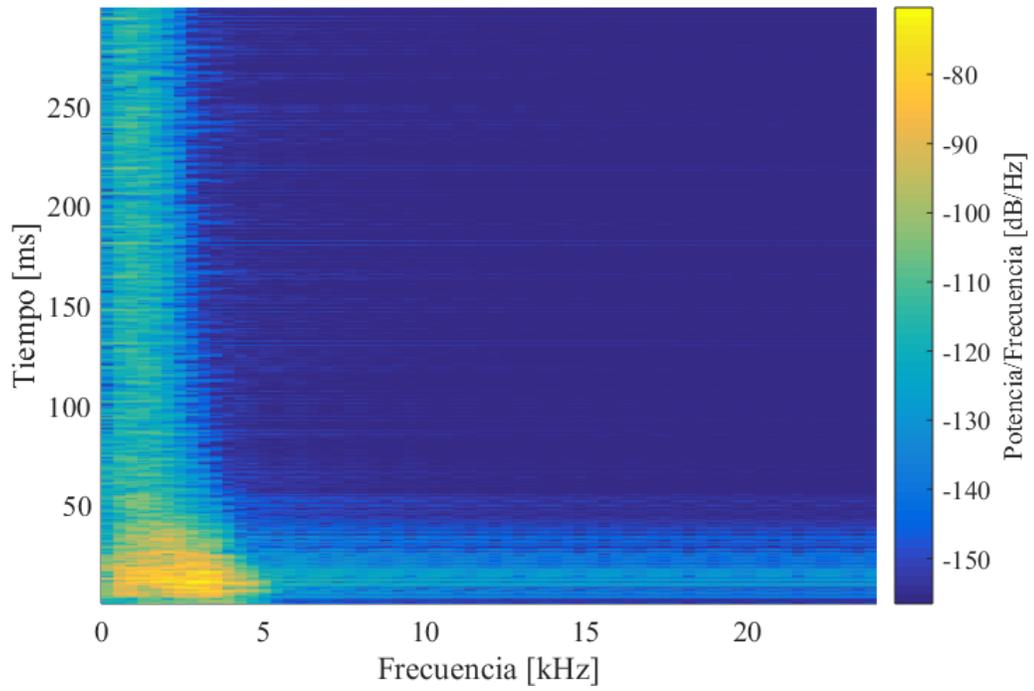


Figura 30: Espectrograma señales en Matlab posterior a aplicación del filtro (V1 0+873.8).

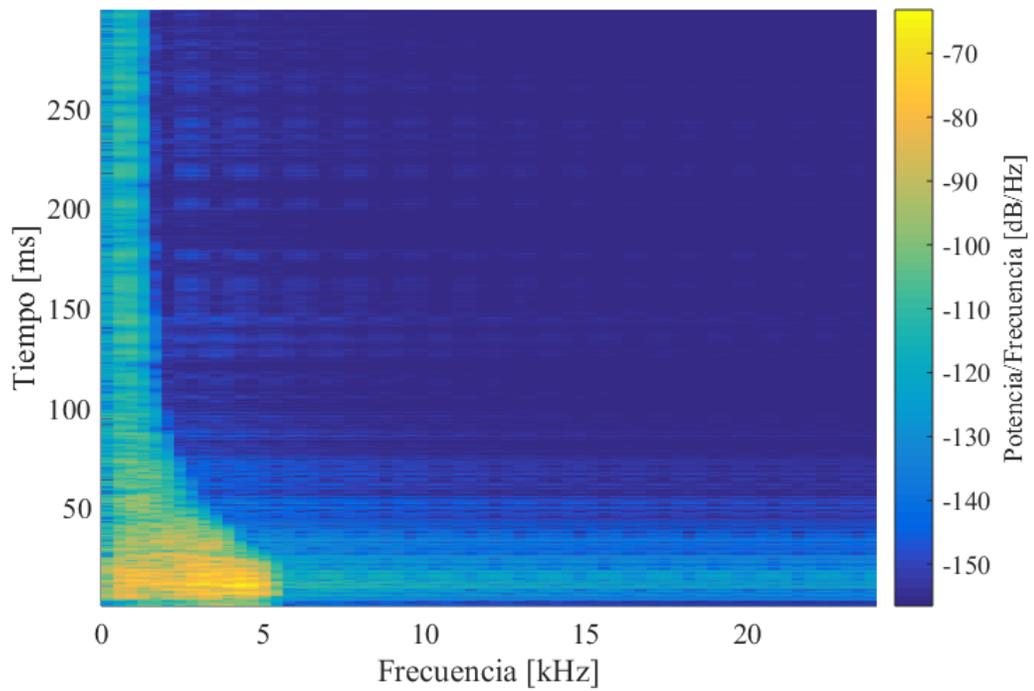


Figura 31: Espectrograma señales en TSP posterior a aplicación del filtro (V1 0+873.8).

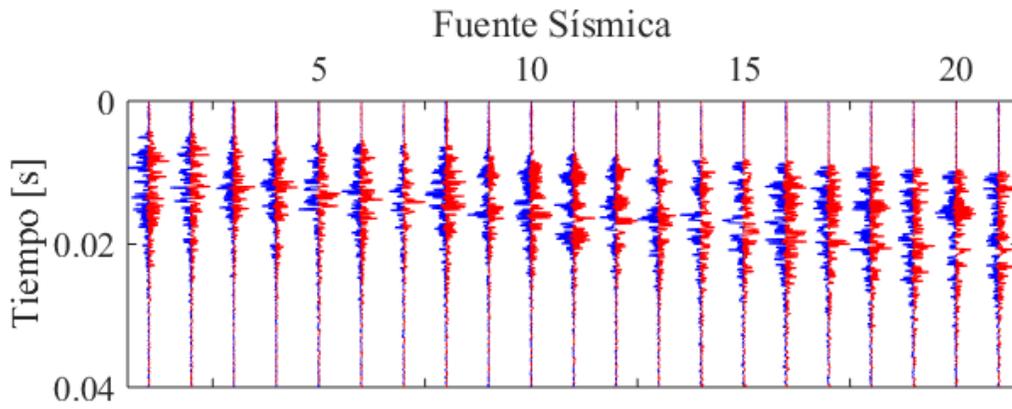


Figura 32: Trazas sísmicas antes de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+873.8)

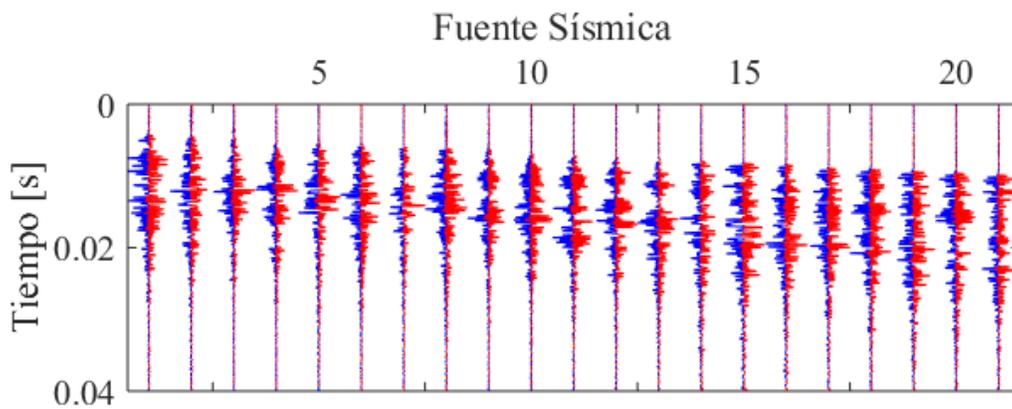


Figura 33: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+873.8). Frecuencia de corte superior de 4320 Hz

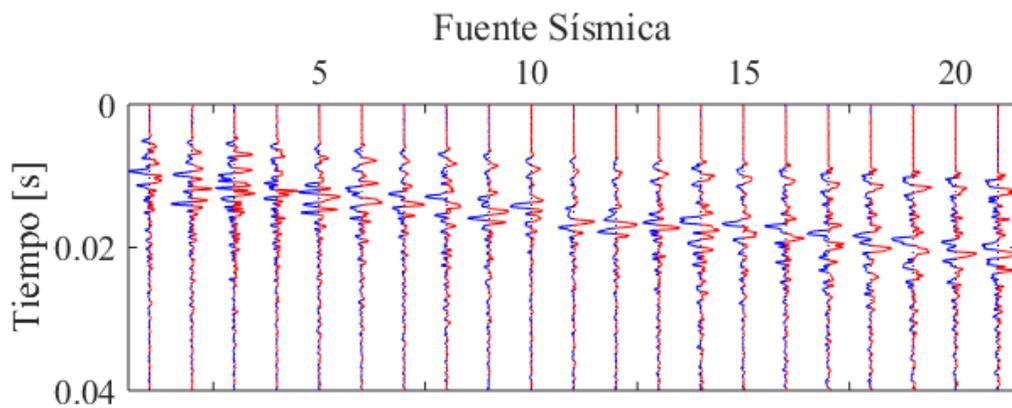


Figura 34: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+873.8). Frecuencia de corte superior de 1500 Hz

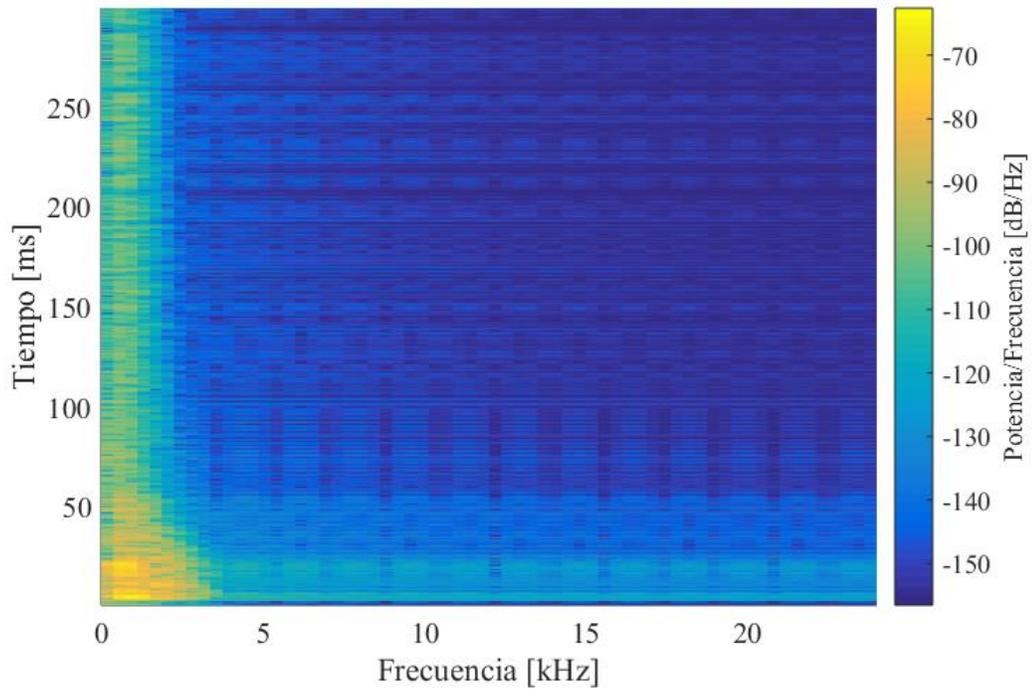


Figura 35: Espectrograma señales en Matlab posterior a aplicación del filtro (V1 0+977.7).

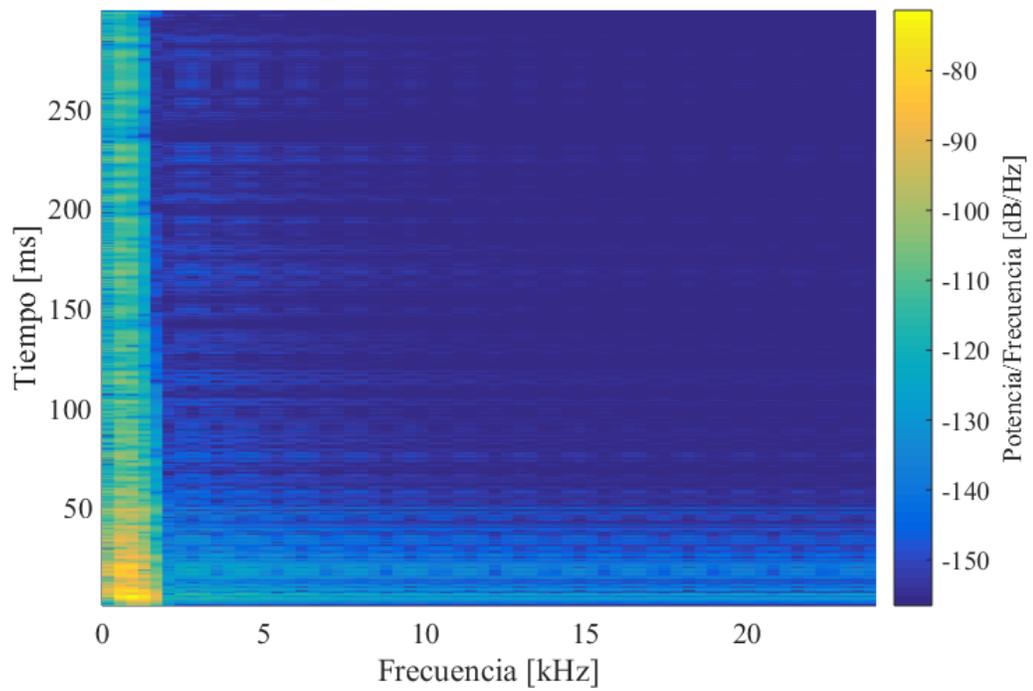


Figura 36: Espectrograma señales en TSP posterior a aplicación del filtro (V1 0+977.7).

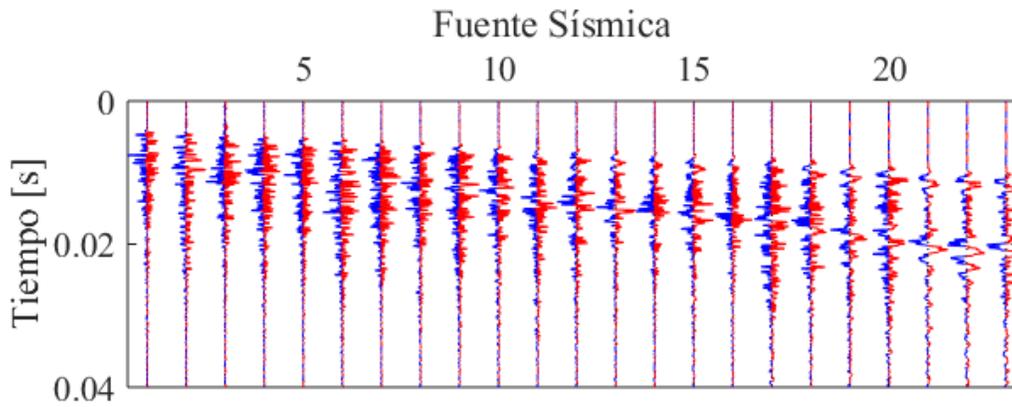


Figura 37: Trazas sísmicas antes de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+977.7)

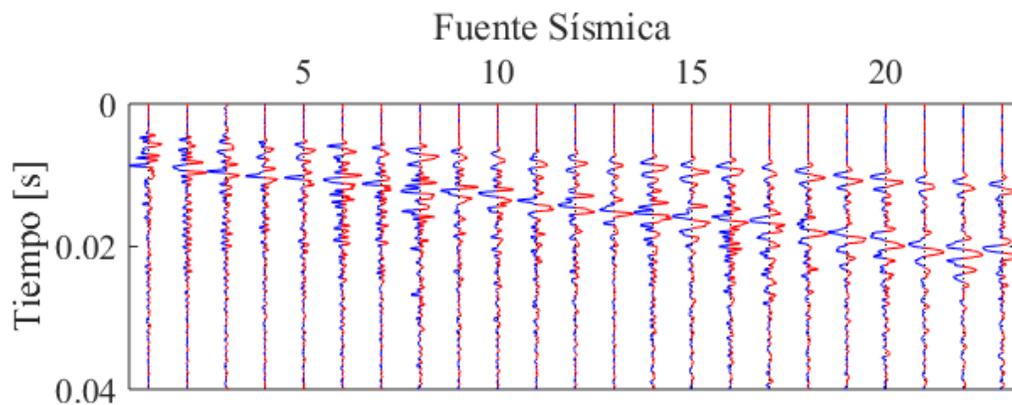


Figura 38: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+977.7)

En resumen, el filtro pasa-banda funciona de forma correcta al eliminar el ruido no deseado, pero se deben considerar frecuencias de corte adecuadas para no inducir más ruido después de aplicar el filtro del paso anterior.

#### 4.2.8 Determinación de los Tiempos de Llegada de la Onda P

En la determinación de los tiempos de llegada de la onda P directa, los resultados obtenidos utilizando el algoritmo descrito en la sección 3.2.9 en la primera prueba son los mostrados en la Tabla 7, en la cual se considera falla de detección si la marca de llegada de la onda P no corresponde con la llegada de la onda en la traza. Los resultados se muestran para dos niveles de filtrado distintos.

Tabla 7: Aciertos y fallas al detectar los tiempos de llegada de la onda P directa en la Primera prueba con dos niveles de filtrado distintos

Primera prueba	V1 0+873.8 filtrado a 4250 Hz			V1 0+873.8 filtrado a 1500 Hz		
	Aciertos	Fallas	Porcentaje de aciertos	Aciertos	Fallas	Porcentaje de aciertos
Sensor 1	21	0	100%	21	0	100%
Sensor 2	21	0	100%	18	3	85.7%
Sensor 3	14	7	66.7%	17	4	80.95%
Sensor 4	11	10	52.38%	19	2	90.5%

De la Tabla 7 se observa que en promedio, el porcentaje de aciertos aumentó en las trazas filtradas a 1500 Hz, por lo que tener trazas con el menor ruido posible ayuda a obtener una mejor determinación de los tiempos de llegada de la onda P.

En la Tabla 8 se tiene la cantidad de aciertos y fallas para la Segunda prueba. Al tener las trazas un mejor filtrado en comparación con la primera prueba, se obtuvo un nivel de aciertos mayor en la determinación de los tiempos de llegada de la onda P.

Tabla 8: Aciertos y fallas al detectar los tiempos de llegada de la onda P directa

Segunda prueba	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
V1 0+977.7 Aciertos	21	23	17	21
V1 0+977.7 Fallas	2	0	6	2
Porcentaje de aciertos	91.3%	100%	73.9%	91.3%

Tomando en consideración los resultados expuestos anteriormente, el algoritmo tuvo un desempeño dentro de los niveles comentados en Chi (2015) [15], mejorando en algunos casos el porcentaje promedio de detecciones correctas citadas en el mismo documento.

Debido a la dificultad que tiene el determinar el tiempo de llegada de la onda P, es necesario hacer una revisión manual de los resultados del método, sobre todo cuando el ruido en algunas trazas es alto, ya que esto hace fallar más al algoritmo.

Aun teniendo que hacer una revisión previa, el algoritmo es de ayuda debido a que permite ahorrarle tiempo al usuario ya que este último solo tiene que revisar las trazas con falla de detección y no el conjunto completo de datos.

#### 4.2.9 Verificación de los Tiempos de Llegada de la Onda P Determinados y Cálculo de Velocidad de Onda P Promedio

Una vez revisados los tiempos de llegada de la onda P directa, las velocidades promedio para cada sensor son los mostrados en la Tabla 9, los cuales se obtuvieron después de hacer la regresión lineal de los tiempos de llegada con respecto a la distancia sensor – fuente sísmica.

Tabla 9: Velocidades promedio de la onda P calculadas para cada sensor.

<b>Prueba</b>	<b>Velocidad Sensor 1 [m/s]</b>	<b>Velocidad Sensor 2 [m/s]</b>	<b>Velocidad Sensor 3 [m/s]</b>	<b>Velocidad Sensor 4 [m/s]</b>
<b>Matlab V1 0+873.8</b>	5721	5793	5668	5731
<b>TSP V1 0+873.8</b>	5771	5677	5697	5669
<b>Diferencia</b>	<b>0.87%</b>	<b>-2.04%</b>	<b>0.51%</b>	<b>-2.91%</b>
<b>Matlab V1 0+977.7</b>	5501	5454	5404	5722
<b>TSP V1 0+977.7</b>	5757	5864	5509	5378
<b>Diferencia</b>	<b>4.45%</b>	<b>6.83%</b>	<b>1.91%</b>	<b>-6.40%</b>

En la Tabla 9 también se incluyen las velocidades obtenidas por el TSP y las diferencias de velocidad de los métodos para ambas pruebas. Se puede notar que las velocidades para la primera prueba son más cercanas entre ambos métodos obteniéndose en Matlab velocidades más altas.

En la segunda prueba, la diferencia de velocidades es mayor obteniéndose con TSP velocidades más altas. Lo anterior se debe a la diferencia de distancias sensor-fuente sísmica calculadas en el paso 4.2.2, sobre todo para el Sensor 2 el cual se ve que tiene la velocidad más alta de la prueba, concluyendo que es necesario determinar de la forma más exacta posible la distancia sensor-fuente sísmica para poder estimar de forma correcta las velocidades de desplazamiento de las ondas en el medio de propagación.

#### 4.2.10 Alineación de Trazas a Línea de Tendencia de Tiempos de Llegada de Onda P Directa

En la Figura 39 se muestra uno de los conjuntos de trazas graficados antes de la alineación (punteado en negro) y después (azul y rojo sólido). El desplazamiento completo de las trazas tiene como objetivo hacer coincidir el cero de la línea de tendencia (línea azul), con el cero de la distancia sensor-fuente sísmica, además de hacer coincidir con la línea de tendencia los tiempos de llegada de la onda P directa en cada traza (línea roja).

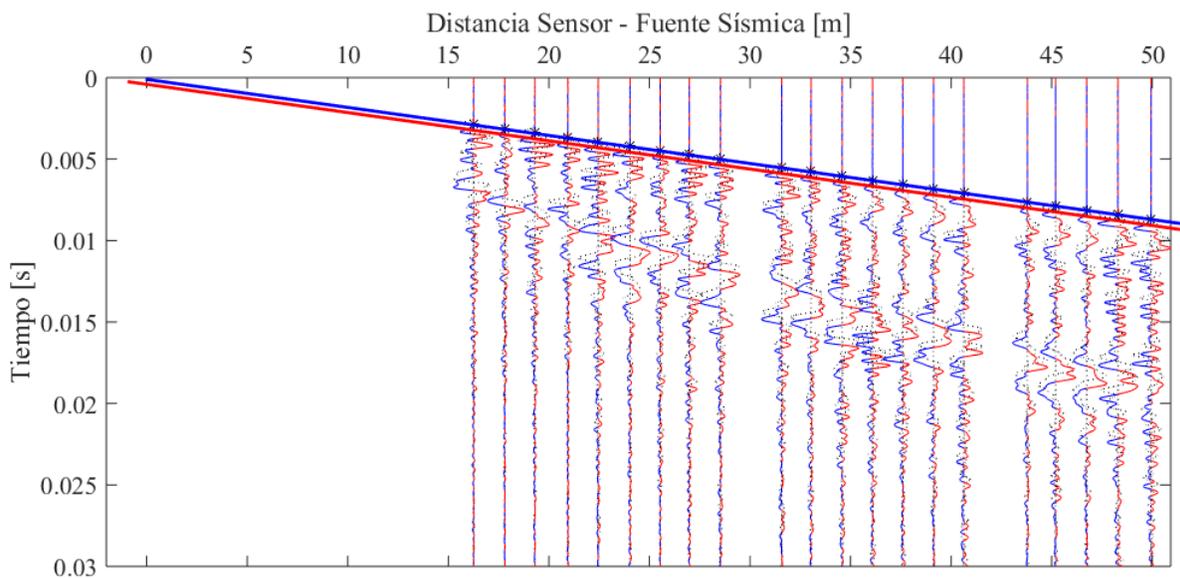


Figura 39: Trazas desplazadas coincidiendo con la tendencia calculada (línea azul)

La no coincidencia de la línea de tendencia con el cero de la distancia sensor-fuente sísmica se explica en el manual de evaluación de TSP [13] por diferencias leves en el tipo de roca en la cual están instaladas las fuentes sísmicas o en diferencias de tiempo en la combustión del explosivo después de haber sido iniciado el detonador, lo que hace que las ondas lleguen en tiempos levemente distintos y se debe forzar la intersección de la línea de tendencia.

#### 4.2.11 Normalización de la Energía de Fuentes Sísmicas Controladas

En el gráfico de la Figura 40 se representa la amplitud espectral promedio de la señal recibida por la componente Y del sensor 1 en Matlab, previo a aplicar la normalización de la energía de las fuentes sísmicas. Los asteriscos (\*) azules son la amplitud espectral promedio recibida en cada detonación graficada con respecto a la distancia sensor-fuente sísmica y la línea roja es la curva de tendencia exponencial de los datos. Se puede observar la dispersión que tienen los datos con respecto a la tendencia determinada.

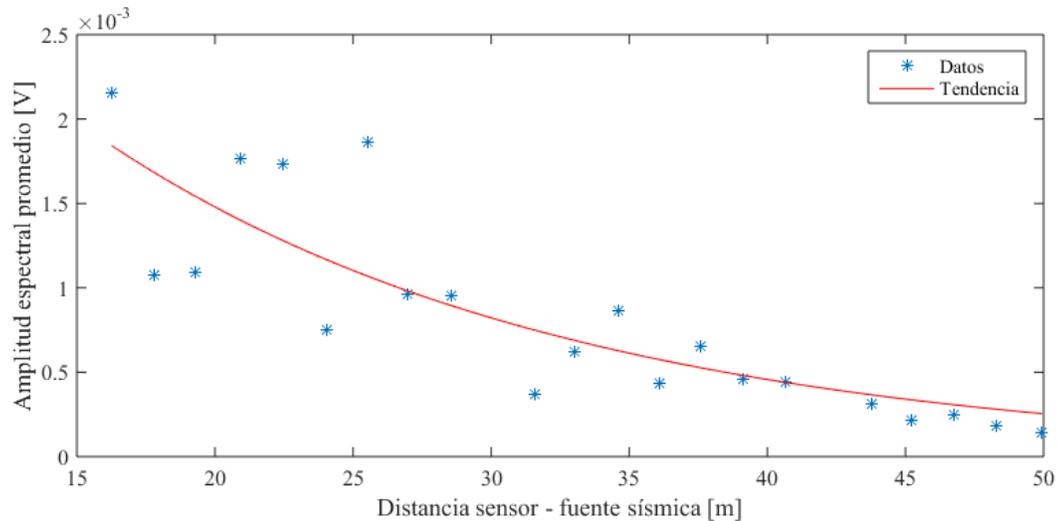


Figura 40: Amplitud espectral promedio v/s Distancia Sensor - fuente sísmica previo al balance de energía (Matlab V1 0+873.8, sensor 1)

En el gráfico de la Figura 41 se representa la amplitud espectral promedio de la señal recibida por la componente Y del sensor 1 en Matlab, posterior a aplicar la normalización de la energía de las fuentes sísmicas. Se puede observar un acercamiento de los datos a la curva, la cual tiene los mismos parámetros que la graficada en la Figura 40, pero manteniendo la variabilidad de los datos como fue explicado en la sección 3.2.12.

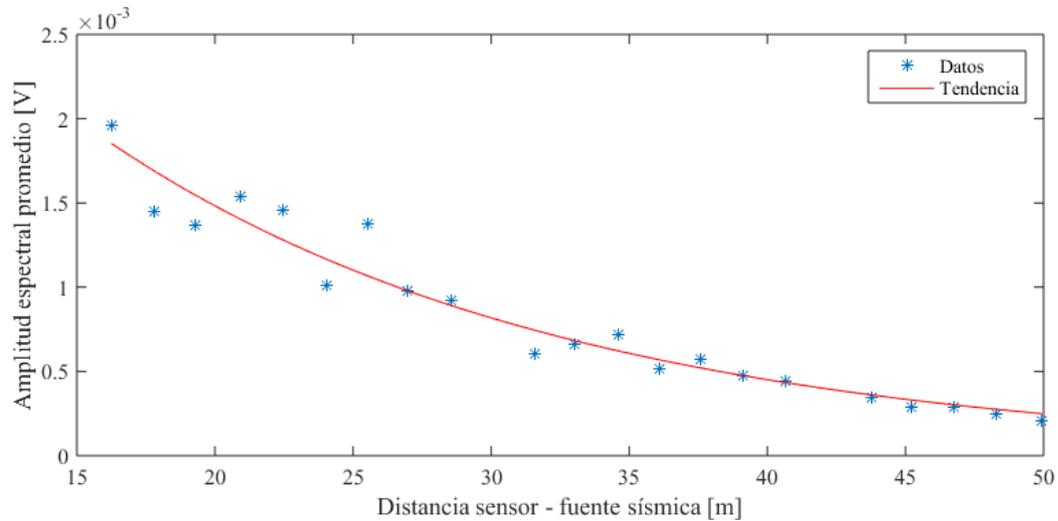


Figura 41: Amplitud espectral promedio v/s Distancia Sensor - fuente sísmica posterior al balance de energía (Matlab V1 0+873.8, sensor 1)

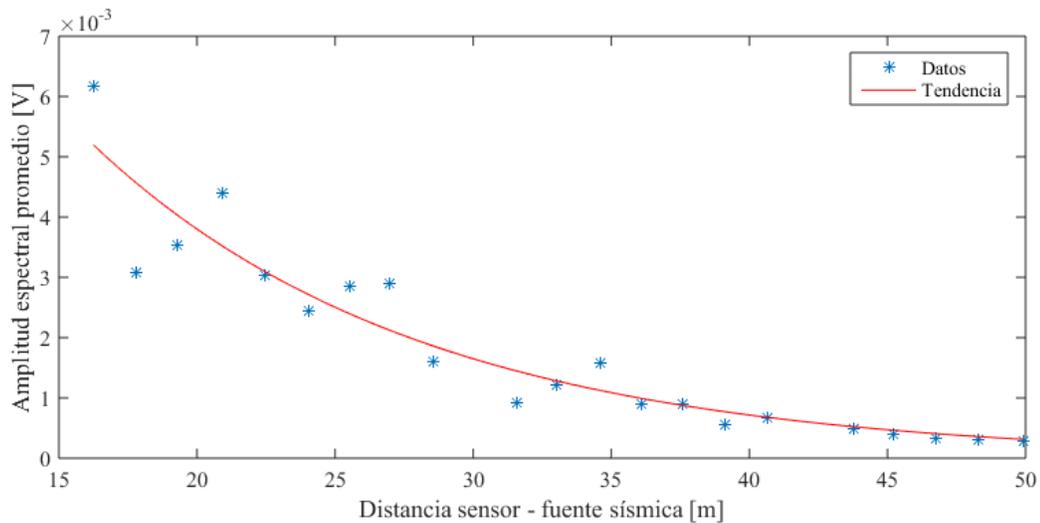


Figura 42: Amplitud espectral promedio v/s Distancia Sensor - fuente sísmica previo al balance de energía (TSP V1 0+873.8, sensor 1)

Los gráficos de las Figuras 42 y 43 representan las amplitudes espectrales promedio de las señales previo y posterior a la normalización de la energía de las fuentes respectivamente, extraídos de los datos procesados en TSP. Se puede observar en la Figura 43 que, si bien las muestras se acercan más a la tendencia que en la Figura 42, existen cambios en los parámetros de la curva producto de que se atenuaron en general las trazas posterior a la normalización y no se ajustaron los datos a la curva de tendencia, por lo que en este paso el TSP no se ajusta a lo que describe teóricamente, concluyendo así que el algoritmo en Matlab cumple de mejor manera los objetivos del paso.

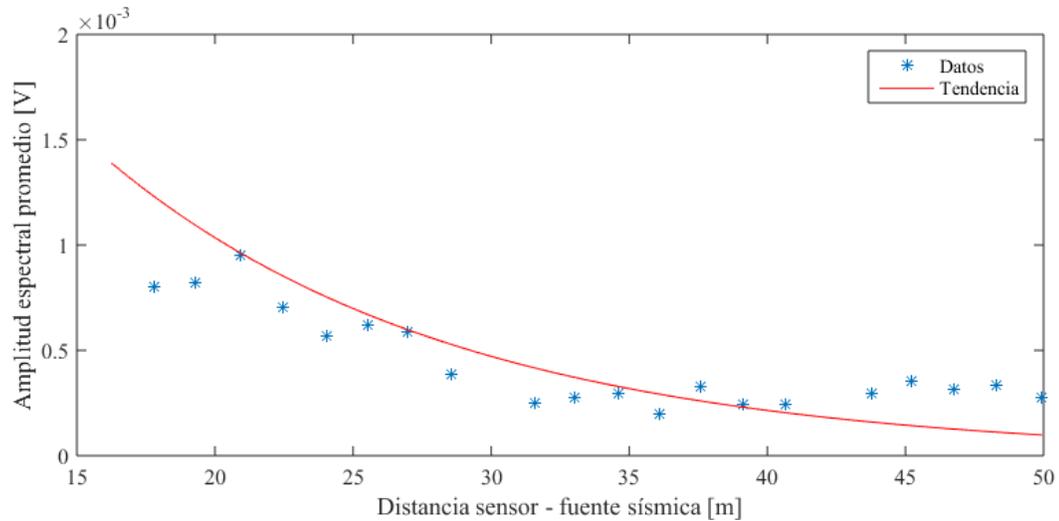


Figura 43: Amplitud espectral promedio v/s Distancia Sensor - fuente sísmica posterior al balance de energía (TSP V1 0+873.8, sensor 1)

#### 4.2.12 Estimación del Factor de Atenuación en Medio

Para aplicar el algoritmo cuyo fin es estimar el factor de atenuación del medio, se debe tener en cuenta que la ventana temporal que se debe considerar para hacer los cálculos debe abarcar la llegada de la onda P directa. La Figura 44 muestra la ventana temporal usada, la cual tiene un largo de 0.003 segundos y para cada traza inicia desde el tiempo donde se detectó la llegada de la onda P.

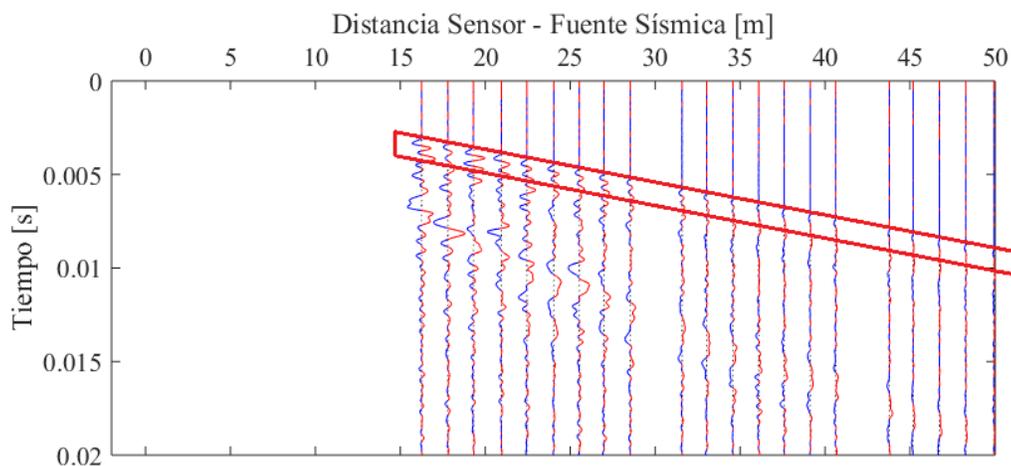


Figura 44: Trazas con ventana temporal marcada (rectángulo rojo)

La Tabla 10 muestra los resultados obtenidos luego de la estimación del factor de atenuación del medio en Matlab y TSP para ambas pruebas. Se observa una diferencia mínima en cada una de las pruebas. La diferencia de los resultados, aunque pequeña, puede deberse a la ventana de usada para calcular el factor, la cual se tuvo que ajustar varias veces ya que la ventana usada en TSP no tomaba completamente la onda P. Además, hay que considerar las diferencias entre las trazas debido a los diferentes enfoques de filtrado usado.

Tabla 10: Comparación de resultados de estimación del factor de atenuación en TSP y en Matlab

<b>Prueba</b>	<b>V1 0+873.8 (Primera prueba)</b>	<b>V1 0+977.7 (Segunda prueba)</b>
<b>Factor (<math>Q^{-1}</math>) estimado por Matlab</b>	27	23
<b>Factor (<math>Q^{-1}</math>) estimado por TSP</b>	28	22

Si bien la prueba entregó resultados cercanos entre ambos métodos, la técnica de estimación del factor de atenuación usada es sumamente sensible a la ventana de cálculo usada y al contenido de ruido de las muestras, por lo que es necesario seguir haciendo revisiones con tal de mejorar la robustez del método.

#### 4.2.13 Extracción de las Ondas Reflejadas de los Datos Procesados

##### 4.2.13.1 Aplicación de la Transformada de Radón

Los parámetros utilizados para la aplicación del filtro en el dominio Radón, necesario para recuperar las ondas reflejadas, se muestran en la Tabla 11. Como se explica en la sección 3.2.14.1, de estos valores depende el rango de ondas reflejadas que se extraerán luego de aplicar el filtro.

Tabla 11: Valor de tiempo mínimo utilizado para el filtro en dominio Radón

<b>Prueba</b>	<b>V1 0+873.8 (Primera prueba)</b>	<b>V1 0+977.7 (Segunda prueba)</b>
$t_{min}$ [s]	0.00211	0.00254

En las Figuras 45 y 46 se muestran las trazas sísmicas previo y posterior a la aplicación del filtro en el dominio Radón respectivamente, en las cuales se puede ver un cambio en la tendencia que siguen las llegadas de las ondas.

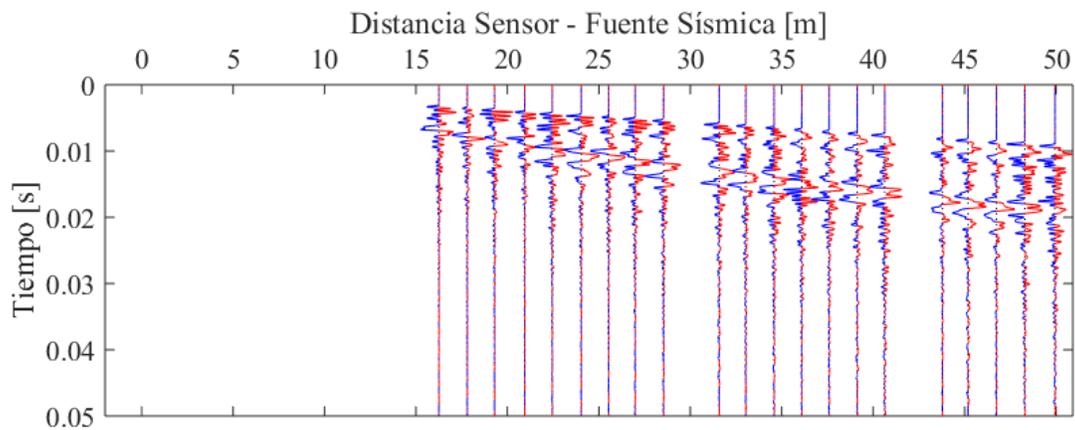


Figura 45: Trazas sísmicas antes de aplicar el filtro en dominio Radón (V1 0+873.8)

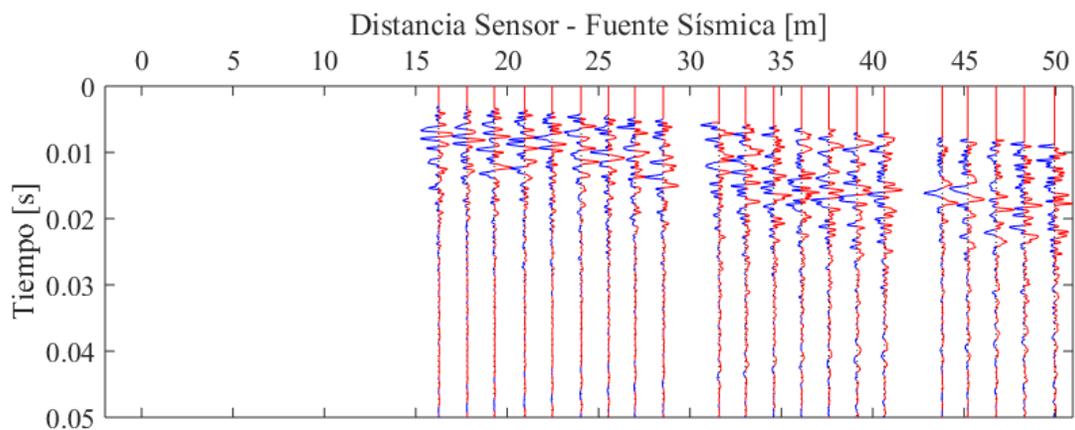


Figura 46: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro en dominio Radón (V1 0+873.8)

Más detalladamente, en la Figura 47, se puede observar que las llegadas siguen la tendencia mostrada por la línea verde previo a la aplicación del filtro, mientras que en la Figura 48, las llegadas siguen la tendencia mostrada por la línea roja, la cual tiene una inclinación con signo opuesto a la línea verde de la Figura 47.

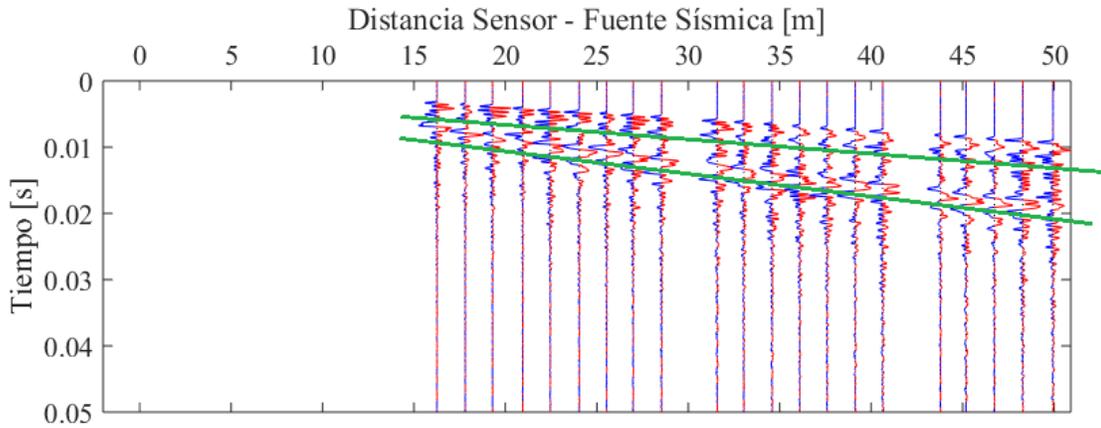


Figura 47: Trazas sísmicas antes de aplicar el filtro en dominio Radón (V1 0+873.8). Tendencia de las llegadas marcadas con líneas verdes.

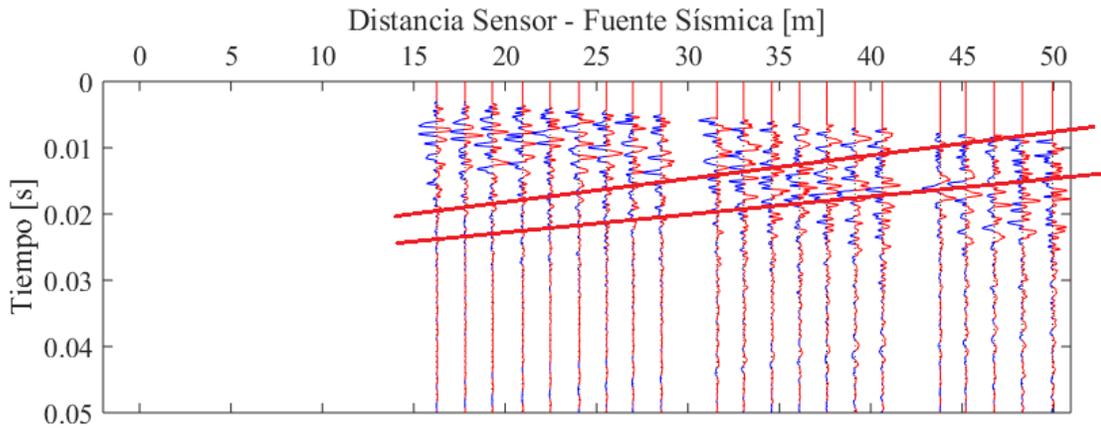


Figura 48: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro en dominio Radón (V1 0+873.8). Tendencias de las llegadas marcadas con líneas rojas.

La selección de la componente máxima de frecuencia debe ser lo más ajustada posible a los datos, debido a que, si se utiliza una frecuencia máxima muy baja, se puede producir *aliasing* en las señales y si se utiliza una frecuencia muy alta, el algoritmo toma demasiado tiempo en realizar la operación sin tener una mejora significativa en los resultados.

#### 4.2.13.2 Aplicación del Filtro de Atenuación Inversa

Los parámetros utilizados para ambos conjuntos de datos al aplicar el filtro de atenuación inversa, se muestran en la Tabla 12. Para el factor de atenuación, se utilizaron los resultados obtenidos por el TSP, luego de aplicar la estimación del factor de atenuación del medio.

Tabla 12: Parámetros utilizados en la aplicación del filtro de atenuación inversa

Prueba	V1 0+873.8 (Primera prueba)	V1 0+977.7 (Segunda prueba)
Factor de atenuación ( $Q^{-1}$ )	28	22
Ganancia máxima [dB]	20	20

En los gráficos de las Figuras 49 y 50 se muestran los resultados de la aplicación del filtro de atenuación inversa a las trazas de la primera prueba en Matlab y TSP respectivamente. En ambos casos se observa un aumento en la amplitud de las señales posterior a los 0.02 segundos, además de incluir componentes de frecuencias más altas que las vistas en las trazas del paso anterior.

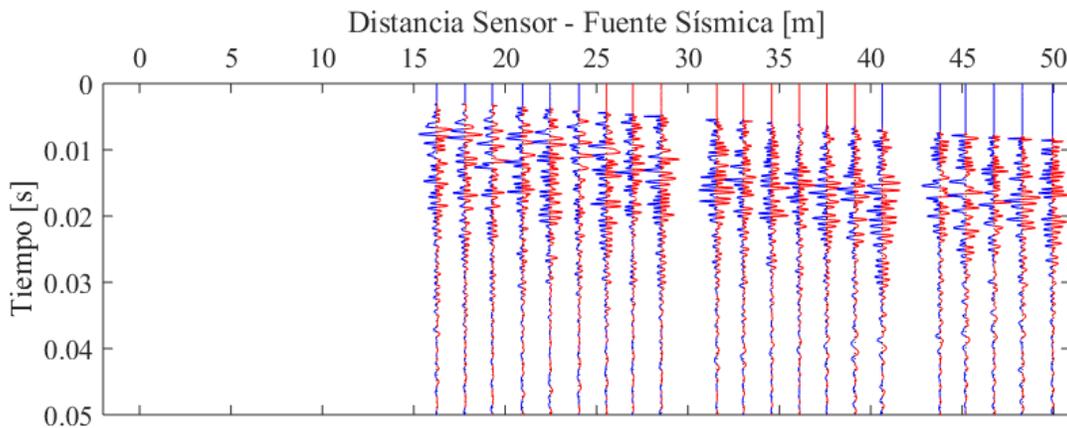


Figura 49: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro de atenuación inversa en Matlab (V1 0+873.8).

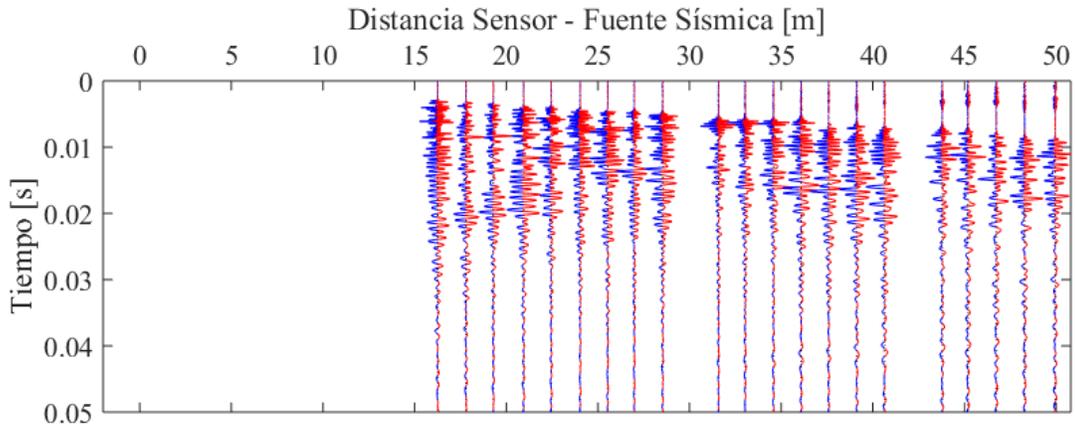


Figura 50: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro de atenuación inversa en TSP (V1 0+873.8).

En los gráficos de las Figuras 51 y 52 se muestran los resultados de la aplicación del filtro de atenuación inversa a las trazas de la segunda prueba en Matlab y TSP respectivamente. En este caso se observa una mayor limpieza de las trazas procesadas con TSP, pero no existe una mayor recuperación de la amplitud de la señal posterior a los 0.03 segundos, lo cual, si es visto en las trazas procesadas en Matlab, pero con una mayor adición de ruido.

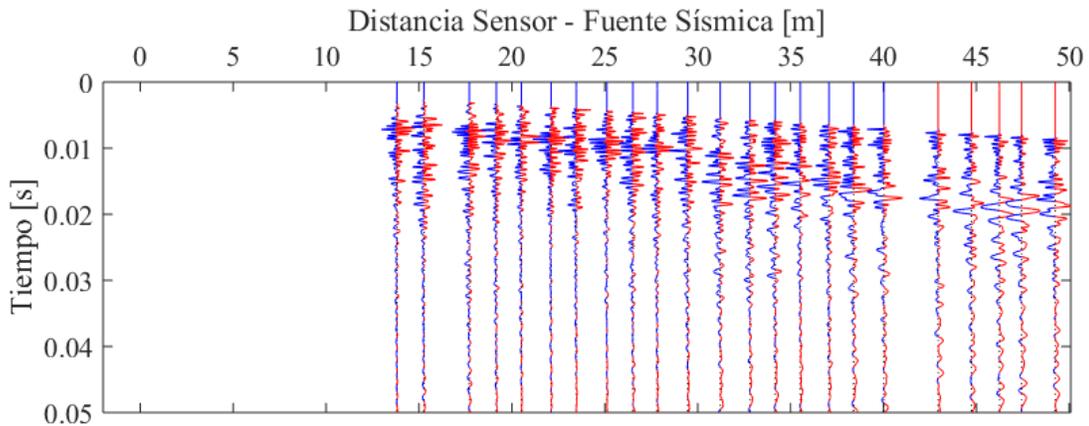


Figura 51: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro de atenuación inversa en Matlab (V1 0+977.7).

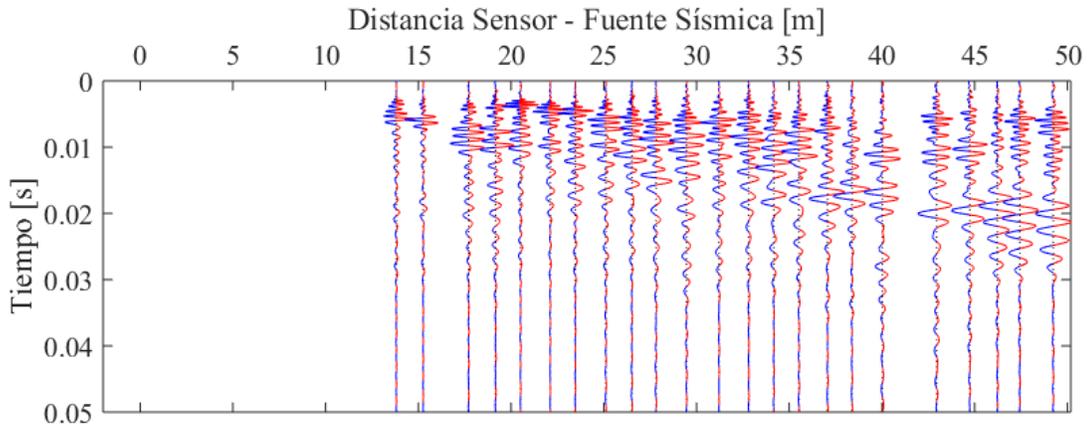


Figura 52: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro de atenuación inversa en TSP (V1 0+977.7).

En resumen, en este paso se lograron resultados similares a los obtenidos en TSP, aunque con un mayor nivel de ruido en las trazas, lo cual puede ser remediado aplicando un filtro pasa banda posterior a la aplicación del filtro de atenuación inversa, lo cual también es aplicado en el TSP en un paso posterior.

## Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se entregan las conclusiones finales del trabajo de título y se proponen las recomendaciones que se estiman necesarias para trabajos a futuro basados en los resultados de éste.

### 5.1 Conclusiones

El modelo geométrico determinado del túnel, logró un modelo con dimensiones y posiciones de los sensores y fuentes sísmicas de manera más ajustada a las mediciones tomadas en terreno que el TSP, obteniendo diferencias de menos de 10 cm en promedio, a diferencia de su contraparte que tiene 40 cm promedio de diferencia.

Al determinar las distancias recorridas por las ondas sísmicas desde las fuentes a los sensores, se obtuvo un promedio 23 cm de diferencia en la primera prueba y 37 cm en la segunda prueba entre lo calculado por Matlab y el TSP, lo que se considera una diferencia aceptable, pero que puede hacer variar las velocidades de llegada de la onda P directa que se calculan en los pasos siguientes.

En cuanto a la normalización y a la corrección de los sistemas de referencia de los sensores, se obtuvieron niveles de correlación entre las trazas procesadas que permiten concluir que la aplicación de las matrices de rotación a las trazas sísmicas para corregir las desviaciones de posición de los sistemas de referencia de los sensores y el túnel funcionó de manera aceptable.

En la determinación de la ventana temporal, utilizada para limitar el largo de las trazas a procesar, se obtuvieron los mismos resultados en Matlab y TSP. Siendo éste un paso secundario, los resultados se consideraron satisfactorios.

Al aplicar el filtro pasa-bajo con frecuencia de corte variable en el tiempo, se obtuvieron resultados similares a los obtenidos con el TSP, consiguiendo, para un mismo rango de frecuencias, eliminar la onda de choque aérea sin afectar la información relevante de las trazas sísmicas, con lo que se concluye que el filtro es una herramienta adecuada para eliminar el ruido generado por la llegada de la onda de choque aérea.

En la aplicación del filtro pasa-banda para respetar los rangos dinámicos del sensor, se encontró que, si uno se limita estrictamente a elegir como frecuencia de corte las entregadas por el fabricante del sensor, las trazas sísmicas siguen teniendo un nivel de ruido alto, en el cual no se alcanza a distinguir la llegada de la onda S, lo cual se solucionó utilizando una frecuencia de corte superior más baja, llegando así a resultados satisfactorios en comparación a lo obtenido con el TSP.

En el paso de determinación de los tiempos de llegada de la onda P directa, se concluye que el algoritmo utilizado tiene un buen desempeño, llegando a determinar de forma correcta el tiempo de llegada en un 90% de las veces, con lo que se concluye que el algoritmo es muy adecuado, pero que aun así se debe revisar en un paso posterior que los tiempos de llegada se hayan determinado de forma correcta.

Luego de verificar los tiempos de llegada de la onda P directa y el cálculo de velocidades de propagación de la onda P directa, las diferencias promedio de velocidad entre las obtenidas en Matlab y las calculadas en TSP, fue de un 3.24%, lo cual aunque es un porcentaje bajo, induce una diferencia considerable entre las velocidades debido a sus altos valores de propagación, por lo que se concluye que es necesario determinar de la manera más exacta posible la posición de los sensores y las fuentes sísmicas para tener una mejor estimación de la velocidad de desplazamiento de la onda P en el medio.

Al alinear las trazas con la línea de tendencia de tiempos de llegada de la onda P directa, se encontró que la tendencia no interceptaba el eje del tiempo en 0 y se debió forzar la intersección. Esto se explica en el manual del TSP debido a diferencias de tiempo en la iniciación del detonador y la combustión completa del explosivo.

En el paso de normalización de la energía de las fuentes sísmicas controladas, el paso implementado en Matlab obtuvo mejores resultados que el TSP, debido a que las trazas normalizadas en TSP no se ajustaron a la tendencia de las trazas previa a la normalización, con lo que la implementación en Matlab cumple de mejor manera con el balance de energía.

Si bien en la estimación del factor de atenuación del medio se obtuvieron resultados similares entre Matlab y TSP, la implementación desarrollada en Matlab es muy sensible a la ventana de tiempo usada para hacer el cálculo, por lo que se debe revisar el paso y buscar una mejor implementación que sea más robusta.

Al aplicar la transformada de Radón a las trazas sísmicas, se obtuvieron resultados acordes a la teoría, pudiendo recuperar las ondas reflejadas a partir de las trazas completas, eso si para obtener este resultado, se debe tener en consideración que la componente de frecuencia máxima de las trazas, la cual es utilizada para hacer *downsampling*, debe ser lo más ajustada posible a los datos para evitar inducir ruido y aumentar de forma innecesaria el tiempo de procesamiento.

Finalmente, en la aplicación del filtro de atenuación inversa, se obtuvieron resultados similares entre Matlab y TSP, aunque el nivel de ruido de las trazas procesadas en Matlab fue mayor, lo cual se puede solucionar aplicando un filtro pasa banda nuevamente.

## **5.2 Recomendaciones**

Como recomendación de un trabajo a futuro, se sugiere continuar con el desarrollo del algoritmo, en el cual queda propuesta la etapa de migración de las trazas sísmicas y la representación en 3D de los mapas de velocidad obtenidos, así como el desarrollo del hardware necesario para hacer las mediciones en túneles, revisando la viabilidad de utilizar percutores mecánicos en lugar de cargas explosivas por temas de seguridad en el manejo de los implementos.

# Bibliografía

- [1] E.T.S.I. Telecomunicación, «Laboratorio de procesado de imagen,» Universidad de Valladolid, [En línea]. Available: [https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_06\\_07/io3/public\\_html/Sismografo/Sismografo.html](https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Sismografo/Sismografo.html). [Último acceso: 19 11 2016].
- [2] R. E. Sheriff y L. P. Geldart, Exploración sísmológica volumen I Historia, teoría y obtención de datos, Mexico: Noriega Limusa, 1991.
- [3] F. Guerrero, «Ciencias de la Tierra (geología - geografía),» [En línea]. Available: [http://csdelatierra2011proffauusto.blogspot.cl/2011/09/actividades-sismicas-y-volcanicas-del\\_16.html](http://csdelatierra2011proffauusto.blogspot.cl/2011/09/actividades-sismicas-y-volcanicas-del_16.html). [Último acceso: 12 11 2016].
- [4] H. Igel, «Universität München, Curso Applied Geophysics 1,» [En línea]. Available: <https://www.geophysik.uni-muenchen.de/~igel/downloads/agiseismicwaves.pdf>. [Último acceso: 19 10 2016].
- [5] P. Bormann, New Manual of Seismological Observatory Practice, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum, 2012.
- [6] Y. Wang, Seismic Inverse Q Filtering, Londres: Blackwell, 2008.
- [7] E. W. Weisstein, «"Rotation Matrix." From MathWorld--A Wolfram Web Resource.,» [En línea]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/RotationMatrix.html>. [Último acceso: 14 11 2016].
- [8] J. R. Andrews, Spectrum Amplitude -- Definition, Generation an Measurement, Washington: U.S. Department of Commerce, 1977.
- [9] O. Yilmaz, Investigations in Geophysics N°10, Seismic Data Analysis. Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data Vol. 1, Tulsa: Society of Exploration Geophysics, 2001.
- [10] J. Claerbout, Imaging the Earth's Interior, Palo Alto, California: Blackwell, 1985.

- [11] S. Jetschny, «PhD. Dissertation. Seismic prediction and imaging of geological structures ahead of a tunnel using surface waves,» Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- [12] AES Gener, «Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo,» Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, 2016. [En línea]. Available: <http://www.altomaipo.com/Pages/default.aspx>.
- [13] Amberg Technologies AG, Amberg TSP Plus Evaluation Manual, Regensdorf, 2015.
- [14] A. V. Oppenheim, Discrete-Time Signal Processing, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 1999.
- [15] R. Chi, Caracterización de Trazas Sísmicas en el Campo Cercano: Pisagua, Norte de Chile, Santiago: Universidad de Chile, 2015.
- [16] M. Sarajaervi, «Msc. Dissertation. Inversion of the Linear and Parabolic Radon Transform,» University of Bergen, Bergen, Norway, 2010.
- [17] MAXAM, *RIODIN, Dinamita Gelatinosa - Hoja de datos técnicos*, Madrid: Maxam, 2007.
- [18] Math/Science Nucleus, «Math/Science Nucleus,» [En línea]. Available: <http://www.ms-nucleus.org/membership/html/jh/earth/earthquakes/lesson1/earthquakes1f.html>. [Último acceso: 13 12 2015].
- [19] Z. Cao, «Radon transform and multiple attenuation, CREWES Research Report Volume 15,» CREWES Research Report, Alberta, 2003.