

MONITOREO DE VIBRACIONES Y MODELO DE ATENUACIÓN TEMPRANA DEL TÚNEL EL VOLCÁN

NOTA TÉCNICA

RESULTADOS MONITOREO DE VIBRACIONES POR TRONADURAS ETAPA I TÚNEL EL VOLCÁN

Preparado para:

ALTO MAIPO SpA – Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM)

Preparado por :

E-MINING TECHNOLOGY S.A.

Nombre Estudio : Monitoreo de Vibraciones y Modelo de Atenuación Temprana del Túnel El Volcán

Nombre documento : Nota Técnica Etapa I, Resultados Monitoreo de Vibraciones por Tronaduras en Túnel El Volcán

REGISTRO CONTROL DE EMISIÓN					
Por E-Mining Technology S.A.					
Fecha	Revisión	Descripción	Emitido por:	Revisado por:	Aprobado por:
23/03/2016	1.0	Emitido para revisión interna	F. Vanbrabant	C. Contreras	
24/03/2016	1.1	Emitido para revisión interna	C. Contreras	F. Sablureau	
06/04/2016	1.2	Emitido para revisión por parte de cliente	F. Sablureau	E. Hernández	R. Ojeda
20/04/2016	1.3	Documento Final post revisión del cliente	F. Sablureau	E. Hernández	R. Ojeda
Aprobación del Cliente: Patricio Del Fierro S. – Administrador de Contrato PHAM					

ÍNDICE

	<i>Página</i>
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS Y ALCANCES.....	3
3. ANTECEDENTES GENERALES DEL PROYECTO.....	4
4. CONCEPTOS GENERALES DE INTENSIDAD DE VIBRACIONES POR TRONADURA.....	7
5. INSTRUMENTACIÓN.....	10
5.1 INSTRUMENTACIÓN INTERIOR TÚNEL.....	10
5.2 INSTRUMENTACIÓN SUPERFICIE.....	12
6. DISEÑO DE TRONADURA.....	15
7. ETAPA DE RECOPIACIÓN DE DATOS.....	16
8. MODELO DE ATENUACIÓN DE VIBRACIONES POR TRONADURAS.....	21
9. MODELO DE PREDICCIÓN DE PPV EN SUPERFICIE.....	25
10. CONCLUSIONES.....	28
 ANEXO A. TABLA VALORES DE PPV Y SU EFECTO SOBRE MATERIALES Y ESTRUCTURAS.....	 29

1. INTRODUCCIÓN

Alto Maipo SpA se encuentra actualmente desarrollando el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), consistente en la construcción de dos centrales hidroeléctricas de paso y su respectiva red de túneles de transporte de agua. En este contexto, Alto Maipo SpA requiere determinar el efecto en superficie que tendrán las vibraciones generadas por las tronaduras de avance de uno de sus túneles, Túnel El Volcán, en el tramo que se construye mediante tronadura convencional. En respuesta a lo anterior, y de acuerdo a lo solicitado por Alto Maipo SpA, E-Mining Technology S.A. (EMT) se encuentra llevando a cabo un Plan de Monitoreo de Vibraciones y Construcción de un Modelo de Atenuación Temprana del Túnel El Volcán, que contempla el monitoreo de dos etapas dentro de la construcción del túnel. El presente documento, detalla los resultados de la primera etapa del monitoreo de vibraciones, referido a tronaduras realizadas entre los Pk 0+500 a 0+710, realizado entre fines de Diciembre 2015 y comienzos de Febrero de 2016.

2. OBJETIVOS Y ALCANCES

El objetivo general del estudio es la elaboración de un modelo de atenuación de vibraciones de campo lejano, a partir del monitoreo en dos etapas de las tronaduras de avance de la construcción del Túnel El Volcán, con el fin de evaluar tempranamente dentro del desarrollo del proyecto (específicamente, dentro de sus 2 primeros kilómetros), el nivel de vibraciones que pudieran alcanzar en superficie y validar el supuesto de nulo o imperceptible efecto asociado a las actividades de tronadura en el área del Monumento Natural El Morado. La selección de los dos tramos a monitorear en esta etapa temprana, también busca cubrir los principales tipos de roca a atravesar por el túnel, a lo largo del trazado que será construido por tronadura convencional.

En particular, el objetivo del monitoreo del primer tramo, consiste en obtener datos en un estado inicial del proyecto, mediante el registro de tronaduras por un período de un mes, buscando monitorear, durante dicho lapso, un total de al menos 12 tronaduras a partir del Pk 0+500. Asimismo, se contempla integrar al análisis de los datos de monitoreo, toda la información disponible de las tronaduras de avance, esta es, información geológica-geotécnica de la construcción del túnel, malla de perforación teórica, carguío teórico, secuencia de iniciación, entre otros. Con todo lo anterior, se busca estimar, mediante la construcción de un modelo de atenuación, el nivel de vibraciones que se espera en superficie por la ejecución de las tronaduras en el túnel en esta primera etapa del proyecto.

3. ANTECEDENTES GENERALES DEL PROYECTO

El Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo se ubica en el sector del Cajón del Maipo, Región Metropolitana, y consiste en la construcción de 2 centrales hidroeléctricas de paso y su respectiva red de túneles de transporte de agua. En Figura 1, se presenta la ubicación del proyecto, destacándose el área de estudio correspondiente al Túnel El Volcán, el cual corresponde al primer tramo del sistema de colección y transporte de agua hacia las futuras centrales y que conecta el Valle del Río El Volcán, a la altura de La Engorda, con el Valle del Río El Yeso aguas abajo del embalse El Yeso.

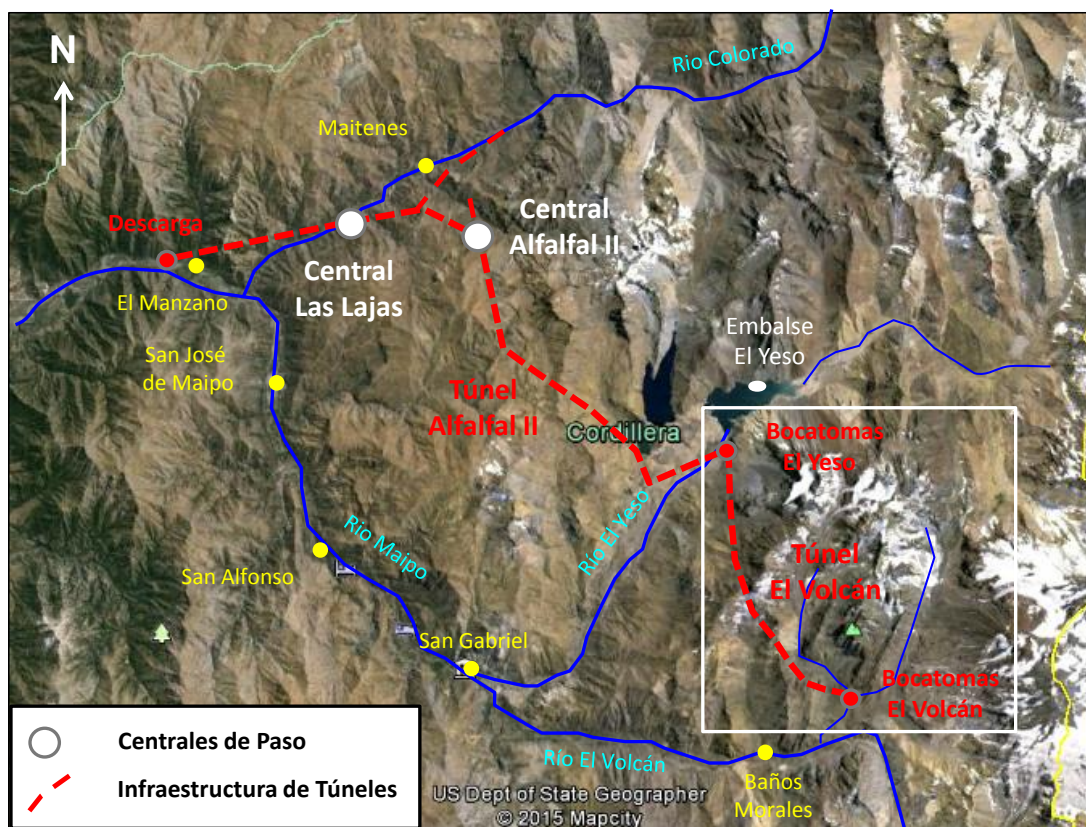


FIGURA 1. PHAM (EN RECUADRO EL ÁREA DE ESTUDIO)

El Túnel El Volcán posee 14 km de extensión y se construye desde dos frentes de avance (Figura 2): desde el sur, sector El Volcán (Pk 0+000), mediante tronadura convencional (Drill&Blasting, **D&B**); desde el norte, sector El Yeso (Pk 14+000), mediante tunelera (Tunnel Boring Machine, **TBM**). El trazado del túnel atraviesa aproximadamente entre el Pk 4+000 y el Pk 8+000 bajo el área del Monumento Natural El Morado, sector donde se contempla la construcción del túnel mediante TBM.

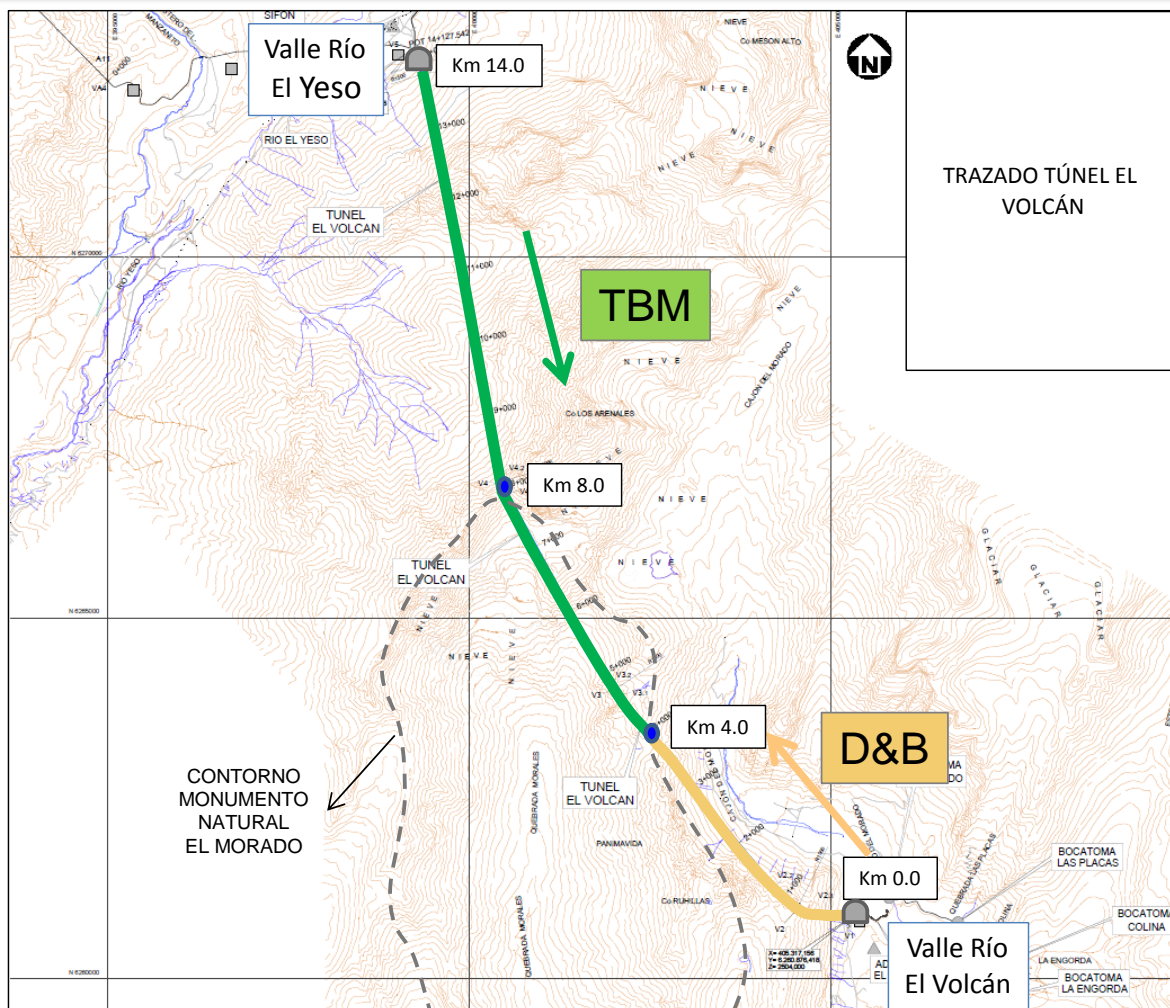


FIGURA 2. PLANO TRAZADO TÚNEL EL VOLCÁN

Como antecedente general, se tiene que el trayecto del Túnel El Volcán atraviesa 4 unidades geológicas principales (Formaciones): desde Este a Oeste tenemos la Formación Río Damas, Formación Lo Valdés, Formación Colimapu y Formación Abanico (Figura 3).

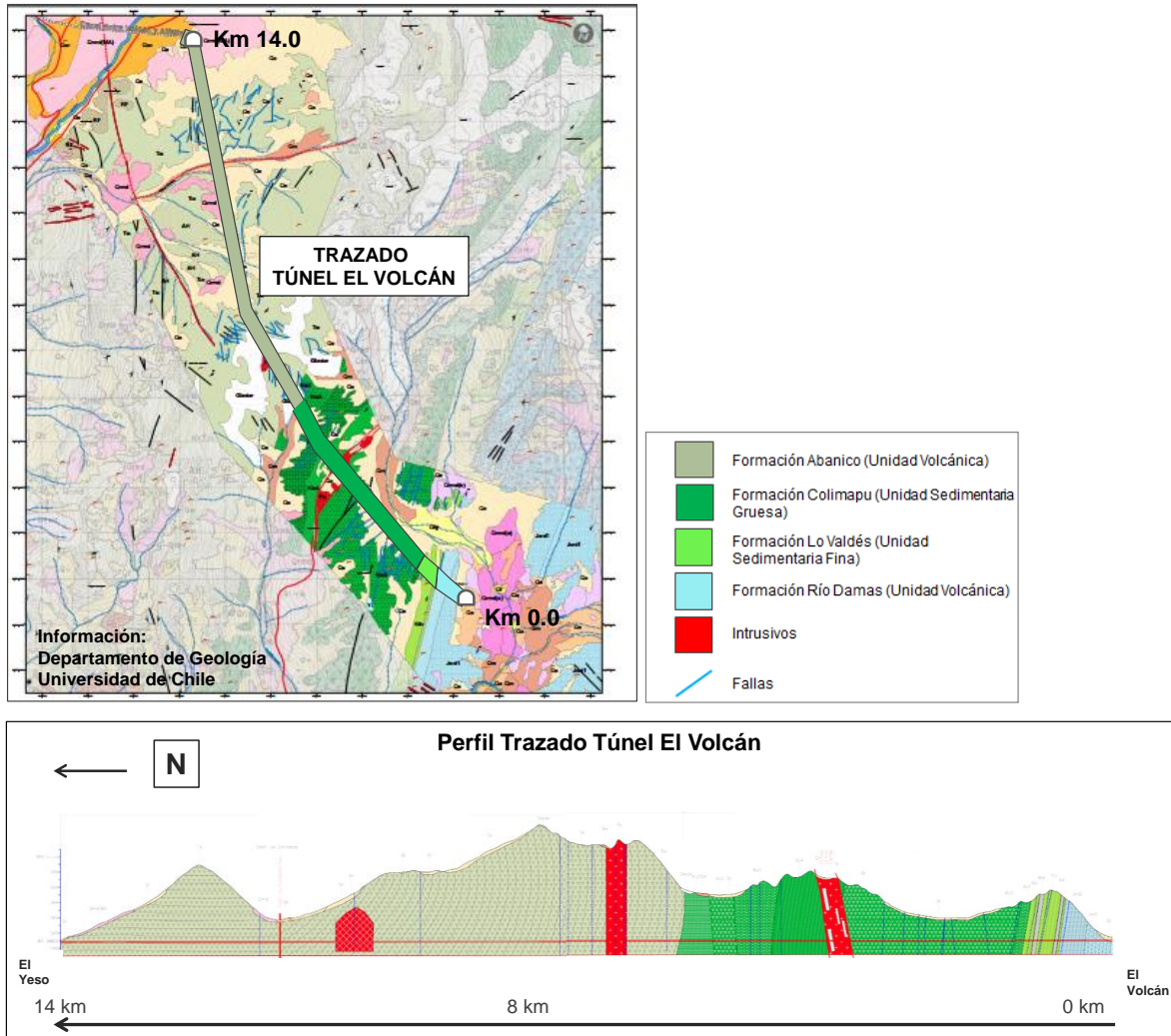


FIGURA 3. GEOLOGÍA TRAZADO TÚNEL EL VOLCÁN

Finalmente, se muestra a continuación la ubicación de los tramos seleccionados (Figura 4):

- Tramo 1: El objetivo del monitoreo de este tramo es la construcción temprana de un modelo de atenuación de vibraciones, entorno al Pk 0+500. El instrumental será instalado en un tramo al interior del túnel (Tramo 1) y un punto de superficie (Punto A). Este monitoreo contempla cubrir las tronaduras a efectuar en rocas de las formaciones Río Damas y Lo Valdés.
- Tramo 2: El objetivo del monitoreo de este tramo, es registrar las vibraciones por tronadura en un estado más avanzado del avance del túnel, entorno al PK 2+000, lugar donde se instalará instrumental de medición en túnel y superficie (Tramo 2 y Punto B, respectivamente), cubriendo las tronaduras a ser realizadas en la Formación Colimapu.

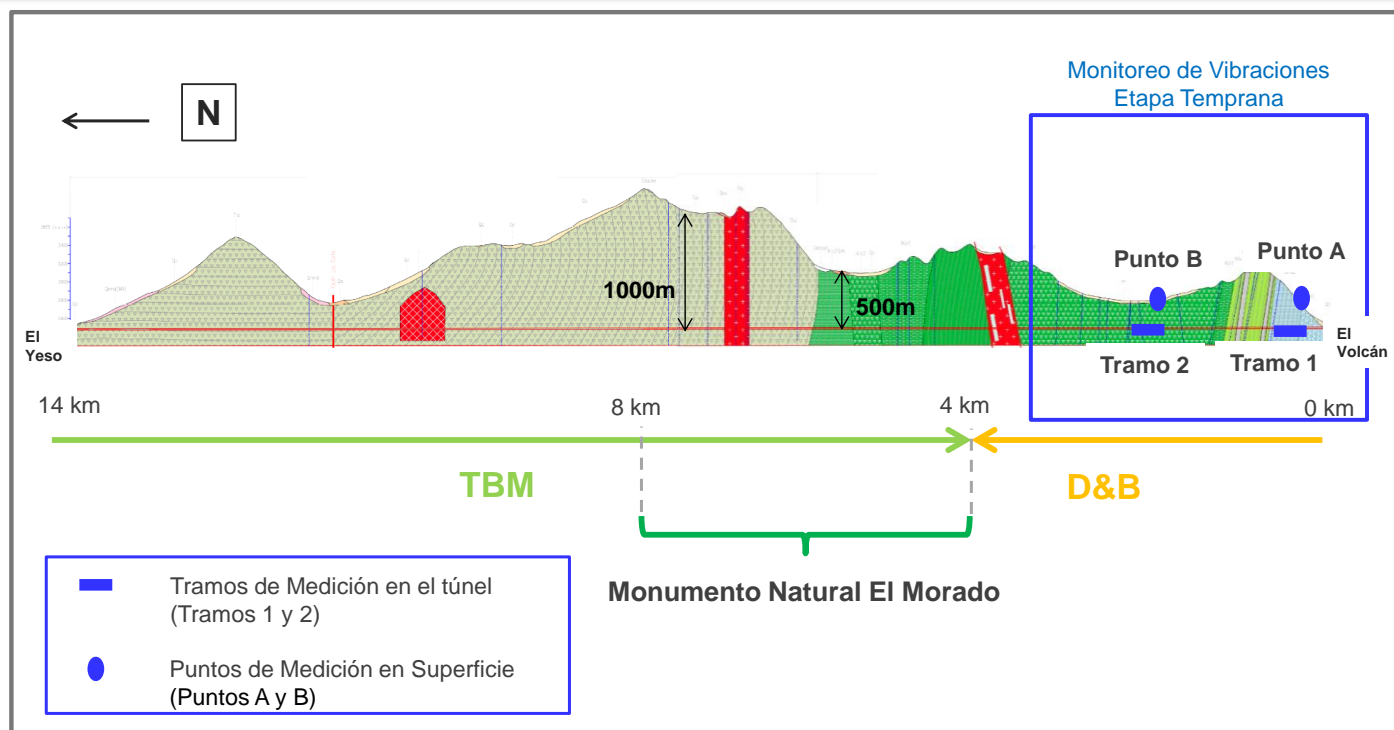


FIGURA 4. TRAMOS ESCOGIDOS PARA MONITOREO DE TRONADURAS TÚNEL EL VOLCÁN

4. CONCEPTOS GENERALES DE INTENSIDAD DE VIBRACIONES POR TRONADURA

Las tronaduras utilizadas en labores mineras generan un volumen de gases a alta temperatura y presión, que al expandirse realiza un trabajo mecánico de fragmentación de las rocas. Una parte del total de la energía liberada se consume en el trabajo útil de fragmentación y desplazamiento de rocas. El resto se disipa en otras formas de energía: térmica, luminosa, sónica, vibratoria, etc.

Entre el 5 y el 10 % de la energía producida se transmite a través de las rocas generando un campo de ondas de esfuerzos (stress waves), constituido por ondas volumétricas longitudinal (onda P) y transversal (ondas S), de forma cónica, es decir con simetría de rotación, que se propagan con su velocidad propia en el macizo rocoso. Las ondas P, más rápidas, son constituidas por un pulso de compresión seguido por una cola de tracción, y las ondas S por un doble pulso de cizalle (Figura 5).

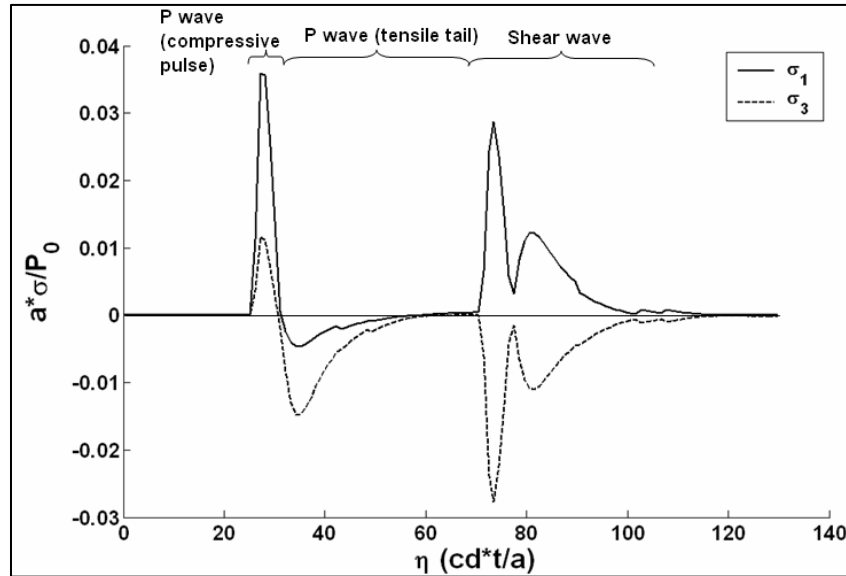


FIGURA 5. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAS ONDAS VOLUMÉTRICAS GENERADAS POR LA TRONADURA: ONDA P (PULSO DE COMPRESIÓN Y COLA DE TRACCIÓN) Y ONDA S. P_0 : PRESIÓN DE BARRENO, a : RADIO DE LA CARGA, cd : VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA P, t : TIEMPO, σ : ESFUERZOS

Para capturar y caracterizar esas ondas de esfuerzos, se necesita su registro en tres ejes ortogonales, por lo que se utilizan arreglos triaxiales, compuestos por 3 sensores, cada uno orientado en un eje, midiendo el movimiento (velocidad) de la roca por el paso de esas ondas.

Actualmente, se considera a la Velocidad Peak de Partícula (sigla en inglés PPV – Peak Particle Velocity), como un indicador de la amplitud de movimiento a la que una partícula es sometida por vibraciones y se define como la amplitud máxima de la suma vectorial de las tres componentes ortogonales de la velocidad de partícula, generada por una carga sola, en un medio confinado, es decir en ausencia de cara libre.

El PPV depende de varios factores:

- Presión de detonación, es decir presión de la onda de choque en el explosivo, la cual, para una detonación ideal, depende de la densidad del explosivo y de su velocidad de detonación (VOD).
- Presión de barreno, es decir la presión transmitida por la detonación al macizo rocoso por el intermedio de la pared del tiro, la cual depende del diámetro del tiro, del grado de acoplamiento de la carga a la roca, del confinamiento del tiro, de las propiedades dinámicas del macizo rocoso, etc.
- Forma del campo de onda, definido por la longitud de carga y del ratio entre velocidad de detonación y velocidad de propagación de ondas.

- Atenuación geométrica de las ondas, es decir distancia a la carga.
- Atenuación material de las ondas de esfuerzos, es decir el amortiguamiento inducido por el comportamiento no elástico del macizo rocoso.
- Posicionamiento relativo del geófono respecto a la carga.

La industria ha intentado simplificar esos mecanismos, proponiendo expresiones que relacionan el PPV (mm/s), la carga por retardo Q (kg), que expresa la influencia de la densidad y del diámetro de la carga sobre la presión de detonación y de barrenos, y la distancia del punto de monitoreo a la carga D (m), que describe las atenuaciones geométrica y material de las ondas y del medio, por el intermedio de un factor de atenuación. Así, una de las expresiones más general se presenta de la siguiente forma

$$PPV = k \left(\frac{D}{Q^\alpha} \right)^{-\beta} \quad \text{Ecuación 1}$$

con k un parámetro de ajuste y β el factor de atenuación. La expresión (D / Q^α) es conocida como distancia escalar.

Una forma de simplificar esta expresión, y dado que el objetivo del estudio es predecir el nivel de PPV (velocidad máxima de partícula) en superficie a partir del monitoreo de tronaduras al interior del túnel, es considerar que la variable principal que afecta el PPV es la distancia, para lo cual se empleará un modelo de atenuación geométrico simple, como se indica en la Ecuación 2. La simplificación anterior es válida también, al considerar la homogeneidad de los diseños de P&T a implementarse a lo largo del Tramo 1, donde las tronaduras presentan la misma longitud de carga, diámetro y tipo de explosivo.

$$PPV = \frac{K}{d^\lambda} \quad \text{Ecuación 2}$$

con d la distancia (m), K y λ parámetros de ajuste.

Por otro lado, numerosos estudios sobre los efectos de las vibraciones en las estructuras permiten comparar el efecto provocado por las tronaduras industriales con actividades de la vida cotidiana o eventos naturales.

Para tener una idea de lo que representan las intensidades PPV y sus efectos en diversos materiales y estructuras, se presenta en la Tabla 1 un resumen del resultado de varios investigadores y organizaciones, a partir de un trabajo presentado por Wesley L. Bender en el 2007 Workshops of the Golden West Chapter of the International Society of Explosives Engineers,

y complementado por antecedentes de la industria minera. En Anexo A se presenta la tabla original del trabajo de Wesley.

TABLA 1. VALORES DE PPV (mm/s) Y SUS EFECTOS EN MATERIALES Y ESTRUCTURAS

PPV (mm/s)	MATERIALES / ESTRUCTURAS	EFFECTOS
>2000	Explosivo en roca	Ruptura de roca
500-1500	Explosivo en concreto	Ruptura masiva de concreto
120-400	Explosivo cerca de cañería bajo tierra	No hay daño
70-250	Explosivo cerca de roca	Grietas tensionales
25-200	Explosivo cerca de concreto	Agrietamiento
20-50	Túneles	Caídas de rocas en túneles subterráneos
<25	Rocas	No hay daño
20-25	Bloques de concreto	Agrietamiento
25	Estructura residencial	Daño severo
10-20	Estructura residencial	Daño menor
10	Estructura residencial	Probable daño
<7	Estructura residencial	No hay daño
2,0-2,5	Estructura residencial	Equivalente clavar en la pared
1,0 -1,5	Estructura residencial	Equivalente a un portazo
0,1 -1,0	Estructura residencial	Equivalente a saltar en el piso

5. INSTRUMENTACIÓN

El monitoreo de vibraciones fue efectuado mediante instrumental de alta sensibilidad, instalado y registrando de manera continua, tanto en el interior del túnel como en la superficie. Se utilizaron geófonos con diferentes rangos de sensibilidad, lo que permite el estudio de ondas sísmicas con características de frecuencia diferentes. Para el estudio adecuado de las vibraciones, en este caso, se utilizaron dos tipos de sensores, para el túnel y para superficie. A continuación se presenta el detalle del instrumental instalado:

5.1 INSTRUMENTACIÓN INTERIOR TÚNEL

En el interior del túnel se instalaron 3 arreglos triaxiales cementados de 28 Hz, fabricados por la empresa Blastmine SpA, con geófonos uniaxiales de marca Geospace. Este tipo de sensor permite el registro del espectro de frecuencia alto de ondas generadas por las tronaduras, en sitios más cercanos a estas. Cada arreglo fue instalado a una profundidad de 2 m desde la pared del túnel, en el interior de un tiro de 4" perforado de manera subhorizontal en la roca (-15°). Para cada instrumento se fabricó un nicho donde se dispuso de una caja de seguridad, la cual albergó un datalogger (Geocentinela) para la captura de la información y una batería para energizar al equipo (Figura 6).

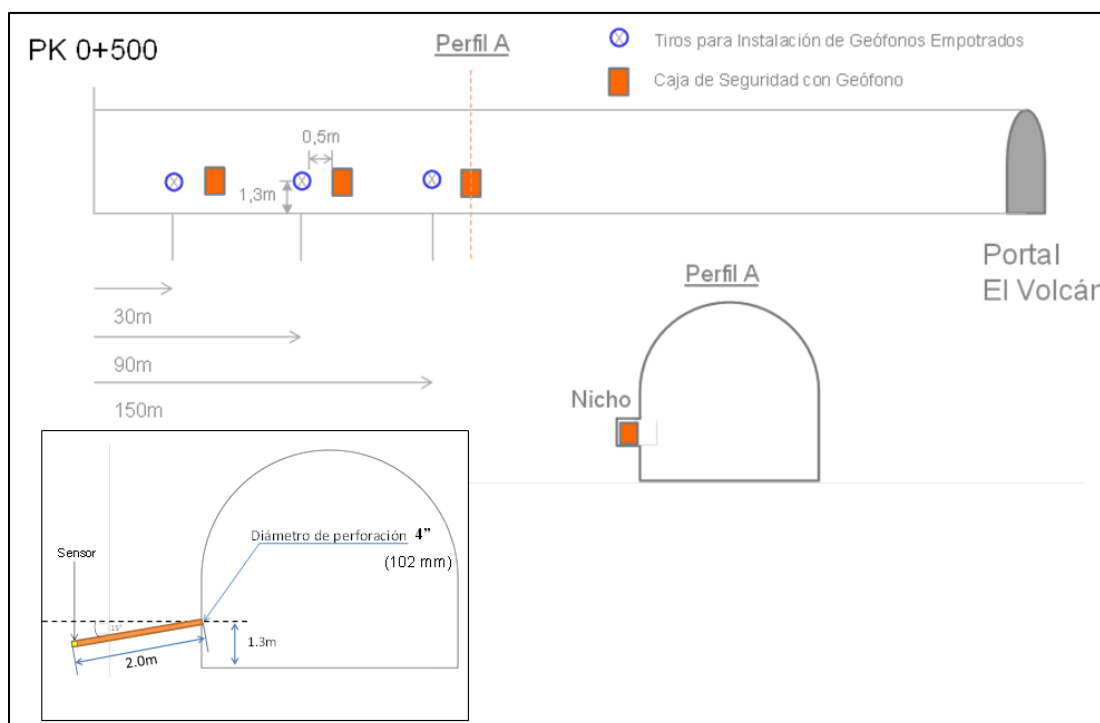


FIGURA 6. DISEÑO DE INSTALACIÓN DE INSTRUMENTOS AL INTERIOR DEL TÚNEL.

La ubicación de los geófonos estaba estipulada a distancias de 150 m, 90 m y 30 m desde la frente de avance asociada a la primera tronadura a monitorear (Pk 0+500), es decir, en los puntos Pk 0+350 (G#1), Pk 0+410 (G#2) y Pk 0+350 (G#3), respectivamente. Sin embargo, la ubicación del punto G#2 coincidió con la de un nicho tipo troya, utilizado para la acumulación de marina, cruce de vehículos y de ubicación de refugio minero, por lo que se definió, en conjunto con personal de PHAM, desplazar la ubicación de este geófono inmediatamente al costado de la troya, es decir, en el Pk 0+425. La disposición final del instrumento, cumplió el objetivo técnico originalmente planteado.

La Figura 7 muestra la instalación de los 3 geófonos al interior del túnel.



FIGURA 7. INSTALACIÓN DE GEÓFONOS INTERIOR TÚNEL EL VOLCÁN

5.2 INSTRUMENTACIÓN SUPERFICIE

En superficie se instaló un arreglo triaxial de 4.5 Hz con geófonos uniaxiales de marca Geospace, que permite el estudio de ondas con frecuencias bajas, que podrán ser registradas a mayor distancia de los puntos de tronaduras. Estos geófonos también registran actividad sísmica local y regional.

La ubicación de este punto, G#4, se revisó previamente con planos topográficos y fotos satelitales. Una vez en terreno, utilizando equipo GPS, personal de EMT y PHAM procedieron a buscar el afloramiento más cercano a la proyección de la traza del túnel, que cumpliera con los requisitos de presentar un acceso seguro y expedito (tomando en cuenta que se debía acceder semanalmente al lugar para el rescate de datos) y que permitiera la instalación del geófono sobre un afloramiento de roca subhorizontal, esto último, de gran importancia para obtener un registro óptimo de las vibraciones.

La ubicación final que se obtuvo para la instalación del instrumento, cumple el objetivo de encontrarse a una distancia tal de la traza del túnel en su proyección vertical, que permite registrar las vibraciones por tronadura que pudiesen alcanzar la superficie.

La Figura 8 presenta la ubicación aproximada del geófono G#4 de superficie, mientras que la Figura 9 muestra los instrumentos instalados en dicho sector.



FIGURA 8. UBICACIÓN GEÓFONO G#4 SUPERFICIE

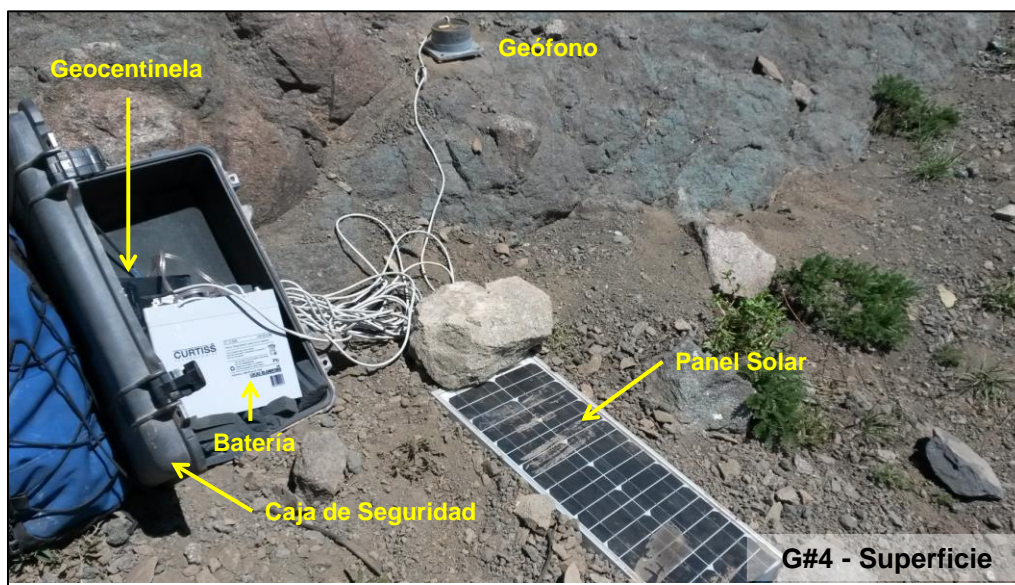


FIGURA 9. INSTALACIÓN GEÓFONO G#4 SUPERFICIE

Las coordenadas finales de los instrumentos instalados, tanto en coordenadas del proyecto (GENER) como en UTM WGS84, se presentan en Tabla 2.

TABLA 2. COORDENADAS UBICACIÓN GEÓFONOS TRAMO 1 PROYECTO MONITOREO ETAPA TEMPRANA

Geofono N°	Pk	COORDENADAS				
		GENER		WGS 84		Z
		X	Y	S _x	S _y	
		Este	Norte	Este	Norte	
G#1	0+351,12	404966.80	6260891.06	404778.34	6260533.05	2497.80
G#2	0+426,73	404890.55	6260895.36	404702.13	6260537.35	2496.21
G#3	0+470,90	404846.71	6260901.93	404658.32	6260543.92	2495.42
G#4	Superficie	405011.35	6260963.36	404822.86	6260605.30	2653.54

Para la obtención de estas coordenadas, personal de Topografía de PHAM procedió a levantar las coordenadas de ubicación de los 4 geófonos. En el caso de los geófonos localizados en el túnel, en primer lugar se determinó la coordenada collar del tiro en cual se instaló cada geófono, y luego, en post-proceso, se determinó la coordenada final del geófono, considerando la profundidad (2m) a la que se encontraba dentro del tiro.

En Figura 10, se muestra una planta con la ubicación de los puntos de instalación de los geófonos, tanto en superficie como en el túnel (traza proyectada).

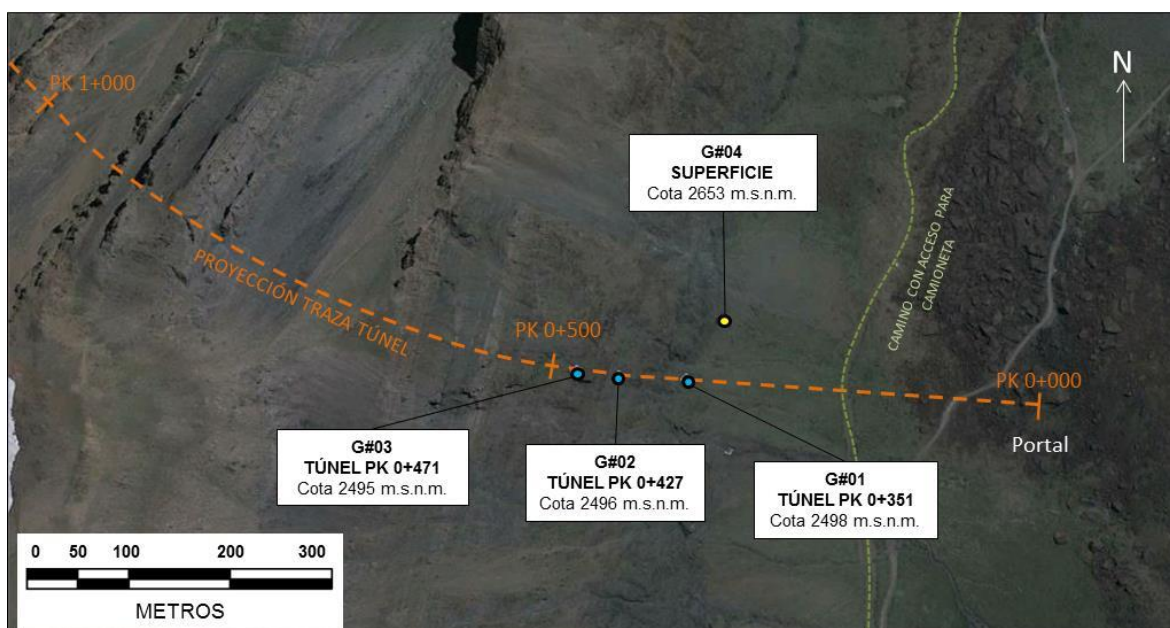


FIGURA 10. PLANTA UBICACIÓN RED DE GEÓFONOS DE SISTEMA DE MONITOREO TRAMO 1

A partir de la información anterior, se pudo determinar la distancia entre el geófono de superficie y cada uno de los geófonos instalados en el túnel, la cual se indica en Tabla 3.

TABLA 3. DISTANCIA ENTRE GEÓFONO DE SUPERFICIE Y GEÓFONOS EN INTERIOR TÚNEL

Geofono	Pk	Distancia al geófono de superficie (G#4)
G#1	0+351,12	180m
G#2	0+426,73	210m
G#3	0+470,90	235m

Finalmente, como antecedente geológico aportado por personal de PHAM, se dispone del mapeo geológico y de caracterización geotécnica del macizo rocoso disparo a disparo, realizado por la empresa Skava Amberg Multiconsult (SAM), el cual arrojó la siguiente información acerca de las unidades de roca reconocidas en el tramo monitoreado:

- Entre Pk 0+160 y Pk 0+605: Litologías Andesita y Tobas, pertenecientes a la Formación Río Damas (antes del Pk 0+160 el túnel atravesó exclusivamente material de relleno).
- Desde Pk 0+605 a Pk 0+710: Litología Arenisca y Lutitas, pertenecientes a la Formación Lo Valdés.

6. DISEÑO DE TRONADURA

Del diseño de tronadura provisto por PHAM, se obtiene la información referida al diagrama de perforación y secuencia de los disparos de avance del túnel. Este diseño consiste en 78 perforaciones de 45 mm, 2 escareados de 102 mm y tacos de 0.4 m (Figura 11).

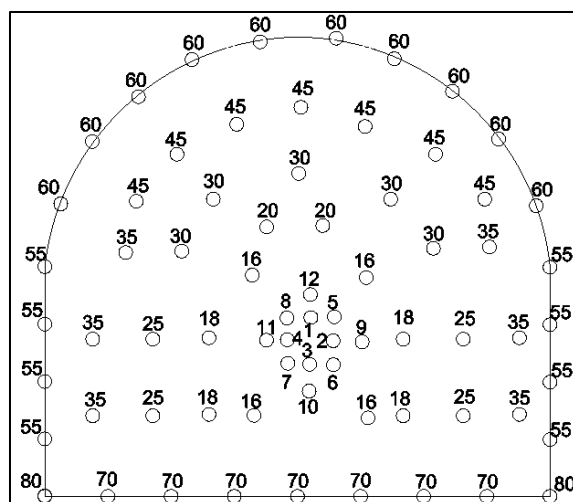


FIGURA 11. DIAGRAMA DE PERFORACIÓN Y SECUENCIA DE TRONADURAS DE AVANCE, TÚNEL EL VOLCAN

Por su parte, el área de las tronaduras es de 23.8 m² y el avance teórico por tronadura de 3.8 m.
Para cada tipo de tiro, el carguío fue el siguiente:

- Descarga: ANFO
- Producción: ANFO
- Zapateras: Riolin
- Cajas: Softron
- Corona: Softron

7. ETAPA DE RECOPIACIÓN DE DATOS

La etapa de monitoreo de vibraciones se extendió entre el 28 de Diciembre de 2015 y el 10 de Febrero de 2016, período en el cual se realizaron 61 tronaduras en el túnel. De estas 61 tronaduras, 60 fueron registradas por los instrumentos de monitoreo. A su vez, de estas 60 tronaduras monitoreadas, 37 fueron registradas por el sistema completo (4 Geocentinelas), 14 fueron registradas por 3 Geocentinelas, 9 fueron registradas por 1 Geocentinel y 1 tronadura no fue registrada por ningún instrumento. En Tabla 4, se muestra el resumen de este registro.

TABLA 4. DETALLE DE REGISTRO DE TRONADURAS

Sistema Monitoreo	Tronaduras Registradas
Por 4 Geocentinelas	37
Por 3 Geocentinelas	14
Por 1 Geocentinelas	9
Tronaduras No Registradas	1
TOTAL	61

La siguiente tabla (Tabla 5) muestra el detalle de los registros de monitoreo de cada tronadura, integrando la información entregada por los Geocentinelas y los datos reportados en los protocolos de tronaduras de PHAM.

TABLA 5. REGISTROS DE MONITOREO DE TRONADURAS

N° TRONADURA		INFORMACIÓN REGISTRADA EN PROTOCOLOS DE TRONADURA					INFORMACIÓN REGISTRADA EN GEOCENTINELAS					
N°	Tronadura	Fecha	Hora	Desde (Pk)	Hasta (Pk)	Factor de Carga	Fecha	Hora	G#1	G#2	G#3	G#4
1	164	28-12-2015	13:25	498.15	501.40	2.69	28-12-2015	13:21	si	si	si	si
2	165	28-12-2015	2:55	501.40	504.70	2.54	29-12-2015	2:53	no	si	no	si
3	166	29-12-2015	-	504.70	508.00	2.69	29-12-2015	13:50	no	si	no	si
4	167	29-12-2015	3:45	508.00	511.20	2.87	30-12-2015	3:45	no	no	no	no
5	168	30-12-2015	-	511.20	514.20	2.82	30-12-2015	14:33	si	si	si	si
6	169	30-12-2015	-	514.20	517.10	2.86	31-12-2015	4:23	si	si	si	si
7	170	31-12-2015	-	517.10	520.30	2.94	01-01-2016	3:45	si	si	si	si
8	171	01-01-2016	-	520.30	524.10	2.94	02-01-2016	0:57	si	si	si	si
9	172	02-01-2016	-	524.10	527.80	2.94	02-01-2016	23:51	si	si	si	si
10	173	03-01-2016	14:15	527.80	531.60	2.94	03-01-2016	14:17	si	si	si	si
11	174	04-01-2016	17:05	531.60	535.40	2.94	04-01-2016	17:07	si	si	si	si
12	175	04-01-2016	5:00	535.40	539.00	2.94	05-01-2016	5:06	si	si	si	si
13	176	05-01-2016	19:40	539.00	543.10	2.94	05-01-2016	19:43	si	si	si	si
14	177	06-01-2016	8:50	543.10	546.80	2.94	06-01-2016	8:51	si	si	si	si
15	178	06-01-2016	2:25	546.80	549.00	2.94	07-01-2016	2:23	si	si	si	si
16	179	07-01-2016	19:45	549.00	552.70	2.77	07-01-2016	19:38	si	si	si	si
17	180	07-01-2016	7:59	552.70	555.60	2.77	08-01-2016	7:59	si	si	si	si
18	181	08-01-2016	4:30	555.60	559.30	2.82	09-01-2016	4:31	si	si	si	si
19	182	09-01-2016	23:30	559.30	563.00	2.94	09-01-2016	23:26	si	si	si	si
20	183	10-01-2016	14:45	563.00	565.40	2.94	10-01-2016	14:42	si	si	si	si
21	184	10-01-2016	3:20	565.40	568.40	2.94	11-01-2016	3:18	si	si	si	si
22	185	11-01-2016	14:45	568.40	572.20	2.89	11-01-2016	14:49	si	si	si	si
23	186	11-01-2016	3:50	572.20	575.65	2.89	12-01-2016	3:49	si	si	si	si
24	187	12-01-2016	19:56	575.65	577.60	2.89	12-01-2016	19:56	si	si	si	si
25	188	13-01-2016	7:45	577.60	-	2.82	13-01-2016	7:42	si	si	si	si
26	189	14-01-2016	14:00	581.00	584.05	2.87	14-01-2016	14:06	si	si	si	si
27	190	14-01-2016	7:05	584.05	587.10	2.89	15-01-2016	7:05	si	si	si	si
28	191	15-01-2016	23:35	587.10	590.50	2.89	15-01-2016	23:34	si	si	si	si
29	192	16-01-2016	17:00	590.50	594.50	2.89	16-01-2016	17:05	si	si	si	si
30	193	16-01-2016	8:00	594.50	597.40	2.89	17-01-2016	7:59	si	si	si	si
31	194	17-01-2016	22:35	597.40	601.10	2.89	17-01-2016	22:34	si	si	si	si
32	195	18-01-2016	14:10	601.10	603.10	2.89	18-01-2016	14:11	si	si	si	si
33	196	18-01-2016	2:35	603.10	606.30	2.89	19-01-2016	2:33	si	si	si	si
34	197	19-01-2016	19:30	606.30	610.40	2.89	19-01-2016	19:34	si	si	si	si
35	198	19-01-2016	7:45	610.40	614.10	2.89	20-01-2016	7:47	si	si	si	si
36	199	20-01-2016	0:05	614.10	617.30	2.89	21-01-2016	0:03	si	si	si	si
37	200	20-01-2016	20:10	617.30	621.30	2.9	21-01-2016	20:05	si	si	si	si
38	201	22-02-2016	12:20	621.30	625.20	2.9	22-01-2016	12:19	si	si	si	si
39	202	22-02-2016	8:00	625.20	629.10	2.9	23-01-2016	7:57	si	si	si	si
40	203	23-01-2016	4:10	629.10	633.00	2.9	24-01-2016	4:11	si	no	si	si
41	204	24-01-2016	19:40	633.00	636.80	2.9	24-01-2016	19:41	si	no	si	si
42	205	25-01-2016	18:45	636.80	640.60	2.9	25-01-2016	18:40	si	no	si	si
43	206	26-01-2016	18:30	640.60	644.40	2.9	26-01-2016	18:29	si	no	si	si
44	207	28-01-2016	20:10	644.40	648.20	2.87	28-01-2016	20:09	si	no	si	si
45	208	30-01-2016	5:45	648.20	652.20	2.61	30-01-2016	5:52	si	no	si	si
46	209	31-01-2016	-	652.20	656.00	2.72	31-01-2016	1:02	si	no	si	si
47	210	31-01-2016	23:25	656.00	660.10	2.72	31-01-2016	23:23	si	no	si	si
48	211	01-02-2016	16:40	660.10	664.00	3.00	01-02-2016	16:40	si	no	si	si
49	212	02-02-2016	6:40	664.00	667.80	2.92	02-02-2016	6:36	si	no	si	si
50	213	02-02-2016	19:35	667.80	671.80	2.92	02-02-2016	19:36	si	no	si	si
51	214	03-02-2016	7:35	671.80	675.70	2.92	03-02-2016	7:35	si	no	si	si
52	215	03-02-2016	23:25	675.70	679.60	2.92	03-02-2016	23:24	si	no	si	si
53	216	04-02-2016	19:00	679.60	683.40	2.92	04-02-2016	18:56	si	no	si	si
54	217	05-02-2016	14:15	683.40	687.20	2.92	05-02-2016	14:15	no	no	no	si
55	218	06-02-2016	-	687.20	690.80	2.92	06-02-2016	5:15	no	no	no	si
56	219	06-02-2016	2:35	690.80	694.60	2.92	07-02-2016	2:34	no	no	no	si
57	220	07-02-2016	20:15	694.60	698.40	2.92	07-02-2016	20:34	no	no	no	si
58	221	08-02-2016	11:30	698.40	702.20	2.92	08-02-2016	11:35	no	no	no	si
59	222	09-02-2016	3:30	702.20	706.00	2.92	09-02-2016	14:45	no	no	no	si
60	223	10-02-2016	2:00	706.00	709.70	2.92	10-02-2016	1:55	no	no	no	si

La tronadura de las 18:37 hrs del día 13-01-2016, no posee información de protocolo de tronadura, por lo que no se consideró en el análisis de los datos registrados.

En resumen, en el túnel se obtuvieron 138 registros, para distancia entre 27 y 366 m entre la frente y los geófonos, y un PPV entre 0,5 y 16,3 mm/s (Figura 12). Las distancias fueron estimadas calculando la coordenada de cada frente de avance (para las 61 tronaduras), a partir del levantamiento topográfico de los geófonos del túnel, asumiendo un túnel lineal para el tramo.

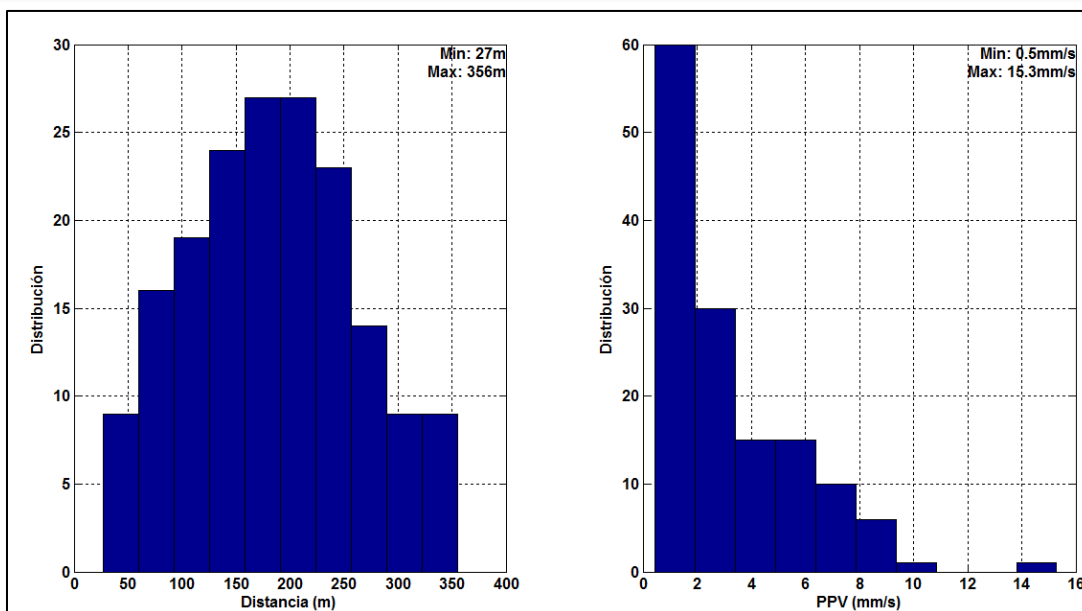


FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN DE DISTANCIAS ENTRE TRONADURAS Y GEÓFONOS (IZQUIERDA) Y DE PPV (DERECHA) PARA LOS REGISTROS DEL INTERIOR DEL TÚNEL.

En superficie, se registraron 59 tronaduras, para distancias entre 255 y 430 m, y PPV entre 0,8 y 8,2 mm/s (Figura 13).

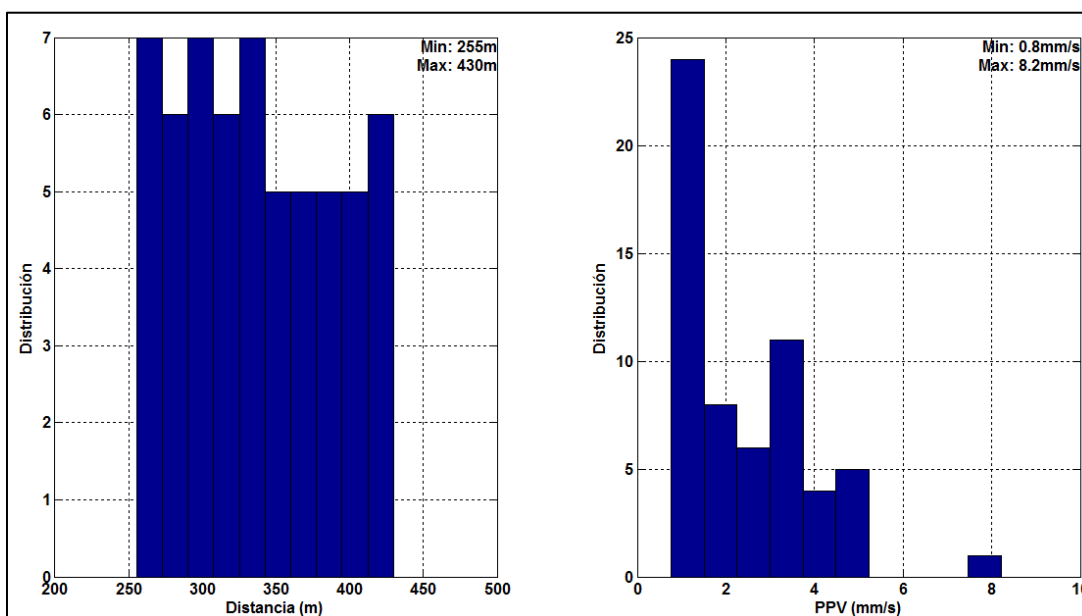


FIGURA 13. DISTRIBUCIÓN DE DISTANCIAS ENTRE TRONADURAS Y GEÓFONOS (IZQUIERDA) Y DE PPV (DERECHA) PARA LOS REGISTROS DE SUPERFICIE

Respecto a las frecuencias registradas, no se observan diferencias significativas entre túnel y superficie (Figura 14).

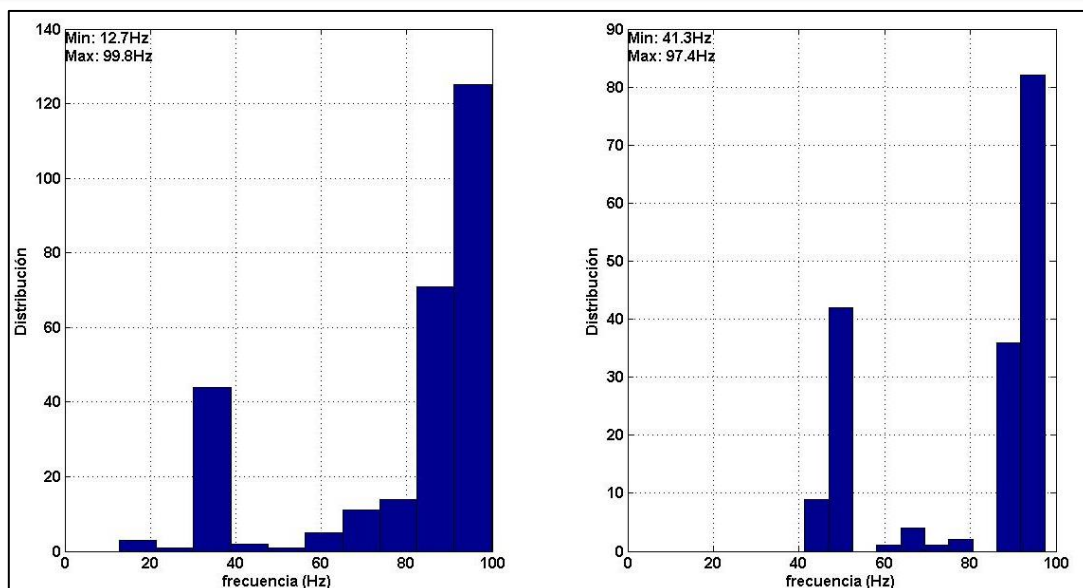


FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA EN EL INTERIOR TÚNEL (IZQUIERDA) Y LA SUPERFICIE (DERECHA)

Por otra parte, en relación a los registros de velocidades obtenidos para las tronaduras al interior del túnel, se puede mencionar que, de acuerdo a la Figura 15, la cual toma como ejemplo el registro de la tronadura N°193 por el geófono G#3, una tronadura de avance considera un gran número de cargas, con distintos tipos de explosivo, y con una secuencia de iniciación calculada para favorecer la fragmentación y arranque del material de la frente. En la gráfica los primeros tiros de alivio generan cada uno una onda elemental (P y S). Luego, se utiliza el mismo número de detonador, es decir el mismo retardo para varias cargas en los tiros de producción, cajas, corona y zapatera, lo que implica que se suman las velocidades de ondas que se superponen, generando un valor máximo para la amplitud de onda (PPV), como se muestra en la (Figura 15).

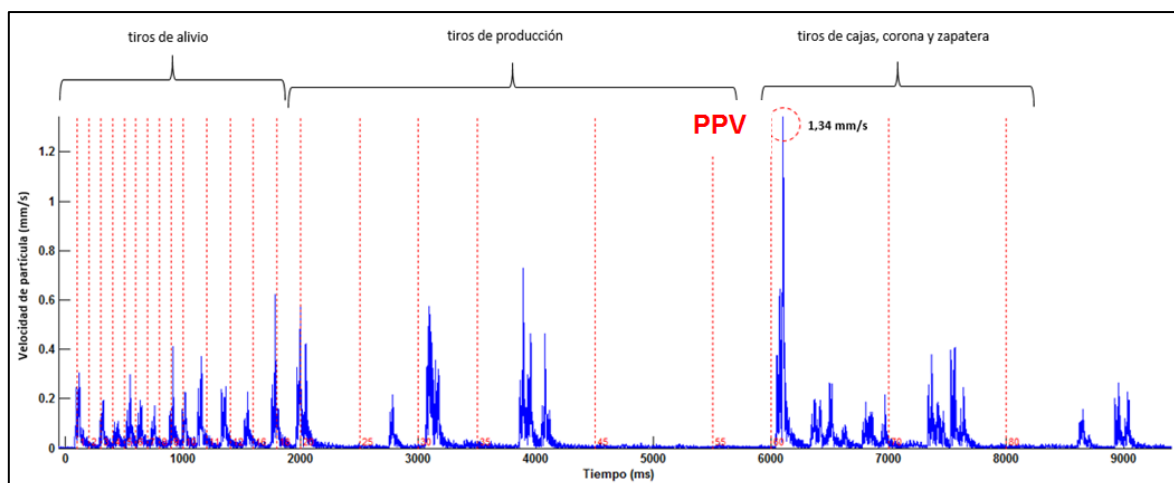


FIGURA 15. EJEMPLO DE TREN DE ONDAS MONITOREADO (SUMA VECTORIAL, TRONADURA N°193, GEÓFONO G#3) CON LOS RETARDOS TEÓRICOS. EL CÍRCULO ROJO INDICA EL PPV.

La Tabla 6, muestra un resumen de los valores de PPV máximos registrados por los 4 geófonos para las distintas tronaduras.

TABLA 6. PPV REGISTRADOS POR GEÓFONO

N°	Tronadura	Desde (Pk)	Hasta (Pk)	Fecha	Hora	REGISTROS			
						G01	G02	G03	G04
1	164	498.15	501.40	28-12-2015	13:21	5.33	8.89	15.29	4.34
2	165	501.40	504.70	29-12-2015	2:53		7.87		14.01
3	166	504.70	508.00	29-12-2015	13:50		8.44		6.01
4	167	508.00	511.20	30-12-2015	3:45				
5	168	511.20	514.20	30-12-2015	14:33	5.05	5.76	9.48	7.60
6	169	514.20	517.10	31-12-2015	4:23	4.19	4.8	5.62	5.99
7	170	517.10	520.30	01-01-2016	3:45	6.27	6.51	8	5.99
8	171	520.30	524.10	02-01-2016	0:57	7.98	8.76	8.74	6.91
9	172	524.10	527.80	02-01-2016	23:51	6.54	7	7.35	5.91
10	173	527.80	531.60	03-01-2016	14:17	5.92	6.6	5.66	5.14
11	174	531.60	535.40	04-01-2016	17:07	4.85	6.21	6.84	8.48
12	175	535.40	539.00	05-01-2016	5:06	6.6	7.7	6.04	8.84
13	176	539.00	543.10	05-01-2016	19:43	4.13	5.61	4.2	7.89
14	177	543.10	546.80	06-01-2016	8:51	4.96	6.85	5.03	8.76
15	178	546.80	549.00	07-01-2016	2:23	5.42	6.3	3.75	8.04
16	179	549.00	552.70	07-01-2016	19:38	3.98	5.71	3.18	6.74
17	180	552.70	555.60	08-01-2016	7:59	3.22	4.1	2.44	5.77
18	181	555.60	559.30	09-01-2016	4:31	2.63	4	2.29	5.94
19	182	559.30	563.00	09-01-2016	23:26	2.36	4.09	1.76	7.46
20	183	563.00	565.40	10-01-2016	14:42	2.28	3.31	1.38	4.04
21	184	565.40	568.40	11-01-2016	3:18	2.55	3.1	1.73	5.24
22	185	568.40	572.20	11-01-2016	14:49	2.65	2.98	1.55	5.27
23	186	572.20	575.65	12-01-2016	3:49	3.13	3.67	2.05	6.23
24	187	575.65	577.60	12-01-2016	19:56	1.67	2.39	0.99	3.29
25	188	577.60	-	13-01-2016	7:42	2.68	3.36	1.52	4.66
26	189	581.00	584.05	14-01-2016	14:06	2.07	2.59	1.3	3.14
27	190	584.05	587.10	15-01-2016	7:05	1.98	2.99	1.45	4.49
28	191	587.10	590.50	15-01-2016	23:34	1.6	4.32	1.3	3.93
29	192	590.50	594.50	16-01-2016	17:05	1.38	1.93	0.82	1.76
30	193	594.5	597.40	17-01-2016	7:59	1.84	4.03	1.34	1.79
31	194	597.4	601.10	17-01-2016	22:34	1.54	2.62	0.83	1.67
32	195	601.1	603.10	18-01-2016	14:11	1.02	2.13	0.7	1.47
33	196	603.1	606.30	19-01-2016	2:33	1.16	2.7	0.68	1.30
34	197	606.3	610.40	19-01-2016	19:34	2.27	4.77	1.31	3.29
35	198	610.4	614.10	20-01-2016	7:47	2.1	3.01	0.99	2.05
36	199	614.1	617.30	21-01-2016	0:03	1.62	3.24	0.88	2.46
37	200	617.3	621.30	21-01-2016	20:05	1.28	2.79	0.74	1.76
38	201	621.30	625.20	22-01-2016	12:19	1.28	2.51	0.7	2.01
39	202	625.2	629.10	23-01-2016	7:57	1.73	3.84	1.02	2.68
40	203	629.1	633.00	24-01-2016	4:11	1.47		0.89	3.00
41	204	633	636.80	24-01-2016	19:41	0.97		0.65	2.22
42	205	636.80	640.60	25-01-2016	18:40	1.29		0.67	1.66
43	206	640.6	644.40	26-01-2016	18:29	1.36		0.62	1.74
44	207	644.4	648.20	28-01-2016	20:09	1.46		0.7	1.89
45	208	648.2	652.20	30-01-2016	5:52	1.57		0.75	2.99
46	209	652.2	656.00	31-01-2016	1:02	1.75		0.67	4.27
47	210	656	660.10	31-01-2016	23:23	1.64		0.67	3.19
48	211	660.1	664.00	01-02-2016	16:40	1.29		0.6	2.61
49	212	664	667.80	02-02-2016	6:36	0.87		0.46	2.36
50	213	667.8	671.80	02-02-2016	19:36	1.07		0.51	2.15
51	214	671.8	675.70	03-02-2016	7:35	1.01		0.53	1.57
52	215	675.7	679.60	03-02-2016	23:24	0.82		0.53	1.81
53	216	679.6	683.40	04-02-2016	18:56	0.97		0.46	1.57
54	217	683.4	687.20	05-02-2016	14:15				1.37
55	218	687.20	690.80	06-02-2016	5:15				1.45
56	219	690.8	694.60	07-02-2016	2:34				1.95
57	220	694.6	698.40	07-02-2016	20:34				5.56
58	221	698.4	702.20	08-02-2016	11:35				2.00
59	222	702.2	706.00	09-02-2016	3:27				1.40
60	223	706	709.70	10-02-2016	1:55				1.35

Con los registros de PPV por geófono para cada tronadura, se estableció la siguiente secuencia de trabajo:

- Con los datos de los geófonos interior túnel (G#1, G#2 y G#3), se procedió a ajustar un modelo de predicción de PPV a distintas distancias, correspondiente a un modelo de atenuación de vibraciones por tronaduras.
- Los resultados de este modelo, fueron comparados con los valores de PPV obtenidos en la superficie (geófono G#4), estableciéndose un factor de amplificación, o de atenuación, en función de las condiciones locales superficiales, para predecir los PPV que finalmente se estiman que alcancen la superficie.

8. MODELO DE ATENUACIÓN DE VIBRACIONES POR TRONADURAS

La Figura 16, presenta los PPV registrados en el interior del túnel para cada uno de los 3 arreglos triaxiales de geófonos.

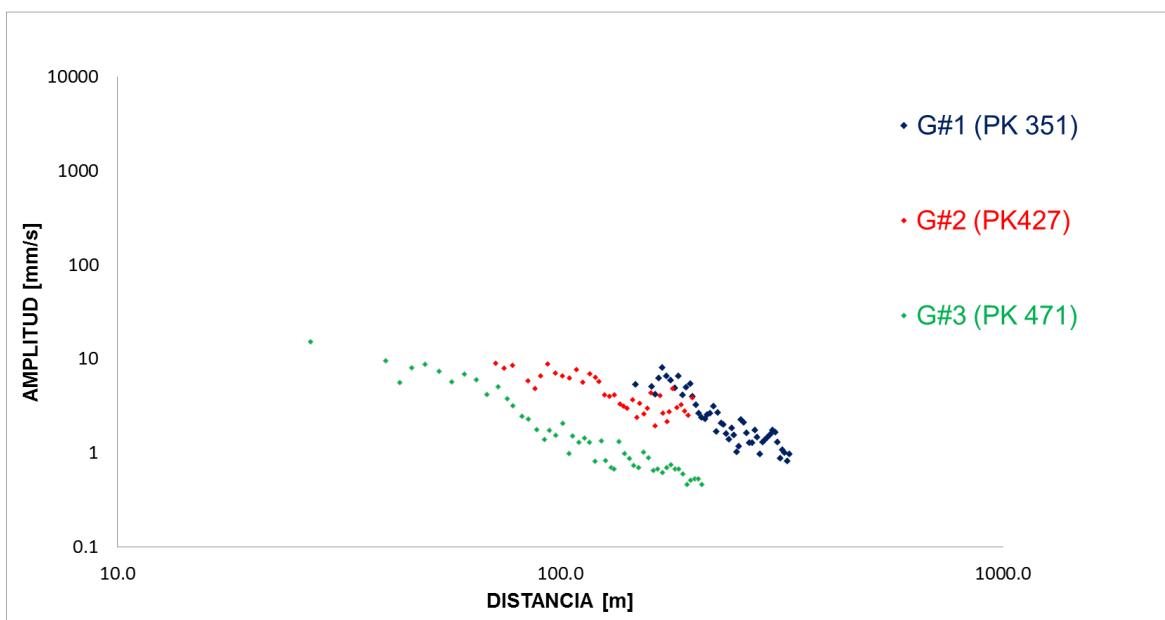


FIGURA 16. PPV EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA PARA LOS GEÓFONOS G#1 (AZUL), G#2 (ROJO) Y G#3 (VERDE).

Se observa que para cada geófono, el PPV sigue una ley de atenuación geométrica simple, como se describe en la Ecuación 2, aunque cada geófono muestra un coeficiente de atenuación (β) y amplitudes distintas. En particular, el geófono G#3 registró movimientos de amplitud más bajos que los dos otros geófonos. Esto puede estar asociado a un “efecto pantalla”, dado probablemente por

la curvatura del túnel y su pendiente, generando un “punto ciego” donde estaba cementado el geófono G#3.

A su vez, la variabilidad en las condiciones de detonación de cada carga, interferencias constructivas y destructivas de los trenes de ondas, diferencias en la posición relativa de cada geófono respecto a la frente, incertidumbres acerca del carguío real y condiciones locales pueden afectar también la amplitud real medida por los geófonos, lo que se traduce por una cierta dispersión de valores de PPV.

Tomando en cuenta lo anterior, y dado que el objetivo del estudio es establecer los niveles máximos de velocidad de partícula en la superficie, se construyó el modelo con los datos de los geófonos G#1 y G#2, sin considerar los registros del geófono G#3 (Figura 17), lo cual da lugar a un modelo más conservador.

Para los geófonos G#1 y G#2, el modelo de atenuación geométrico está dado por la Ecuación 3, el cual corresponde a la mediana de los datos (probabilidad de excedencia de 50%):

$$PPV = \frac{4857}{d^{1,4}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Por otra parte, se determinan también los máximos niveles de PPV esperados, considerando una probabilidad de excedencia del 90%, lo cual, adicionalmente, permite hacerse cargo de la dispersión de los datos. De lo anterior, se desprende que el máximo nivel de PPV esperado será:

$$PPV < \frac{7436}{d^{1,4}} \quad \text{Ecuación 4}$$

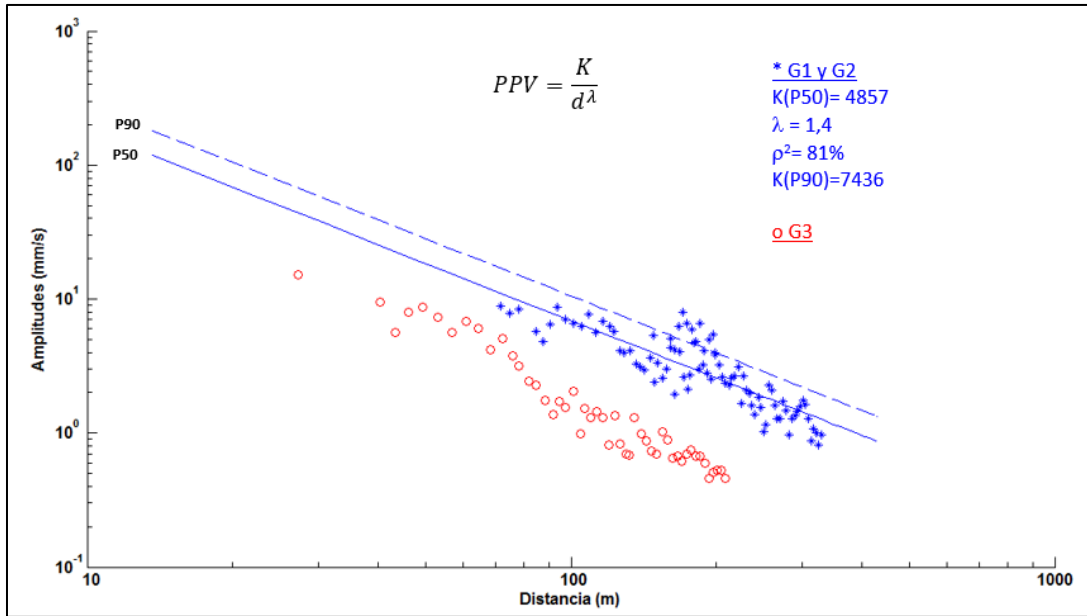


FIGURA 17. MODELO DE ATENUACIÓN GEOMÉTRICO (G#1 Y G#2).

Se destaca que, una vez revisado en los datos recopilados, no se aprecia una variación en la tendencia de los registros del PPV producto del cambio litológico reconocido en el túnel (Figura 18). Cabe recordar que este cambio litológico pone en contacto a las rocas volcánicas de la Formación Río Damas con las rocas sedimentarias de la Formación Lo Valdés en el Pk 0+605, aproximadamente. Luego, es posible afirmar que, no habiéndose implementado una modificación el diseño de perforación con el cambio litológico, las rocas se comportan de manera similar como medio de transmisión de ondas por tronaduras.

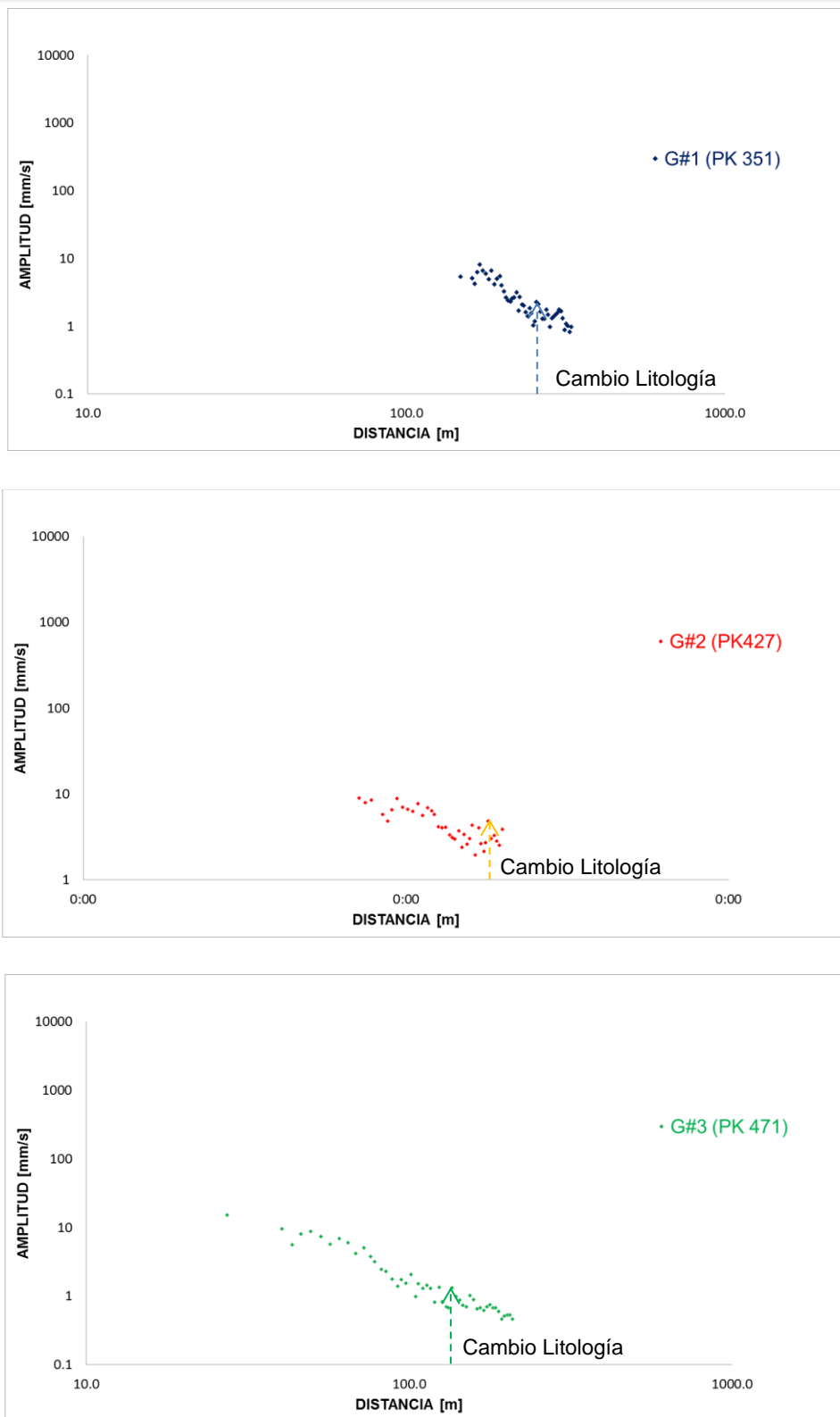


FIGURA 18. REGISTRO CAMBIO LITOLÓGICO EN CADA GEÓFONO.

En el caso de haberse presentado un control en los registros, asociado a un cambio en el medio de transmisión de las ondas (por ejemplo, un cambio brusco de litología), éste se vería reflejado en un cambio en la impedancia, pasando de una impedancia alta a una impedancia baja, que reflejaría parte de las ondas que viajan hacia los geófonos, reduciendo, de esta forma, el PPV. Asimismo, un cambio fuerte de las propiedades elásticas y/o dinámicas de la roca intacta, modificaría la forma en que la energía se transmite del explosivo a la roca y/o el VOD (Velocidad de detonación) del explosivo. Ninguna de estas condiciones se presenta en el caso de las tronaduras monitoreadas.

Finalmente, y con el fin de reducir las interferencias registradas al interior del túnel, a futuro se evaluará la cementación los geófonos a mayor profundidad, para evitar las potenciales perturbaciones inducidas por las cavidades.

9. MODELO DE PREDICCIÓN DE PPV EN SUPERFICIE

Además de los mecanismos de interferencias indicados en el Capítulo 4, las vibraciones registradas en superficie pueden ser afectadas por:

- Aparición de ondas superficiales (ondas de Rayleigh) que interfieren con las ondas directas.
- Amplificación o atenuación de la amplitud producto de alteraciones locales de los afloramientos rocosos o de la presencia de depósitos de terrenos con impedancias distintas.
- Concentración o difracción de la energía inducidas por la topografía.

En el caso del registro de las vibraciones en superficie del tramo monitoreado, se observan PPV mayores que los registrados al interior del túnel, además de presentar una mayor dispersión, debido a las interferencias mencionadas (Figura 19). En la siguiente etapa de monitoreo, se evaluará la instalación de más de un punto de medición en superficie, con el fin de analizar distintas condiciones locales e identificar posibles fuentes de perturbación.

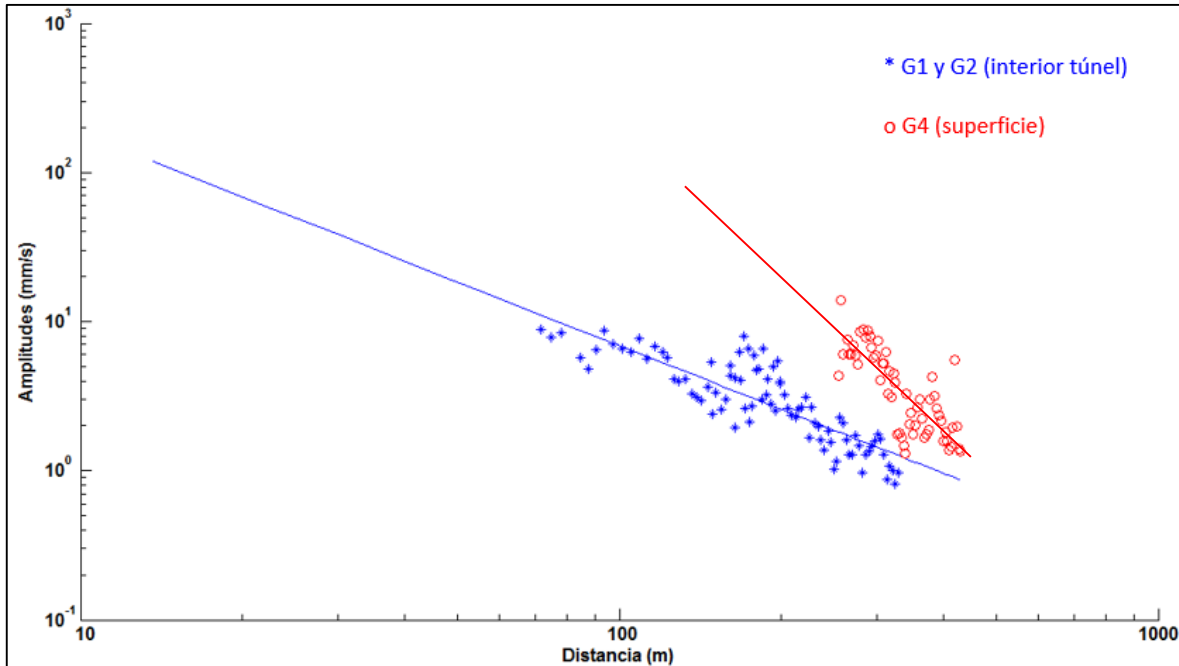


FIGURA 19. COMPARACIÓN ENTRE LOS PPV EN SUPERFICIE Y EN EL INTERIOR DEL TÚNEL

Si se comparan los ratios entre los PPV reales y estimados en el interior túnel y en superficie, se observa lo siguiente (Figura 20):

- Todas las mediciones de superficie presentan PPV mayores al PPV esperado (ratio PPV real/PPV estimado en superficie es siempre >1).
- La mediana de la amplificación del PPV en superficie respecto al interior túnel es de es de 150% (2,5 veces).
- 10% de los datos en superficie (Probabilidad de Excedencia de 90%, P90) tienen una amplificación mayor a 400% (5 veces mayor).

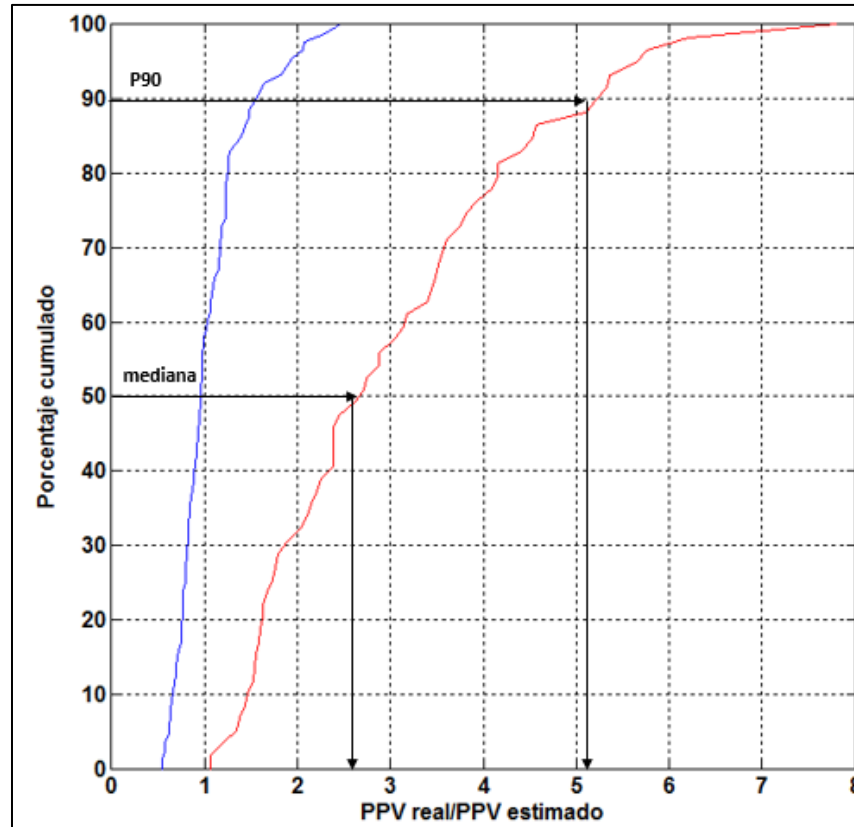


FIGURA 20. PPV REAL/PPV ESTIMADO EN EL INTERIOR TÚNEL (AZUL) Y EN SUPERFICIE (ROJO).

A partir de lo anterior, se puede proponer la estimación de los PPV utilizando las siguientes formulas:

- El PPV en superficie presentará una mediana del orden de:

$$PPV < 2,5 * \frac{4857}{d^{1,4}} = \frac{12143}{d^{1,4}} \text{ mm/s} \quad \text{Ecuación 5}$$

- El máximo nivel de PPV esperado en superficie¹ (90% de probabilidad de excedencia será inferior a:

$$PPV < 5 * \frac{4857}{d^{1,4}} = \frac{24285}{d^{1,4}} \quad \text{Ecuación 6}$$

¹ Esta estimación es válida para el lugar de medición del estudio. Otras condiciones locales podrían modificar el PPV

A partir de toda la información antes mencionada, se presenta a continuación valores referenciales de PPV esperables en superficie (mediana) y PPV máximos esperables (con 90% de probabilidad) (Tabla 7):

TABLA 7. PPV ESPERABLES EN SUPERFICIE

DISTANCIA	PPV PROMEDIO	PPV MÁXIMO
[m]	[mm/s]	[mm/s]
100	19.2	38.5
200	7.3	14.6
300	4.1	8.3
400	2.8	5.5
500	2.0	4.0
600	1.6	3.1
700	1.3	2.5
800	1.0	2.1
900	0.9	1.8
1000	0.8	1.5

10. CONCLUSIONES

Los resultados del monitoreo de las vibraciones por tronaduras del Tramo 1, mediante la red instrumental instalada en el interior del túnel y superficie, permitieron construir un modelo de atenuación válido, a partir del cual fue posible determinar los niveles de vibraciones (PPV) esperables en superficie (Tabla 7, Capítulo 9).

Considerando los resultados obtenidos, y de acuerdo a diversos estudios que comparan los efectos de las vibraciones con actividades de la vida cotidiana o eventos naturales (Tabla 1, Capítulo 4), es posible afirmar que, a distancias mayores de 500 m desde el origen de las tronaduras, los niveles máximos de PPV esperados en superficie serán muy bajos (menores a 4.0mm/s), cuyo impacto equivaldría a percibir golpes menores en las paredes de una estructura residencial, sin la generación de daño alguno asociado.

ANEXO A. TABLA VALORES DE PPV Y SU EFECTO SOBRE MATERIALES Y ESTRUCTURAS

La Tabla A1 resume el resultado de varios investigadores y organizaciones sobre PPV (inches/seg.) en trabajo presentado por Wesley L. Bender en el 2007 Workshops of the Golden West Chapter of the International Society of Explosives Engineers.

PPV	Application	Effect	Reference
600	Explosive inside concrete	Mass blowout of concrete	j
375	Explosive inside concrete	Radial cracks develop in concrete	j
200	Explosive inside concrete	Spalling of loose/weathered concrete skin	j
> 100	Rock	Complete breakup of rock masses	a
100	Explosive inside concrete	Spalling of fresh grout	j
100	Explosive near concrete	No damage	l
50 - 150	Explosive near buried pipe	No damage	n
25 - 100	Rock	Tensile and some radial cracking	a
40	Mechanical equipment	Shafts misaligned	d
25	Explosive near buried pipe	No damage	o
25	Rock	Damage can occur in rock masses	c
10 - 25	Rock	Minor tensile slabbing	a
24	Rock	Rock fracturing	b
15	Cased drill holes	Horizontal offset	d
> 12	Rock	Rockfalls in underground tunnels	b
12	Rock	Rockfalls in unlined tunnels	g
< 10	Rock	No fracturing of intact rock	a
9.1	Residential structure	Serious cracking	b
8.0	Concrete blocks	Cracking in blocks	d
8.0	Plaster	Major cracking	h
7.6	Plaster	50% probability of major damage	g
7.0 - 8.0	Cased water wells	No adverse effect on well	m
> 7.0	Residential structure	Major damage possible	e
4.0 - 7.0	Residential structure	Minor damage possible	e
6.3	Residential structure	Plaster and masonry walls crack	b
5.44	Water wells	No change in well performance	k
5.4	Plaster	50% probability of minor damage	g
4.5	Plaster	Minor cracking	h
4.3	Residential structure	Fine cracks in plaster	b
> 4.0	Residential structure	Probable damage	f
2.0 - 4.0	Residential structure	Plaster cracking (cosmetic)	e
2.8 - 3.3	Plaster	Threshold of damage (from close-in blasts)	g
3.0	Plaster	Threshold of cosmetic cracking	h
1.2 - 3.0	Residential structure	Equals stress from daily environmental changes	i
2.8	Residential structure	No damage	b
2.0	Residential structure	Plaster can start to crack	d
2.0	Plaster	Safe level of vibration	g
< 2.0	Residential structure	No damage	e
< 2.0	Residential structure	No damage	f
0.9	Residential structure	Equivalent to nail driving	i
0.5	Mercury switch	Trips switch	d
0.5	Residential structure	Equivalent to door slam	i
0.1 - 0.5	Residential structure	Equates to normal daily family activity	i
0.3	Residential structure	Equivalent to jumping on the floor	i
0.03	Residential structure	Equivalent to walking on the floor	i

Tabla A1. Valores de PPV (in/seg) y su efecto sobre materiales y estructuras

Referencias Tabla A1:

- a) Bauer, A., & Calder, P.N. (1978), *Open Pit and Blast Seminar*, Kingston, Ontario, Canada.
- b) Langefors, Ulf, Kihlstrom, B., & Westerberg, H. (1948), *Ground Vibrations in Blasting*.
- c) Oriard, L.L., (1970), *Dynamic Effect on Rock Masses From Blasting Operations*, Slope Stability Seminar, Univ. of Nevada.
- d) Bauer, A., & Calder, P.N., (1977), *Pit Slope Manual*, Canmet Report 77-14.
- e) Nicholls, H.R., Johnson, C.F., & Duvall, W.I., (1971), *Blasting Vibrations and Their Effects on Structures*, Bureau of Mines Bulletin 656.
- f) Edwards, A.T., & Northwood, T.D., (1960), *Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures*. *The Engineer*, September 1960.
- g) *Blasters' Handbook*, (1977), E. I. du Pont de Nemours & Co.
- h) Northwood, T.D., Crawford, R., & Edwards, A.T., (1963), *Blasting Vibrations and Building Damage*. *The Engineer*, May 1963.
- i) Stagg, M.S., Siskind, D.E., Stevens, M.G., & Dowding, C.H., (1980), *Effects of Repeated Blasting on a Wood Frame House*. Bureau of Mines R I 8896.
- j) Tart, R.G., Oriard, L.L., & Plump, J.H., (1980), *Blast Damage Criteria for Massive Concrete Structure*. ASCE National Meeting, Specialty Session on Minimizing Detrimental Construction Vibrations, Portland, OR, April 1980.
- k) Robertson, D.A., Gould, J.A., Straw, J.A., & Dayton, M.A., (1980), *Survey of Blasting Effects on Ground Water Supplies in Appalachia: Volumes I and II*. Bureau of Mines open field report 8(1)-82.
- l) Oriard, L.L., & Coulson, J.H., (1980), *TVA Blast Vibration Criteria for Mass Concrete*. ASCE.
- m) Rose, R., Bowles, B. & Bender, W., (1991), *Results of Blasting in Close Proximity to Water Wells at the Sleeper Mine*. *Proceedings of the Seventeenth Conference on Explosives and Blasting Technique*. International Society of Explosives Engineers.
- n) Oriard, L.L., (1994), *Vibration and Ground Rupture Criteria for Buried Pipelines*. *Proceedings of the Twentieth Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*. International Society of Explosives Engineers.
- o) Siskind, D.E. & Stagg, M.S., (1993), *Response of Pressurized Pipelines to Production-Size Mine Blasting*. *Proceedings of the Ninth Annual Symposium on Explosives and Blasting Research*. International Society of Explosives Engineers.