



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

IMPACTO DE LAS VIBRACIONES INDUCIDAS POR TRONADURAS EN FASES 13 Y
14 DE LA EXPLOTACIÓN A RAJO ABIERTO SOBRE LA PLANTA DE
PROCESAMIENTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS

JAVIER ALEJANDRO ROZAS VEGA

PROFESOR GUÍA:
EXEQUIEL MARAMBIO DIAZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DIANA COMTE SELMAN
ROBERTO MIRANDA CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS
POR: JAVIER ALEJANDRO ROZAS VEGA
FECHA: 06/01/2020
PROF. GUÍA: EXEQUIEL MARAMBIO DIAZ

IMPACTO DE LAS VIBRACIONES INDUCIDAS POR TRONADURAS EN FASES 13 Y 14 DE LA EXPLOTACIÓN A RAJO ABIERTO SOBRE LA PLANTA DE PROCESAMIENTO

Durante los años 2014 y 2015 se desarrolló la explotación de las fases 13 y 14 del rajo de una compañía minera. Debido a la proximidad de estas fases con la infraestructura de la planta de procesamiento, fue necesario tomar medidas cautelares para reducir el impacto de las vibraciones por tronaduras sobre dichas zonas. La empresa Rockblast brindó el servicio de monitoreo inalámbrico y análisis de vibraciones por tronadura por un periodo continuo de 1 año, 2 meses y 20 días en puntos específicos de las correas de CV-07, CV-05, del silo 1 y silo 2, de las pilas de lixiviación 4 y 12A, y en el edificio de harneros. El monitoreo fue llevado a cabo tanto en infraestructura como a nivel de terreno. Los resultados muestran que algunas tronaduras tienen una alta probabilidad de provocar daño en la cepa 4 de la correa CV-07, las cañerías HDPE, en el silo 2 y sobre la fundación 2 del harnero, por lo que se recomienda reforzar estructuralmente estos puntos o disminuir la carga explosiva detonada en las cercanías de esos puntos mediante el uso de los modelos de vibración elaborados. Los modelos de regresión alcanzaron como máximo un R^2 de 0,73, y solo 4 de los 7 modelos se consideraron útiles con un $R^2 > 0,55$. Si bien estos valores se pueden considerar bajos, son usuales en el campo estudiado. El uso de estos modelos ha sido verificado a partir de mediciones de 11 tronaduras durante el mes de septiembre de 2015, encontrando un error absoluto promedio de la velocidad máxima de partícula de 0,83 mm/s. Al comparar las predicciones sobre los criterios y normas de daño, se obtuvo una concordancia total con las mediciones en cuanto a su impacto en la infraestructura.

During 2014 and 2015 took place the exploitation of phases 13 and 14 of the a northern open pit mining company in Chile. Due to the proximity of these phases to the infrastructure of the processing plant, it was necessary to take precautionary measures to reduce the impact of blast vibrations on said areas. Rockblast company provided a wireless monitoring and analysis of vibrations by blasting service for a continuous period of 1 year, 2 months and 20 days, at specific points of the belts of CV-07, CV-05, silo 1 and silo 2, leaching heaps 4 and 12A, and in the building of harness. The monitoring was carried out both in infrastructure and at the ground level. The results shows that some of the blasts vibrations could damage the strain 4 of the CV-07 belt, the HDPE pipes, the silo 2 and the harness foundations. Thus it's recommended to reinforce those structures or to lower the detonated explosive charge nearby the processing plant according to the estimated results by the use of the vibrations models found. In regard to the models, only 4 out of 7 have been considered useful with $R^2 > 0,55$, while the maximum R^2 was 0,74. Even though some of these values could be considered low, they are usual or even good in the field of study. The use of these models have been validated by the measure of 11 blasts during September, 2015, where the average absolute error of the peak particle velocity was 0,83 mm/s. When comparing the predictions of the model and the measured values on the international norms and criteria used in this study, was found a complete concordance in the potential damage of blasts on to the infrastructure.

Dedicado a tod@s l@s marginad@s, l@s que venimos de abajo, l@s patipelad@s, l@s rot@s, l@s que tuvimos que trabajar mientras estudiábamos, l@s que quedamos endeudad@s por 25 años para sacar un título, l@s que no pudieron surgir porque como sociedad l@s abandonamos, l@s que quedaron pateando piedras, a l@s padres, tí@s, abuel@s, amig@s, cuñad@s y tod@s l@s que se rompen el lomo para que la próxima generación tenga una vida digna, por y para tod@s ustedes esta dedicatoria. Porque podemos derribar este sistema enfermo, ayudémonos y nunca más nos soltemos.

Agradecimientos

A mi madre Isabel, de quién aprendí los valores de la educación, del perdón y el amor. Gracias por criarme, nadie podría haberlo hecho mejor que tú; gracias por la comida que nos preparaste y serviste, creo que nunca probaré un arroz con pollo al jugo mejor que el tuyo; gracias por estar en los momentos en que te necesité; gracias por inculcar en mí valores que me hacen sentir orgulloso de quién soy; y por sobretodo, gracias por ser mi madre, no te cambiaría por nada. Te amo.

Gracias a mi padre Sergio, por mostrarme a través de su experiencia, lo cruda y difícil que puede ser la sociedad y la vida, por enseñarme que la superación se logra a base de esfuerzo, empeño, garra y objetivos. Gracias por acercarme a la naturaleza y así descubrir los bellos paisajes del norte y del sur en aventuras que espero nunca olvidar. Gracias por enseñarme el amor por el fútbol. Y por sobretodo, gracias por nunca olvidar la responsabilidad de ser padre. Te amo.

A mis herman@s, familia y amig@s, gracias por compartir la alegría de la vida, por las risas, el carrete, por el apañe en situaciones difíciles, por darme un abrazo y una mano cuando me sentí frágil, por disfrutar juntos los momentos de alegría y por quererme tal como soy. Los quiero caleta!

Gracias a Alejo, por enseñarme los modales, la calle, la viveza y quererme como un hijo. Por siempre ofrecerme una mano en momentos complicados y mostrarme la humildad, que muchas veces me ha hecho falta, pero que lucho para que día a día crezca en mí. Te quiero muchísimo.

Gracias a la música, al baile, las risas y al llanto, por estar ahí cada vez que necesito un respiro y debo dejarme llevar por las emociones.

Gracias a la empresa RockBlast por permitirme desarrollarme como profesional y poder realizar este trabajo. Les deseo lo mejor a todos sus integrantes.

Y como suelo hacer, reservo lo mejor para el final...a mi cachorro Duke, que se comió mi memoria 3 años consecutivos, solo decir que eres mi ser vivo favorito y mi amor por ti es infinito.

Tabla de Contenido

1. Introduccion	1
1.1. Introducci3n	1
1.1.1. Objetivos	2
1.1.2. Alcances	3
1.1.3. Limitaciones	3
2. Antecedentes	5
2.1. Antecedentes del problema	5
2.1.1. Descripci3n de la operaci3n actual	6
2.2. Marco te3rico	15
2.2.1. Monitoreo y an3lisis de vibraciones	15
2.2.2. Ecuaciones de propagaci3n y decaimiento de las vibraciones	27
2.2.3. Modelos para la estimaci3n de vibraciones por tronadura	29
2.2.4. Impacto de las vibraciones en infraestructura	44
2.2.5. Determinaci3n de valores at3picos (outliers) [1]	55
3. Metodolog3a	58
3.1. Monitoreo de vibraciones	58
3.1.1. Defini3n del periodo de monitoreo de vibraciones	59
3.1.2. Puntos de monitoreo	59
3.1.3. Instrumentaci3n en terreno	59
3.2. Mantenci3n del servicio de monitoreo	59
3.3. An3lisis de la informaci3n y asociaci3n	59
3.3.1. Recopilaci3n de la informaci3n	60
3.3.2. Identificaci3n de se3ales	60
3.3.3. Asociaci3n de mediciones con informaci3n de tronadura	60
3.4. Resultados del impacto en infraestructura y modelos de vibraciones	60
3.4.1. Evaluaci3n del impacto en infraestructura	60
3.4.2. Obtenci3n de modelo de vibraci3n de Devine [9]	61
3.4.3. Obtenci3n del modelo de vibraci3n de Yang [39]	61
3.4.4. Simulaci3n de vibraciones a partir de modelos	61
3.5. An3lisis de resultados	61
3.6. Recomendaciones	61
4. Resultados	62
4.1. Monitoreo de vibraciones	62

4.1.1.	Periodo de monitoreo de vibraciones	62
4.1.2.	Puntos de monitoreo	62
4.1.3.	Equipos utilizados	66
4.1.4.	Minimate Plus de InstanTel	66
4.1.5.	Servidor	69
4.1.6.	Mantenimiento del servicio de monitoreo	70
4.2.	Análisis de la información recopilada	70
4.2.1.	Reportes rápidos	70
4.2.2.	Análisis de señal y asociación a tronaduras	72
4.3.	Evaluación del impacto en infraestructura	74
4.3.1.	Ubicación: Silo 1	75
4.3.2.	Ubicación: Correa CV-05 - Cepa 1	75
4.3.3.	Ubicación: Silo 2	75
4.3.4.	Ubicación: Harneros - Fundación 2	75
4.3.5.	Ubicación: Pila 12A	75
4.3.6.	Ubicación: Correa CV-07 - Cepa 4	76
4.3.7.	Ubicación: Pila 4	76
4.4.	Elaboración de los modelos de vibración - Ley escalar de Devine	76
4.4.1.	Ley escalar por estación para todos los datos asociados	78
4.4.2.	Ley escalar por estación para datos categoría A y B	92
4.5.	Elaboración de los modelos de vibración - Modelo de Yang	106
4.5.1.	Antecedentes del estudio de campo cercano	107
4.5.2.	Parámetros finales para el modelamiento	109
4.5.3.	Ley escalar	109
4.5.4.	Elaboración de los modelos de vibración - Modelo probabilístico de Blair	110
4.6.	Estimación de vibraciones por tronadura	110
4.6.1.	Tronaduras estimadas por los modelos de vibración	110
4.6.2.	Resultados de las estimaciones	111
4.6.3.	Comparación entre estimaciones y mediciones	114
4.6.4.	Error absoluto entre simulaciones y mediciones	115
4.6.5.	Error porcentual entre estimaciones y mediciones	118
4.6.6.	Impacto sobre infraestructura a partir de estimaciones	122
5.	Análisis de resultados	127
5.1.	Monitoreo de vibraciones	127
5.1.1.	Periodo del monitoreo de vibraciones	127
5.1.2.	Puntos de monitoreo	127
5.1.3.	Equipos utilizados, instrumentación en terreno y mantenimiento	129
5.2.	Análisis de información recopilada	129
5.2.1.	Reportes rápidos y descarga de datos	129
5.2.2.	Análisis de señal y asociación a tronadura	130
5.3.	Evaluación del impacto en infraestructura	131
5.4.	Elaboración de los modelos de vibración - Ley escalar de Devine	132
5.4.1.	Sobre el uso de la carga total detonada como variable	132
5.4.2.	Sobre el uso de la carga equivalente al ANFO como variable	132
5.4.3.	Sobre la categorización de los datos	133
5.4.4.	Sobre la correlación de los modelos	133

5.5.	Elaboración de los modelos de vibración - Modelo de Yang	133
5.6.	Estimación de vibraciones por tronadura	134
5.7.	Impacto sobre infraestructura a partir de simulaciones	135
6.	Conclusiones	136
7.	Anexos	139
7.1.	Evaluación del impacto en infraestructura	139
7.1.1.	Evaluación del impacto en infraestructura - Silo 1	139
7.1.2.	Evaluación del impacto en infraestructura - Correa CV-05 - Cepa 1	142
7.1.3.	Evaluación del impacto en infraestructura - Silo 2	144
7.1.4.	Evaluación del impacto en infraestructura - Harneros - Fundación 2	147
7.1.5.	Evaluación del impacto en infraestructura - Pila 12A	149
7.1.6.	Evaluación del impacto en infraestructura - Correa CV-07 - Cepa 4	154
7.1.7.	Evaluación del impacto en infraestructura - Pila 4	156
7.2.	Elaboración de los modelos de vibración - Ley escalar de Devine	161
7.2.1.	Ley escalar por estación para todos los datos asociados	161
7.2.2.	Ley escalar por estación para datos categoría A y B	175
7.3.	Tronaduras simuladas	189
7.3.1.	Tronadura 1: 3 de septiembre de 2015	189
7.3.2.	Tronadura 2: 7 de septiembre de 2015	190
7.3.3.	Tronadura 3: 8 de septiembre de 2015	191
7.3.4.	Tronadura 4: 10 de septiembre de 2015	192
7.3.5.	Tronadura 5: 13 de septiembre de 2015	193
7.3.6.	Tronadura 6: 14 de septiembre de 2015	194
7.3.7.	Tronadura 7: 15 de septiembre de 2015	195
7.3.8.	Tronadura 8: 26 de septiembre de 2015	196
7.3.9.	Tronadura 9: 27 de septiembre de 2015	197
7.3.10.	Tronadura 10: 28 de septiembre de 2015	198
7.3.11.	Tronadura 11: 30 de septiembre de 2015	199
	Bibliografía	201

Índice de Tablas

2.1. Rango de magnitud típicos mediciones de vibración por tronadura	19
2.2. Diferentes predictores convencionales.	38
2.3. Reglamentacional para el manejo de vibraciones por tronadura	47
2.4. Características de la norma Alemana DIN 4150-3:2015-10	48
2.5. Norma Alemana DIN 4150-3:2015-10	48
2.6. Características de la norma USBM RI8507	49
2.7. Criterio USBM RI8507	50
2.8. Características de la norma UNE 22-381-93	50
2.9. Valores admisibles según Norma UNE 22-381-93	51
2.10. Características de la norma Suiza SN 640 312a, 1992	52
2.11. Valores máximos admisibles de velocidad de partícula para la norma Suiza SN 640 312a, 1992	52
2.12. Valores de la máxima velocidad vertical sin corrección (Norma Sueca)	53
2.13. Valores de F_b según la edificación	54
2.14. Valores de F_m según materiales	54
2.15. Valores de F_t según el tiempo del proyecto	54
4.1. Ubicaciones de estación sismológica 105. Coordenadas mina.	63
4.2. Ubicaciones de estación sismológica 106. Coordenadas mina.	64
4.3. Ubicaciones de estación sismológica 107. Coordenadas mina.	65
4.4. Ubicaciones de estación sismológica 108. Coordenadas mina.	65
4.5. Especificaciones técnicas del geófono triaxial estándar ISEE	67
4.6. Especificaciones técnicas del geófono triaxial estándar ISEE	68
4.7. Número de eventos por categoría y estación	73
4.8. Constantes de los modelos de vibración para el Silo 1.	79
4.9. Constantes de los modelos de vibración para el Silo 2.	81
4.10. Constantes de los modelos de vibración para la Pila 12A.	82
4.11. Constantes de los modelos de vibración para la Pila 12A.	84
4.12. Constantes de los modelos de vibración para la Ceba 1.	85
4.13. Constantes de los modelos de vibración para la Ceba 4.	87
4.14. Constantes de los modelos de vibración para Harneros - Fundación 2.	88
4.15. Constantes de los modelos de vibración para cañería HDPE - Pila 12A.	90
4.16. Constantes de los modelos de vibración para cañería HDPE - Pila 4.	91
4.17. Tabla resumen de constantes para modelos de vibración - Categorías A, B y X	92
4.18. Constantes de los modelos de vibración para el Silo 1.	94
4.19. Constantes de los modelos de vibración para el Silo 2.	95

4.20. Constantes de los modelos de vibración para la Pila 12A.	97
4.21. Constantes de los modelos de vibración para la Pila 4.	98
4.22. Constantes de los modelos de vibración para la Ceba 1.	100
4.23. Constantes de los modelos de vibración para la Ceba 4.	101
4.24. Constantes de los modelos de vibración para la Fundación 2.	103
4.25. Constantes de los modelos de vibración para cañería HDPE - Pila 12A.	104
4.26. Constantes de los modelos de vibración para cañería HDPE - Pila 4.	106
4.27. Tabla resumen de constantes para modelos de vibración - Categorías A y B	106
4.28. Parámetros finales para la simulación de vibraciones - Modelo de Yang	109
4.29. Características generales de las tronaduras simuladas	111
4.30. Simulaciones de la tronadura 1 - 3 de septiembre de 2015	111
4.31. Simulaciones de la tronadura 2 - 7 de septiembre de 2015	111
4.32. Simulaciones de la tronadura 3 - 8 de septiembre de 2015	112
4.33. Simulaciones de la tronadura 4 - 10 de septiembre de 2015	112
4.34. Simulaciones de la tronadura 5 - 13 de septiembre de 2015	112
4.35. Simulaciones de la tronadura 6 - 14 de septiembre de 2015	112
4.36. Simulaciones de la tronadura 7 - 15 de septiembre de 2015	113
4.37. Simulaciones de la tronadura 8 - 26 de septiembre de 2015	113
4.38. Simulaciones de la tronadura 9 - 27 de septiembre de 2015	113
4.39. Simulaciones de la tronadura 10 - 28 de septiembre de 2015	113
4.40. Simulaciones de la tronadura 11 - 30 de septiembre de 2015	114
4.41. Datos medidos en correa CV-05 Ceba 1 - Septiembre de 2015	114
4.42. Datos medidos en correa CV-07 Ceba 4 - Septiembre de 2015	115
4.43. Datos medidos en harneros fundación 2 - Septiembre de 2015	115
4.44. Error absoluto Ceba 1 - Devine - Septiembre de 2015	116
4.45. Error absoluto Ceba 4 - Devine - Septiembre de 2015	116
4.46. Error absoluto fundacion 2 - Devine - Septiembre de 2015	117
4.47. Error absoluto Ceba 1 - Yang - Septiembre de 2015	117
4.48. Error absoluto Ceba 4 - Yang - Septiembre de 2015	118
4.49. Error absoluto fundacion 2 - Yang - Septiembre de 2015	118
4.50. Error porcentual Ceba 1 - Devine - Septiembre de 2015	119
4.51. Error porcentual Ceba 4 - Devine - Septiembre de 2015	119
4.52. Error porcentual fundacion 2 - Devine - Septiembre de 2015	120
4.53. Error porcentual Ceba 1 - Yang - Septiembre de 2015	121
4.54. Error porcentual Ceba 4 - Yang - Septiembre de 2015	121
4.55. Error porcentual fundación 2 - Yang - Septiembre de 2015	121
4.56. Frecuencias de resonancia usadas en evaluación de infraestructura	122

Índice de Ilustraciones

2.1. Zona de estudio	9
2.2. Silos de Planta 1	10
2.3. Edificio Harneros	11
2.4. Fundaciones edificio Harneros	11
2.5. Correa CV-05	12
2.6. Correa CV-07	12
2.7. Estanques de ácido	13
2.8. Tipos de ondas en vibraciones por tronadura en roca	16
2.9. Movimiento de partículas por tipo de onda	17
2.10. Vibración sinusoidal	18
2.11. Registro típico de vibración por tronadura	20
2.12. Tres componentes de la vibración	21
2.13. Componentes ortogonales de la vibración	21
2.14. Amplitud máxima por componente	22
2.15. Vector suma	23
2.16. Ejemplo de obtención de frecuencia mediante FFT	24
2.17. Sismógrafos de tronadura y geófonos	26
2.18. Arribo de tipos de onda	27
2.19. Importancia de la disipación geométrica y friccional con la distancia	29
2.20. Diagrama de la metodología de Blair.	32
2.21. Esquema de la RNA usada	35
2.22. Sensibilidad de las variables sobre el PPV y la frecuencia en el modelo de RNA	35
2.23. Sensibilidad de la RNA con respecto al PPV	36
2.24. Hiperplano construido mediante SVM. Hiperplano separando dos familias, (a) con un margen pequeño y (b) con un margen mayor.	37
2.25. PPV medido y pronosticado con SVM, sobre el conjunto de verificación.	38
2.26. Comparación de PPV.	39
2.27. Compendio de daños por vibraciones del USBM RI8507	49
2.28. Gráfico de F_d según distancia a la carga explosiva	54
2.29. Comparación de los criterios estadísticos presentes en Minitab para la identificación de valores atípicos	57
4.1. Imagen satelital con ubicación de estaciones sismológicas	63
4.2. Estación sismológica 105	64
4.3. Estación sismológica 106	64
4.4. Estación sismológica 107	65

4.5. Estación sismológica 108	66
4.6. Equipo de monitoreo Minimate Plus de Instanatel	67
4.7. Geófono triaxial estándar ISEE	68
4.8. Ejemplos de instalación del geófono	69
4.9. Instalación del geófono	69
4.10. Reporte de vibración automático	72
4.11. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para el Silo 1.	78
4.12. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para el Silo 1.	79
4.13. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para el Silo 2.	80
4.14. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para el Silo 2.	80
4.15. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para la Pila 12A.	81
4.16. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para la Pila 12A.	82
4.17. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para la Pila 12A.	83
4.18. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para la Pila 12A.	83
4.19. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para la Cepa 1.	84
4.20. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para la Cepa 1.	85
4.21. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para la Cepa 4.	86
4.22. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para la Cepa 4.	86
4.23. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para Harneros - Fundación 2.	87
4.24. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para Harneros - Fundación 2.	88
4.25. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para cañería HDPE - Pila 12A.	89
4.26. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para cañería HDPE - Pila 12A.	89
4.27. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para cañería HDPE - Pila 4.	90
4.28. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para cañería HDPE - Pila 4.	91
4.29. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para el Silo 1.	93
4.30. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para el Silo 1.	93
4.31. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para el Silo 2.	94
4.32. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para el Silo 2.	95
4.33. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para la Pila 12A.	96
4.34. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para la Pila 12A.	96
4.35. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para la Pila 4.	97
4.36. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para la Pila 4.	98
4.37. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para la Cepa 1.	99
4.38. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para la Cepa 1.	99
4.39. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para la Cepa 4.	100
4.40. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para la Cepa 4.	101
4.41. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para la Fundación 2. . .	102
4.42. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para la Fundación 2. . .	102
4.43. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para cañería HDPE - Pila 12A.	103

4.44. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para cañería HDPE - Pila 12A.	104
4.45. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para cañería HDPE - Pila 4.	105
4.46. Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para cañería HDPE - Pila 4.	105
4.47. Pulsos de pozos singulares - Velocidad vertical - Estudio campo cercano . . .	107
4.48. Obtención de $K = 1/Q_d * V_p$ y T_0 a partir de la duración de la onda y distancia - Estudio campo cercano	108
4.49. Obtención de μ - Estudio campo cercano	109
4.50. DIN 4150-3 - Modelo de Devine - Septiembre de 2015	122
4.51. USBM RI8507 - Modelo de Devine - Septiembre de 2015	123
4.52. UNE 22-381-93 - Modelo de Devine - Septiembre de 2015	123
4.53. Norma SN 640 315a - Modelo de Devine - Septiembre de 2015	124
4.54. DIN 4150-3 - Modelo de Yang - Septiembre de 2015	124
4.55. USBM RI8507 - Modelo de Yang - Septiembre de 2015	125
4.56. UNE 22-381-93 - Modelo de Yang - Septiembre de 2015	125
4.57. Norma SN 640 315a - Modelo de Yang - Septiembre de 2015	126
7.1. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Silo 1	139
7.2. Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Silo 1	140
7.3. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Silo 1	141
7.4. Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Silo 1	141
7.5. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Cepa 1	142
7.6. Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Cepa 1	143
7.7. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Cepa 1	143
7.8. Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Cepa 1	144
7.9. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Silo 2	145
7.10. Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Silo 2	145
7.11. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Silo 2	146
7.12. Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Silo 2	146
7.13. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Fundación 2	147
7.14. Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Fundación 2	148
7.15. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Fundación 2	148
7.16. Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Fundación 2	149
7.17. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Pila 12A - Terreno	150
7.18. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Pila 12A - HDPE	150
7.19. Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Pila 12A - Terreno	151
7.20. Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Pila 12A - HDPE	151
7.21. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Pila 12A - Terreno	152
7.22. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Pila 12A - HDPE	152
7.23. Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Pila 12A - Terreno	153
7.24. Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Pila 12A - HDPE	153
7.25. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Cepa 4	154
7.26. Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Cepa 4	155
7.27. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Cepa 4	155
7.28. Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Cepa 4	156

7.29. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Pila 4 - Terreno	157
7.30. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Pila 4 - HDPE	157
7.31. Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Pila 4 - Terreno	158
7.32. Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Pila 4 - HDPE	158
7.33. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Pila 4 - Terreno	159
7.34. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Pila 4 - HDPE	159
7.35. Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Pila 4 - Terreno	160
7.36. Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Pila 4 - HDPE	160
7.37. Modelos de vibración - Vector suma - SILO 1 - Categorías A,B y X	161
7.38. Modelos de vibración - Transversal - SILO 1 - Categorías A,B y X	162
7.39. Modelos de vibración - Vertical - SILO 1 - Categorías A,B y X	162
7.40. Modelos de vibración - Longitudinal - SILO 1 - Categorías A,B y X	163
7.41. Modelos de vibración - Vector suma - SILO 2 - Categorías A,B y X	163
7.42. Modelos de vibración - Transversal - SILO 2 - Categorías A,B y X	164
7.43. Modelos de vibración - Vertical - SILO 2 - Categorías A,B y X	164
7.44. Modelos de vibración - Longitudinal - SILO 2 - Categorías A,B y X	165
7.45. Modelos de vibración - Vector suma - PILA 12A - Categorías A,B y X	165
7.46. Modelos de vibración - Transversal - PILA 12A - Categorías A,B y X	166
7.47. Modelos de vibración - Vertical - PILA 12A - Categorías A,B y X	166
7.48. Modelos de vibración - Longitudinal - PILA 12A - Categorías A,B y X	167
7.49. Modelos de vibración - Vector suma - PILA 4 - Categorías A,B y X	167
7.50. Modelos de vibración - Transversal - PILA 4 - Categorías A,B y X	168
7.51. Modelos de vibración - Vertical - PILA 4 - Categorías A,B y X	168
7.52. Modelos de vibración - Longitudinal - PILA 4 - Categorías A,B y X	169
7.53. Modelos de vibración - Vector suma - CEPA 1 - Categorías A,B y X	169
7.54. Modelos de vibración - Transversal - CEPA 1 - Categorías A,B y X	170
7.55. Modelos de vibración - Vertical - CEPA 1 - Categorías A,B y X	170
7.56. Modelos de vibración - Longitudinal - CEPA 1 - Categorías A,B y X	171
7.57. Modelos de vibración - Vector suma - CEPA 4 - Categorías A,B y X	171
7.58. Modelos de vibración - Transversal - CEPA 4 - Categorías A,B y X	172
7.59. Modelos de vibración - Vertical - CEPA 4 - Categorías A,B y X	172
7.60. Modelos de vibración - Longitudinal - CEPA 4 - Categorías A,B y X	173
7.61. Modelos de vibración - Vector suma - Fundación 2 - Categorías A,B y X	173
7.62. Modelos de vibración - Transversal - Fundación 2 - Categorías A,B y X	174
7.63. Modelos de vibración - Vertical - Fundación 2 - Categorías A,B y X	174
7.64. Modelos de vibración - Longitudinal - Fundación 2 - Categorías A,B y X	175
7.65. Modelos de vibración - Vector suma - SILO 1 - Categorías A y B	175
7.66. Modelos de vibración - Transversal - SILO 1 - Categorías A y B	176
7.67. Modelos de vibración - Vertical - SILO 1 - Categorías A y B	176
7.68. Modelos de vibración - Longitudinal - SILO 1 - Categorías A y B	177
7.69. Modelos de vibración - Vector suma - SILO 2 - Categorías A y B	177
7.70. Modelos de vibración - Transversal - SILO 2 - Categorías A y B	178
7.71. Modelos de vibración - Vertical - SILO 2 - Categorías A y B	178
7.72. Modelos de vibración - Longitudinal - SILO 2 - Categorías A y B	179
7.73. Modelos de vibración - Vector suma - PILA 12A - Categorías A y B	179
7.74. Modelos de vibración - Transversal - PILA 12A - Categorías A y B	180
7.75. Modelos de vibración - Vertical - PILA 12A - Categorías A y B	180

7.76. Modelos de vibración - Longitudinal - PILA 12A - Categorías A y B	181
7.77. Modelos de vibración - Vector suma - PILA 4 - Categorías A y B	181
7.78. Modelos de vibración - Transversal - PILA 4 - Categorías A y B	182
7.79. Modelos de vibración - Vertical - PILA 4 - Categorías A y B	182
7.80. Modelos de vibración - Longitudinal - PILA 4 - Categorías A y B	183
7.81. Modelos de vibración - Vector suma - CEPA 1 - Categorías A y B	183
7.82. Modelos de vibración - Transversal - CEPA 1 - Categorías A y B	184
7.83. Modelos de vibración - Vertical - CEPA 1 - Categorías A y B	184
7.84. Modelos de vibración - Longitudinal - CEPA 1 - Categorías A y B	185
7.85. Modelos de vibración - Vector suma - CEPA 4 - Categorías A y B	185
7.86. Modelos de vibración - Transversal - CEPA 4 - Categorías A y B	186
7.87. Modelos de vibración - Vertical - CEPA 4 - Categorías A y B	186
7.88. Modelos de vibración - Longitudinal - CEPA 4 - Categorías A y B	187
7.89. Modelos de vibración - Vector suma - Fundación 2 - Categorías A y B	187
7.90. Modelos de vibración - Transversal - Fundación 2 - Categorías A y B	188
7.91. Modelos de vibración - Vertical - Fundación 2 - Categorías A y B	188
7.92. Modelos de vibración - Longitudinal - Fundación 2 - Categorías A y B	189
7.93. Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 1 - 3 de septiembre de 2015	189
7.94. Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 2 - 7 de septiembre de 2015	190
7.95. Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 3 - 8 de septiembre de 2015	191
7.96. Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 4 - 10 de septiembre de 2015	192
7.97. Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 5 - 13 de septiembre de 2015	193
7.98. Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 6 - 14 de septiembre de 2015	194
7.99. Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 7 - 15 de septiembre de 2015	195
7.100 Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 8 - 26 de septiembre de 2015	196
7.101 Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 9 - 27 de septiembre de 2015	197
7.102 Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 10 - 28 de septiembre de 2015	198
7.103 Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 11 - 30 de septiembre de 2015	199

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Las vibraciones producidas por tronadura puedan causar daños estructurales a diversas infraestructuras presentes en las proximidades de la faena, ya sean caminos, paredes del rajo, plantas de tratamiento, cañerías, edificaciones de servicio y a los asentamientos de comunidades locales.

El propósito de este trabajo es monitorear las vibraciones provocadas por tronadura de forma continua, analizar la información recopilada y estimar las vibraciones inducidas por tronadura en terreno, y mediante estos resultados, correlacionar el posible daño que éstas podrían ocasionar sobre infraestructura de la mina.

Para el monitoreo de las vibraciones es necesario instrumentar el área de interés con sensores como geófonos o acelerómetros, equipos de medición y almacenamiento como sismógrafos, y otros accesorios para la canalización y transmisión de la información, y sustentabilidad energética del equipo. Sin embargo, el sólo monitoreo de las vibraciones no ayuda directamente a la ingeniería de tronadura, ya que solo se preocupa de evaluar el post-tronadura. Para ayudar al proceso de ingeniería, diseño e implementación de la tronadura, es necesario elaborar modelos predictivos que permitan estimar los niveles de vibración en distintos puntos a cautelar antes de realizar la tronadura, con el propósito de prevenir el potencial daño mediante la modificación de parámetros claves de este proceso.

Durante la última mitad de siglo pasado y hasta la fecha, se han elaborado una cantidad no menor de métodos que permiten la estimación de las vibraciones producidas por tronaduras, tanto en campo cercano como en campo lejano. En base a estas estimaciones es posible diseñar tronaduras que generen menor impacto en el entorno. Entre estos modelos se pueden encontrar: Ley escalar (Devine, 1966); Modelo estadístico (Blair, 1999); Modelo de carga escalada (Blair, 2006); Modelo de daño por explosión (Blair, 2006); Superposición de modelos no lineales de vibración (Blair, 2008); Redes neuronales artificiales (Khandelwal, 2009); Support vector machine (Khandelwal, 2010); Universal distinct element code (Mohammadi, 2004); Múltiples ondas semillas (Yang, 2010); PPV para campo cercano (Yang, 2008); entre otros. El presente trabajo consiste en la implementación de un sistema de monitoreo de las vibraciones producidas por tronaduras durante un periodo prolongado de tiempo. Esto permitirá obtener una cantidad de datos suficientes para realizar una estimación del potencial

daño sobre infraestructura, elaborar y calibrar distintos modelos predictivos de vibración y generar recomendaciones con respecto a estos resultados.

1.1.1. Objetivos

1.1.1.1. Objetivo principal

Estudiar las vibraciones generadas por tronadura en una compañía minera, y en base a estos resultados establecer alertas, modelos de vibración y recomendaciones técnicas con el propósito de mantener la integridad de la infraestructura de la planta de procesamiento.

1.1.1.2. Objetivos específicos

- Definir un plan de monitoreo de vibraciones con una duración, ubicación, y equipos de medición específicos;
- realizar la instrumentación en terreno de los equipos de acuerdo al plan definido;
- Recopilar información desde las estaciones sismológicas;
- recepcionar y digitalizar la información de tronadura desde la compañía minera;
- filtrar ondas de vibración de acuerdo al origen o fuente de éstas;
- asociar la información de tronadura con registros de vibración filtrados;
- Definir las normas o criterios de daño a infraestructura que sean representativas del estudio;
- evaluar los registros de vibración asociados a tronadura sobre los criterios o normas seleccionadas;
- Identificar datos outliers dentro de la base de datos generada;
- elaborar modelos de vibración de acuerdo a la ley escalar de Devine, 1966 [9];
- elaborar modelo de vibración de acuerdo a la metodología propuesta por Ruilin Yang & Scott Scovira, 2008 [39];
- elaborar modelo de vibración de acuerdo a la metodología propuesta por Blair, 1999 [5];
- estimar niveles de vibración mediante el uso de modelos calibrados y comparar con datos medidos;
- Comparar los modelos obtenidos de acuerdo a los resultados de cada uno;
- establecer ventajas y desventajas de cada modelo y exactitud de estos;
- Generar simulaciones en el dominio de la frecuencia para la evaluación y validación de

las estimaciones contra la realidad;

- Generar recomendaciones de acuerdo a los resultados del impacto sobre infraestructura;

1.1.2. Alcances

- Determinar un modelo predictivo de vibraciones en campo lejano específico para esta faena en particular considerando las fases 13 y 14 en explotación;
- el macizo rocoso analizado corresponde al Hipógeno, unidades geotécnicas 13 y 14, y la caracterización del terreno se realizará en una franja longitudinal desde esta zona a los puntos de monitoreo;
- los resultados planteados en este informe no aplican a otras fases, unidades geotécnicas ni áreas de terreno que no sean explícitamente mencionadas;
- la información de tronadura fue proporcionada por la compañía minera.
- las tronaduras solo serán evaluadas considerando los niveles de vibración que éstas generen y su impacto en infraestructura;
- el potencial daño se evaluará en función de una o más normas validadas internacionalmente;
- los modelos predictivos de vibración por tronadura serán implementados y elaborados siguiendo la metodología indicada en las publicaciones correspondientes.

1.1.3. Limitaciones

- Durante el periodo de elaboración de los modelos de vibración por tronadura se decidió realizar un software capaz de llevar a cabo la metodología de cálculo de tres modelos: modelo de Devine o de ley escalar [9], de Yang & Scovira [39] y de Blair[5]. Sin embargo, la empresa encargada de realizar la implementación computacional no fue capaz de entregar un producto finalizado y suficientemente confiable para llevar a cabo el modelo de Blair, por lo que este modelo queda fuera de los alcances de esta memoria.
- La información de tronadura proveniente de la compañía minera no informaba sobre los tiempos de retardo o secuencia de los pozos, lo cual fue una limitante para el modelo de Yang & Scovira. Tampoco informaba acerca de la hora de cada una de las tronaduras que se llevaban a cabo, y por lo tanto, resultó complicado establecer una asociación mayor entre la vibración medida y la tronadura cuando existían muchas posibilidades o combinaciones de asociación.
- Los modelos de vibración obtenidos en este estudio fueron elaborados para cada estación sismológica y su extrapolación a otros sectores de la faena es de completa responsabilidad de quien la realice, mas no se recomienda.
- La instrumentación en terreno no formó parte de este trabajo, dado que ésta ya se

encontraba instalada al momento de dar inicio a esta memoria. Las referencias respecto a su selección, configuración y uso fue obtenida a partir de datos recabados de la documentación en la empresa.

- No ha sido posible establecer una relación entre la geología y unidades geotécnicas de las zonas de estudio con la propagación y atenuación de las vibraciones en terreno.
- No se realizó un análisis dinámico estructural sobre los puntos de interés, debido a que no se cuenta con la expertíz suficiente para proponer un análisis de este estilo. No obstante, se utilizó información referente a las frecuencias naturales de resonancia de la infraestructura, para considerar el peor escenario posible al momento evaluar los PPV estimados en un criterio o norma de daño por tronadura.

Capítulo 2

Antecedentes

En este capítulo se presentan los antecedentes del problema particular y el marco teórico sobre el cual se desarrollará este trabajo.

2.1. Antecedentes del problema

En la I región de Tarapacá, aproximadamente a 9 km al poniente de la localidad de Mamiña, se encuentra la faena minera en donde se lleva a cabo este estudio. Esta cual forma parte de un grupo internacional dedicado a la extracción y procesamiento de recursos minerales. Esta faena dio inicio a sus operaciones el año 1994 con una producción promedio inicial de 60.000 ton/año de cátodos de cobre, en el transcurso del tiempo la producción aumentó hasta llegar a las 130.000 ton/año de cátodos de cobre que se producen actualmente a través el procesamiento de mineral mediante chancado en tres etapas, lixiviación en pilas, extracción por solventes y electro obtención ¹.

El año 2011 se presentó un proyecto que buscaba modificar la planificación espacial de la operación del rajo, priorizando la explotación de mineral en las áreas con mayor ley de cobre manteniendo la tasa de producción de cátodos. Para esto se propuso la explotación anticipada de las fases 13 y 14 del rajo. Dichas fases se encuentran relativamente cercanas a la infraestructura de la planta de procesamiento, la cual podía verse afectada por las operaciones mineras que se desarrollarían en el área. La tronadura, operación unitaria fundamental del ciclo minero, cuyo objetivo principal es el arranque y desplazamiento del estéril y mineral desde el macizo rocoso para su posterior carguío y transporte, podría afectar negativamente la estabilidad de las paredes del rajo, ocasionar daño a la infraestructura industrial y civil e incluso producir molestia en las personas si las vibraciones inducidas en el terreno no son controladas efectivamente.

En virtud de cautelar la infraestructura de la planta de procesamiento de las vibraciones inducidas por tronaduras en las fases 13 y 14, se propuso realizar un estudio de las vibraciones en terreno, y en base a este generar recomendaciones periódicas y finales al área de perforación y tronadura de la minera.

¹Información correspondiente a los años 2014 y 2015

2.1.1. Descripción de la operación actual

En esta subsección se describen las obras, acciones y partes físicas de la faena minera que forman parte de la operación actual en la cual se desarrolló el proyecto.

La totalidad del proyecto comprende solo el Sector Mina, el cual comprende el Área Mina y el Área Planta.

2.1.1.1. Área Mina

En el Área Mina se desarrolla la extracción de mineral desde los frentes activos mediante las operaciones de perforación y tronadura, el carguío y transporte de mineral estéril hacia los botaderos y del mineral hacia los stocks y hacia el chancado.

(a) Actividades en el Área Mina

La explotación del yacimiento se realiza por el método de rajo abierto. El diseño del rajo contempla banco de 10 m y 15 m de altura, rampas y caminos.

El ritmo de explotación actual requiere de la extracción de un promedio aproximado de 56.490 toneladas por día de mineral y una remoción de estéril de alrededor de 180.000 toneladas por día.

Las operaciones unitarias consideran perforación, tronadura, carguío y transporte. La perforación es realizada por personal propio de la faena, utilizando perforadoras hidráulicas con diámetros variables de 9 a $9\frac{7}{8}$ pulgadas de diámetro. La tronadura es realizada por una empresa contratista, la que se encarga de la fabricación y almacenamiento del explosivo, carguío en los pozos de tronadura y posterior detonación.

El carguío de los materiales de la mina se realiza mediante cargadores frontales y palas hidráulicas las que cargan el mineral y el lastre en camiones mineros de alrededor de 177 y 218 toneladas útiles. El mineral se envía posteriormente al chancador primario o stocks y el estéril a los botaderos.

(b) Infraestructura

A continuación se listan los principales desarrollos, obras, instalaciones e infraestructura de servicio que soportan las actividades que se ejecutan en Área Mina y/o que se emplazan en dicha Área. Debido a que ninguna de éstas forma parte del alcance del proyecto no serán detallados.

- Rajo;
- stocks de mineral;
- botaderos de estériles

- taller de mantención de equipos mineros;
- instalaciones de almacenamiento de insumos para tronaduras;
- relleno sanitario
- patio de almacenamiento de neumáticos usados;
- bodega de almacenamiento de equipos radiactivos en desuso;
- piscina de lodos de lavado de equipos móviles;
- tendido eléctrico Minera-Mamiña;
- acueducto, reservorio y planta de osmosis;
- otras instalaciones.

2.1.1.2. Área Planta

En el Área Planta se concentran todas las actividades relacionadas con el proceso productivo, el cual se inicia con el chancado del mineral, seguido de su lixiviación en pilas dinámicas y la disposición del material agotado en los botaderos de rípios; la separación del cobre, para obtener una solución rica en el proceso de extracción por solventes, y finalmente la recuperación del cobre desde la solución rica mediante electrocátodos obtención, para obtener los cátodos de cobre.

(a) Actividades en el Área Planta

Luego del chancado secundario y terciario el material, que se encuentra en su totalidad bajo 1/2 pulgada, es almacenado en silos (Planta 1) y en un domo cubierto (Planta 2). Desde estos silos el material es enviado a la etapa de aglomeración.

El material aglomerado es transportado mediante un sistema de correas móviles hasta las canchas de lixiviación, donde es acopiado mediante un sistema de apilamiento móvil formándose pilas de una altura variable entre 3 y 10 m de altura.

Las pilas de lixiviación son regadas con una solución ácida (refino) que da como resultado una solución rica en cobre (PLS) la cual es enviada por un sistema de canaletas y tuberías a piscinas de decantación y posteriormente a piscinas de almacenamiento de solución PLS. Ésta solución alimenta al circuito de extracción por solvente (SX), de este se obtienen dos productos, el electrolito y el refino.

La solución rica en cobre, o electrolito fuerte, es conducida hasta la etapa de electrocátodos obtención (EW) donde en celdas electrolíticas se extrae el cobre desde la solución mediante una diferencia de potencial eléctrico.

(b) Infraestructura

La principal infraestructura que soporta los procesos asociados al Área Planta es listada

a continuación. Se ha puesto especial énfasis en la zona de pilas de lixiviación debido a que ésta será la zona monitoreada por las estaciones sismológicas.

- Planta de chancado y sistema de correas;
- acopios de mineral fino y aglomeradores;
- estaciones de descarga y almacenamiento de ácido sulfúrico;
- pilas de lixiviación, sistema de correas y piscinas de manejo de soluciones:

Corresponden a pilas dinámicas de 3 a 10 m de altura, colocadas sobre una membrana de polietileno de alta densidad (HDPE de su abreviatura en inglés) de 2mm, y cuentan con un sistema de drenaje que se utiliza para recolectas y transportar las soluciones hacia las piscinas de manejo de soluciones. Las pilas de lixiviación ubicadas al Suroeste del rajo corresponden a la Planta 1, mientras que las pilas ubicadas al Sureste del rajo corresponden a la Planta 2. Las dos áreas de lixiviación cubren un superficie total estimada de 270 hectáreas. La zona de lixiviación se divide en 16 pilas en la Planta 1 y 13 pilas en la Planta 2.

- Planta de extracción por solventes (SX) y patio estanque;
- planta de electro obtención (EW);
- botadero de ripios;
- subestación eléctrica principal;
- otras instalaciones.

2.1.1.3. Definición de la zona de estudio general

Dados los antecedentes generales del problema, se propuso monitorear las vibraciones inducidas por tronaduras en infraestructura específica del Área Planta, con especial énfasis en aquellas tronaduras llevadas a cabo en las fases 13 y 14 del rajo. Por lo tanto la zona definida como parte del estudio corresponde al polígono que contiene las pilas de lixiviación dinámicas de la Planta 1 (color amarillo en la imagen), zona de cañerías HDPE y silos (color azul en la imagen), las fases 13 y 14 (color rojo) y la zona intermedia entre estas ubicaciones.

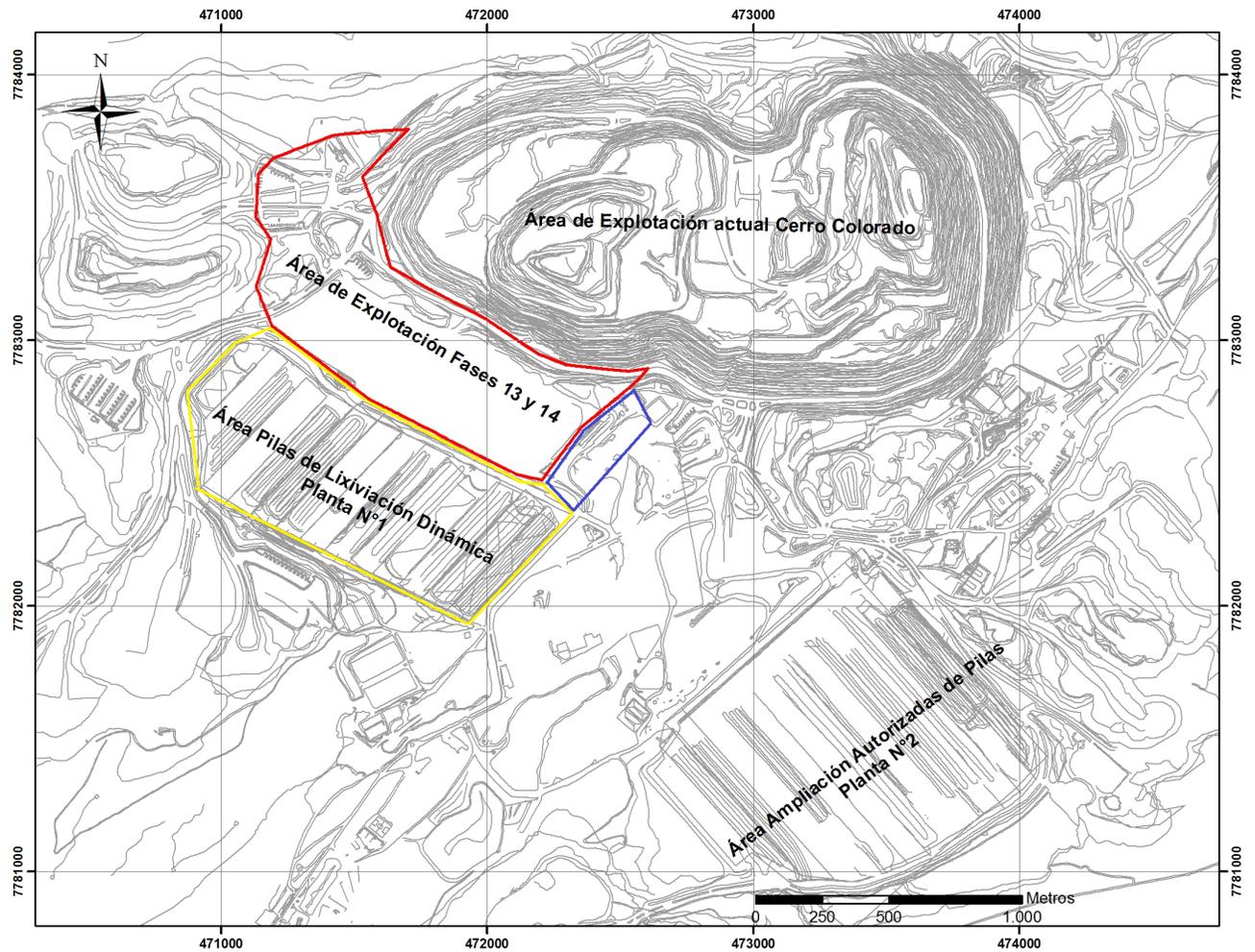


Figura 2.1: Zona de estudio: fases 13 y 14, pilas dinámicas de lixiviación Planta 1 y zona de cañerías HDPE y silos.

2.1.1.4. Zonas de monitoreo específicas

Silos 1 y 2

La estructura de los silos se soporta en una fundación circular, con diámetro de 28 m. y un espesor de 3.4 m en el centro y 2.0 en la parte exterior del anillo de cimentación, la fundación resiste cinco columnas cuadradas de 1 m x 1 m en el interior del primer nivel, las que a su vez con ayuda del anillo de concreto y las vigas de acero, soportan la losa que sirve de apoyo al material almacenado. Un estudio realizado el año 2015 por Hatch [36] indica que la solidez de la fundación y la conformación estructural del edificio absorben convenientemente las vibraciones de los silos y se estima que pueden soportar convenientemente las vibraciones emitidas por efecto de las tronaduras.



Figura 2.2: Zona de estudio: Silos de Planta 1.

Fundaciones edificio Harneros

El edificio Harneros presenta una estructura de acero- hormigón, con 5 x 4 ejes, un área total de 21.65 m x 27 m y una altura de 33.18 m; el edificio se apoya una parte en una losa de cimentación que va entre dos ejes, la otra sección del edificio se soporta en 4 zapatas independientes amarradas por vigas de fundación entre los otros dos ejes, unidas por vigas de amarre. Los niveles inferiores sobre las fundaciones, son columnas de hormigón armado, unidas también por vigas del mismo material; vigas y columnas de concreto se aprecian sanas, sin hormigoneo, grietas, ni deformaciones aparentes, las fundaciones en apariencia no presentan desniveles o asentamientos diferenciales; la estructura de acero, al igual que sus soportaciones sobre el concreto están en buen estado de conservación [36].



Figura 2.3: Zona de estudio: edificio Harneros.



Figura 2.4: Zona de estudio: edificio Harneros, fundaciones.

De acuerdo a un informe emitido por Hatch el año 2015 [35], las estructuras permiten absorber en buena forma las vibraciones resultantes de la tronadura en ambos sentidos debido a su rigidez e inercia, por lo que no ameritaría realizar mejoras en la estructura para absorber vibraciones en ambos sentidos, esto a pesar de ser la edificación más cercana a la zona de tronadura F14 (80 m aprox).

Correa CV-05

La correa va desde el edificio de harneros hasta el edificio de chancado, es una correa de 36", con una longitud aproximada de 171 m, con una velocidad de 2.7 m/s y una capacidad de diseño de 1058 TPH. La correa tiene una torre de contrapeso y se soporta en 3 cepas.



Figura 2.5: Zona de estudio: Correa CV-05.

De acuerdo al informe emitido por Hatch, esta correa requeriría mejorar las fundaciones de la Cepa 1, además de un monitoreo continuo de las vibraciones, no así la torre, y cepas 2 y 3.

Correa CV-07

La correa va en dos tramos desde el edificio de Chancado hasta el edificio de harneros en el tramo norte y desde el edificio de harneros hasta los silos en el tramo sur, con una longitud total aproximada de 328 m; es una correa de 36", con una velocidad de 2.8 m/s y una capacidad de diseño de 1067 TPH. Esta correa se soporta hacia el sur sobre la Cepa 1 y una torre de contrapeso, mientras hacia el norte lo hace con las Cepa 4 y Cepa 5.



Figura 2.6: Zona de estudio: Correa CV-07.

Las torres de transferencia y de contrapeso de las correas, presentan fundaciones inde-

pendientes para cada una de las columnas de acero de las estructuras pertenecientes a las distintas correas, soportadas por sus respectivos pedestales y mesas de anclaje a las fundaciones. Son estructuras esbeltas que absorben convenientemente las vibraciones producidas por la operación de las correas.

Las fundaciones en hormigón armado para las diferentes cepas son cimentaciones únicas para cada de las correas CV-03, CV-05 y CV-07; Se observan en buen estado, tanto el hormigón como las estructuras de acero, de acuerdo a información obtenida desde la minera, éstas están diseñadas para soportar las vibraciones resultantes de la operación [36] [35].

Estanques de ácido

En la zona de descarga de los camiones de transporte de ácido, actualmente la descarga es a través manguerotes y luego el fluido es traslado por cañerías hacia los estanques, éstas se encuentran en altura y están soportadas sobre pilares.



Figura 2.7: Zona de estudio: Estanques de ácido.

Anterior al estudio, en la línea de descarga de ácido, a unos 20m desde la descarga de los estanques ácido, existió una rotura de cañería, la que fue reparada mediante un by pass con una tubería de HDPE.

Los manguerotes utilizados en las descarga permiten absorber las vibraciones por efecto de las tronaduras. Las cañerías nuevas de alimentación a estanques, por estar en altura, deben ser capaces de absorber los movimientos verticales y horizontales provocados por las tronaduras,

esto es debido a que los pilares son livianos y se mueven fácilmente a las vibraciones del suelo. A simple vista se aprecia un deficiente aislamiento a las vibraciones, donde las fijaciones y anclajes se aprecian que no están aislados. La línea de descarga, donde se produjo la rotura, es difícil atribuirla directamente a los efectos de vibraciones, la mayor probabilidad es que la rotura se produjo por una combinación de situaciones, siendo algunas de ellas la vida útil de la cañería, concentración de tensiones en el punto de rotura, o que la cañería estuviera sometida a sobreesfuerzos externos, como paso el vehículos sobre ella u otros [35].

2.2. Marco teórico

En esta sección se definen términos, conceptos, procesos, equipos, insumos, criterios y modelos que son relevantes para entender la naturaleza y resultados de este proyecto. En base a este marco teórico se desarrollará la metodología, se analizarán los resultados y se establecerán conclusiones y/o recomendaciones.

En virtud del orden y mantener la estructura del trabajo, se ha dividido el marco teórico en tres categorías: Monitoreo y análisis de vibraciones en roca; Modelos para la estimación de vibraciones por tronadura; e impacto de las vibraciones en infraestructura.

2.2.1. Monitoreo y análisis de vibraciones

A continuación se definen todos los aspectos relevantes para el estudio que tengan relación con el registro de vibración, sus características y categorización de acuerdo al origen y medio por la cual se propagan.

2.2.1.1. Vibraciones por tronadura

Cuando se lleva a cabo la detonación de una columna de explosivo, la roca en la zona inmediata a esta columna se fractura, separa y desplaza dependiendo de las condiciones del terreno y distribución, tipo y cantidad de carga explosiva, entre otros factores de influencia, a esta zona se le llama zona no elástica o zona de cráter. En dicha zona se consume la mayor cantidad de la energía explosiva, sin embargo, una pequeña porción de ésta se extiende más allá de la zona de fracturamiento en forma de vibraciones elásticas del suelo y ondas de aire [12].

Tipos de ondas en vibraciones por explosiones en roca

Las ondas de vibración generadas por cargas explosivas en un medio sólido como la roca generan distintos tipos de ondas (Figura 2.8) ondas de compresión (o P), ondas transversales (o S) y ondas de superficie o Rayleigh (o R). Las ondas P y S se propagan a través del cuerpo de la roca o el suelo, y las ondas R se transmiten a lo largo de la superficie del terreno. La más rápida de estas onda es la onda P, la cual tiene velocidades, V_p , de aproximadamente 1830 m/s a 6100 m/s, por lo tanto es la primera que arriba de los tres tipos de onda, le sigue la onda S que se desplaza a cerca de $3/5$ de la velocidad de la onda P, finalmente se produce el arribo de las ondas Rayleigh con una velocidad de 0.9 veces la velocidad de la onda S. En detonaciones a distancias cortas, las ondas de cuerpo son predominantes y la identificación de los distintos tipos de onda en el registro de vibración es complicado debido a la superposición de unas sobre otras, mientras que a distancias mayores las ondas Rayleigh recuperan importancia en términos de amplitud y es posible identificar los distintos tipos de onda debido a tiempos de arribo más espaciados. Otro efecto de la distancia es que a mayor distancia la onda se extiende y su intensidad o amplitud disminuye [12].

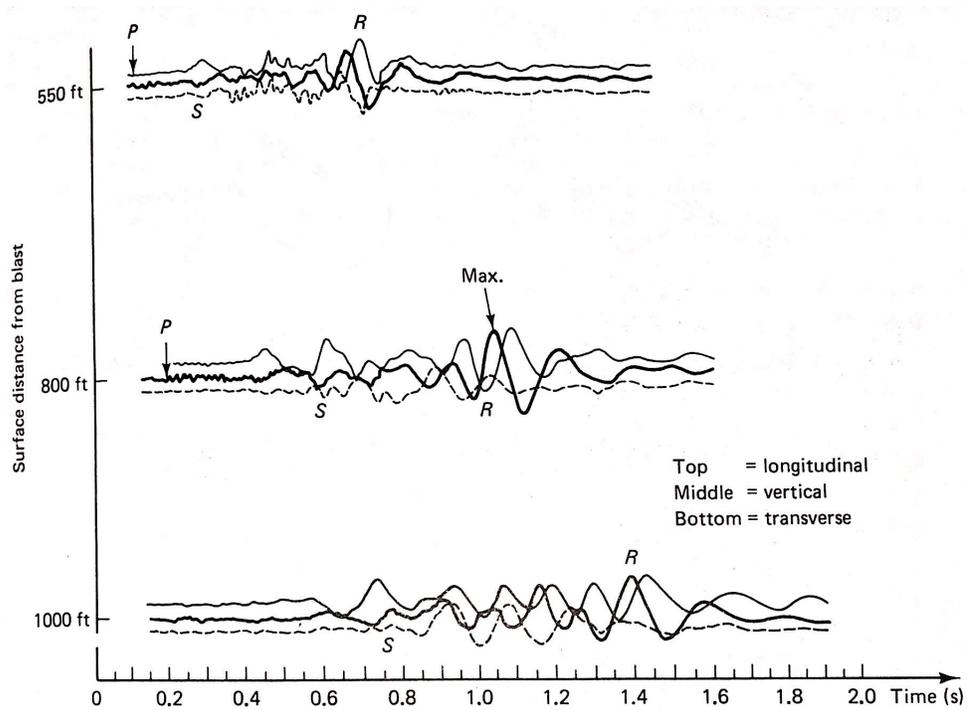


Figura 2.8: Identificación de ondas de compresión o P, ondas corte o S y ondas de superficie o Rayleigh, en registros de vibración por tronadura a diferentes distancias.

En la Figura 2.9 se observa como los tres tipos de onda producen distintos tipos de patrones de movimiento en las partículas del terreno o suelo a medida que se propagan. Como resultado, las estructuras construidas sobre este van a ser deformadas de diferente manera por cada una de estas ondas. Las ondas longitudinales (del tipo de compresión) mueven las partículas en la misma dirección de propagación de la onda, mientras que las ondas de corte producen movimientos perpendiculares a la dirección de propagación, ya sea de manera horizontal o vertical. Por su parte, las onda Rayleigh producen movimientos en ambas direcciones verticales y también paralelas a la dirección de propagación, haciendo que sean las más complicadas de evaluar en la práctica [7].

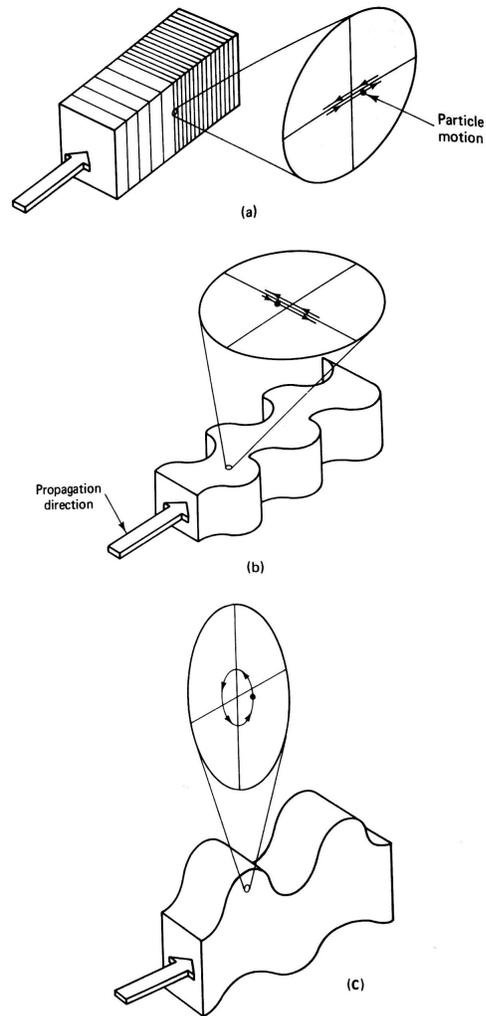


Figura 2.9: Movimiento de las partículas del terreno frente a (a) ondas de compresión (o P), (b) ondas de corte (o S) y (c) ondas Rayleigh (o R) [7].

En tronaduras es complicado identificar correctamente cada uno de los tipos de onda, esto debido a que las detonaciones ocurren en diferentes instantes de tiempo, con solo unos pocos milisegundos de diferencia entre uno y otro, mientras que algunas ocurren simultáneamente, además las cargas están separadas por distancias cortas y a menudo se produce un traslape de ondas individuales en la medición. Este tipo de dificultades ha limitado el estudio detallado de la sismica de tronaduras. Para sobrellevar este tipo de problemáticas, se ha optado por simplificar la onda de vibración a variables representativas que permitan analizar los efectos de la vibración por tronadura, una de estas simplificaciones consiste en considerar solo el peak de desplazamiento, velocidad o aceleración de las vibraciones y la frecuencia principal de la onda.

Aproximación sinusoidal de las vibraciones por tronadura

Las vibraciones típicas de tronadura, sin importar el tipo de onda analizada, pueden ser aproximadas por una función sinusoidal en torno a cero (estado de reposo), que describe

el movimiento de la partícula del suelo por donde pasa la onda, ya sea en el tiempo o en la distancia. Este tipo de aproximación es útil ya que facilita los cálculos de deformación y aceleración a partir de la velocidad máxima de partícula registrada en una medición [7]. Las siguientes ecuaciones (2.1) describen el movimiento de una partícula mediante esta aproximación.

$$\begin{aligned}
 u &= \int v dt \\
 v &= \int a dt \text{ o } v = \frac{du}{dt} \\
 a &= \frac{dv}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Donde, u es el desplazamiento de partícula, v es la velocidad de partícula, a es la aceleración de la partícula que es perturbada por el paso del tren de ondas y t es el tiempo. En la Figura 2.10 se grafican estos movimientos en el tiempo junto a las respectivas ecuaciones.

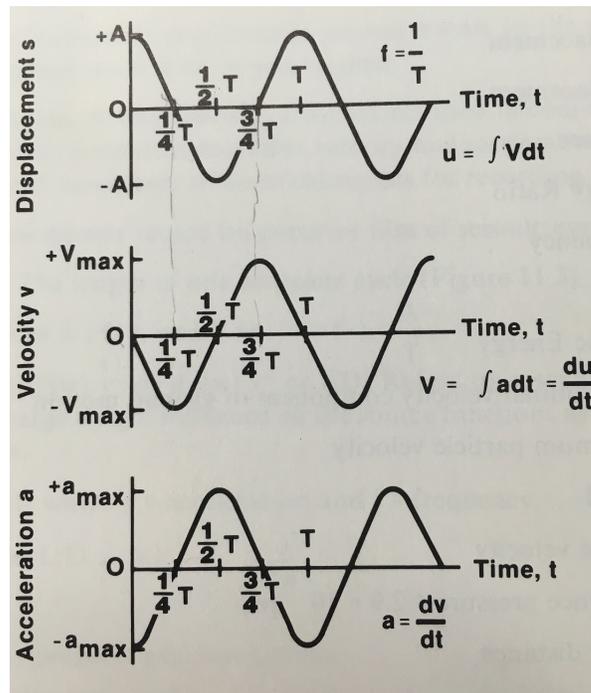


Figura 2.10: Gráfico de desplazamiento, velocidad y aceleración de un movimiento de una partícula descrita mediante una aproximación sinusoidal. Donde, A = amplitud del desplazamiento, v_{max} = amplitud de la velocidad, a_{max} = amplitud de la aceleración, T = periodo y $f = 1/T$ es la frecuencia.

Dependiendo del tipo de transductor sísmico que se utilice para medir las vibraciones mediante el desplazamiento, velocidad o aceleración, podremos utilizar las ecuaciones de integración o diferenciación anteriores para convertir de una magnitud a otra. En análisis de vibraciones, lo más común es medir directa o indirectamente la velocidad de partícula y convertir utilizando las ecuaciones de movimiento armónico simple (2.2) [24].

$$\begin{aligned}
u &= \frac{v}{\omega} + \frac{v}{2\pi f} \\
v &= \frac{a}{\omega} + \frac{a}{2\pi f} + 2\pi f u \\
a &= \omega v = 2\pi f v
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Donde, f es la frecuencia del segmento de la onda en donde se produce el peak de la amplitud, y $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular.

En la mayoría de los casos nos interesa el caso en donde se ha producido el mayor desplazamiento, ya que es cuando la deformación se maximiza y la posibilidad de daño en un medio elástico rígido como las edificaciones aumenta (Ecuación (2.3)). Las siguientes relaciones (Ecuación (2.4)) describen las magnitudes de desplazamiento, velocidad y aceleración máximas que son utilizadas al construir la mayoría de los criterios de daño sobre infraestructura cuando la frecuencia de la vibración, f , es conocida [7].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{AE} \tag{2.3}$$

En donde, F es la fuerza que provoca el esfuerzo, ΔL es el alargamiento, L la longitud original, E el módulo de Young y A la sección transversal de la pieza sometida a esfuerzo.

$$\begin{aligned}
u_{max} &= U \\
\dot{u}_{max} &= U\omega = U2\pi f = 2\pi f u_{max} \\
\ddot{u}_{max} &= U\omega^2 = U4\pi^2 f^2 = 2\pi f \dot{u}_{max}
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Estas unidades de movimiento pueden ser reportadas en dos grupos dependiendo de la región en que nos encontremos, la mayoría lo expresa en unidades métricas como u en mm (milímetros), v en mm/s y a en mm/s^2 . En Estados Unidos se utiliza el sistema anglosajón que está en pulgadas, in , in/s y in/s^2 respectivamente.

Rango de magnitud en las mediciones de vibraciones por tronaduras

Dependiendo de la magnitud y distancia a la detonación se tendrá un rango amplio de valores de vibración [10], en la tabla 2.1 se proponen rangos de valores referenciales obtenidos a partir de mediciones en terreno. Al calcular los rangos dinámicos de las variables, se puede observar que estos son bastante grandes: 100 dB para los desplazamientos, 140 dB para las velocidades y 80 dB en aceleraciones [2]. A juzgar por estos valores, la velocidad es la métrica con mayor rango dinámico y por lo tanto mayor resolución de los tres, además es aquella a partir del cual se han correlacionado de mejor forma los daños en infraestructura y se han elaborado modelos de estimación de vibración.

Tabla 2.1: Rango de magnitud típicos en las mediciones de vibración por tronadura [10].

Parámetro	Rango	Unidades
Desplazamiento	$10^{-4} \rightarrow 10$	<i>mm</i>
Velocidad de partícula	$10^{-4} \rightarrow 10^3$	<i>mm/s</i>
Aceleración de partícula	$10 \rightarrow 10^5$	<i>mm/s²</i>
Frecuencia	$0.5 \rightarrow 200$	<i>Hz</i>
Longitud de onda	$30 \rightarrow 1500$	<i>m</i>
Duración de pulsos	$0,1 \rightarrow 2$	<i>s</i>
Deformación	$3,0 \rightarrow 5000$	μ in/in

Registro de vibración

En la Figura 2.11 se puede ver un registro típico de vibración por tronadura obtenido de la literatura. En esta se observan los parámetros más importantes al momento de estudiar las vibraciones producidas por tronadura: la amplitud máxima (Peak Amplitude B), expresada como desplazamiento, velocidad o aceleración; la duración de la vibración; y el periodo principal (recíproco de la frecuencia principal), que se ubica en el segmento en donde se produce la máxima amplitud (Peak Amplitude B). Todos estos son dependientes del diseño de la tronadura y del medio por donde la vibración se propaga [7].

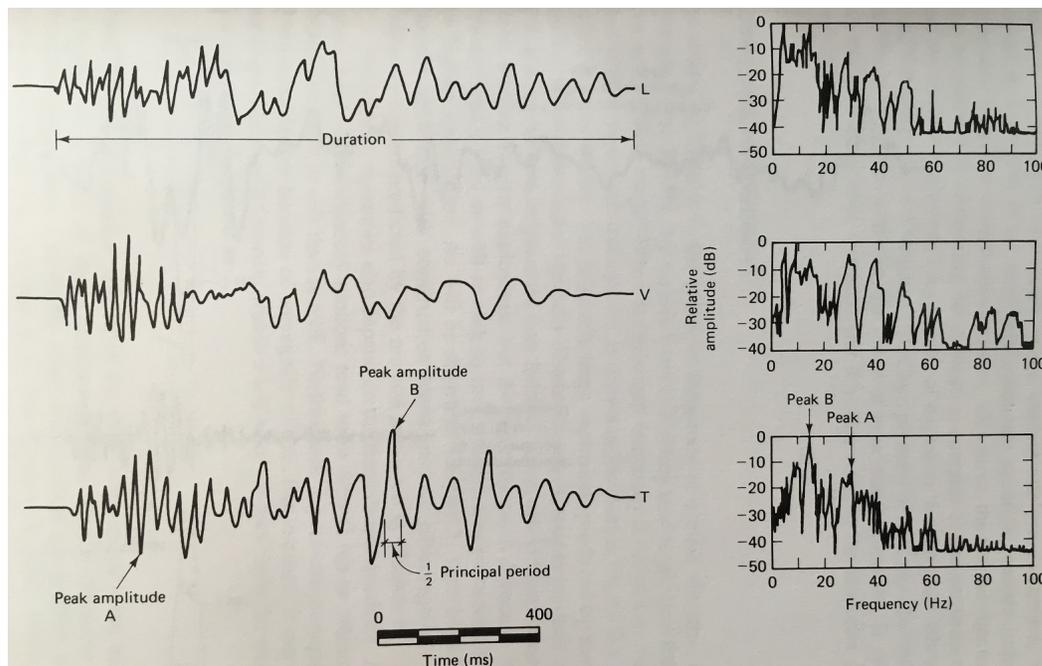


Figura 2.11: Registro típico de vibración por tronadura y sus parámetros principales: amplitud máxima, duración de la vibración y periodo principal.

Tal como se puede ver en la Figuras 2.11 y 2.12, en cada registro de tronadura se miden tres componentes ortogonales simultáneamente: la componente longitudinal, denotada por la letra L, que generalmente se orienta radial a la explosión desde el lugar de medición; la componente vertical, denotada por la letra V; y la transversal, T, ambas perpendiculares a la componente longitudinal. Cada una de estas mediciones son necesarias para describir el movimiento de las partículas en el espacio.

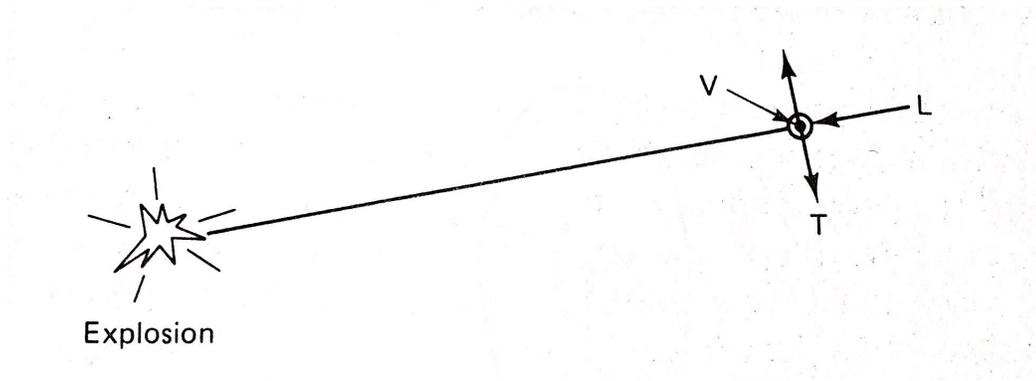


Figura 2.12: Componentes ortogonales de la onda de vibración que deben ser medidos para describir el movimiento de las partículas en terreno.

En la Figura 2.13 se tiene un registro real de tronadura obtenido durante este estudio, para esto se utilizó un geófono triaxial junto a un equipo Instantel Minimate plus. Se aprecian las componentes longitudinal en azul, vertical en verde y transversal en rojo. La amplitud peak se obtiene en la componente longitudinal aproximadamente a los 0,6 segundos.

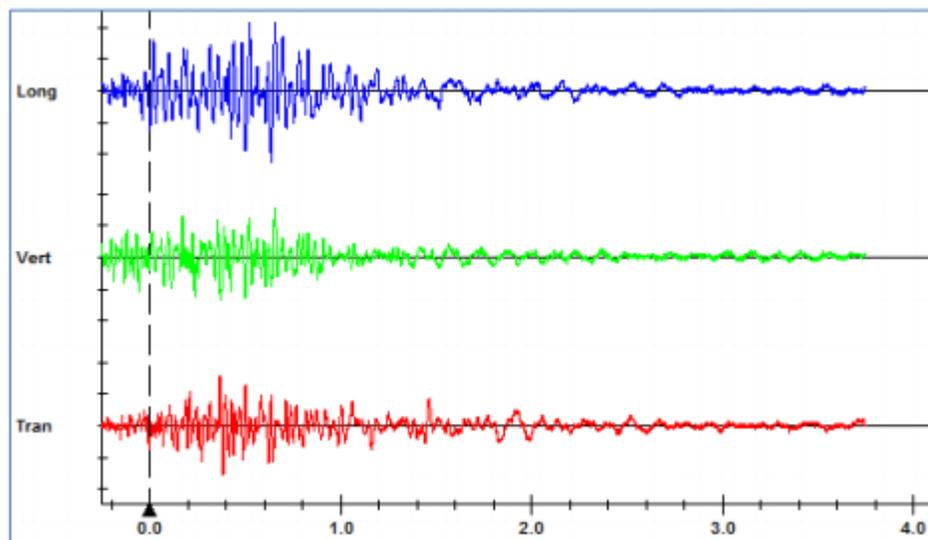


Figura 2.13: Registro de la velocidad de partícula de una vibración, amplitud contra tiempo: componente longitudinal, vertical y transversal.

Amplitud máxima por componente y vector suma

Como se mencionó anteriormente, en la práctica resulta de interés evaluar la vibración en el segmento en donde se produce la amplitud máxima, ya sea aceleración, velocidad o desplazamiento de las partículas en las tres componentes ortogonales principales. Ninguna de estas componentes perpendiculares domina de forma permanente o es predominante en las vibraciones inducidas por tronadura, por lo tanto, la componente en donde se produce el peak puede variar de una tronadura a otra sin un patrón hasta ahora conocido. De esta misma manera, el peak puede ocurrir a diferentes tiempos y a diferentes frecuencias para

cada una de las componentes.

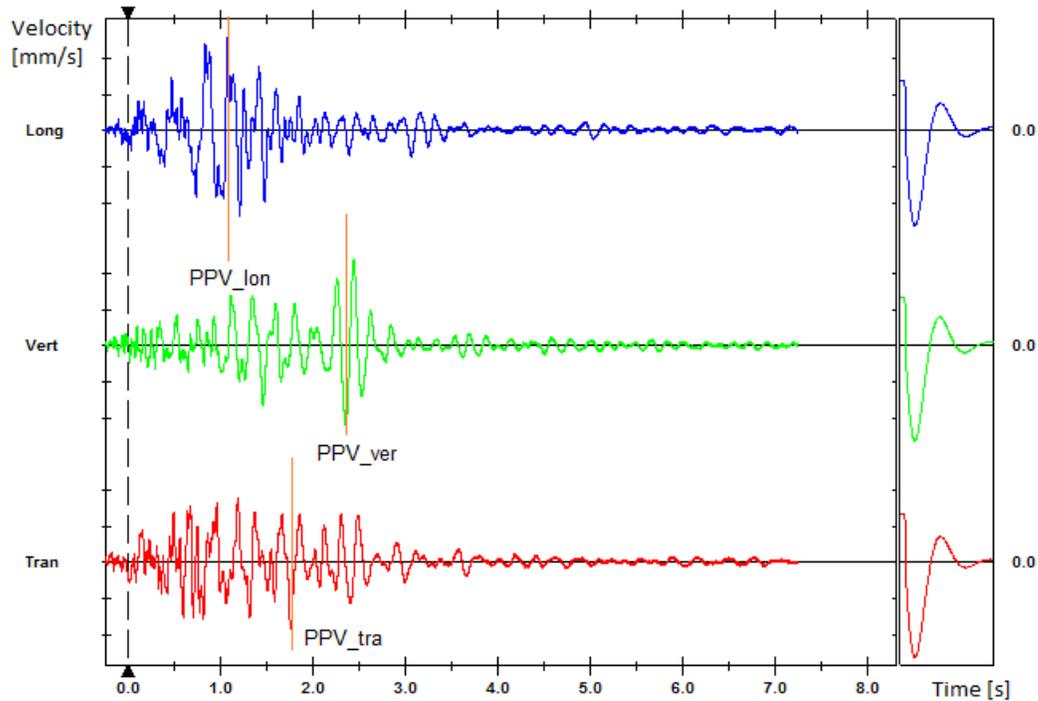


Figura 2.14: Registro de la velocidad de partícula de una vibración, amplitud [mm/s] contra tiempo [s]: peaks de velocidad de partícula para las componentes longitudinal, vertical y transversal.

En la Figura 2.14 se aprecian tres señales de vibración, estas señales corresponden a las componentes longitudinal (Long, en azul), vertical (Vert, en verde) y transversal (Tran, en rojo). Se puede ver como el peak de la velocidad de partícula, PPV, en cada componente ocurre en distintos instantes de tiempo.

Debido a la dificultad en identificar de forma clara cual de las componentes tiene mayor importancia a la hora de analizar el efecto de las vibraciones sobre el terreno, o sobre la infraestructura, se define el peak del vector suma como el máximo valor de la norma del vector de aceleración, velocidad o desplazamiento que contiene las tres componentes ortogonales de la medición [7].

$$PPV_{sum} = MAX\{\sqrt{(V_{Lon} + V_{Ver} + V_{Tra})}\} \quad (2.5)$$

Es usual encontrar el peak del vector suma en el mismo instante en donde se encuentra el peak más alto de una de las componentes.

Es importante notar que los peaks de cada una de las componentes pueden ocurrir en distintos instantes de tiempo y el peak del vector suma no corresponde a la norma de los peaks individuales de cada componente, este suele ser un error común que lleva a sobreestimar los valores de la magnitud medida.

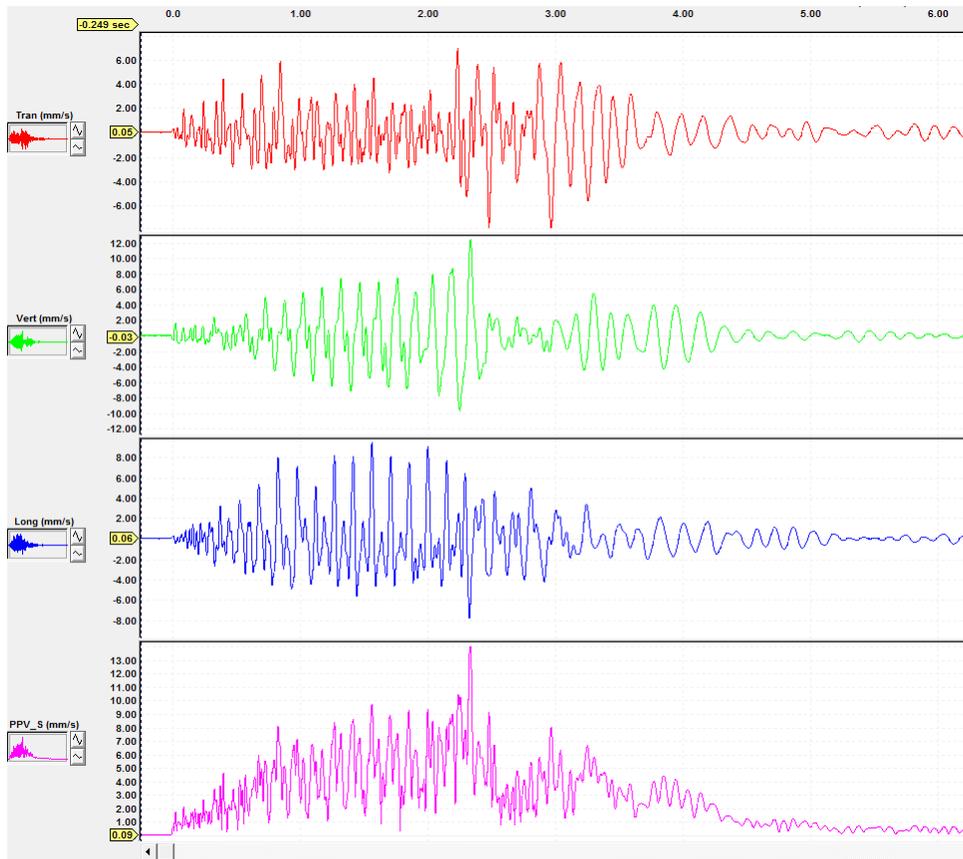


Figura 2.15: Registro de una vibración, velocidad de partícula contra tiempo: componentes longitudinal, vertical, transversal y vector suma.

Mediante el uso del software Blastware[®] de Instantel es posible obtener el vector suma a lo largo de toda la duración de la onda. En la Figura 2.15) se puede observar el vector suma a través del tiempo en color rosa. Notar que el peak del vector suma ocurre en el mismo instante que el peak de la componente vertical, pero no así en los peak de las componentes longitudinal ni transversal.

Frecuencia de las vibraciones

Habitualmente la frecuencia de las vibraciones por tronadura es estimada utilizando el método Zero Cross (ZC) o del semiperiodo, en esta se usan los tiempos a la cual la amplitud de la señal es cero para definir el periodo de la onda, o la mitad del periodo de la onda. Con este método, la frecuencia “dominante” o principal usada por la mayoría de las personas es la frecuencia derivada a partir de una media-onda, cual tiene un valor absoluto de amplitud mayor. La desventaja de este método es la inexactitud al momento de evaluar frecuencias en una onda compuesta en la cual la amplitud de las ondas singulares son iguales, pero con distinta frecuencia.

Otro método para evaluar la frecuencia de una vibración es mediante la transformada rápida de fourier (en inglés Fast Fourier Transform, en adelante FFT), la cual se presenta en la mayoría de los software incluidos con los equipos de medición. El análisis de fourier establece

que una señal oscilatoria puede ser representada por una serie de ondas armónicas sinusoidales que varían en amplitud, frecuencia y fase. Finalmente nos entrega una distribución de frecuencias de las cuales el peak constituye la frecuencia dominante de la vibración, este análisis puede ser obtenido a partir del software Blastware[®] como se observa en la Figura 2.16.

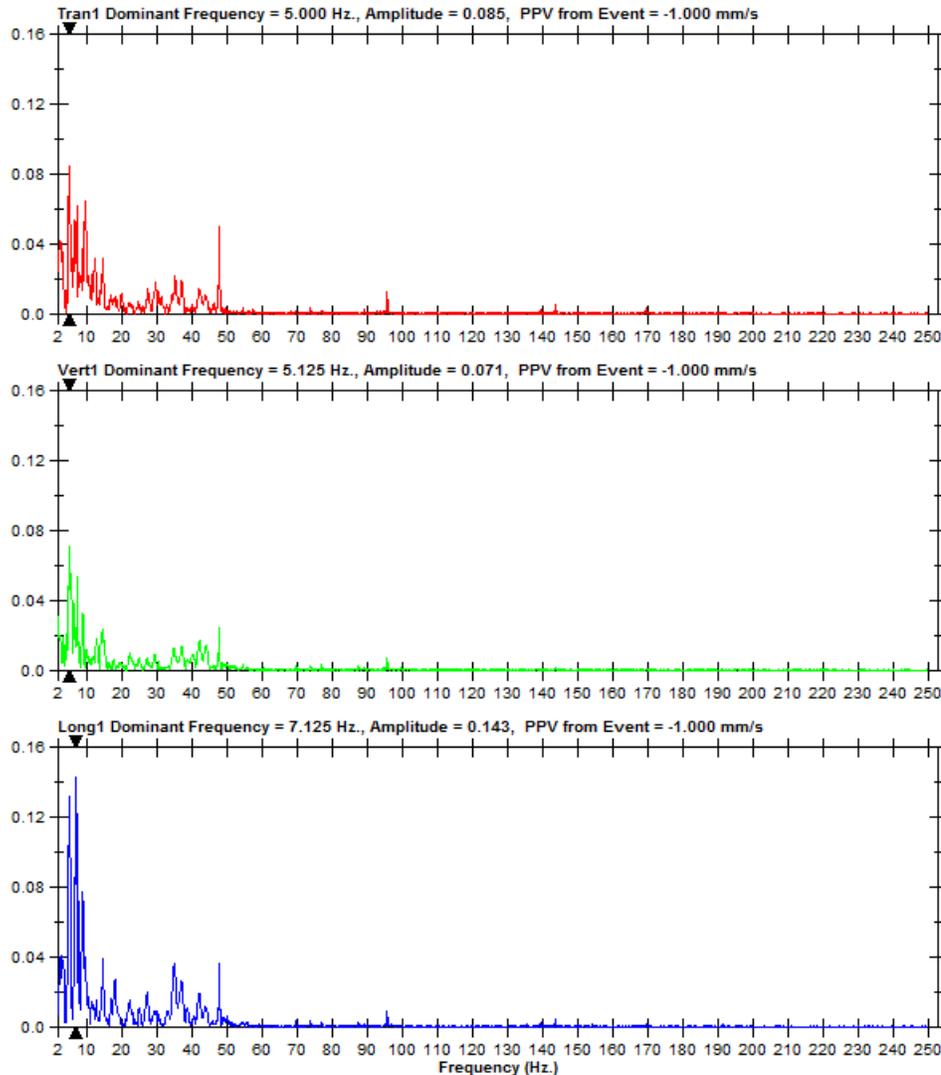


Figura 2.16: Ejemplo de obtención de frecuencia mediante FFT.

Frecuencia principal

Como se mencionó en secciones anteriores, la frecuencia principal (recíproco del periodo principal) se mide cuando ocurre la máxima amplitud, esto hace que resulte muy diferente identificar valores típicos para distintos tipos de voladuras o lugares de medición, por ejemplo, tronaduras en minas de carbón tienden a producir vibraciones con bajas frecuencias comparadas con aquellas con fines civiles, en donde la distancia entre la explosión y el edificio es menor, o en minería metalífera, en donde existe un contacto roca-roca que tiende a generar altas frecuencias [30]. Por lo tanto, la frecuencia principal también depende de la geología del medio por donde se propaga la onda, incluso se han identificado filtros naturales de frecuencia

debido a la naturaleza del material, en donde las frecuencias principales en suelo varían de 1-40 Hz, mientras que roca van de 1 a 100 Hz [21] [7].

Medición de las vibraciones en terreno

Para entender el comportamiento de una onda de vibración en terreno, es necesario primero estar familiarizado con las características principales de cualquier tipo de onda. La frecuencia (f), aceleración (A), velocidad (V) y desplazamiento (D) son magnitudes medibles que pueden ser utilizadas para describir una onda que se propaga por un medio. Éstas están relacionadas a través de las ecuaciones (2.6), (2.7) y (2.8).

$$V = 2 * \pi * f * D \quad (2.6)$$

$$A = 2 * \pi * f * V \quad (2.7)$$

$$A = 4 * \pi^2 * f^2 * D \quad (2.8)$$

Cada una de estas magnitudes puede ser medida remotamente a través de un sensor específico diseñado con este propósito. Se ha identificado que de todas estas características, la velocidad de partícula es aquella que se puede correlacionar mejor con el daño tanto en macizo rocoso como en infraestructura, más que el desplazamiento o la aceleración. Consecuencia de esto último, es que en tronadura se suelen utilizar instrumentos que permiten medir directamente la velocidad de partícula (a partir de esta puede calcularse la aceleración y el desplazamiento), estos instrumentos son llamados sismógrafos de tronadura, los que cuentan con los elementos necesarios para analizar la señal de las vibraciones y también con un micrófono que permite medir la onda de choque que se propaga por el aire.

Como se mencionó anteriormente, para definir completamente el movimiento de las partículas en vibración, han de medirse simultáneamente las tres componentes ortogonales: longitudinal, vertical y transversal. A partir de éstas es posible calcular el vector suma que es la velocidad de la partícula que experimenta un movimiento a raíz del tren de ondas que se propaga en el terreno. Por lo general, tanto el peak de cada componente como el del vector suma es una información de salida de estos instrumentos de medición.

Los sismógrafos de tronadura consisten en un transductor, generalmente un geófono o acelerómetro, conectado a un procesador que se dedica a coleccionar, analizar y almacenar las señales. Es habitual utilizar geófonos triaxiales que son capaces de medir las tres componentes ortogonales de la velocidad, sin embargo, en algunos casos particulares se utilizan geófonos uniaxiales o biaxiales. Es importante identificar el rango de frecuencias y de velocidades que se necesita medir pues la mayoría de los geófonos son capaces de medir en un rango limitado de valores. Instantel es una de las marcas reconocidas en el área minera, en la Figura 2.17 se observan distintos sismógrafos, geófonos y micrófonos de esta marca.

Instalar el geófono de forma correcta es de suma relevancia, este debe permanecer solidario a la estructura o al terreno que se desea estudiar, para esto se pueden utilizar pernos y placas, pesos sobre el geófono como sacos de arena, o una mezcla de concreto en el caso de estar en presencia de un terreno particularmente complicado y poco compacto. El no instalar el

geófono de manera correcta puede llevar a registrar valores de velocidad que no corresponden y por lo general amplificados, debido a la libertad con la que el geófono se mueve.



Figura 2.17: Sismógrafos de tronadura, micrófonos y geófonos marca Instantel.

Velocidad de propagación

La velocidad de propagación de los tipos de onda en el terreno son de gran importancia ya que se consideran una medida indirecta de como las propiedades de la roca o suelo afectan el decaimiento de los peaks de velocidad de partícula así como el largo de onda. La velocidad de propagación es diferente para cada tipo de onda y en cada macizo rocoso, en general la onda de compresión o P tiene la mayor velocidad de propagacion de los tres, por lo que será la primera en ser registrada luego de una detonación. Le sigue la onda de corte o S, ésta viaja a una velocidad de aproximadamente 50-60 % de la velocidad P. Finalmente, con una velocidad de propagación mucho menor se encuentra la onda Rayleigh que se propaga a través de la superficie. En la Figura 2.18 se ve como la velocidad de propagación afecta al peak de la velocidad de partícula final con el arribo de cada tipo de onda.

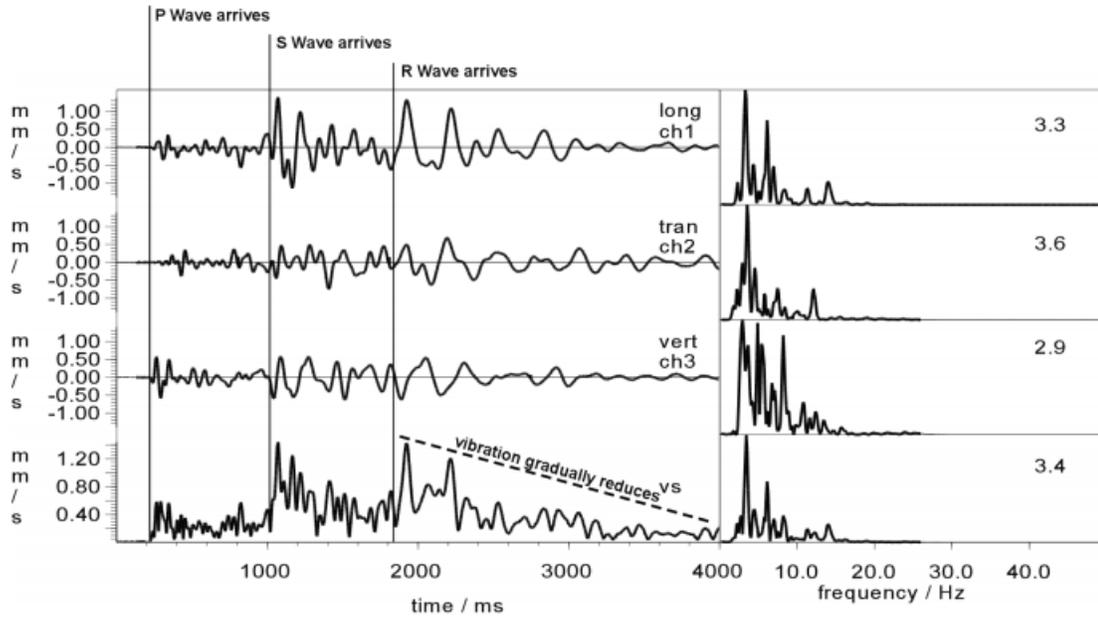


Figura 2.18: Arribo de los distintos tipos de onda y el efecto de la velocidad de propagación en el peak de la velocidad de partícula.

2.2.2. Ecuaciones de propagación y decaimiento de las vibraciones

Es conocido que la amplitud de la onda de vibración decrece con el aumento de la distancia de propagación, como resultado de dos mecanismos diferentes e independientes –disipación geométrica y pérdida friccional (algunas veces llamado histéresis) [7] [10] [8].

2.2.2.1. Disipación geométrica

La energía contenida en el impulso inicial de vibración se irradia hacia el exterior con un frente de onda esférico, si la fuente inicial de vibración está concentrada en un punto, y el medio de propagación es homogéneo. Después de un tiempo de iniciado el impulso, el frente de onda esférico se hace cada vez más grande. Sin embargo, la energía total no puede aumentar y en un medio perfectamente elástico se mantendrá constante, independiente del diámetro del frente de onda esférico. Por lo tanto, la energía por unidad de área debe decrecer, debido a que la energía total es irradiada en una superficie total en aumento.

Para un frente de onda esférico, el área de la esfera ($4\pi r^2$) es proporcional al cuadrado de la distancia de propagación, por lo tanto la energía por unidad de área debe decrecer inversamente con el cuadrado de la distancia, es decir $\frac{E}{A} \propto \frac{1}{A} = \frac{1}{4\pi r^2}$.

Debido a que la energía es proporcional al cuadrado de la amplitud, debiéramos esperar que la amplitud decrezca de acuerdo al inverso de la distancia, si el frente de onda en expansión es esférico. Para una forma general del frente de onda, se espera que la velocidad de vibración a cierta distancia r , $V(r)$, este relacionada con la velocidad V_0 a la distancia $r = 1$ por $V(r) = V_0(r)^{-n}$, donde n varía típicamente entre 1 y 2 para tronaduras.

2.2.2.2. Pérdida por fricción

Debido a que ningún material es perfectamente elástico, la energía se pierde durante la propagación debido a la fricción de las partículas en movimiento. Esta pérdida de energía

por fricción significa que la energía de vibración por unidad de área no se mantiene constante (aunque la energía total debe mantenerse constante de acuerdo a la ley de conservación de energía). La pérdida friccional ocurre debido a que las partículas están sometidas a esfuerzos de compresión y relajación. Una suposición común es que la energía perdida por ciclo de propagación, ΔE , es constante, la Ecuación (2.9) muestra esta relación.

$$\frac{-\Delta E}{E} \frac{1}{2\pi} = K \quad (2.9)$$

El signo negativo es usado para indicar pérdida de energía. Muchos investigadores se refieren a esta constante como Q^{-1} , donde Q es un factor de pérdida de energía [20]. A partir de la definición anterior, la ecuación de pérdida friccional puede ser escrita como en (2.10).

$$\frac{dA}{A} = \frac{1}{2} \frac{dE}{E} = -\frac{\pi}{Q} \frac{dr}{\lambda} \quad (2.10)$$

Finalmente, el decaimiento en la velocidad de partícula puede representarse con de acuerdo a la ecuación (2.11) .

$$V(r) = V_0 e^{-\frac{\pi}{Q} \frac{dr}{\lambda}} = V_0 e^{-\frac{\pi}{Q} \frac{fr}{\lambda}} \quad (2.11)$$

En donde f es la frecuencia de la onda y V_p es la velocidad de la onda P de dicha onda.

2.2.2.3. Consecuencias combinadas del efecto de geometría y fricción

Los efectos de la disipación geométrica y pérdida por fricción son independientes, y actúan simultáneamente todo el tiempo, de tal manera que la descripción final de la amplitud de la onda en función de la distancia de propagación se describe mejor por la ecuación (2.12).

$$V(t) = V_0 r^{-n} e^{-\alpha r} \quad (2.12)$$

En donde el término α se refiere comúnmente como al coeficiente de atenuación dependiente de la frecuencia, y es igual a $\pi/(Q\lambda)$, o $\pi f/(QV_p)$ [3].

En la Figura 2.19 se pueden apreciar los efectos de la disipación geométrica, por fricción y el combinado de ambos fenómenos sobre la amplitud relativa de la vibración con la distancia.

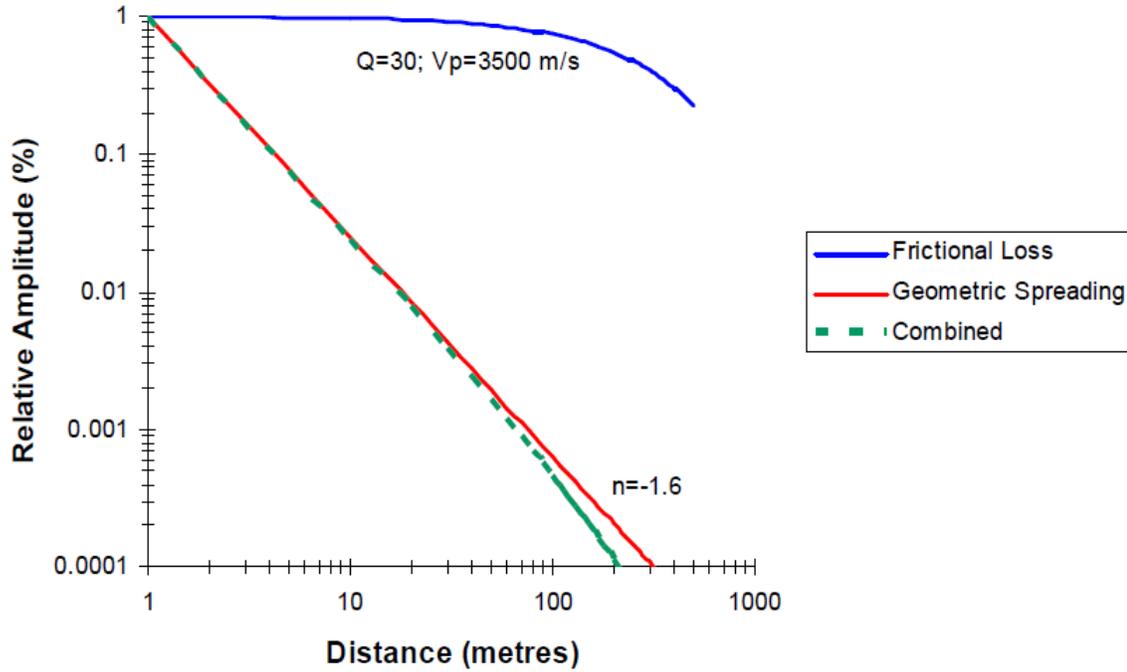


Figura 2.19: Importancia de la disipación geométrica y friccional con la distancia

2.2.3. Modelos para la estimación de vibraciones por tronadura

Anteriormente se mencionó que la magnitud que mayor correlación tenía con el daño provocado por vibraciones de tronadura en la infraestructura y en el macizo rocoso era el peak de la velocidad de partícula. Por esta razón, es que distintos autores han propuesto modelos para la estimación del peak de la velocidad de partícula en base al diseño de tronadura y la recopilación de mediciones en terreno. Los modelos tienen aproximaciones desde la estadística, física, matemática e incluso desde la inteligencia artificial, sin embargo, solo algunos han probado ser consistentes en el tiempo, reconocidos por sus pares o han contado con una base de datos suficiente que los respalde.

A continuación se describen tres modelos para la estimación de vibraciones inducidas por tronaduras que han sido propuestos por autores reconocidos en el área.

2.2.3.1. Ley Escalar de Devine (1966) [9]

Artículo publicado el año 1966 por James F. Devine y Richard H. Beck en donde se realiza un análisis estadístico de la máxima velocidad de vibración (PPV) respecto de la distancia entre el punto de monitoreo y la detonación, considerando los kilogramos de explosivos detonados en un instante de tiempo (se propone considerar una ventana de tiempo de 8 ms). Se estudiaron 39 tronaduras en diferentes canteras a lo largo de Estados Unidos (Iowa, Washington D.C., New York, Ohio, Virginia). El estudio muestra que la raíz cuadrada de la carga de explosivo detonada puede ser usada como un factor de escala, tal como se muestra en la Ecuación (2.13).

$$PPV = K \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-n} \quad (2.13)$$

En donde PPV es la velocidad peak de partícula (mm/s), D es la distancia (m) desde el punto a evaluar al centro de masa de las cargas detonadas, W es el peso total en kilogramos de las cargas detonadas en un intervalo de tiempo, K y n son constantes para cada componente de la velocidad y dan cuenta de la atenuación de la vibración en el medio específico. A menudo el modelo puede ser obtenido mediante una regresión potencial del PPV medido y la distancia escalar correspondiente.

En general este modelo funciona relativamente bien tanto en campo cercano como lejano, sin embargo, las correlaciones tienden a ser más bajas en este último debido a que Devine no considera la componente friccional en la disipación de la onda y su importancia es significativa a grandes distancias.

2.2.3.2. Modelo de predicción en Campo Cercano de Yang (2008) [39]

Yang y Scovira (2008) presentan un modelo de predicción del PPV, el cual es una generalización de la Ley Escalar de Devine. La principal idea involucrada en este modelo es la de carga dominante, la cual representa el pozo que más contribuye al PPV para un punto de monitoreo dado. La distancia efectiva, d_e , se expresa en la Ecuación (2.14).

$$d_e = \frac{d}{\sqrt[a]{S(\phi)}} \quad (2.14)$$

En donde d es la distancia desde el punto de monitoreo (m), y $S(\phi)$ (Ecuación (2.15)) es la función de apantallamiento que representa la atenuación de la vibración al atravesar un medio fragmentado como la roca que ya ha sido tronada en la secuencia.

$$S(\phi) = \lambda^\phi \quad ; \phi = \frac{w_t}{w} \quad (2.15)$$

En donde w_t es la carga total ya detonada de los pozos en la ruta de apantallamiento, tomando la ruta como una banda en línea recta y de ancho δ (m) que va desde el pozo detonado al sismógrafo, y w es la carga actualmente detonada. A su vez, $\lambda < 1$ es una constante de calibración del modelo que implicará un factor de atenuación de $1 - \lambda$ sobre la amplitud de la onda.

Se consideran pozos dominantes (con distancia d_{dc}) aquellos con la mínima distancia escalar, definida en la ecuación (2.16).

$$d_{dc} = \min_{i=1..n} \frac{d_{ei}}{\sqrt[a]{W_i}} \quad (2.16)$$

Donde n es el número de pozos, W_i es la carga (kg) del pozo i y d_{ei} es la distancia efectiva del pozo i .

Se define una ventana de tiempo con respecto a la carga dominante con el fin de determinar

cargas contribuyentes. Para ello, se registra el tiempo de llegada t_i según la Ecuación (2.17)

$$t_i = t_s + t_v = t_s + \frac{d_{ei}}{V_p} \quad (2.17)$$

De este modo, el tiempo de llegada asociado a la carga dominante t_{dc} es sobre el cual se construye la ventana temporal. Esta ventana está definida como en la Ecuación (2.18).

$$t_i - 0,5T_i < t_{dc} < t_i + 0,5T_i \quad (2.18)$$

En donde T_i (Ecuación (2.19)) describe la duración de la onda del pozo i .

$$T_i = T_0 + \frac{d_e}{Q_d V_p} \quad ; \quad k = \frac{1}{Q_d V_p} \quad (2.19)$$

Una vez determinadas las cargas contribuyentes, éstas se escalan con respecto a distancia (ws_i) de la carga dominante según la Ecuación (2.20).

$$ws_i = w_i \sqrt[\gamma]{\left(\frac{d_{dc}}{d_e}\right)^n} \quad (2.20)$$

Se genera una función ponderadora de las cargas escaladas que depende de los tiempos siguiendo la relación de la Ecuación (2.21).

$$f_i(t_i) = e^{-\mu \left| \frac{\tau}{0,5T_i} \right|} \quad (2.21)$$

En donde $\tau = t_i - t_{dc}$, t_i es el tiempo en detona la carga i , t_{dc} es el tiempo en que detona la carga dominante, μ es un coeficiente que determina el valor de $f_i(\tau)$ cuando $|\tau| = 0,5T_i$. El valor de μ se obtiene calibrando el modelo contra el PPV medido.

Se calcula la carga acumulada se calcula según la Ecuación (2.22).

$$w_{ec} = \sum_{i=1}^k f(t_i)ws_i \quad (2.22)$$

Finalmente el PPV_{SUM} en el punto considerado determinado según la Ecuación (2.23).

$$PPV_{SUM} = K \left(\frac{d_{dc}}{\sqrt[\beta]{(w_{ec})^\gamma}} \right)^{-n} \quad (2.23)$$

En donde K y n son las constantes de atenuación de la ley escalar de Devine.

2.2.3.3. Modelo probabilístico de Blair (1999) [5]

Blair (1999) presenta un modelo probabilístico para predecir y ayudar al control de vibraciones producidas por las tronaduras en operaciones mineras. De acuerdo al modelo de Blair, las vibraciones en cualquier punto de observación están determinadas por una serie de parámetros ilustrados en la Figura 2.20 y que se detallan a continuación.

- Cantidad de carga y el tipo de explosivo usado por unidad de retardo.
- La secuencia de disparo, tiempos de salida de los pozos.
- La dispersión inherente en la secuencia de salida de los pozos y en los kilogramos efectivamente cargados.
- La localización espacial de las cargas.
- Propiedades de transmisión del medio.
- Efecto de apantallamiento o filtro originado por el material previamente fragmentado.

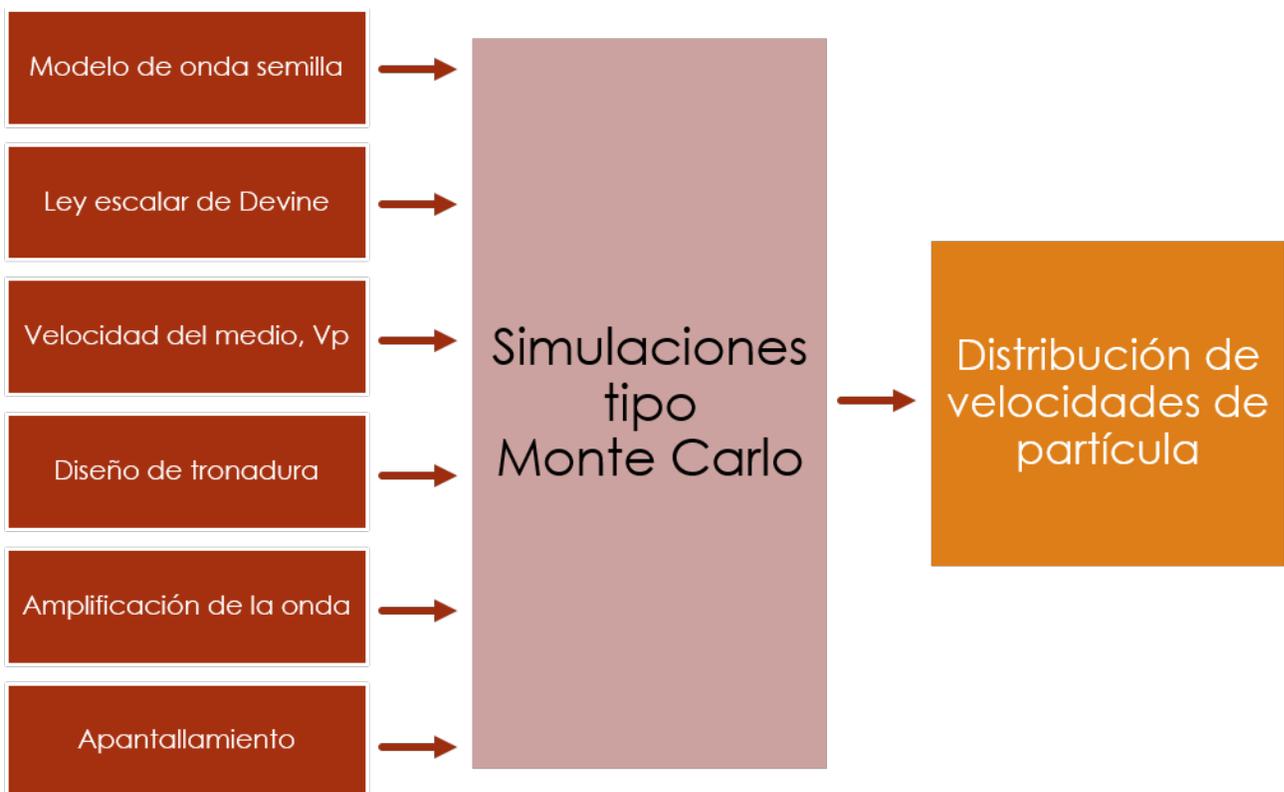


Figura 2.20: Diagrama de la metodología de Blair.

Blair (1999) muestra la influencia de las variables y parámetros anteriores combinados en un modelo tipo Monte Carlo, logrando, en teoría, un mejor resultado predictivo respecto a la “Ley Escalar” presentada por Devine.

Este define:

- $v_p(t)$: Velocidad de la onda en un punto de monitoreo según la Ecuación (2.24). Donde N es la cantidad de pozos, w_j es la ley de escalar de Devine (2.13), R es una cantidad relativa de ruido, s es la onda semilla, d_{jp} es el retraso asociado al pozo j y la simulación p , y n_{jp} es una onda de ruido aleatoria.

$$v_p(t) = \sum_{j=1}^N w_j \left[\sqrt{(1-R)}s(t-d_j) + \sqrt{R}n_{jp}(t-d_{jp}) \right] \quad (2.24)$$

Y funciona de acuerdo a la siguiente secuencia:

1. Dada una onda semilla $s(t)$, se genera una onda de ruido aleatorio n_{jp} a partir de una convolución entre $s(t)$ con un arreglo de funciones delta según la Ecuación (2.25).

$$n_{jp} = s(t) * \frac{\sqrt{R}}{R_j} \sum_{k=1}^m r_{jkp} \delta(t-d_j - k\Delta t) \quad (2.25)$$

Donde r_{jkp} es un número aleatorio en $[-1, 1]$ generado para cada valor de las (j, k, p) y R_j se define como en la Ecuación (2.26).

$$R_j = \sum_{k=1}^m r_{jkp}^2 \quad (2.26)$$

2. Se utiliza la ley escalar de Devine incorporando una componente aleatoria normal (en base a datos observados) según la Ecuación (2.27).

$$w_{jp} = H \left(\frac{h_j}{\sqrt{w_j}} \right)^{-\beta} (1 + 0,25z_{jp}) \quad (2.27)$$

Donde z_{jp} es la variación normal estándar.

3. Se considera el apantallamiento de la onda tomando en cuenta los pozos j que se encuentran en el “camino” de ésta desde un pozo k a la estación de monitoreo, calculado a partir de la Ecuación (2.28).

$$S_{jp} = \frac{1}{1 + eN_{sjp}^9} \quad (2.28)$$

De este modo, la ley escalar se define según la Ecuación (2.29).

$$w_{jp} = H \left(\frac{h_j}{\sqrt{w_j}} \right)^{-\beta} (1 + 0,25z_{jp})S_{jp} \quad (2.29)$$

4. Se le agrega el motor de Monte Carlo (aleatoriedad), obteniendo la Ecuación (2.30).

$$v_p(t) = s(t) * \sum_{j=1}^N \varphi_{jp}(t, R, m); \varphi_{jp}(t, R, m) = w_{jp} \left[\sqrt{(1-R)}\delta(t - d_{jp}) + \frac{\sqrt{R}}{R_j} \sum_{k=1}^m r_{jkp}\delta(t - d_{jp} - k\Delta t) \right] \quad (2.30)$$

5. Para resolver la velocidad para cada una de sus componentes se establece una relación entre las componentes de la onda y el ángulo θ entre el pozo j y la estación de monitoreo D , esto se aprecia en las Ecuaciones (2.31), (2.32) y (2.33).

$$v_{XD_p}(t) = -s_L(t) * \sum_{j=1}^N \beta_{jp}(t, R, m)\cos(\theta_{jD}) + s_T(t) * \sum_{j=1}^N r_j\beta_{jp}(t, R, m)\sin(\theta_{jD}); \quad (2.31)$$

$$v_{YD_p}(t) = s_L(t) * \sum_{j=1}^N \beta_{jp}(t, R, m)\sin(\theta_{jD}) + s_T(t) * \sum_{j=1}^N r_j\beta_{jp}(t, R, m)\cos(\theta_{jD}); \quad (2.32)$$

$$v_{ZD_p}(t) = s_V(t) * \sum_{j=1}^N (\beta_{jp}(t, R, m)); \quad (2.33)$$

6. De este modo, para determinar el máximo en un intervalo de tiempo $[0, T]$ se toma el máximo del vector suma de cada simulación, como en la Ecuación (2.34).

$$V_{p(MAX)} = \max(\sqrt{v_{XD_p}^2(t) + v_{YD_p}^2(t) + v_{ZD_p}^2(t)})_{t \in [0, T]} \quad (2.34)$$

7. Finalmente, de acuerdo a la metodología Montecarlo se toma el promedio de las P simulaciones como resultado del modelo (Ecuación (2.35)).

$$V_{MAX} = \frac{\sum_{p=1}^P V_{p(MAX)}}{P} \quad (2.35)$$

2.2.3.4. Predicción de vibraciones usando redes neuronales [18]

En el trabajo presentado por Manoj Khandelwal y T.N. Singh [18], se utiliza una red neuronal artificial (RNA) para modelar el máximo de la velocidad de vibración PPV [mm/s] y su frecuencia, en base a propiedades de la roca, diseño de la tronadura y parámetros de la detonación.

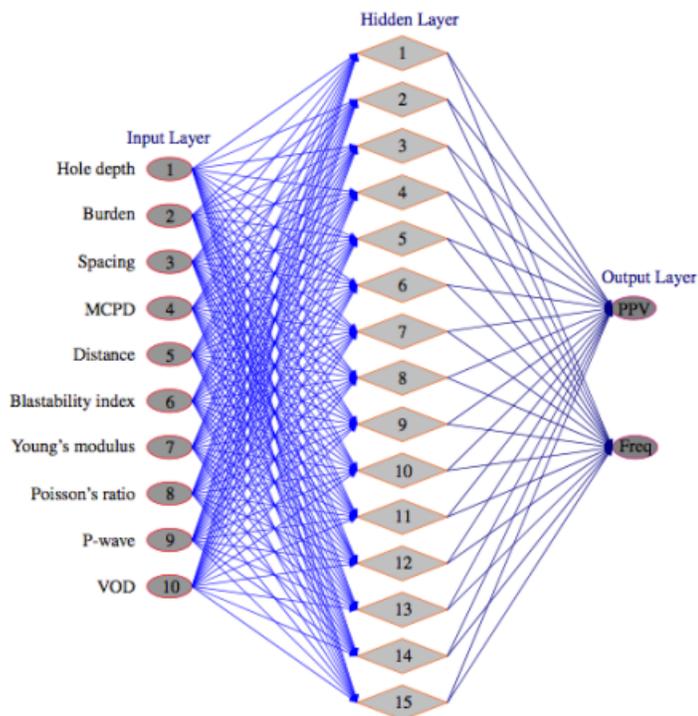
Se consideró una RNA de tres capas con “feed-forward back-propagation”, la cual consta de 15 neuronas ocultas, 10 entradas y 2 salidas (Figura 2.21). La RNA fue entrenada con el método clásico de optimización de paso de descenso óptimo, utilizando 154 conjuntos de datos. Para la validación se utilizaron 20 conjuntos de datos provenientes de tronaduras.

El “feed-forward back-propagation” es una técnica de aprendizaje supervisado para conocer al inicio del proceso los resultados deseados. La tarea de la red es aprender a generar los resultados deseados de las entradas.

Básicamente entrenar una red es encontrar un ajuste óptimo en los pesos de los arcos de las neuronas. Para ello se modifican los valores de los arcos de tal forma de producir una variación en la salida y construir una versión discreta de una derivada de la red respecto de ese parámetro, luego se usa un algoritmo en la dirección de menor gradiente para obtener un óptimo y de esta forma determinar los pesos en los arcos de la red.

Figura 2.21: Esquema de la RNA usada

[18]

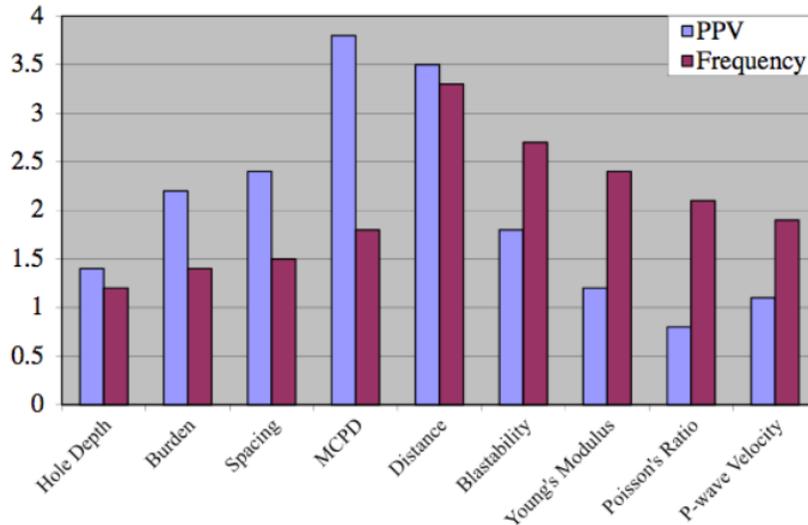


En el trabajo se comparó el ajuste obtenido con la RNA con el métodos clásico de Devine y con el método de análisis de regresión multivariada (MVRA). Se observó que la RNA tiene un mayor ajuste en los datos usados en la verificación, comparada con MVRA y con Devine.

En la Figura 2.22 podemos observar la importancia relativa (sensibilidad) de los parámetros de entrada con respecto al PPV y la frecuencia (las salidas del modelo). En particular se observa que la cantidad de carga por pozo (MCPD en la Figura 2.22) y la distancia al punto de observación poseen la mayor relevancia sobre el PPV.

Figura 2.22: Sensibilidad de las variables sobre el PPV y la frecuencia en el modelo de RNA

[18]



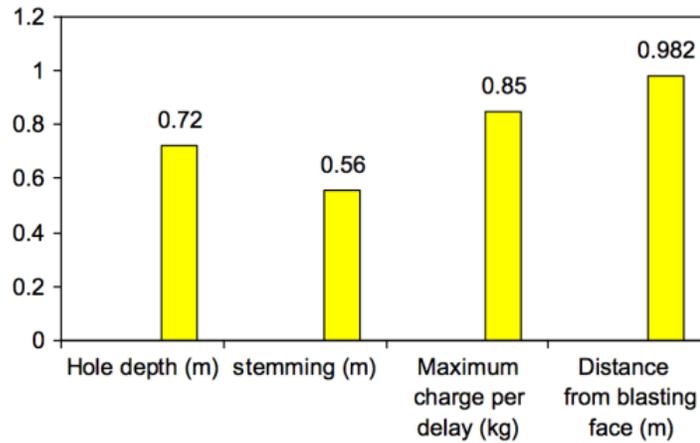
Otro trabajo donde se aplican RNA como estrategia de modelación es el desarrollado por M. Monjezi, M. Ghafurikalajahi y A. Bahrami en 2011 [19] [23]. En este caso la RNA utiliza como variables de entrada.

- La carga máxima por unidad de retardo
- La distancia a la tronadura
- largo de la carga
- Largo del pozo

Solo el PPV es considerado como variable de salida. Desde una base de 182 conjuntos de datos, se utilizaron 162 para entrenar la base de datos y sólo 20 de ellos fueron destinados para testear la RNA. La red utilizada tiene 4 capas con una topología 4-10-5-1 y en ella se aplicó la técnica del “feed-forward back-propagation” para el entrenamiento de la red.

En este trabajo también se estudió la sensibilidad obtenida por los diferentes parámetros (ver Figura 2.23), de donde se concluye que la distancia a la explosión es la variable más significativa a diferencia del largo de la carga, que tiene la de menor relevancia.

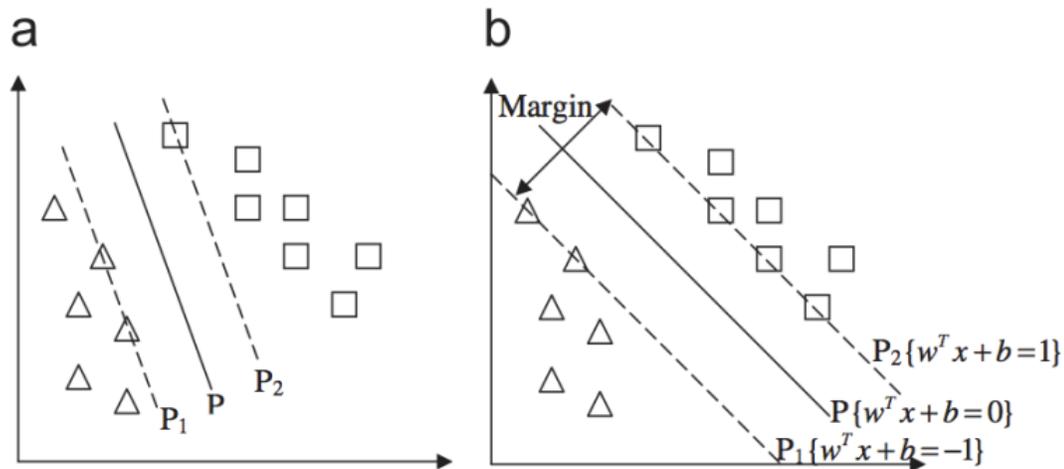
Figura 2.23: Sensibilidad de la RNA con respecto al PPV



2.2.3.5. Predicción usando Support Vector Machine [17]

En 2010, Manoj Khandelwal [17] utiliza máquinas de soporte vectorial (SVM), para predecir el ppV. Esta es una técnica de aprendizaje supervisado que se basa en la construcción de un hiperplano o conjunto de hiperplanos en un espacio de dimensionalidad muy alta (ver Figura 2.24), que puede ser utilizado en problemas de clasificación o regresión. Una buena separación entre las clases permitirá una clasificación correcta.

Figura 2.24: Hiperplano construido mediante SVM. Hiperplano separando dos familias, (a) con un margen pequeño y (b) con un margen mayor.



La técnica del SVM está basada en el principio de minimización del riesgo estructural y tiene muy buena generalización con pocas muestras de datos. La técnica del SVM se plantea como un problema de optimización cuadrático con restricciones lineales. Por ende se puede encontrar una forma computacional robusta de realizar el ajuste.

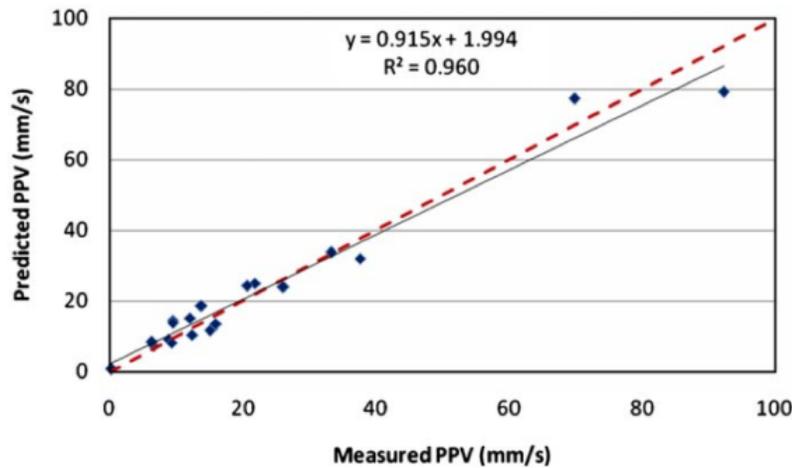
Para construir el SVM planteado en la [17] se utilizó como datos la distancia del observador a la tronadura, la máxima carga por retardo y como variable de salida (a explicar) el PPV.

Un total de 174 conjuntos de datos se utilizaron, de los cuales 20 fueron extraídos aleatoriamente, para ser usados como conjunto de verificación, mientras que 154 conjuntos de datos fueron usados para calcular SVM.

En la Figura 2.25, podemos ver la relación entre el ppV medido y el pronosticado por el SVM, sobre el conjunto de verificación, el promedio del error es 0,257. Esto muestra que sobre el conjunto de verificación SVM tiene un alto ajuste.

En el artículo no se menciona la representatividad de los datos; es decir, si están representadas todas las direcciones u otras consideraciones.

Figura 2.25: PPV medido y pronosticado con SVM, sobre el conjunto de verificación.



En este trabajo se comparan otras técnicas de estimación como es el análisis de regresión multivariante (MVRA). En la Ecuación (2.36) , podemos ver los coeficientes obtenidos con este procedimiento de interpolación.

$$PPV = 15,6755 + 0,0013 \cdot Q_{max}(kg) - 0,0023 \cdot D(m) \quad (2.36)$$

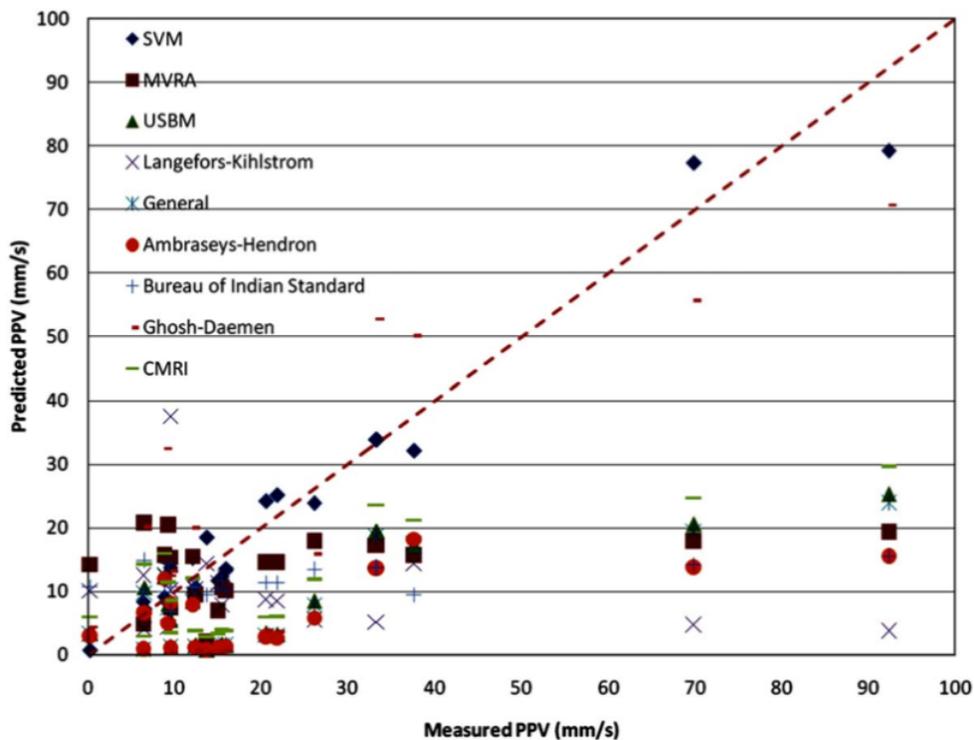
También se comparan otros estimadores clásicos (Tabla 2.2) y se presentan las comparaciones sobre el conjunto de verificación (ver Figura 2.26), donde se aprecia un mejor desempeño del estimador obtenido con SVM.

Tabla 2.2: Diferentes predictores convencionales.

Name	Equation
USBM (1959)	$v = K [D/\sqrt{Q_{\max}}]^{-B}$
Langefors-Kihlstrom (1963)	$v = K [\sqrt{(Q_{\max}/D^{2/3})}]^B$
General predictor (1964)	$v = K D^{-B} (Q_{\max})^A$
Ambraseys-Hendron (1968)	$v = K [D/(Q_{\max})^{1/3}]^{-B}$
Bureau of Indian Standard (1973)	$v = K [(Q_{\max}/D^{2/3})]^B$
Chosh-Daemen predictor (1983)	$v = K [D/\sqrt{Q_{\max}}]^{-B} e^{-\alpha R}$
CMRI predictor (1993)	$v = n + K [D/\sqrt{Q_{\max}}]^{-1}$

Donde V , representa el ppV, D la distancia a la explosión, Q_{\max} la carga máxima por retardo y el resto son los parámetros del respectivo modelo.

Figura 2.26: Comparación de PPV.



2.2.3.6. Superposición de modelos no lineales [6]

Comúnmente los modelos de vibración consideran una superposición lineal de características de cada pozo (ondas semilla). Sin embargo, las tronaduras producen grandes deformaciones en el medio circundante, lo cual implica una respuesta no lineal del material. Por esto es cuestionable el uso de esquemas de superposición de ondas provenientes de diferentes pozos, especialmente en campo cercano.

Blair [6] introduce superposición de una forma no lineal y compatibiliza el modelo de campo lejano con la superposición de las cargas de los pozos. Puntualmente, en este trabajo se presentan dos modelos, el llamado “modelo de carga escalada” y el “modelo de daño por

explosión”.

Modelo de carga escalada

Este modelo consiste en la generalización del modelo no lineal de superposición para una columna de explosivo presentado por Blair y Minchinton [4]. El modelo de carga escalar esta descrito en la ecuación (2.37).

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad \bar{w} &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w_n \\
 \text{(b)} \quad r_n &= \frac{h_n \bar{w}}{D s_p w_n} \\
 \text{(c)} \quad Z_n &= \sum_{j=1}^n w_j \\
 \text{(d)} \quad C_n &= Z_n^A - Z_{n-1}^A + \frac{r_n^P}{1+r_n^P} (w_n^A + Z_{n-1}^A - Z_n^A) \\
 \text{(e)} \quad V(t) &= \sum_{n=1}^N k d_n^{-a} C_n s_n (t - \delta_n)
 \end{aligned} \tag{2.37}$$

En donde,

- (a) Promedio de las cargas de cada pozo.
- (b) r_n representa una medida del radio de influencia de la carga, h_n es la distancia de la carga más cercana que ha sido detonada previamente a la carga n , y w_n es el peso del explosivo de la carga. De esta forma r_1 es infinito (por convención), s_p es la distancia entre pozos y D una constante (un parámetro a determinar).
- (c) Representa la suma de las cargas detonadas hasta la carga n .
- (d) C_n representa la contribución de la carga n a la velocidad, esto es la generalización del modelo de superposición clásico donde $C_n = w_n \cdot A$, con A un parámetro (típicamente $A = 0, 7$).
- (e) $V(t)$ es la velocidad recibida en la posición del observador, d_n es la distancia desde el punto del observador al pozo n , y S_n es la forma de la onda emitida por el pozo (onda semilla de cada pozo).

Notar que cuando todas las distancias d_n son iguales, y r_n es infinito para todas las cargas, la ecuación (e) colapsa a la clásica superposición de la Ley Escalar de Devine (Ecuación 2.13).

Modelo de daño por explosión

Este modelo contempla una manera diferente de asociar a cada señal el efecto del daño en el medio producido por los pozos previamente detonados. A su vez, este planteamiento

representa el apantallamiento de las ondas al atravesar un medio previamente fracturado.

En la Ecuación (2.38) se muestra la función de atenuación del modelo.

$$v(t) = \sum_{n=1}^N k \left(\frac{d_n}{\sqrt{w_n}} \right)^{-a} \left[\left(1 + \eta \sum_{j=1}^{n-1} \frac{w_j}{\bar{w}} \left(\frac{s_p}{h_{nj}} \right)^3 \right) \cdot \left(1 + \frac{g}{d_n^2} \sqrt{\sum_{s=1}^{N_s} \frac{w_s}{\bar{w}} e^{-\left(\frac{p n s}{s_p} \right)^2}} \right) \right] s_n(t - \delta_n) \quad (2.38)$$

Es de notar que este enfoque también colapsa al caso de la superposición de Ley Escalar (Ecuación (2.13)), cuando las constantes asociadas al apantallamiento y al efecto del daño son nulas.

El autor describe que este último modelo resultó con un mayor ajuste que el modelo de carga escalada en un caso de estudio con datos reales.

2.2.3.7. Comparación de los modelos de estimación de velocidad de partícula

En esta sección se analizan los modelos según sus características a fin de encontrar aquellos que son más aptos de desarrollar durante la práctica.

- Ley Escalar de Devine (1966)

Ventajas

- Fácil aplicación.
- Determinación del PPV en sus tres componentes mediante la regresión potencial en cada componente.
- Gran uso y aceptación en la industria minera, respaldo científico.
- Poca cantidad de información necesaria para desarrollar el modelo.
- Rapidez de la evaluación.

Desventajas

- Baja dependencia del diseño de tronadura, no entrega herramientas interesantes de análisis.
- No considera la geometría de la carga, ni la secuencia de salida de los pozos.
- Genera isolíneas de vibración concéntricas y circulares.
- Bajo nivel de ajuste del modelo (Correlación).

- Generalmente utilizado en Campo Lejano debido a que considera el total de carga en un instante de tiempo corto (8 ms).
- Modelo de predicción del vector suma (V_{SUM}) en Campo Cercano de Yang (2008)

Ventajas

- Facilidad de evaluación.
- Rapidez de la estimación.
- Considera el diseño de tronadura.
- Presenta conceptos importantes como acoplamiento y apantallamiento, así como también la identificación de un pozo dominante identificable.
- Pocos parámetros a considerar.
- Buena generalización de la ley escalar de Devine.

Desventajas

- Sólo entrega el vector suma (V_{SUM}) como resultado.
- Metodología de apantallamiento carece de bases científicas claras (no se especifica claramente una metodología).
- Calibración de al menos 5 parámetros, lo que requiere de una base de datos extensa y tiempo para llevarla a cabo.
- Desconocimiento del modelo por la comunidad minera encuestada.
- Modelo probabilístico de Blair (1999)

Ventajas

- Generalización de la ley escalar de Devine.
- Considera diseño de la tronadura: geometría y secuencia de salida.
- Genera una distribución de velocidades máximas de partícula mediante la cual, dado un nivel de confianza, entrega robustez y seguridad al modelo.
- Entrega forma de onda de salida.
- Considera la forma de la onda de entrada y no sólo los parámetros característicos del macizo.
- Influencia la planificación de la detonación mediante la observación del efecto de

apantallamiento o filtro.

Deventajas

- Gran dependencia de parámetros de entrada como el diseño de tronadura y onda semilla que para su obtención requiere de una detonación singular de carga.
- Metodología para considerar el efecto de apantallamiento no tiene fundamentos científicos claros.
- Gran cantidad de cálculos, lentitud del proceso de cálculo y tiempos de desarrollo altos.
- Baja aceptación de la industria minera consultada (principalmente debido al desconocimiento de la metodología detrás del modelo).

- Redes Neuronales

Ventajas

- Alto nivel de ajuste del RNA sobre el conjunto de verificación utilizado en la literatura.
- Escalabilidad. En general la RNA resulta ser robusta respecto a los datos de entrada, dado el nivel de entrenamiento de la misma.
- Flexibilidad. Es relativamente fácil adaptar una red a nuevos datos en la entrada.

Deventajas

- Ajuste. Si el conjunto de entrenamiento es muy limitado, se corre el peligro de tener más parámetros que salidas a ser ajustadas. En este caso, el resultado sobre el conjunto de entrenamiento puede ser muy limitado.
- Datos de entrenamiento. Las RNA consumen muchos datos a la hora de ser entrenadas y un alto costo computacional.
- Número de parámetros. Los parámetros a fijar en el entrenamiento son mucho mayores que los encontrados en los modelos anteriores.
- Problema al fijar los parámetros. El proceso de entrenamiento de una RNA, es básicamente un problema de optimización, pero dependiendo del problema y la topografía de la red, es común encontrar que el ajuste tiene muchos mínimos locales lo cual se traduce en una alta inestabilidad en el aprendizaje.

- Support Vector Machine

Ventajas

- Permite establecer criterios de seguridad. Al ser un clasificar, permite extender esta técnica a criterios de seguridad.
- Proceso de optimización. Gracias al proceso de optimización se obtiene un único ajuste, en los parámetros.

Deventajas

- Necesidad de un conjunto de entrenamiento (ajuste).
- No es claro que al incorporar nuevas variables el ajuste lineal usado por el SVM siga siendo el indicado.

• Modelos de superposición No lineales

Ventajas

- Mejora la definición del modelo en campo cercano y en el caso del modelo de daño por explosión, este se hace cargo del efecto de apantallamiento.
- Utilizan la información proveniente de la configuración de las cargas.
- Ambos modelos presentados tienen una evaluación rápida desde el punto de vista computacional, aún cuando el primer modelo (Modelo de carga escalada) resulta ser mucho más rápido en su evaluación, pues el segundo (Modelo de daño por explosión) debe calcular el apantallamiento.

Deventajas

- El cambio no afecta de manera gravitante el campo lejano.
- Aumento de complejidad del modelo.
- Presenta una dependencia explícita del modelo con respecto a la onda semilla de cada pozo.

En este trabajo, debido a sus ventajas y desventajas, se decidió utilizar los siguientes modelos.

- Ley escalar de Devine (1966)
- Modelo de predicción de campo cercano de Yang (2008)
- Modelo probabilístico de Blair (1999)

2.2.4. Impacto de las vibraciones en infraestructura

Las vibraciones provocadas por tronadura, y en general de cualquier naturaleza, pueden provocar daños cosméticos o estructurales en edificaciones rígidas, esto debido a los esfuerzos

dinámicos inducidos por el movimiento del terreno en donde éstas se emplazan, dichos esfuerzos generan pequeñas deformaciones temporales en todos los elementos constitutivos de la edificación, las cuales podrían terminar generando un daño permanente sobre la estructura completa.

La relación entre velocidad de vibración de partícula y esfuerzos, en el caso ideal de una onda plana en un medio elástico infinito, está dada por la Ecuación (2.39) [26].

$$\begin{aligned}\sigma &= \varepsilon E. \\ \varepsilon &= \dot{u}/c \\ \sigma &= \dot{u}E/c\end{aligned}\tag{2.39}$$

En donde, σ es el esfuerzo, ε la deformación, E el módulo de deformación de Young, \dot{u} la velocidad de partícula y c la velocidad de propagación de la onda sísmica en el medio [26]. Por lo tanto, para un medio relativamente homogéneo que conserve sus propiedades de velocidad de propagación y elasticidad, la velocidad de partícula es la variable decisiva al momento de determinar los esfuerzos que pueden causar daño sobre una infraestructura. Es por esta razón que la mayoría de normas y reglamentaciones internacionales, en cuanto a niveles de vibración sísmica, basan sus umbrales de daño en la velocidad de partícula máxima medida.

No obstante, son varios los factores que influyen en la probabilidad de daño, entre estos tenemos:

- la duración de las vibraciones,
- los esfuerzos estáticos a los que está sujeta la estructura,
- la resistencia de los materiales que constituyen la estructura,
- la calidad y mantención de la estructura,
- la fatiga acumulada a otros modos de vibraciones como equipos móviles, maquinaria, etc.

Los dos enfoques principales a partir de los cuales se puede evaluar el potencial daño en infraestructura a partir de las vibraciones del terreno, son el análisis dinámico estructural y la estadística.

2.2.4.1. Análisis dinámico estructural

El análisis dinámico de estructuras destaca por su nivel de detalle y la complejidad de su aplicación. Este permite definir límites de velocidad de partícula en cada sector de una infraestructura particular a partir de la deformación máxima que soporta dicho sector en relación a los materiales, dimensiones, ubicación y presencia de elementos de refuerzo en el punto estudiado. Su aplicabilidad requiere de un estudio base sobre distintos sectores claves de la infraestructura con el propósito de encontrar la frecuencia circular natural y el factor de atenuación de las vibraciones en dicho punto. Estos últimos son parámetros de entrada a modelos que permitirán estimar las velocidades de partícula máximas que se sentirán en el

punto a distintas frecuencias principales de vibración, los gráficos que reflejan estos resultados se llaman espectros de respuesta y permiten evaluar rápidamente la amplificación de la señal de vibración del terreno sobre el punto estudiado.

El modelo principal, a partir del cual es posible obtener los espectros de respuesta, es el SDF (del inglés, Single Degree of Freedom). Este corresponde a un análisis dinámico unidimensional simplificado que considera la masa y rigidez de los principales componentes del sistema, y la energía disipada del movimiento diferencial que se produce en grietas, juntas y conexiones entre las partes.

La Ecuación (2.40) es una simplificación de la ecuación principal de movimiento del SDF y permite describir el movimiento de una estructura en respuesta a la vibración del terreno en donde ésta se asienta.

$$\ddot{\delta} + 2\beta p\dot{\delta} + p^2\delta = \ddot{u} \quad (2.40)$$

En donde, $\ddot{\delta}$ es la aceleración relativa, $\dot{\delta}$ la velocidad relativa y δ el desplazamiento de la estructura relativo al terreno; p es la frecuencia circular principal de la zona estudiada (pared, techo, cimiento, etc.), β la fracción de atenuación crítica y \ddot{u} es la aceleración del terreno.

Las soluciones a la ecuación (2.40) al evaluar distintos p y β , particulares a distintas zonas de la infraestructura, permiten elaborar un gráfico del espectro de respuesta a la vibración del terreno para una amplia variedad de estructuras. Lo que finalmente permitirá establecer si ocurrirá algún tipo de daño en éstas.

En el caso de contar con un registro de señal de la velocidad de partícula en terreno, \dot{u} , es posible obtener el desplazamiento relativo en el tiempo en una punto de la estructura, $\delta(t)$, a partir de la integral en (2.41) [37].

$$\delta(t) = - \int_0^t \dot{u}(\tau) \exp^{-\beta p(t-\tau)} \left[\cos[p_d(t-\tau)] - \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin[p_d(t-\tau)] \right] d\tau \quad (2.41)$$

En donde, $\dot{\delta}$ y δ son igual a cero en t_0 ; p_d es la frecuencia circular natural de un sistema amortiguado ($p_d = p\sqrt{1-\beta^2}$).

En un instante t^* del registro, se puede encontrar el desplazamiento máximo, δ_{max} , el cual al multiplicarse con la frecuencia circular natural, p , entrega la pseudo-velocidad (PV) de partícula, magnitud que se aproxima de muy buena manera a la velocidad relativa de partícula, $\dot{\delta}$, si el pulso asociado con δ_{max} es aproximadamente sinusoidal.

$$PV = p * \delta_{max} PV = (2\pi f)\delta_{max} \quad (2.42)$$

A través de la Ecuación (2.42), variando la frecuencia, f , y el desplazamiento relativo máximo, δ_{max} , para cada zona de la estructura, es posible elaborar un pseudo-espectro de respuesta de la velocidad de partícula (PSRV) frente a las vibraciones del terreno, que describirá como reacciona cada zona de la infraestructura frente a las vibraciones en función de la velocidad de partícula máxima.

Una vez obtenida la velocidad de partícula máxima en cada zona de la infraestructura es posible comparar con los niveles máximos soportados en base a los materiales, calidad de la construcción, estabilidad de las fundaciones, y otras consideraciones técnicas que le dan soporte a la edificación.

Debido a la gran cantidad de gastos que conlleva realizar un estudio acabado de los parámetros dinámicos de cada estructura, residencia o edificación, y además considerar todos los factores involucrados en la probabilidad de daño, es que se han construido criterios de daño o reglamentaciones que agrupan las características más importantes de las estructuras y de las vibraciones para evaluar rápidamente el daño y tomar medidas correctivas.

2.2.4.2. Normas y reglamentación internacional

La mayoría de estas normas ha sido construida a partir de una extensa toma de datos en terreno y posterior evaluación presencial de los daños causados. Sin embargo, es importante considerar que los estudios fueron llevados a cabo en una localidad en particular y por lo tanto, su aplicación en lugares distintos o en edificaciones distintas a las de origen, debe ser evaluada o al menos tomada en consideración al momento aplicarse y tomar decisiones en base a ella.

Particularmente en Chile no existen normas para la prevención de daño en infraestructura a partir de vibraciones provocadas por tronadura, por esta razón en los estudios realizados en el país es habitual evaluar el daño utilizando una norma internacional.

En la tabla 2.3 se muestra un resumen de la reglamentación internacional vigente en distintos países, algunas de estas normas serán aplicadas en el desarrollo de esta memoria para la evaluación del daño, y así, tomar medidas correctivas al diseño de tronadura o de mitigación estructural.

Tabla 2.3: Reglamentacional para el manejo de vibraciones por tronadura [2].

Pais de procedencia	Nombre de reglamentación	Fecha de expedición
Alemania ^a	DIN 4150	1975
Brasil	CETESB D7.013	1998
Escocia	PAN50	2000
EEUU - Federal	USBM RI8507	1980
EEUU - Federal	OSM 817.67	1983
España	UNE 22-381-93	1993
Francia	Recomendaciones GFEE	2001
Internacional	ISO 4866	1990
Italia	UNI 9916	1991
Nueva Zelanda	NZS 4403	1976
Portugal	NP2074	1983
Reino Unido	BSI 6472	1992
Reino Unido	BSI 7385	1993
Sueca	SS 460 48 46	1991
Suiza	SN 640 312a	1992

- **Alemania, DIN-4150 [14]**

Reglamentación publicada por el instituto de normalización Alemana o DIN (Deutsches Institut für Normung) en el año 1975, conformado por 3 secciones que abordan vibraciones sobre infraestructura, la primera de ellas enfocada a la estimación de parámetros

de predicción de las vibraciones (DIN 4150-1), la segunda que aborda la exposición del cuerpo humano a las vibraciones (DIN 4150-2) y la tercera que establece los criterios de daño sobre infraestructura producto de vibraciones (DIN 4150-3). En virtud de los objetivos de este trabajo se utilizará la DIN 4150-3, cuyo campo de aplicación se resume en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Características de la norma Alemana DIN 4150-3:2015-10 [14].

Campo de aplicación	Vibraciones provenientes de cualquier fuente
Variables medidas	$PPV_{vertical}$ [mm/s] y PPV_{suma} resultante [mm/s]

Esta norma ha sido actualizada continuamente desde el año 1999, y su última edición es del año 2016 (DIN 4150-3:2016-12). Por esta razón es una de las normas más respetadas a nivel internacional.

En la tabla 2.5 se muestran los valores de PPV referenciales para la evaluación del efecto de las vibraciones sobre edificaciones de acuerdo a la norma DIN 4150-3.

Tabla 2.5: Valores de referencia de velocidad de vibración PPV, para la evaluación del efecto de vibraciones breves en edificios [14].

-	Tipo de edificio	Valores de referencia de velocidad de vibración $v_{1\max}$ en mm/s				
		Cimiento, Frecuencias			Planta superior, horizontal	Plantas, vertical
		1 Hz a 10 Hz	10 Hz A 50 Hz	50 Hz a 100Hz ^a	Todas las frecuencias	Todas las frecuencias
Colum. Fila	1	2	3	4	5	6
1	Edificios de uso comercial, edificios industriales y edificios de estructura similar	20	20 a 40	40 a 50	40	20
2	Edificios residenciales y edificios similares en su construcción o uso	5	5 a 15	15 a 20	15	20
3	Edificios que no corresponden a las filas 1 ni 2 debido a su gran sensibilidad a las vibraciones y que tienen un gran valor de preservación (por ejemplo, patrimonio cultural)	3	3 a 8	8 a 10	8	20
NOTA leves.		Si se mantienen los valores de referencia de la fila 1, columnas 2 a la 5, no se estaría exento de daños				
a		Para frecuencias mayores a 100 Hz se deben utilizar los valores de referencia para 100 Hz como mínimo.				

- EEUU - USBM RI8507 [31]

El criterio de daño sobre infraestructura del United States Bureau of Mines, USBM, o departamento de minas de Estados Unidos, es parte de un reporte de investigación del año 1989 sobre vibraciones producidas por tronadura sobre edificaciones residenciales de características constructivas modernas y viejas [31]. Incluso cuando no constituye una norma o reglamentación, sus valores y recomendaciones han sido aceptadas mundialmente como base para la estimación de daños cosméticos sobre edificaciones. En la Figura 2.27 se aprecian los datos tomados de terreno, en donde se relaciona el nivel de daño sobre residencias con la velocidad de partícula y frecuencia de la onda sísmica. Además, se proponen niveles referenciales (líneas continuas) para evaluar el potencial daño sobre estructuras residenciales.

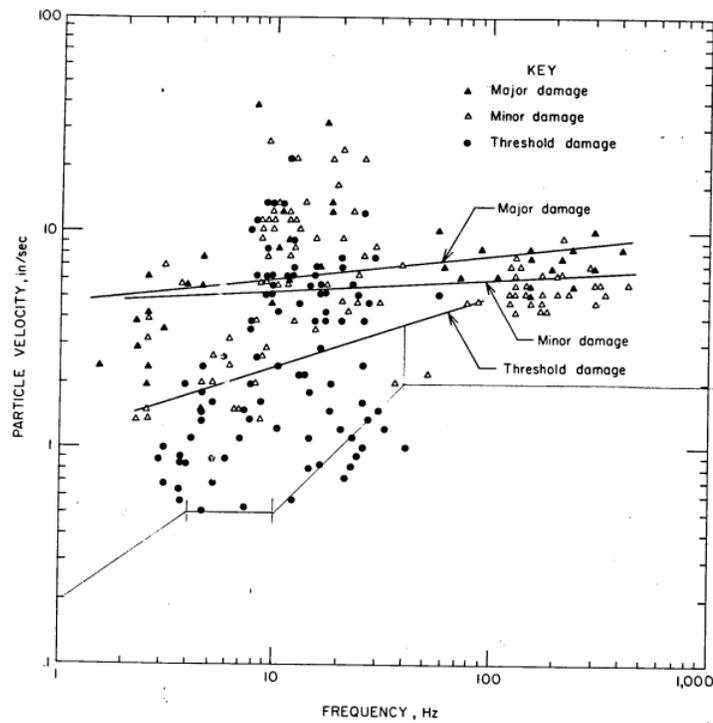


Figura 2.27: Compendio de daños por vibraciones del USBM RI8507, la línea punteada corresponde a los límites hasta donde no se produce daño [31].

La principal dificultad de este criterio radica en la poca información de tronaduras con frecuencia principal bajo 4 Hz. Al no tener suficiente información experimental en el rango 0 a 4 Hz se trazó una línea con pendiente 0.03 pulgadas entre 0 y 4 Hz, lo que es un antiguo criterio de daño por sismos [2].

En la Tabla 2.6 se muestran las características generales del reporte utilizado para elaborar el criterio.

Tabla 2.6: Características de la norma USBM RI8507 [31].

Campo de aplicación	Vibraciones producidas por tronaduras
VARIABLES MEDIDAS	PPV [mm/s] y frecuencia principal [Hz]
Sensores utilizados	Sensores de triaxiales que miden velocidad de partícula en las 3 componentes
Debilidades	Valores bajo 4 Hz no fueron comprobados. Las mediciones se realizaron utilizando una distancia escalada prácticamente constante. Se aplican solo a viviendas.

La tabla 2.7 muestra los valores de velocidad máxima admisibles para no provocar daño en estructuras residenciales en los Estados Unidos.

Tabla 2.7: Valores de máxima velocidad de vibración, PPV, admisibles para la evaluación del efecto de vibraciones breves en residencias según USBM RI8507 [31].

Type of structure	Ground vibration—peak particle velocity, in/sec	
	At low frequency ¹ (<40 Hz)	At high frequency (≥40 Hz)
Modern homes, Drywall interiors	0.75	2.0
Older homes, plaster on wood lath construction for interior walls50	2.0

¹ All spectral peaks within 6 dB (50 pct) amplitude of the predominant frequency must be analyzed.

- España - UNE 22-381-93 [13]

Norma española de control de vibraciones producidas por voladuras [13], elaborada por la Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR, tiene por objetivo principal establecer un procedimiento de estudio y control de las vibraciones producidas por voladuras en trabajos de explotación de minas, canteras, obras civiles, demoliciones y otras técnicas que requieran el uso de explosivos. En la Tabla 2.8 se indican las características principales del criterio elaborado en el informe de AENOR.

Tabla 2.8: Características de la norma UNE 22-381-93 [13].

Campo de aplicación	Vibraciones producidas por tronaduras
VARIABLES MEDIDAS	PPV [mm/s] y frecuencia principal [Hz]
Sensores utilizados	Sensores de triaxiales que miden velocidad de partícula en las 3 componentes, o bien desplazamiento o aceleración y usar conversión con pérdida de precisión. Respuesta lineal del equipo de 2 a 200 Hz con rango de medición de 1 a 100 mm/s
Ubicación de sensores	Sobre el terreno cercanos a la infraestructura objetivo
Fortalezas	-Cubre gran cantidad de variables estructurales - Por medio de un procedimiento sencillo se puede determinar el tipo de vibraciones requerido por el proyecto

La variable crítica para este estudio es la velocidad de partícula máxima o PPV, en la componente en donde se registró la máxima amplitud (longitudinal, vertical o transversal). También considera la frecuencia principal o dominante (Hz) de la vibración para atribuir la probabilidad de daño. Como recomendación, AENOR plantea que en el caso de observarse vibraciones con más de un peak, se debe evaluar aquella con menor frecuencia.

La tabla 2.9 muestra los valores máximos de velocidad de partícula admisibles a cierta frecuencia principal de vibración para la AENOR.

Tabla 2.9: Valores admisibles según Norma UNE 22-381-93 [13].

Tipo de estructura	Frecuencia principal (Hz)		
	2 – 15 Vel. ^b	15 – 75 ^a Desp. ^c	>75 Vel.
I Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.	20	0.212	100
II Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa española. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones	9	0.095	45
III Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener	4	0.042	20

Con base en AENOR (1993).

^a En el tramo de frecuencias comprendido entre 15 y 75 Hz, en los que el nivel está dado en desplazamiento, se podrá calcular la velocidad equivalente conociendo la frecuencia principal a través de la ecuación

$$V = 2\pi f d,$$

donde V es la velocidad de vibración equivalente en mm/s, f es la frecuencia principal en Hz y d es el desplazamiento admisible en mm indicado en la tabla.

^b Velocidad máxima en mm/s.

^c Desplazamiento máximo en mm (ver comentario a.)

- **Suiza - SN 640 312a [25]**

La norma Suiza de 1992 fue elaborada para ser aplicada a vibraciones por tronadura, maquinaria y tráfico, las cuales podrían causar daño cosmético en edificaciones. La norma solo considera vibraciones con frecuencias entre 8 y 150 Hz, y establece que vibraciones fuera de este rango deben ser evaluadas mediante el uso de otras normas o criterios.

A diferencia del resto de las normas, ésta considera el número de solicitaciones o cantidad de vibraciones en la señal y su diferencia en los valores máximos admisibles de velocidad, esto hace que su aplicabilidad sea más amplia y versátil. En la Tabla 2.10 se presentan las principales características de esta norma.

Tabla 2.10: Características de la norma Suiza SN 640 312a, 1992 [25].

Campo de aplicación	Vibraciones producidas por tronaduras, maquinaria, equipo de construcción, tráfico en carretera y ferroviario
Variables medidas	PPV_{suma} [mm/s] y frecuencia principal [Hz], adicionalmente se considera la cantidad de oscilaciones
Sensores utilizados	Sensores de triaxiales que miden velocidad de partícula en las 3 componentes con un rango lineal entre 5 y 150 Hz
Ubicación de sensores	Sobre la estructura
Fortalezas	Brinda criterios para definir daño no estructural como fisuras en mampostería. Define una frecuencia de las solicitaciones.

Los valores máximos establecidos en la norma dependen de varios parámetros como la cantidad de solicitaciones y de la susceptibilidad de la edificación, obteniéndose así un rango amplio de valores indicativos. Esta norma también contempla la posibilidad de cambiar estos valores previa consulta a un experto en el tema.

La tabla 2.11 muestra los valores máximos admisibles para la velocidad de partícula asociada a la vibración y frecuencia. Es importante considerar que la norma distingue entre tramos bajo la cantidad de solicitaciones de la estructura a evaluar y su susceptibilidad a fallar bajo vibraciones. Para este proyecto se consideran vibraciones ocasionales (menores a 1000 solicitaciones) en construcciones poco susceptibles (silos, edificaciones industriales).

Tabla 2.11: Valores máximos admisibles de velocidad de partícula para la norma Suiza SN 640 312a, 1992 [25].

Clases de susceptibilidad	Frecuencia de solicitaciones	Valores máx. del vector de velocidad resultante (mm/s)		
		Frecuencia dominante		
		<30 Hz	30 - 60 Hz	>60 Hz
1) muy poco susceptible	Ocasional	Valores indicativos: hasta el triple de los valores correspondientes de la clase de susceptibilidad 3)		
	Frecuente			
	Permanente			
2) poco susceptible	Ocasional	Valores indicativos: hasta el doble de los valores correspondientes de la clase de susceptibilidad 3)		
	Frecuente			
	Permanente			
3) susceptibilidad normal	Ocasional	15	20	30
	Recurrente	6	8	12
	Permanente	3	4	6
4) particularmente susceptible	Ocasional	Valores indicativos: entre los valores indicativos de la clase 3) y la mitad de éstos		
	Frecuente			

- Suecia - SS 460 48 66 1991 [28]

Esta norma se sustenta en cientos de mediciones realizadas en el lecho rocoso escandinavo, en donde se ha observado una alta correlación entre la máxima velocidad de partícula en la componente vertical con el daño en edificaciones. Considera distintos tipos de estructuras geológicas, sin embargo, no considera rangos de frecuencias o el efecto de éstas sobre el daño observado, tampoco considera otras componentes distintas a la vertical, lo que la diferencia y debilita frente a otras normas, ya que no toma en cuenta los efectos de amplificación que puede manifestar una vibración al entrar en resonancia con la edificación.

La norma indica mediante la Ecuación (2.43) como deben ser calculados los niveles guía o umbrales, v , para cada tipo de edificación a evaluar.

$$v = v_0 F_k F_d F_t \quad (2.43)$$

En donde v_0 es la máxima velocidad vertical sin corrección, F_k es el factor de calidad de la construcción, F_d es un factor de distancia que toma en cuenta la distancia entre la carga explosiva y el punto de monitoreo, y F_t es un factor que considera la duración del proyecto, es decir, que toma en cuenta la posible fatiga de los materiales ante las vibraciones.

Para obtener la velocidad v_0 se puede utilizar la velocidad de propagación V_p (m/s) dividida por 65 ($v_0 = V_p/65$), o bien utilizar la Tabla 2.12 dependiendo de la litología de la zona por donde se desplaza la onda.

Tabla 2.12: Valores de la máxima velocidad vertical sin corrección (Norma Sueca) [28].

Tipo de terreno	v_o [mm/s]
Morrena suelta, arena, grava, arcilla	18
Morrena firme, arcillolita, limolita blanda	35
Granito, neis, caliza firme, cuarzita, arenisca, diabasa	70

El factor F_k se obtiene a partir de los factores de edificación, F_b , y material, F_m , usando la ecuación $F_k = F_b F_m$ en asociación con las Tablas 2.13 y 2.14.

Tabla 2.13: Valores de F_b según la edificación (Norma Sueca) [28] [2].

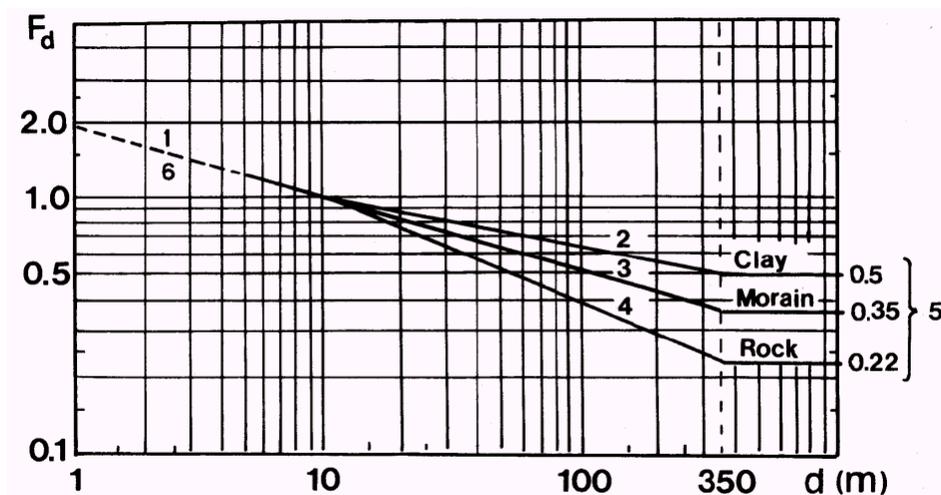
Clase	Tipo de edificación	F_b
1	Edificaciones pesadas (puentes, muelles, defensa civil)	1.70
2	Edificaciones industriales y de oficinas	1.20
3	Viviendas estándar	1.00
4	Edificaciones sensibles de diseño especial (con arcos altos, grandes luces, p. ej. iglesias y museos)	0.65
5	Edificaciones históricas en condición débil y ciertas ruinas	0.50

Tabla 2.14: Valores de F_b según materiales (Norma Sueca) [28] [2].

Clase	Tipo de material	F_m
1	Concreto reforzado, acero, madera	1.20
2	Concreto no reforzado, ladrillo, clincker	1.00
3	Concreto poroso de autoclave	0.75
4	Ladrillo artificial de caliza ("Mexi-brick")	0.65

Por su parte, el factor de distancia, F_d se obtiene a partir del gráfico (Figura 2.28) que relaciona la distancia más corta entre la carga explosiva y el monitor con el terreno por donde se desplaza la onda y está fundada la edificación a evaluar.

Figura 2.28: Gráfico de F_d según distancia a la carga explosiva (Norma Sueca) [28] [2].



El factor de tiempo, F_t , se obtiene a partir de la Tabla 2.15.

Tabla 2.15: Valores de F_t según el tiempo del proyecto (Norma Sueca) [28] [2].

Tipo de actividad de voladura	F_t
Obras de construcción (túneles, cavernas, cortes, etc.)	1.00
Trabajos estacionarios (minas, canteras)	0.75 – 1.00

2.2.5. Determinación de valores atípicos (outliers) [1]

Para la determinación de outliers existen distintos métodos dependiendo de los datos considerados. Para la identificación de valores atípicos al momento de realizar un ajuste potencial para la determinación de las constantes de la ley escalar, usada en los dos modelos predictivos evaluados en este trabajo, se usó el software Minitab17 el cual considera los siguientes criterios.

2.2.5.1. Leverage (apalancamiento)

El leverage (o apalancamiento) mide la distancia desde el valor X de una observación hasta el promedio de los valores X para todas las observaciones en el conjunto total de datos. Se usa para identificar observaciones que tienen valores predictores inusuales en comparación con los datos restantes.

Las observaciones con un gran apalancamiento pueden tener un gran efecto en el valor ajustado y, por lo tanto, en el modelo de regresión. Por ejemplo, una observación que tiene un gran apalancamiento puede hacer que un coeficiente significativo parezca insignificante. Sin embargo, no todos los puntos de apalancamiento son observaciones inusuales.

El software Minitab17 identifica observaciones h_{ij} con valores de apalancamiento superiores a $3p/n$ (Ecuación (2.44)) o 0,99, lo que sea menor, donde p es el número de parámetros del modelo (incluida la constante) y n es el número de observaciones.

$$h_{ij} > \frac{3p}{n} \quad (2.44)$$

2.2.5.2. Cook's D (distancia de Cook)

Geométricamente, la distancia de Cook (D) es una medida de la distancia entre los valores ajustados calculados con y sin la i – *esima* observación. Se usa para identificar observaciones que tienen valores predictores inusuales en comparación con los datos restantes y las observaciones de que el modelo no se ajusta bien. Las observaciones con grandes distancias de Cook pueden tener un gran efecto en el valor ajustado y, por lo tanto, en el modelo de regresión.

Minitab17 identifica las observaciones i – *simas* en donde se cumple la relación (2.45) y las reconoce como influyentes.

$$D_i > F(0,5, p, n - p) \quad (2.45)$$

En donde, $F(0,5, p, n - p)$ es la mediana de una distribución- F , p es el número de parámetros del modelo (incluida la constante) y n es el número de observaciones

Una forma diferente de examinar los valores de distancia es comparar los valores de distancia entre sí gráficamente, utilizando un diagrama lineal. Las observaciones con grandes valores de distancia en relación con otras observaciones pueden ser influyentes.

2.2.5.3. DFITS

Los valores DFITS representan de forma aproximada el número de desviaciones estándar que el valor ajustado cambia cuando cada i -observación se elimina del conjunto de datos y el modelo se reajusta. Se usa para identificar observaciones que tienen valores predictores inusuales en comparación con los datos restantes y por tanto afectan el ajuste del modelo. Las i -observaciones con valores DFITS grandes pueden tener un gran efecto en el valor ajustado y , por lo tanto, en el modelo de regresión.

Minitab17 reconoce aquellas observaciones con valores $DFITS_i$ que cumplen con la Ecuación (2.46) y las marcan como influyentes.

Se considera un punto influyente si se cumple la relación (2.46).

$$|DFITS_i| > 2\sqrt{\frac{p}{n}} \quad (2.46)$$

En donde p es el número de términos del modelo (incluida la constante) y n es el número de observaciones.

Una forma diferente de examinar los valores de DFITS es comparar los valores de DFITS entre sí gráficamente, utilizando un diagrama de serie temporal o un diagrama lineal. Las observaciones con grandes valores de DFITS en relación con otras observaciones pueden ser influyentes.

Ejemplificación de los tres criterios

La Figura 2.29 ejemplifica el resultado de aplicar los tres criterios anteriores en el estudio de una misma muestra estadística. La línea azul marca el límite los datos descartados dependiendo del criterio.

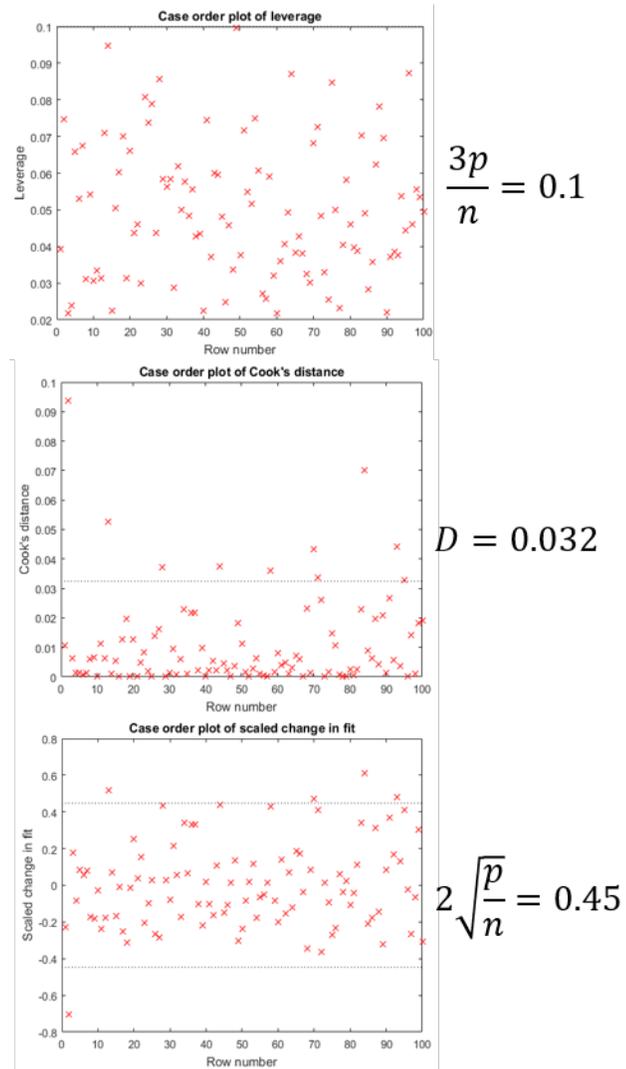


Figura 2.29: Comparación de los criterios estadísticos presentes en Minitab para la identificación de valores atípicos

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se detalla la metodología que se llevó a cabo durante este trabajo de memoria, cuyo comienzo tiene lugar en el transcurso de un proyecto de monitoreo de vibraciones que ya había sido instrumentado en la mina en estudio.

En términos generales el proyecto se enfocó en la instrumentación de zonas críticas para el monitoreo continuo de vibraciones mediante estaciones sismológicas. Al registrar un evento de vibración, este era interpretado, grabado y enviado vía comunicación inalámbrica hacia un servidor en Santiago. Una vez recibido el evento de vibración se procedía a realizar un primer análisis de señal, el cual consistía en descartar vibraciones producidas por maquinaria, golpes, sismos, interferencias de otro tipo, hasta obtener un registro limpio de tronadura.

Todos los registros de tronadura eran almacenados y ordenados mensualmente hasta recopilar toda la información de tronadura relativa al periodo, esta información provenía del área de perforación y tronadura de la mina y consistía en la carga total de explosivo utilizado, el tipo de explosivo y la malla de perforación para cada una de las tronaduras ejecutadas. A partir de estos datos se elaboró una Nota técnica mensual durante todo el periodo del estudio, cuya duración fue de 1 año, 2 meses y 20 días.

Posteriormente, y enfocado a mejorar el análisis realizado en el proyecto antes descrito, cuya duración ya había expirado, se dio paso a reevaluar los datos obtenidos mediante nuevos métodos de análisis estadístico, ocupando mayor cantidad de filtros, asociando datos a otros criterios de daño, simulando mediante modelos de vibración más actuales, para finalmente elaborar un conjunto de recomendaciones que contribuyesen a controlar las vibraciones generadas por esta mina.

3.1. Monitoreo de vibraciones

El correcto monitoreo de vibraciones es la tarea fundamental de este trabajo. Para ello se deben definir los equipos necesarios para la instrumentación, generar las sinergias para lograr una correcta comunicación de los datos hacia los clientes, e implementar planes de monitoreo que contemplen las posibles interferencias operacionales que existen en una mina, las cuales podrían alterar los resultados obtenidos.

Se debe definir un periodo, ubicación, configuración y sistema general de monitoreo de

vibraciones. Este debe ser tal que se preocupe de la infraestructura a cautelar, pero también permita obtener un modelo de vibraciones para la predicción de éstas a futuro. El periodo de monitoreo, el número de equipos y la ubicación de estos estará guiada por los requerimientos de la compañía minera, por lo tanto sus decisiones serán fundamentales para el éxito del proyecto. Las formas de comunicación, instrumentación en terreno, resultados, análisis y conclusiones estarán a cargo de Rockblast.

3.1.1. Definición del periodo de monitoreo de vibraciones

El periodo lo ha definido la compañía minera en base a sus necesidades y objetivos. Este contempla el periodo de explotación de las fases 13 y 14.

3.1.2. Puntos de monitoreo

Las zonas de monitoreo fueron designadas por compañía minera en base a estudios internos sobre la resistencia estructural de los componentes mayores de la planta de procesamiento. La ubicación de los geófonos es crucial para determinar una posible zona de peligro o generar un modelo de vibraciones. Una zona de material fragmentado o inestable dará paso a inexactitudes en el modelo de vibraciones a obtener y generará datos sesgados al momento de evaluar el impacto de las vibraciones por tronadura en infraestructura.

3.1.3. Instrumentación en terreno

La instrumentación de los equipos la llevó a cabo Rockblast, su importancia radicó en seleccionar los equipos correctos para la medición, configurarlos de manera adecuada, permitir una buena comunicación de los datos y obtener mediciones lo más exactas posibles. Debieron ser ubicados de manera que no interfieran operacionalmente con maquinaria o personas, ya que esto podría haber generado eventos de vibración que no correspondiesen a tronaduras.

3.2. Mantenimiento del servicio de monitoreo

Consistía en una serie de actividades que ayudaban a mantener el servicio de monitoreo de vibraciones en línea. Para eso se definieron ciertas tareas esenciales para evitar la pérdida de datos y dar continuidad al servicio.

3.3. Análisis de la información y asociación

El análisis de la información va desde recopilar los datos desde las estaciones sismológicas hasta identificar y asociar cada evento de vibración de tronadura con datos del diseño de tronadura. Este proceso permitirá obtener resultados del impacto sobre infraestructura y los modelos de vibración más adelante.

3.3.1. Recopilación de la información

Fue necesario definir canales de envío de la información tanto de registros de vibración desde las estaciones sismológicas, como de tronadura desde la compañía minera a Rockblast. Ambos aspectos son cruciales para definir una vibración como un evento de tronadura y elaborar los modelos de vibración. Información poco clara, contradictoria o confusa podría ocasionar que la base de datos quede inutilizable debido a la imposibilidad de asociar correctamente la medición con los parámetros de la tronadura.

3.3.2. Identificación de señales

Este paso es importante debido a que no siempre se obtendrán señales de vibración por tronadura desde las estaciones sismológicas. Es probable que interferencias operacionales recurrentes u ocasionales puedan sesgar una medición en terreno y finalmente mermar los resultados esperados. Por lo tanto es importante saber leer e identificar una señal de tronadura, distinguirla de sismos o actividad de maquinaria pesada, pulsos puntuales, golpes o fallos en el geófono. El resultado de esta etapa debe ser clasificar las señales de vibración obtenidas en tronaduras o no tronaduras.

3.3.3. Asociación de mediciones con información de tronadura

Se refiere a poder asociar las vibraciones de tronadura medidas e identificadas con la información de tronadura que nos entrega la compañía minera. Esta asociación se puede llevar a cabo con una alta o baja rigurosidad dependiendo de la cantidad, calidad y claridad de la información. Para realizar esta tarea es necesario contar con eventos desde las estaciones sismológicas y una tronadura conocida e informada en dicha fecha, al menos. La asociación de estos datos será fundamental en la precisión del modelo de vibraciones generado al final del estudio.

Para este propósito se realiza una categorización de la confiabilidad de la asociación de los datos y se evaluó su impacto en los resultados finales del proyecto.

3.4. Resultados del impacto en infraestructura y modelos de vibraciones

3.4.1. Evaluación del impacto en infraestructura

La tarea consiste en tomar un set de datos desde las estaciones sismológicas, que esté correctamente asociado, y compararlo con distintas normas o criterios internacionales que den cuenta de la probabilidad de generar daño en infraestructura. Para este estudio en particular se han definido 5 normas y/o criterios para la evaluación del impacto sobre las zonas monitoreadas.

3.4.2. Obtención de modelo de vibración de Devine [9]

El modelo de Devine [9] constituye uno de los modelos de vibración por tronadura más básicos y reconocidos a nivel mundial, su simplicidad y utilidad lo ha mantenido vigente a pesar de la gran cantidad de modelos de vibración que podemos encontrar hoy en día en la literatura. Para obtener un buen modelo es necesario contar con información clara y precisa de la distancia entre las estaciones sismológicas y las tronaduras, la carga total de explosivo detonada y los niveles máximos de vibración generados en estos puntos. Con el objetivo de encontrar una mejor correlación para este modelo, se desarrollan 3 set de datos distintos por estación.

- Usando todos los datos recopilados sin importar su nivel de confiabilidad;
- usando una menor cantidad de datos de alta confiabilidad; y,
- considerando la masa de explosivo equivalente al ANFO en reemplazo de la masa total de explosivo.

3.4.3. Obtención del modelo de vibración de Yang [39]

Este modelo fue diseñado para estimar las vibraciones por tronadura en campo cercano, permite el ingreso de un número mayor de variables que Devine y por lo tanto entrega mayor posibilidad de cambio en el diseño de tronadura al ingeniero de perforación y tronadura. Se obtiene principalmente del uso de datos en campo cercano en conjunto con la ley escalar de Devine.

3.4.4. Simulación de vibraciones a partir de modelos

Esta tarea contempla el uso de los modelos anteriormente obtenidos para la simulación de niveles de vibración por tronadura. Su validación se llevará a cabo utilizando el último mes de monitoreo en la compañía minera (Septiembre de 2015). Una de las finalidades es poder comparar los resultados de todos los modelos y concluir al respecto.

3.5. Análisis de resultados

En esta sección se analizarán todos los resultados obtenidos en el estudio, con principal énfasis en el impacto de las vibraciones en infraestructura, la validación de los modelos de vibración y la comparación de estos. El análisis pretende encontrar los fundamentos detrás de los posible errores cometidos en todas las etapas descritas anteriormente.

3.6. Recomendaciones

En base a los análisis de los resultados se generarán recomendaciones para solventar aquellos problemas que se hayan detectado o que podrían presentarse a futuro.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos durante este proyecto, desde la implementación en terreno y sus modificaciones en el tiempo, hasta la obtención de resultados de impacto en infraestructura a partir de mediciones y estimación de vibraciones mediante modelos de campo lejano y cercano. Todos los resultados aquí expresados constituyen una re-evaluación, mediante otras técnicas y metodologías, de lo desarrollado en el proyecto concreto con la minera, ya que la finalidad de esta memoria es intentar generar nuevos resultados que puedan resultar atractivos para el cliente sin dejar de lado la rigurosidad del trabajo realizado.

4.1. Monitoreo de vibraciones

A continuación se describen los aspectos generales relativos a la puesta en marcha del proyecto desde el punto de vista de la instrumentación en las zonas de interés.

4.1.1. Periodo de monitoreo de vibraciones

Las estaciones sismológicas fueron construidas en Santiago y transportadas hacia faena la primera semana de julio de 2014, en el transcurso de esa semana se instrumentaron cada uno de los lugares de interés. El primer dato de vibración registrado y enviado inalámbricamente hacia el servidor remoto de Rockblast tuvo lugar el día martes 8 de julio de 2014. Una vez confirmada la correcta implementación del sistema y conectividad, se dió inicio oficial al periodo de monitoreo de vibraciones el día 10 de julio de 2014, con una duración de 1 año, 2 meses y 20 días.

El fin del periodo de monitoreo de vibraciones fue el 30 de septiembre de 2015.

4.1.2. Puntos de monitoreo

Las zonas de monitoreo fueron designadas por la compañía minera, en total se debían distribuir 6 geófonos en 4 zonas de interés. Dos de éstas correspondían a sectores cercanos a pilas de lixiviación, en donde se debía instrumentar con un geófono en terreno y otro

empotrado a cañerías de polietileno de alta densidad (en adelante HDPE, de su abreviatura en inglés) que se ocupaban del transporte de soluciones entre distintos sectores de la planta de procesamiento. Éstas tuberías representaban puntos críticos para el área de tronadura, ya que por sus características materiales y geométricas tendían a oscilar con gran amplitud con cada tronadura o movimiento del terreno. Los otros dos sectores, que correspondían a silos, fueron instrumentados solo con geófonos en terreno. En la Figura 4.1 se pueden observar los puntos de instrumentación en una vista en planta del sector a estudiar.



Figura 4.1: Imagen satelital con ubicación de estaciones sismológicas.

4.1.2.1. Estación sismológica 105

La estación sismológica 105 fue ubicada inicialmente en el Silo 1 (nomenclatura de la mina) el día 10 de Julio de 2014 y luego el 12 de Abril de 2015 fue trasladada a los alrededores de la Correa 010-CV-05, sector denominado Cepa 1. Esta estación siempre contó con un geófono emplazado en terreno. En la Tabla 4.1 se indican las coordenadas locales exactas de estas ubicaciones.

Tabla 4.1: Ubicaciones de estación sismológica 105. Coordenadas mina.

Ubicación	Este	Norte	Cota
Silo 1	72260	82441	2545
Cepa 1 CV-05	72463	82565	2559

En la Figura 4.2 se muestra la imagen final de la instalación de la ESI 105 en el Silo 1 de la planta de procesamiento.



Figura 4.2: estación sismológica 105 ubicada en Silo 1 de la planta.

4.1.2.2. Estación sismológica 106

La estación sismológica 106, similar a la estación 105, fue ubicada en el Silo 2 el día 10 de Julio de 2014, para luego ser trasladada el día 12 de Abril de 2015 a las cercanías del harnero de finos en un sector denominado como Fundación 2, las coordenadas locales se encuentran en la Tabla 4.2. Durante todo el periodo de monitoreo solo contó con un geófono en terreno.

Tabla 4.2: Ubicaciones de estación sismológica 106. Coordenadas mina.

Ubicación	Este	Norte	Cota
Silo 2	72316	82405	2546
Fundación 2 - Harnero Finos	72370	82503	2561

La Figura 4.3 corresponde a una fotografía de una de sus instalaciones.



Figura 4.3: estación sismológica 106 ubicada en Silo 2 de la planta.

4.1.2.3. Estación sismológica 107

Una de las estaciones ubicadas en las cercanías de las pilas de lixiviación fue la estación sismológica 107, cuya instalación tuvo lugar el día 9 de Agosto de 2014 en las cercanías de la Pila 12A instrumentada con un geófono en terreno y otro solidario a una cañería HDPE. Dicha estación fue trasladada el día 13 de Abril de 2015 a la Cepa 4 de la correa CV-07, en donde continuó el monitoreo de vibraciones con solo un geófono en terreno. La Tabla 4.3 resumen sus ubicaciones.

Tabla 4.3: Ubicaciones de estación sismológica 107. Coordenadas mina.

Ubicación	Este	Norte	Cota
Pila 12A	71302	82849	2546
Cepa 4 CV-07	72323	82451	2552

La Figura 4.4 muestra como la instrumentación se instaló en terreno.



Figura 4.4: estación sismológica 107 ubicada Pila 12A.

4.1.2.4. Estación sismológica 108

Finalmente, la estación 108 se ubicó en las proximidades de la culata de pila 4 con un geófono en terreno y otro acoplado a una cañería HDPE, esto tuvo lugar el día 9 de Agosto de 2014. Esta estación permaneció de forma permanente la posición indicada en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Ubicaciones de estación sismológica 108. Coordenadas mina.

Ubicación	Este	Norte	Cota
Pila 4	72035	82471	2546

La Figura 4.5 es una fotografía de su instalación en la planta.



Figura 4.5: estación sismológica 108 ubicada en la culata de la Pila 4.

Las coordenadas de las Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 serán las utilizadas para definir la distancia entre la tronadura y el punto de monitoreo que finalmente influirá en la obtención de los modelos de predicción de vibraciones en campo lejano.

4.1.3. Equipos utilizados

Para el monitoreo continuo de vibraciones se utilizaron estaciones sismológicas autónomas del punto de vista de la comunicación y energía, utilizando la red celular para el envío de datos y paneles solares para la carga de baterías internas, respectivamente. Los sensores correspondieron a geófonos triaxiales estándar de superficie bajo la norma ISEE (International society of Explosive Engineers) de la marca InstanTel, todos con su calibración al día. En algunas zonas se monitoreó con dos geófonos y en otras solo con uno, esto dependiendo de las necesidades y recursos de la mina. También se monitoreó mediante micrófonos, sin embargo su relevancia escapa de los alcances de este trabajo. A continuación se revisan las características de los equipos.

4.1.4. Minimate Plus de InstanTel

El equipo Minimate Plus de InstanTel (Figura 4.6) [33] es un monitor avanzado de vibraciones y de sobrepresión diseñado especialmente para ser usado por contratistas, ingenieros y expertos en tronaduras, ya que ofrece las características y versatilidades necesarias para realizar estudios de campo en donde la resistencia y facilidad de uso es fundamental. Los parámetros más importantes del equipo se resumen en la Tabla 4.6.

Los eventos de vibración son registrados una vez que supera un umbral de vibración establecido en una ventana corta de tiempo, a este valor se le denomina *trigger* (o gatillante, en español) y es configurable de acuerdo a la sensibilidad del geófono utilizado. Para este estudio se definió un trigger para cada estación de acuerdo con la distancia y carga explosiva que era habitualmente detonada en distintos bancos, de tal forma de capturar la mayor cantidad de eventos de tronadura.

Minimate Plus está diseñado especialmente para ser utilizado con geófonos triaxiales estándares en versión ISEE o DIN, y micrófonos de sobrepresión Lineal o Peso A. Los monitores pueden presentarse en versiones de 4 u 8 canales, con arreglos de 1 geófono triaxial + micrófono o bien 2 geófonos triaxiales + 2 micrófonos, aunque pueden también ser usados como canales independientes. En este estudio particular fueron utilizados 2 Minimate Plus de 4 canales (estaciones 105 y 106) y 2 Minimate Plus de 8 canales (estaciones 107 y 108) con los arreglos de geófonos + micrófonos antes mencionados.

Especificaciones técnicas principales

Tabla 4.5: Especificaciones técnicas del geófono triaxial estándar ISEE.

Rango	Hasta 10 in/s (254 mm/s)
Resolución	0.005 in/s (0.127 mm/s)
Precisión (ISEE)	$\pm 5\%$ o 0.02 in/s (0.5 mm/s), cualquiera sea mayor, entre 4 y 125 Hz
Densidad del transductor	1.33 lbs/ft ² (2.13 g/cc)
Rango de frecuencia (ISEE)	2 a 250 Hz
Máximo largo del cable	250 ft (75 m)
Software requerido	Blastware compliance / THOR



Figura 4.6: Equipo de monitoreo Minimate Plus de Instantel.

4.1.4.1. Geófono triaxial

Todos los geófonos utilizados en este estudio correspondieron a geófonos triaxiales del fabricante Instantel, el modelo corresponde a la versión *StandarGeophone* (Figura 4.7) con las especificaciones de la ISEE de la edición 2011, indicadas en la Tabla 4.6 [34]. La diferencia entre los geófonos anclados en terreno con aquellos empotrados sobre cañerías HDP es la base del geófono, la cual es acoplada al geófono mediante un perno y luego esta base se empotra a la estructura mediante amarras de alta resistencia a la tensión.

Especificaciones técnicas

Mide el movimiento del terreno en tres direcciones ortogonales. El sensor puede ser utilizado en terreno blando manteniéndose solidario a este, o bien ser empotrado a una superficie dura mediante pernos.

Tabla 4.6: Especificaciones técnicas del geófono triaxial estándar ISEE.

Estándar de respuesta	Especificaciones ISEE edición 2011
Rango de frecuencia	2 a 250 Hz
Rango de velocidad	hasta 10 in/s (254 mm/s)
Resolución	0.00031 in/s (0.00788 mm/s)
Densidad del sensor	1.33 lbs/ft ² (2.13 g/cc)
largo del cable	6 ft (2 m)
Máximo largo del cable	250 ft (75 m)
Software requerido	Blastware compliance / THOR

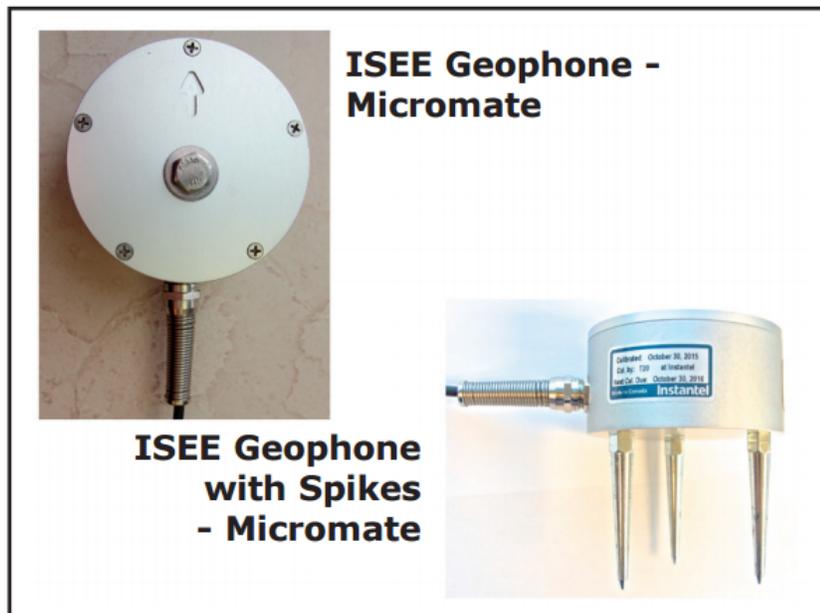


Figura 4.7: Geófono triaxial estándar ISEE.

Instalación en terreno

La instalación de los geófonos de campo lejano fue realizada siguiendo las recomendaciones del fabricante, Instantel, el cual a su vez se basa en los criterios establecidos por la ISEE [16]. Este indica que dependiendo de la superficie en donde se instale el geófono, sea esta una superficie blanda (terreno húmedo sin roca, es decir, sobre tierra común, como por ejemplo, en tierras fértiles para agricultura), terreno duro o altamente consolidado (como roca) o bien sobre estructuras (ver Figura 4.8), siempre debe quedar anclado de tal forma que sea solidario al movimiento del terreno y efectúe una oscilación semejante a las partículas en movimiento. Este tipo de anclaje puede lograrse usando estacas en la base del geófono, pernos de anclaje sobre el geófono o sobre una placa que sostenga el geófono, también puede ubicarse en un agujero un poco más grande que el geófono con un saco de arena, tierra u otro material que genere peso sobre el geófono, para finalmente rellenar la excavación y compactar suavemente el terreno. En este estudio fueron usadas éstas últimas dos técnicas de instrumentación, en

la Figura 4.9 se observa el geófono enterrado con un perno de anclaje que lo fija solidario al terreno, para luego ubicar el saco de tierra sobre el.

Un detalle no menor es la orientación y nivel del geófono, es necesario que siempre se instale lo más horizontal al terreno en donde se emplaza, y la orientación de la componente longitudinal (indicada con una flecha sobre la carcasa del geófono) debe apuntar a la fuente de las vibraciones, en este caso hacia las fases 13 y 14 de explotación.

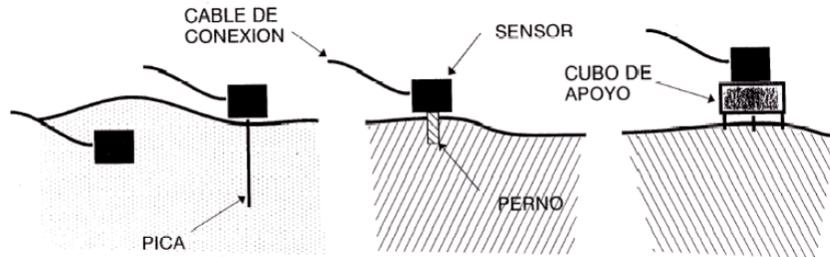


Figura 4.8: Ejemplos de instalación del geófono.



Figura 4.9: Instalación del geófono.

4.1.5. Servidor

El servidor de Rockblast consistía en un computador equipado con el hardware suficiente para llevar a cabo los procesos de envío y recepción de datos desde las estaciones sismológicas inalámbricas. Este proceso se llevaba a cabo a través de los softwares de Instantel llamados Blastware, Auto Call home y Blastware Mail, los cuales se ocupaban de configurar, recibir y enviar registros de vibración desde los equipos de monitoreo Minimate Plus y encapsular los datos más importantes de cada evento y reportarlos mediante correo electrónico a los clientes de la compañía minera y profesionales de Rockblast.

Cada uno de los registros era almacenado en una base de datos a la cual se podía acceder permanentemente mediante plataformas en línea, todos estos registros eran rescatados al final

de cada mes con el propósito de realizar informes de los progresos del modelo de estimación de vibración y asociar las vibraciones captadas con criterios o normas que daban cuenta del impacto sobre las infraestructuras monitoreadas.

4.1.6. Mantención del servicio de monitoreo

Durante el periodo completo de monitoreo se establecieron ciertas tareas importantes para mantener el funcionamiento del servicio de monitoreo, entre estas encontramos las siguientes.

- Revisión diaria de conexión de la estación al servidor de Rockblast. En caso de falla se debía proceder con un protocolo de reinicio del servidor, dar aviso a gente en terreno o coordinar una visita a faena para verificar las condiciones de energía (luz solar), de comunicación celular, integridad física de la estación y estado del equipo de medición.
- Descarga manual de datos en caso que la descarga automática fallase.
- Ajustar la configuración de los equipos de medición en caso de saturación por eventos de baja intensidad, por ejemplo maquinaria adyacente a la instalación. Generalmente se ajustaba el trigger de los equipos de acuerdo al historial de mediciones anteriores.

4.2. Análisis de la información recopilada

Como se mencionó anteriormente, todos los datos registrados por las estaciones sismológicas eran almacenados en una base de datos y luego enviados mediante correo electrónico a los ingenieros de perforación y tronadura de la minera, así como a personal de Rockblast. Lamentablemente no era posible realizar un filtro de toda la información captada por las estaciones en el corto plazo, la cual no siempre correspondía a vibraciones provocadas por tronaduras, en muchas ocasiones las estaciones eran activadas por operaciones habituales de la mina como el paso de camiones, personas, maquinaria, entre otros. Por lo tanto, los reportes rápidos que eran enviados instantáneamente mediante correo electrónico no siempre correspondían a eventos de tronadura.

Para solventar la situación anterior era necesario realizar un análisis de señal más profundo y compararla con información del área de perforación y tronadura de faena. Esta tarea se realizaba mensualmente, y en base a ésta era posible contrastar los resultados de tronadura con los criterios de daño y elaborar un modelo de estimación de vibraciones en campo lejano.

4.2.1. Reportes rápidos

Estos reportes tenían por finalidad dar un aviso temprano al cliente acerca de los niveles máximos de velocidad (PPV) generados por las tronaduras y asociarlas a un criterio de daño a infraestructura, en este caso el criterio DIN 4150-3. En la Figura 4.10 se presenta un ejemplo de los reportes enviados luego de cada registro.

Date/Time TraT1 at 14:45:59 March 17, 2015
 Trigger Source Geo: 1.000 mm/s
 Range Geo: 31.75 mm/s
 Record Time 5.0 sec (Auto=4Sec) at 2048 sps

Serial Number BE21197 V 10.60-8.17 MiniMate Plus/8
 Battery Level 6.7 Volts
 Unit Calibration May 7, 2014 by InstanTel
 File Name W197FRIR.ON0W

Notes

Compania Minera: Cerro Colorado, BHP Billiton
 Area: Planificacion Mina
 Ubicacion: SILO Numero 1
 SN: ESI_105_21197

Extended Notes

Estacion Sismografica Inalambrica
 RockBlast Design Ltda
 Implementacion: 11 de Julio del 2014

Microphone Linear Weighting
 PSPL 0.500 pa.(L) at -0.241 sec
 ZC Freq >200 Hz
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	TraT1	VerT1	LonT1	
PPV	1.143	1.238	0.988	mm/s
ZC Freq	7.4	7.6	6.6	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.229	0.282	0.341	sec
Peak Acceleration	0.017	0.020	0.013	g
Peak Displacement	0.024	0.024	0.022	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.4	7.5	7.2	Hz
Overswing Ratio	3.7	3.9	3.8	

Peak Vector Sum 1.621 mm/s at 0.282 sec

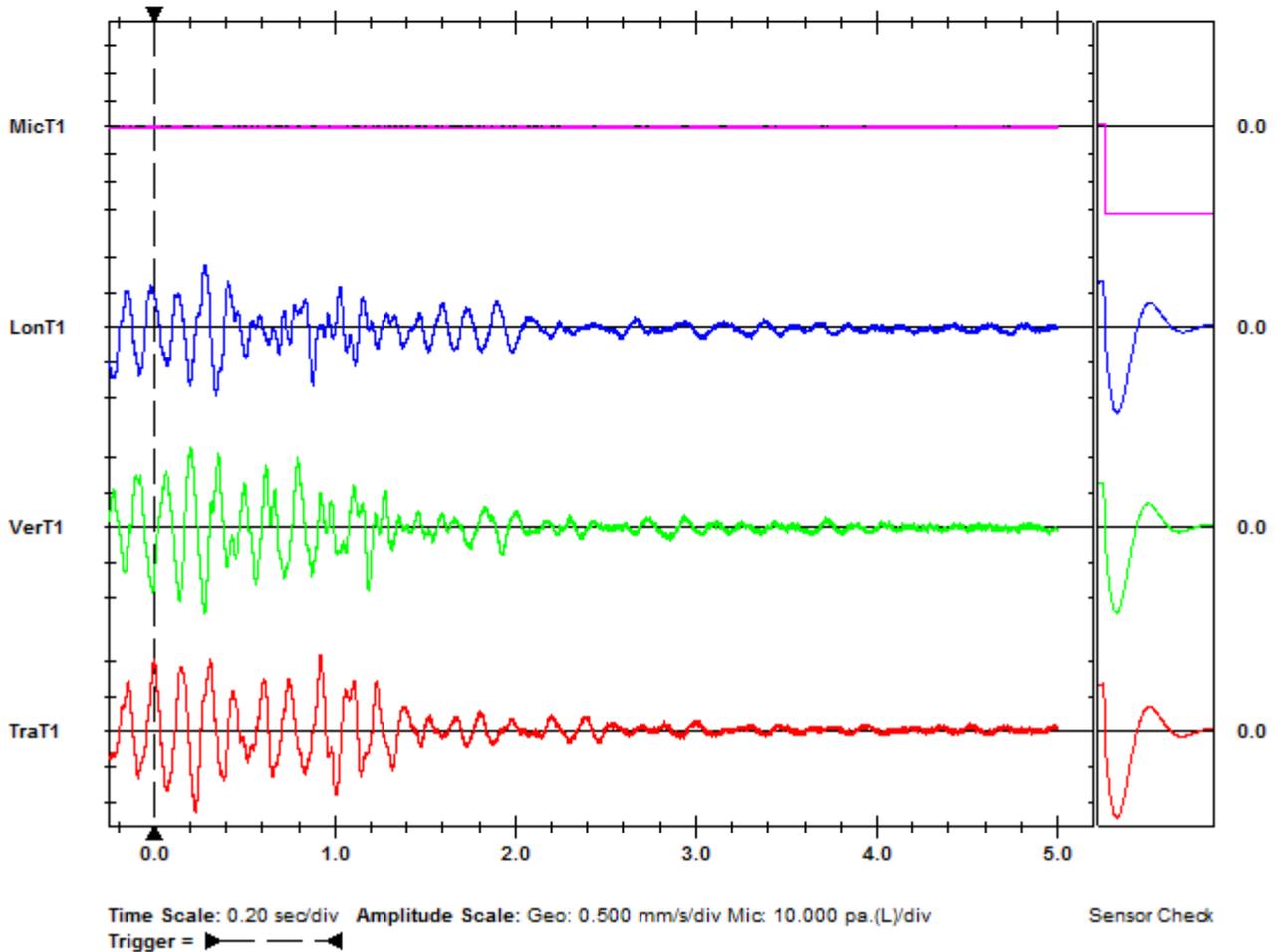
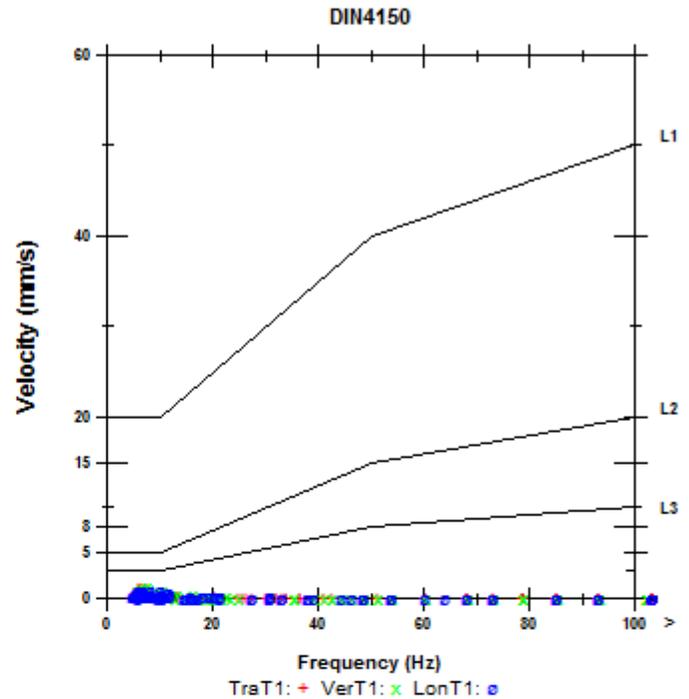


Figura 4.10: Reporte de vibración automático.

En la primera sección de este reporte se muestra información general de la estación, del geófono y del estudio. Luego, en un tabla junto al gráfico de criterio de daño, se muestran los resultados más significativos de la medición: PPV, frecuencia principal obtenida por el método del semiperiodo, instante en el que se obtiene el PPV, aceleración máxima de partícula, desplazamiento máximo de partícula, resultados del chequeo de los geófonos, y el vector suma máximo de la velocidad (PVS). Todo lo anterior en las 3 componentes ortogonales medidas por el sensor.

A la derecha de esta tabla se puede encontrar el gráfico del criterio de daño sobre infraestructuras DIN 4150-3 con aquellos peak de velocidad superiores a 1 mm/s. El gráfico utiliza el peak por componente y la frecuencia obtenida por el método del semiperiodo (Zero cross) para cada uno de estos.

Finalmente, al final de este reporte, se encuentran los registros completos de onda captados por el monitor en la forma de un gráfico de velocidad de partícula (mm/s) contra tiempo (s), para cada eje del sensor.

4.2.2. Análisis de señal y asociación a tronaduras

Cada vez que un evento de vibración era registrado y descargado, éste era inmediatamente analizado mediante el uso del software Blastware Advanced module, con la finalidad de entregar un primer indicio de si efectivamente correspondía a un evento de tronadura. Las características principales de un evento de tronadura correspondían a:

- Frecuencia de vibración entre 1 y 40 Hz ;
- registros de onda con duración menor a 5 segundos;
- picos de velocidad de partícula bien definidos y acotados;
- decaimiento progresivo de la amplitud de velocidad de partícula hasta llegar a cero.

En caso de existir dudas sobre un evento, éste era aceptado como tronadura y se esperaba la información de tronaduras enviadas por la mina para confirmar o descartar el evento en cuestión. También se hizo uso de la plataforma de sismología de la Universidad de Chile para descartar aquellos eventos de vibración que correspondieran a sismos. La información recibida por la mina correspondía a la siguiente.

- Avisos de tronadura diarios con información general de: fase, banco, polígono o malla, perímetro de seguridad, información geotécnica importante y plano de avance de la mina actualizada a ese día. Esta información se recibía en los días que habría tronadura;
- consumo mensual de explosivos por tronadura, este incluía la fecha de la tronadura,

fase, banco, malla o polígono, tonelaje de roca tronada, kilos de explosivo por tipo, factor de carga, tipo y cantidad de detonadores, entre otros;

- archivo DXF con las mallas de tronadura por banco y fase.

Con la información confirmada de la fecha de las tronaduras fue posible realizar una asociación más robusta de los registros de vibración y descartar definitivamente aquellos que no correspondían a dichos días. Sin embargo, esto no significaba que no existieran otros problemas de asociación, por ejemplo, fue habitual encontrar un registro de vibración que podría estar relacionado a solo una de dos o tres tronaduras informadas el mismo día, para las cuales no se conocía la hora. Dichos problemas hicieron necesario categorizar las asociaciones de tronadura en términos de su confiabilidad.

Categorías por asociación:

- Categoría A: asociación con 100 % de confiabilidad, se cumplía con tener un registro de vibración identificado de tronadura, confirmación de la fecha de tronadura y ser la única tronadura del día.
- Categoría B: asociación de alta confiabilidad, cumplía con ser un registro de vibración identificado como tronadura, confirmación de 2 o más eventos de tronadura en dicha fecha y sobre los cuales se pudo identificar a que tronadura correspondía el evento en base a la distancia, cantidad de explosivo, sector de tronadura y onda de vibración generada en las estaciones.
- Categoría X: asociación de baja confiabilidad, este tipo de eventos cumplía con considerarse un registro de vibración de tronadura, confirmación de 2 o más tronadura aquel día, sin embargo, resultó imposible o azaroso asociarlo a una tronadura en particular usando los criterios descritos en la categoría B.
- Sin categoría: eventos de vibración que no eran identificados como tronadura, sino más bien como interferencias operacionales de camiones, personas, golpes, entre otras acciones que pudieron activar el geófono, o bien, como eventos sísmicos confirmados por sismología de la Universidad de Chile (www.sismologia.cl).

Durante el periodo de monitoreo a partir del cual se desarrolló la base de datos para este trabajo de memoria. En la Tabla 4.7 se muestra un resumen de la categorización de estos datos.

Número de eventos de vibración	Estaciones			
	105	106	107	108
Número total de eventos registrados	503	441	506	206
Eventos de categoría A	86	78	73	50
Eventos de categoría B	84	65	79	32
Eventos de categoría X	33	38	38	21
Eventos sin categoría	300	260	316	103
Total de eventos asociados a tronadura	203	181	190	103
porcentaje de eventos asociados a tronaduras	40.4%	41.0%	37.5%	50.0%

Tabla 4.7: Número de eventos por categoría y estación.

La Tabla 4.7 muestra una gran cantidad de eventos de vibración que no correspondieron a tronaduras, es decir, la toma de datos se vió afectada por una importante interferencia operacional de los trabajos mina hacia las estaciones sismológicas. Lo anterior, entorpeció la calidad de la información recibida hacia el cliente y hacia Rockblast, lo que hizo necesario un constante filtrado de los eventos que no correspondían a tronaduras y una mayor precisión de la información de tronadura que era entregada por el área de perforación y tronadura.

Considerando solo los eventos categorizados como A o B, es decir, datos de alta confiabilidad, tenemos un total de eventos asociados por estación de 170, equivalente al 33,8% del total de datos para la estación 105; 143 eventos, equivalente a un 32,4% del total de datos, para la estación 106; 152 eventos, equivalente a 30%, para la estación 107; y 82 eventos, equivalente a 39,8% del total, para la estación 108. Lo que en suma constituye un 33% del total de vibraciones registradas.

Ahora, considerando todos los eventos asociados a tronadura, incluidos aquellos de baja confiabilidad, es decir, la suma de eventos de las categorías A, B y X, se tiene un total de eventos asociados a tronaduras de 203 para la estación 105, 181 para la estación 106, 190 para la estación 107 y 103 para la estación 108. En total, se tienen 677 eventos asociados a tronadura, equivalente al 41% total de los datos registrados en el estudio.

4.3. Evaluación del impacto en infraestructura

La evaluación del impacto en infraestructura se realizó utilizando todos los registros de vibración asociados a tronaduras descritos en la sección anterior, es decir, aquellos en las categoría A, B y X, considerando las normas o criterios DIN 4150-3, USBM RI 8507, UNE 22-381-93, SN 640 315a y SN 460 48 66 1991. Se ha decidido evaluar con cada uno de los criterios con la finalidad de descartar transversalmente la posibilidad de daño sobre los puntos de interés y también ampliar el rango de probabilidad de que pudiese existir un daño, principalmente debido a que todas las normas emplean distintas escalas de evaluación. Se han escogido estas cinco anteriores basado en lo siguiente.

- Representan estándares para la evaluación de daño por tronadura en los países en donde han sido elaborados;
- Son utilizados en la industria minera Chilena;
- Proveen una forma fácil e intuitiva de evaluar el daño basado en la calidad de la infraestructura, el PPV y la frecuencia principal de la vibración (todos parámetros con los que se cuenta);
- Son aplicables a edificios o construcciones de carácter industrial como es el caso de estudio. A excepción del USBM RI 8507, el cual es aplicado comúnmente en residencias, pero que al momento de realizar este trabajo se aplicaba en RockBlast y por lo tanto se incluía dentro de los reportes.

Las frecuencias de vibración utilizadas corresponden a la frecuencia dominante obtenida a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT), la cual fue calculada mediante una rutina programada en Python.

4.3.1. Ubicación: Silo 1

Se evaluaron las mediciones asociadas a tronadura para la ubicación inicial de la estación 105 en el Silo 1. El periodo de evaluación corresponde desde el 10 de julio de 2014 al 12 de abril de 2015.

Se realizó la evaluación considerando todas las normas anteriormente mencionadas, en donde ninguna de éstas indicó que se pudiese ocasionar algún tipo de daño sobre la infraestructura (ver Anexo 7.1.1).

4.3.2. Ubicación: Correa CV-05 - Cepa 1

Se evaluaron las mediciones asociadas a tronadura para la ubicación de la estación 105 en la Cepa 1 de la correa CV-05. Al igual que para el Silo 1 se utilizaron todas las normas y criterios mencionados, obteniendo como resultado que ninguno de los eventos observados generaba alguna posibilidad de daño sobre la Cepa 1 (ver Anexo 7.1.2).

4.3.3. Ubicación: Silo 2

Se evaluaron las mediciones asociadas a tronadura para la ubicación inicial de la estación 106 en el Silo 2. Al igual que en los escenarios anteriores, no se detectó ninguna tronadura que pudiese afectar a esta infraestructura de acuerdo a los criterios o normas utilizados, a excepción de la evaluación sobre la Norma SN 460 66 1991, en donde el 1 % de los eventos han superado el umbral establecido. Dicha situación será tratada en el análisis de resultados de esta memoria (ver Anexo 7.1.3).

4.3.4. Ubicación: Harneros - Fundación 2

Se evaluaron las mediciones correctamente asociadas a tronadura para la ubicación de la estación 106 en la Fundación 2 de los harneros. Este tipo de estructura pertenece al grupo de edificación más competentes y por lo tanto se categorizó dentro de los niveles más resistentes para todos los criterios y normas (ver Anexo 7.1.4).

Bajo ninguno de los criterios evaluados se obtuvo alguna posibilidad de daño sobre la infraestructura.

4.3.5. Ubicación: Pila 12A

Se evaluaron las mediciones asociadas a tronadura para la ubicación inicial de la estación 107 en la Pila 12A. Esta contaba con un geófono en terreno y otro montado sobre la cañería HDPE. Si bien no existen estructuras adosadas al terreno en donde se emplaza el geófono, podría proyectarse este resultado hacia los cimientos de los estanques de ácido a los que alimentan las cañerías. Bajo esta suposición entenderíamos estos cimientos como una estructura fuerte similar a la presente en los silos o cepas, por lo que no habría daño a partir de las

mediciones del geófono en terreno. No sucede así para el geófono en la cañería, el cual tiene signos de una latente probabilidad de daño producto de las vibraciones de tronadura. Esto último es avalado por casi todas las normas y criterios usados en este estudio (ver Anexo 7.1.5).

4.3.6. Ubicación: Correa CV-07 - Cepa 4

Se evaluaron las mediciones correctamente asociadas a tronadura para la re-ubicación de la estación 107 en la Cepa 4 de la correa CV-07, la cual solo contaba con un geófono en terreno. Al observar los resultados para la mayoría de los criterios y normas, se distinguen varios eventos que han sobrepasado los niveles de potencial daño sobre infraestructura, por lo tanto existe una probabilidad de que la Cepa 4 se vea afectada estructuralmente por las tronaduras efectuadas en las fases evaluadas (ver Anexo 7.1.6).

4.3.7. Ubicación: Pila 4

Se evaluaron las mediciones asociadas a tronadura para la estación 108, ubicada de forma permanente en la Pila 4. Esta estación contaba con un geófono en terreno y otro montado sobre la cañería HDPE. Al igual que para el caso de la estación 107 en su primer periodo, no es posible otorgarle un carácter estructural al geófono ubicado en terreno, a menos que extrapolemos las mediciones hacia algún cimiento o fundación a su alrededor. Bajo esta premisa, no existen eventos que sobrepasen los umbrales de daño propuestos.

Para el caso de las cañerías HDPE se tienen niveles de vibración sobre los umbrales permisibles para todas las normas y criterios aquí evaluados (ver Anexo 7.1.7).

4.4. Elaboración de los modelos de vibración - Ley escalar de Devine

Los modelos de vibración utilizados durante este trabajo corresponden al modelo de Devine [9] y de Yang [39]. Estos se basan principalmente en análisis estadísticos de las vibraciones por tronaduras que son registradas a cierta distancia. Los parámetros fundamentales de estos modelos son la distancia y la carga explosiva detonada, no obstante, existe una gran influencia de la geología, no controlable, por donde circula el tren de onda. Esta influencia se manifiesta en las constantes de atenuación de los modelos antes mencionados [27]. Es de conocimiento general, que a distancias entre 100 m y 3000 m, es decir, en campo lejano, las vibraciones se ven altamente influidas por el total de la carga detonada [38] debido a una amplificación de la longitud de onda del pulso de un pozo detonado que se acopla o acumula con otro [5] [39], por tanto, los modelos han sido obtenidos bajo dicha premisa, con la intención de ser verificados.

Se consideraron dos aproximaciones variando la distancia escalar en los datos de entrada al modelo. En la primera aproximación se consideró la distancia escalada como la distancia en metros, dividida por la raíz cuadrada del total de carga explosiva detonada en kilogramos; En la segunda aproximación se divide la distancia por la raíz de la carga explosiva equivalente al ANFO, y no la simple suma algebraica de la carga de los distintos tipos de explosivos pre-

sentes en el pozo. Esto en virtud de que la vibración generada por una tronadura no es más que la transmisión de energía desde el explosivo hacia el medio, habitualmente considerada una pérdida de energía efectiva de fragmentación o desplazamiento del macizo. A partir de los resultados obtenidos, se espera concluir respecto a que aproximación es la más adecuada al momento de estimar vibraciones por tronaduras utilizando distintos tipos de explosivos.

Los modelos fueron obtenidos mediante regresión potencial del PPV_{sum} y/o PPV por componente versus la distancia escalada, SD , definida como la distancia entre el monitor y la detonación, D , dividida por: caso 1) La raíz cuadrada del total de explosivos detonados en kilogramos, $SD1$ (ecuación 4.2), denominado en este trabajo como modelo tradicional; caso 2) La raíz de la carga total detonada relativo al ANFO, $SD2$ (ecuación 4.3), llamado modelo de equivalencia al ANFO. Para calcular el equivalente energético respecto al ANFO se utilizó la potencia en peso relativa al ANFO de cada explosivo, según catálogos [11] [29], usando la Ecuación (4.1).

$$W_{ANFO} = W_{exp_x} * P_{x-ANFO} \quad (4.1)$$

En donde W_{ANFO} es el peso relativo al ANFO del explosivo X, W_{exp_x} es el peso del explosivo X y P_{x-ANFO} es la potencia relativa al ANFO del explosivo X.

Las regresiones potenciales se desarrollaron siguiendo la Ecuación 4.4 y solo utilizaron datos hasta el 31 de agosto de 2015, dejando los datos de septiembre de 2015 para validación de los modelos obtenidos.

$$SD1 = \frac{D}{\sqrt{W}} \quad (4.2)$$

$$SD2 = \frac{D}{\sqrt{W_{ANFO}}} \quad (4.3)$$

$$PPV = K (SD)^n \quad (4.4)$$

Una vez obtenidos los modelos preliminares, utilizando el PPV_{sum} como referente, los datos fueron sometidos a pruebas de reconocimiento de valores *outliers* utilizando el software Minitab. Luego, por medio de un análisis de tendencia histórica de valores, análisis de factibilidad y confiabilidad sobre la información de tronadura entregada, y la tendencia al error absoluto que mostraban dos o más estaciones para el mismo evento de tronadura, fueron definitivamente descartados.

En la siguiente sección se presentan los modelos de vibración sin outliers. Todos los modelos consideran datos desde la implementación de la estación hasta el 31 de Agosto de 2015.

Lo anterior se realizó tanto para todos los datos asociados (suma de los datos categoría A, B y X), como para la suma de los datos categoría A y B. Los modelos fueron elaborados

para el Vector suma, y componente transversal, vertical y longitudinal con el propósito de evaluar individualmente sus valores en los criterios o normas de daño sobre infraestructura.

A continuación se definen las leyes escalares para cada estación de monitoreo. Es importante notar que se han considerado siete puntos de monitoreo, debido al cambio en las ubicaciones de las estaciones 105, 106 y 107, por lo tanto los modelos serán nombrados de acuerdo a su ubicación.

4.4.1. Ley escalar por estación para todos los datos asociados

En esta sección se presentan los modelos de vibración de enfoque tradicional y de equivalencia al ANFO, considerando todos los datos asociados a tronadura, es decir, categorías A, B y X. Los gráficos con los datos, tendencias y modelos para cada ubicación se pueden encontrar en el Anexo 7.2.1.

4.4.1.1. Ubicación: Silo 1

En el Silo 1 realizó un monitoreo continuo de vibraciones durante un periodo de 276 días. El modelo tradicional para el vector suma entregó constantes $K = 17,337$ y $n = -1,198$, con un $R^2 = 0,67$, el cual se considera un modelo relativamente bueno considerando los modelos de campo lejano encontrados en la literatura [22]. Por su parte, el modelo de equivalencia al ANFO para el vector suma entregó constantes $K = 17,495$ y $n = -1,203$, con un $R^2 = 0,67$. A partir de estos valores, se puede inferir que no existen diferencias importantes entre un enfoque y otro. En la Figuras 4.11 y 4.12 se pueden encontrar los modelos (regresiones potenciales) para cada uno de los ejes y el vector suma. En Tabla 4.8 se indican las constantes del modelo para cada enfoque.

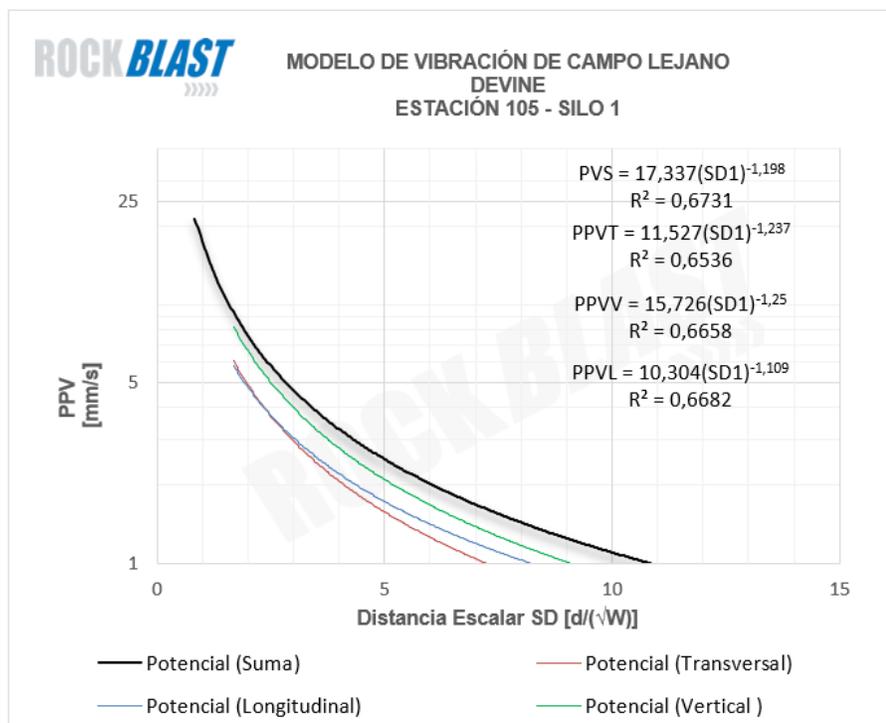


Figura 4.11: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para el Silo 1.

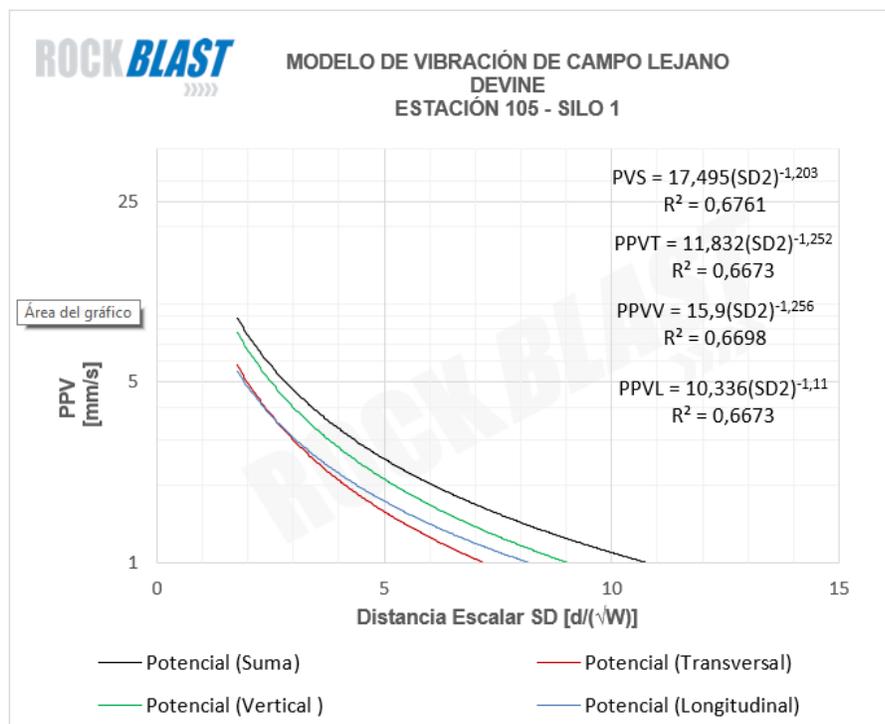


Figura 4.12: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para el Silo 1.

Silo 1	Explosivo (kg) - SD1			Explosivo Equivalente (kg) - SD2		
	K	n	R2	K	n	R2
PPV (mm/s)						
PPV Suma	17,337	-1,198	0,673	17,495	-1,203	0,676
PPV Transversal	11,527	-1,237	0,654	11,832	-1,252	0,667
PPV Vertical	15,723	-1,250	0,666	15,900	-1,256	0,670
PPV Longitudinal	10,304	-1,109	0,668	10,336	-1,110	0,667

Tabla 4.8: Constantes de los modelos de vibración para el Silo 1.

Los gráficos en el Anexo 7.2.1.1 se muestran los datos asociados, la tendencia y ecuaciones para los modelos de enfoque tradicional (en color azul) y el de equivalencia al ANFO (en color rojo)(Exp: explosivo; EQ: equivalente al ANFO).

4.4.1.2. Ubicación: Silo 2

El Silo 2 fue monitoreado, al igual que el Silo 1, por un periodo de 276 días. El modelo tradicional para el vector suma entregó constantes $K = 13,426$ y $n = -1,026$, con un $R^2 = 0,47$, lo que indica una baja correlación entre la distancia escalada y el PPV. Por su parte, el modelo de equivalencia al ANFO para el vector suma entregó constantes $K = 13,472$ y $n = -1,029$, con un $R^2 = 0,47$. Tampoco existen diferencias importantes entre un enfoque y otro.

En las Figuras 4.13 y 4.14 se muestran los modelos para el Silo 2 bajos los enfoques de

kilogramos de explosivo y explosivo equivalente para todas las componentes de la velocidad. La Tabla 4.9 resumen las constantes para estos modelos.

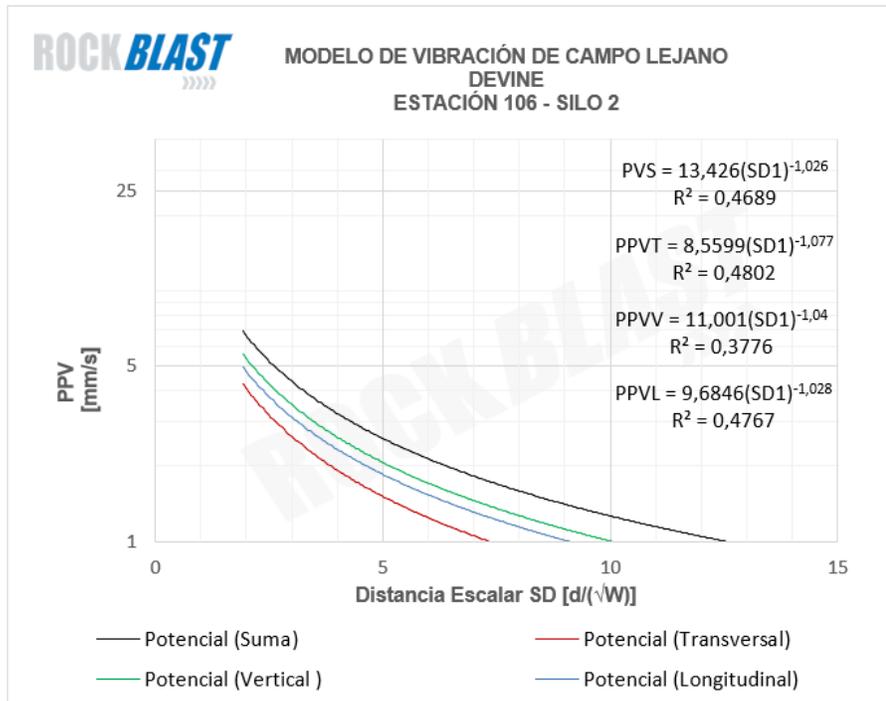


Figura 4.13: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para el Silo 2.

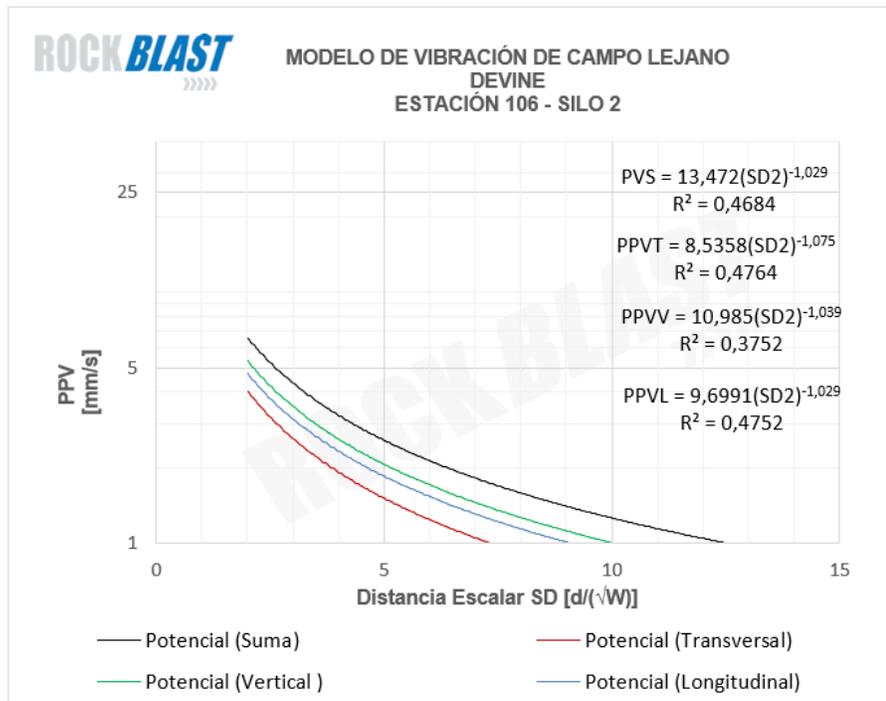


Figura 4.14: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para el Silo 2.

Silo 1	Explosivo (kg) - SD1			Explosivo Equivalente (kg) - SD2		
	K	n	R2	K	n	R2
PPV Suma	13,426	-1,026	0,469	13,472	-1,029	0,468
PPV Transversal	8,560	-1,077	0,480	8,536	-1,075	0,476
PPV Vertical	11,001	-1,040	0,378	10,985	-1,039	0,375
PPV Longitudinal	9,685	-1,028	0,477	9,699	-1,029	0,475

Tabla 4.9: Constantes de los modelos de vibración para el Silo 2.

Los gráficos para cada componente individual en esta ubicación se pueden encontrar en el Anexo 7.2.1.2.

4.4.1.3. Ubicación: Pila 12A

Se realizó un monitoreo continuo del terreno y cañería HDPE en las cercanías de la Pila 12A. El monitoreo se efectuó por un periodo de 247 días. El modelo tradicional para el vector suma entregó constantes $K = 14,71$ y $n = -0,827$, con un $R^2 = 0,52$, lo que indica una baja correlación entre la distancia escalada y el PPV. Por su parte, el modelo de equivalencia al ANFO para el vector suma entregó constantes $K = 14,723$ y $n = -0,83$, con un $R^2 = 0,53$. No se notan diferencias importantes entre un enfoque y otro.

Al graficar los modelos de vibración de Devine, podemos encontrar las tendencias presentes en las Figuras 4.15 y 4.16 para cada una de las componentes de la velocidad y el vector suma. Además, se presenta un resumen de estos modelos en la Tabla 4.10.

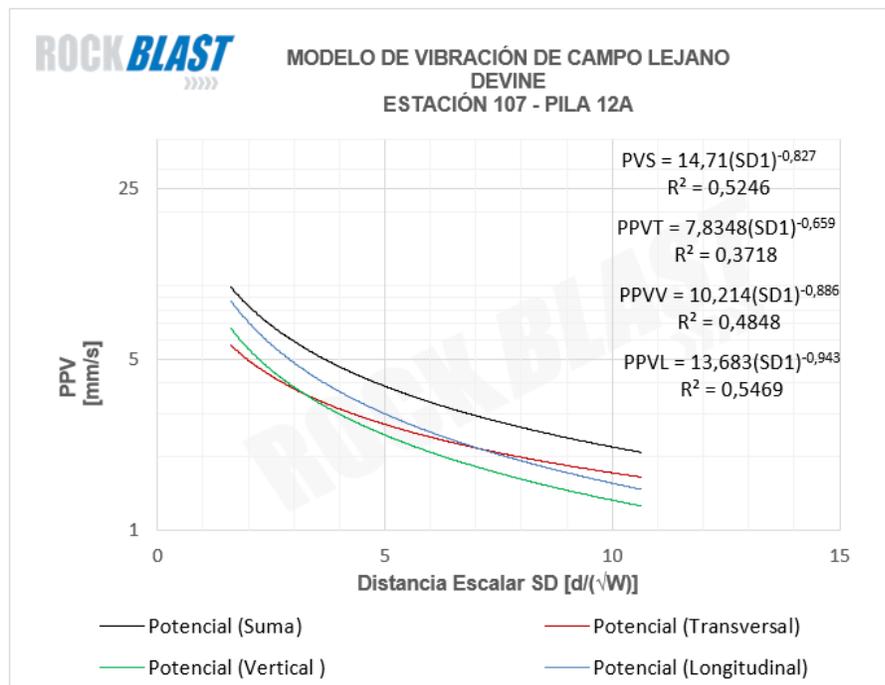


Figura 4.15: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para la Pila 12A.

Pila 4	Explosivo (kg) - SD1			Explosivo Equivalente (kg) - SD2		
	K	n	R2	K	n	R2
PPV Suma	11,386	-0,690	0,351	11,575	-0,693	0,343
PPV Transversal	8,580	-0,710	0,304	8,591	-0,700	0,285
PPV Vertical	7,401	-0,621	0,265	7,520	-0,625	0,259
PPV Longitudinal	7,605	-0,638	0,278	7,836	-0,654	0,282

Tabla 4.11: Constantes de los modelos de vibración para la Pila 12A.

Los gráficos se pueden encontrar en detalle en el Anexo 7.2.1.4.

4.4.1.5. Ubicación: Correa CV-05 - Cepa 1

El 13 de abril de 2015 la estación 105 fue reubicada en la Cepa 1 correa CV-05 debido a la alta sensibilidad de esta estructura hacia las vibraciones. Se realizó un monitoreo continuo por 141 días. El modelo tradicional para el vector suma entregó constantes $K = 22,394$ y $n = -1,327$, con un $R^2 = 0,65$, lo que indica una buena correlación entre la distancia escalada y el PPV [22]. Por su parte, el modelo de equivalencia al ANFO para el vector suma entregó constantes $K = 23,35$ y $n = -1,307$, con un $R^2 = 0,65$. Tampoco existen diferencias importantes entre un enfoque y otro.

En las Figuras ?? y ?? se encuentran los modelos de Devine para la Cepa 1 en cada uno de las componentes de la velocidad. En la Tabla ?? se encuentran las constantes de cada modelo.

El detalle de los gráficos se pueden encontrar en el Anexo 7.2.1.5.

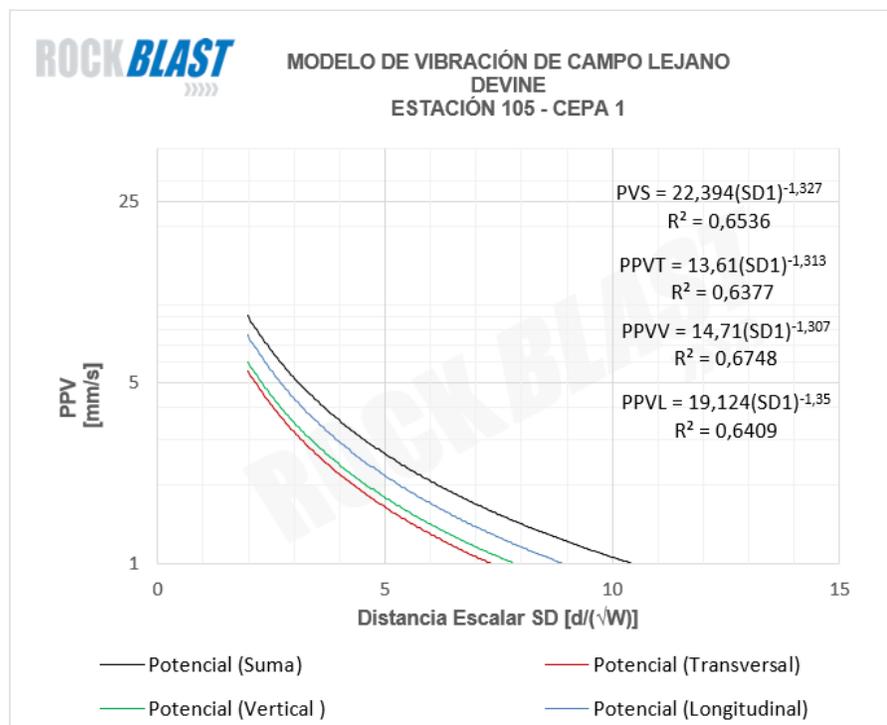


Figura 4.19: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para la Cepa 1.

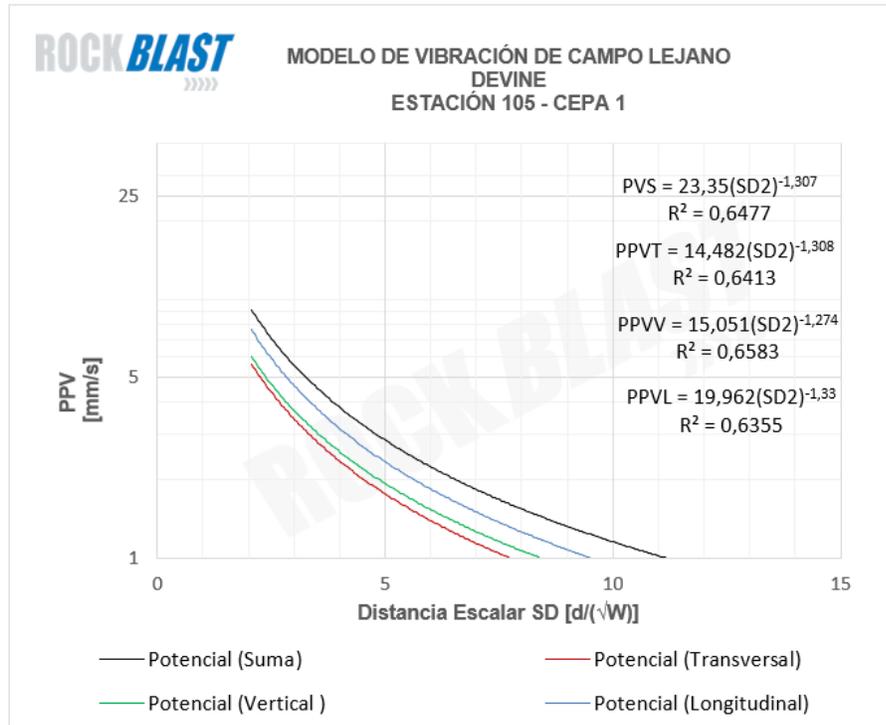


Figura 4.20: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para la Cepa 1.

Cepa 1	Explosivo (kg) - SD1			Explosivo Equivalente (kg) - SD2		
	K	n	R2	K	n	R2
PPV (mm/s)						
PPV Suma	22,394	-1,327	0,654	23,350	-1,307	0,648
PPV Transversal	13,610	-1,313	0,638	14,482	-1,308	0,641
PPV Vertical	14,710	-1,307	0,675	15,051	-1,274	0,658
PPV Longitudinal	19,124	-1,350	0,641	19,962	-1,330	0,636

Tabla 4.12: Constantes de los modelos de vibración para la Cepa 1.

4.4.1.6. Ubicación: Correa CV-07 - Cepa 4

De igual manera que la estación 105, la estación 107 fue reubicada a la Cepa 4 de la correa CV-07, otra estructura sensible. El monitoreo se realizó durante 141 días. El modelo tradicional para el vector suma entregó constantes $K = 52,14$ y $n = -1,541$, con un $R^2 = 0,73$, obteniendo un modelo relativamente bueno [22]. Por su parte, el modelo de equivalencia al ANFO para el vector suma entregó constantes $K = 57,564$ y $n = -1,556$, con un $R^2 = 0,73$. Se observa una tendencia similar entre ambos enfoques.

Los gráficos de las Figuras 4.21 y 4.22 dan cuenta de los modelos de regresión potencial (Devine) obtenidos para la Cepa 4 para ambos enfoques de la velocidad escalar (SD1 y SD2). La Tabla 4.13 recoge los valores de cada uno de los modelos.

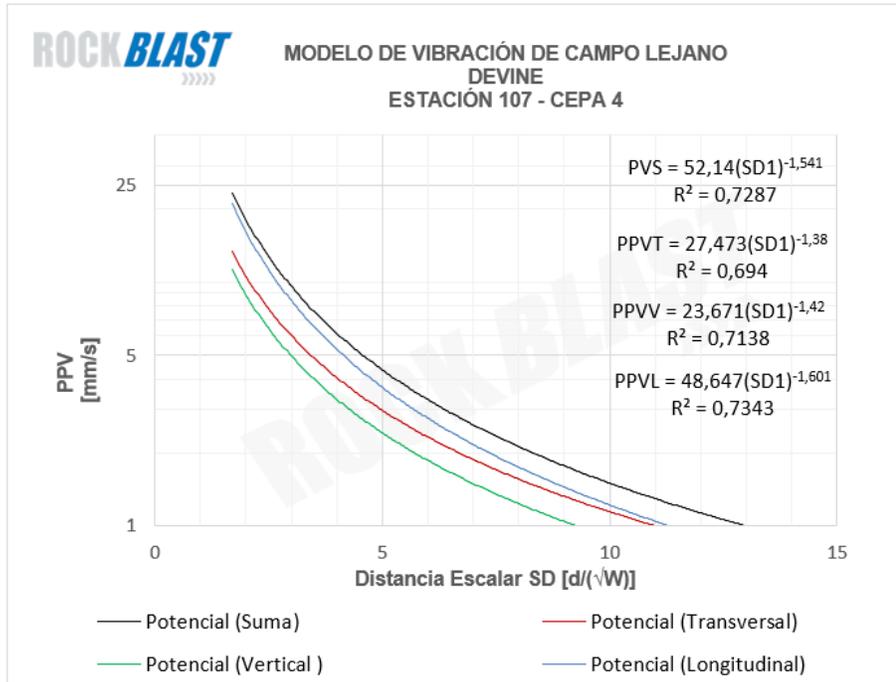


Figura 4.21: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para la Cepa 4.

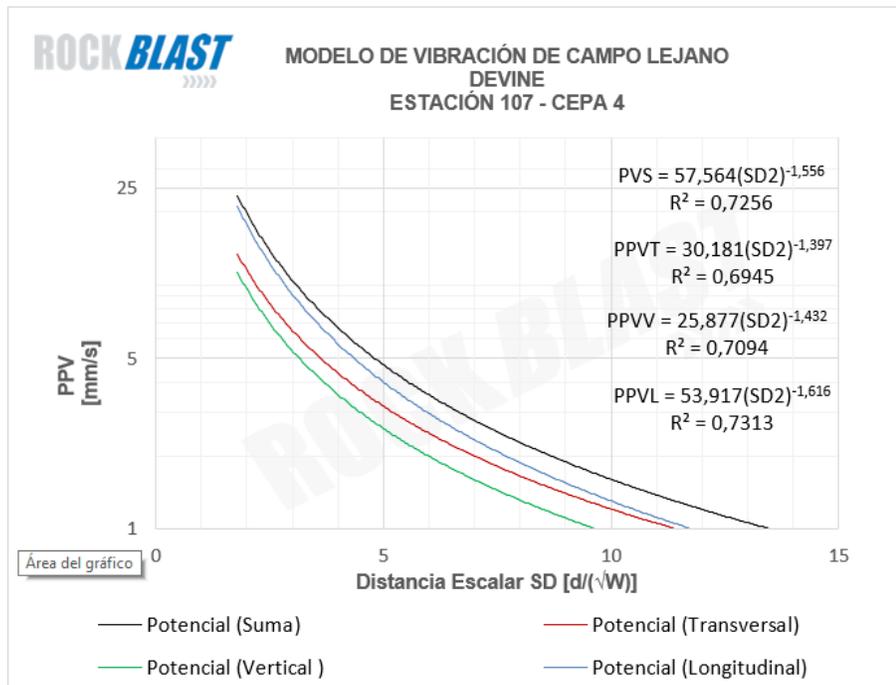


Figura 4.22: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para la Cepa 4.

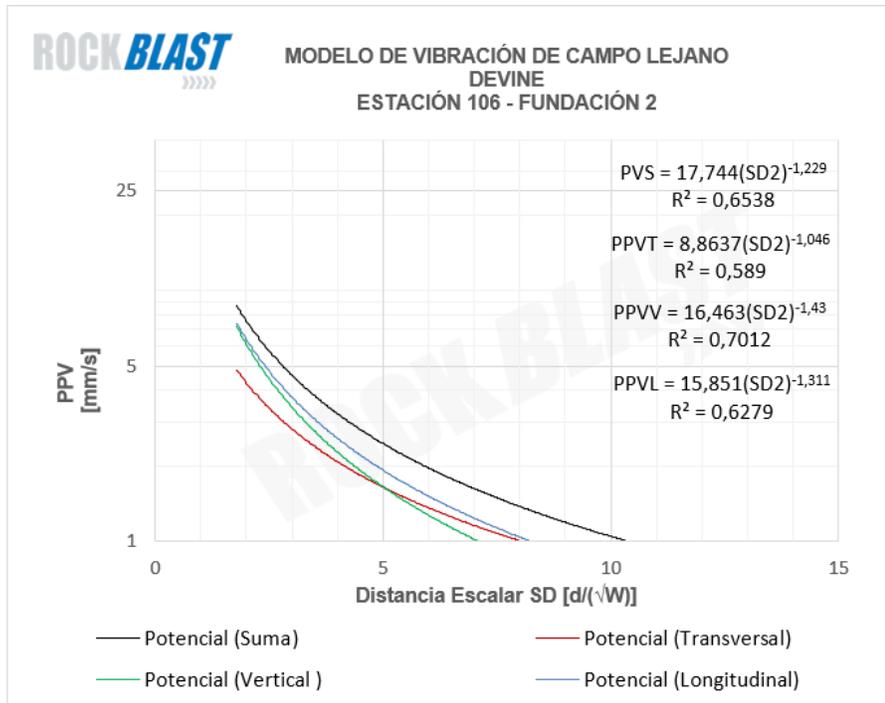


Figura 4.24: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para Harneros - Fundación 2.

Fundación 2	Explosivo (kg) - SD1			Explosivo Equivalente (kg) - SD2		
	K	n	R2	K	n	R2
PPV Suma	16,134	-1,210	0,657	17,744	-1,229	0,654
PPV Transversal	8,182	-1,031	0,588	8,864	-1,046	0,589
PPV Vertical	14,797	-1,410	0,702	16,463	-1,430	0,701
PPV Longitudinal	14,325	-1,290	0,626	15,851	-1,311	0,628

Tabla 4.14: Constantes de los modelos de vibración para Harneros - Fundación 2.

Los gráficos de detalle están disponibles en el Anexo 7.2.1.7.

4.4.1.8. Cañerías HDPE

Tal como se mencionó en los antecedentes de este trabajo, los modelos de vibración están orientados a usarse en terreno o estructuras solidarias a éstas, no en equipos o superficies móviles o con mayor grado de libertad que el suelo en donde están emplazados. No obstante, se ha decidido elaborar los modelos de todas maneras para verificar si podrían ser de utilidad o bien se descartan por completo. Para esto, se elaboraron modelos de vibración para las cañerías HDPE en las Pilas 12A y 4. Estos se pueden encontrar en las Figuras 4.25, 4.26, 4.27 y 4.28. Las Tablas 4.15 y 4.16 muestran estos modelos resumidos.

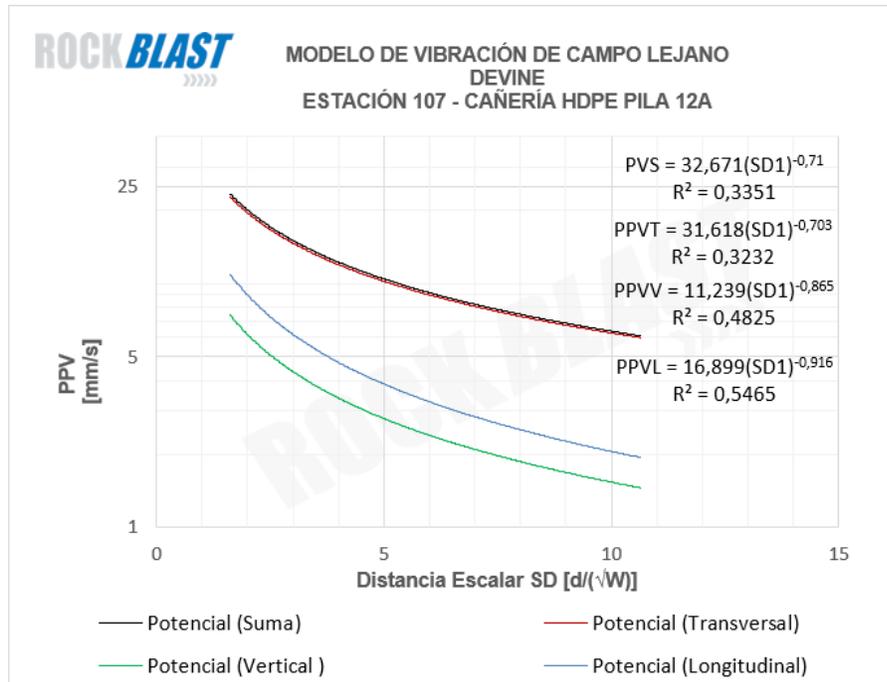


Figura 4.25: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para cañería HDPE - Pila 12A.

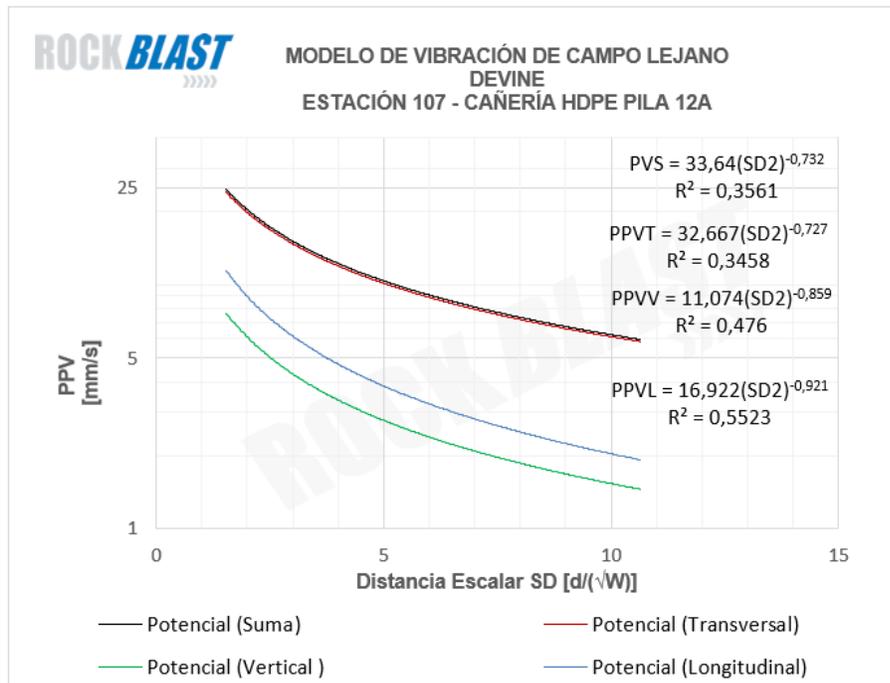


Figura 4.26: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para cañería HDPE - Pila 12A.

Modelos de vibración - Categorías A,B y X		Constantes del modelo							
		Vector suma		Transversal		Vertical		Longitudinal	
Ubicación	Modelo - Enfoque	K	n	K	n	K	n	K	n
Silo 1	Tradicional	17,34	-1,20	11,53	-1,24	15,73	-1,25	10,30	-1,11
	Equivalencia al ANFO	17,50	-1,20	11,83	-1,25	15,90	-1,26	10,34	-1,11
Silo 2	Tradicional	13,43	-1,03	8,56	-1,08	11,00	-1,04	9,69	-1,03
	Equivalencia al ANFO	13,47	-1,03	8,54	-1,08	10,99	-1,04	9,69	-1,03
Pila 12A	Tradicional	14,71	-0,83	7,84	-0,66	10,21	-0,89	13,68	-0,94
	Equivalencia al ANFO	14,72	-0,83	7,89	-0,67	10,13	-0,89	13,58	-0,94
Pila 4	Tradicional	11,26	-0,68	8,54	-0,70	7,36	-0,61	7,53	-0,63
	Equivalencia al ANFO	11,41	-0,68	8,54	-0,69	7,46	-0,62	7,74	-0,64
Correa CV-05 Cepa 1	Tradicional	22,39	-1,33	9,53	-1,09	10,96	-1,12	13,77	-1,14
	Equivalencia al ANFO	23,35	-1,31	14,48	-1,31	15,05	-1,27	19,96	-1,33
Correa CV-07 Cepa 4	Tradicional	52,14	-1,54	27,47	-1,38	23,67	-1,42	48,65	-1,60
	Equivalencia al ANFO	57,56	-1,56	30,18	-1,40	25,88	-1,43	53,92	-1,62
Harneros Fundación 2	Tradicional	16,13	-1,21	7,07	-0,97	10,70	-1,21	11,10	-1,12
	Equivalencia al ANFO	17,74	-1,23	8,86	-1,05	16,46	-1,43	15,85	-1,31
Pila 12A Cañería HDPE	Tradicional	32,67	-0,71	31,62	-0,70	11,24	-0,87	16,90	-0,92
	Equivalencia al ANFO	33,64	-0,73	32,67	-0,73	11,07	-0,86	16,92	-0,92
Pila 4 Cañería HDPE	Tradicional	32,69	-0,70	29,23	-0,70	16,70	-0,70	17,55	-0,65
	Equivalencia al ANFO	33,44	-0,71	29,45	-0,70	17,37	-0,72	18,02	-0,66

R ²	< 50%	50 - 60 %	60 - 70%	70 - 80%	> 80%
Color de celda					

Tabla 4.17: Tabla resumen de constantes para modelos de vibración - Categorías A, B y X

4.4.2. Ley escalar por estación para datos categoría A y B

Se presentan los modelos de vibración de enfoque tradicional y de equivalencia al ANFO, considerando los datos asociados a tronadura de alta confiabilidad, es decir, categorías A y B. Los gráficos con los datos, tendencias y modelos para cada ubicación se pueden encontrar en el Anexo 7.2.2.

4.4.2.1. Ubicación: Silo 1

En el Silo 1 realizó un monitoreo continuo de vibraciones durante un periodo de 276 días. El modelo tradicional para el vector suma entregó constantes $K = 14,776$ y $n = -1,115$, con un $R^2 = 0,64$, el cual se considera un modelo relativamente bueno de acuerdo a los modelos de campo lejano encontrados en la literatura [22]. Por su parte, el modelo de equivalencia al ANFO para el vector suma entregó constantes $K = 14,919$ y $n = -1,12$, con un $R^2 = 0,65$. A partir de estos valores, se puede inferir que no existen diferencias importantes entre un enfoque y otro.

Las Figuras 4.29 y 4.30 se grafican los modelos de vibración para el Silo 1 considerando solo los datos categoría A y B. La Tabla 4.18 muestra los valores de los modelos.

Silo 1	Explosivo (kg) - SD1			Explosivo Equivalente (kg) - SD2		
PPV (mm/s)	K	n	R2	K	n	R2
PPV Suma	14,776	-1,115	0,643	14,919	-1,120	0,648
PPV Transversal	10,375	-1,186	0,655	10,673	-1,201	0,672
PPV Vertical	13,813	-1,179	0,645	13,970	-1,184	0,651
PPV Longitudinal	9,072	-1,044	0,653	9,155	-1,048	0,658

Tabla 4.18: Constantes de los modelos de vibración para el Silo 1.

En los gráficos en el Anexo 7.2.2.1 muestran los datos asociados, la tendencia y ecuaciones para ambos enfoques para la obtención de los modelos de vibración. En azul se muestran los datos asociados al enfoque tradicional y en rojo aquellos de equivalencia al ANFO (Exp: explosivo; EQ: equivalente al ANFO).

4.4.2.2. Ubicación: Silo 2

El Silo 2 fue monitoreado, al igual que el Silo 1, por un periodo de 276 días. El modelo tradicional para el vector suma entregó constantes $K = 12,806$ y $n = -1,007$, con un $R^2 = 0,45$, lo que indica una mala correlación entre la distancia escalada y el PPV. Por su parte, el modelo de equivalencia al ANFO para el vector suma entregó constantes $K = 13,063$ y $n = -1,017$, con un $R^2 = 0,46$. Como se ve en las Figuras 4.31, 4.32 y Tabla 4.19, tampoco existen diferencias importantes entre un enfoque y otro.

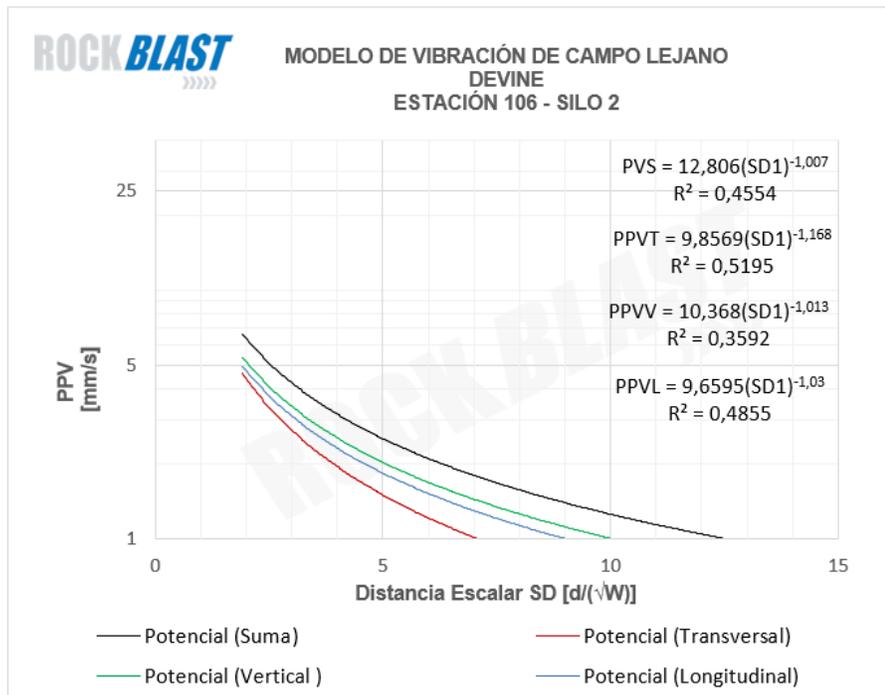


Figura 4.31: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para el Silo 2.

Pila 12A	Explosivo (kg) - SD1			Explosivo Equivalente (kg) - SD2		
	K	n	R2	K	n	R2
PPV Suma	13,877	-0,794	0,511	13,875	-0,797	0,518
PPV Transversal	7,582	-0,651	0,366	7,644	-0,659	0,377
PPV Vertical	10,253	-0,903	0,487	10,154	-0,900	0,487
PPV Longitudinal	12,739	-0,901	0,544	12,664	-0,901	0,547

Tabla 4.20: Constantes de los modelos de vibración para la Pila 12A.

Los gráficos se encuentran en el Anexo 7.2.2.3.

4.4.2.4. Ubicación: Pila 4

De igual manera, se realizó un monitoreo continuo del terreno y cañería HDPE en las cercanías de la Pila 4. El monitoreo se mantuvo por un periodo de 418 días, es decir, la totalidad del periodo de estudio. El modelo tradicional para el vector suma entregó constantes $K = 11,252$ y $n = -0,703$, con un $R^2 = 0,37$, lo que indica una bajísima correlación entre la distancia escalada y el PPV. Por su parte, el modelo de equivalencia al ANFO para el vector suma entregó constantes $K = 11,451$ y $n = -0,712$, con un $R^2 = 0,37$. No se notan diferencias importantes entre un enfoque y otro. Debido a su baja correlación, este modelo fue descartado de las simulaciones posteriores y no se realizó ningún tipo de validación sobre él.

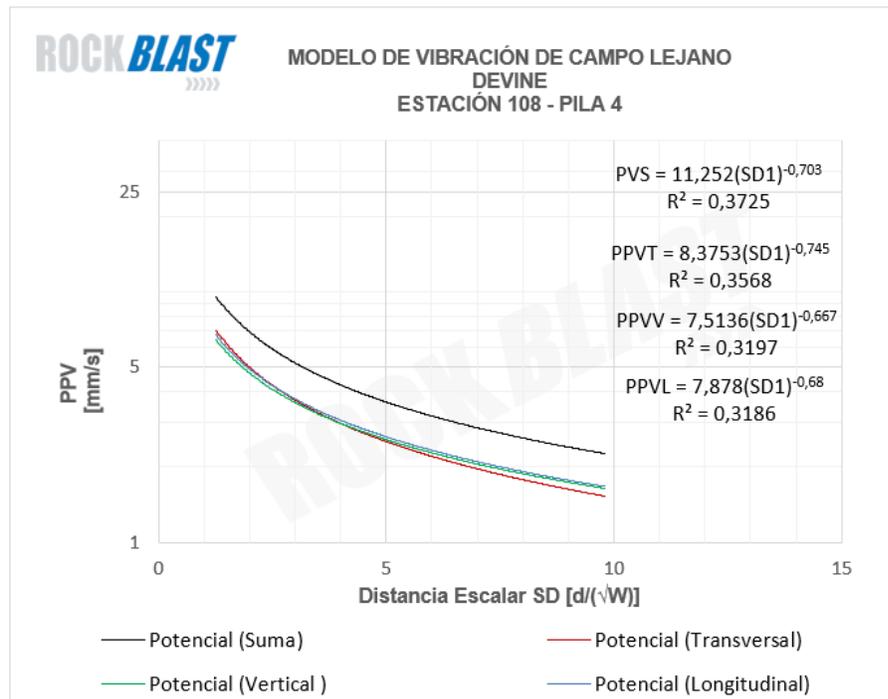


Figura 4.35: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para la Pila 4.

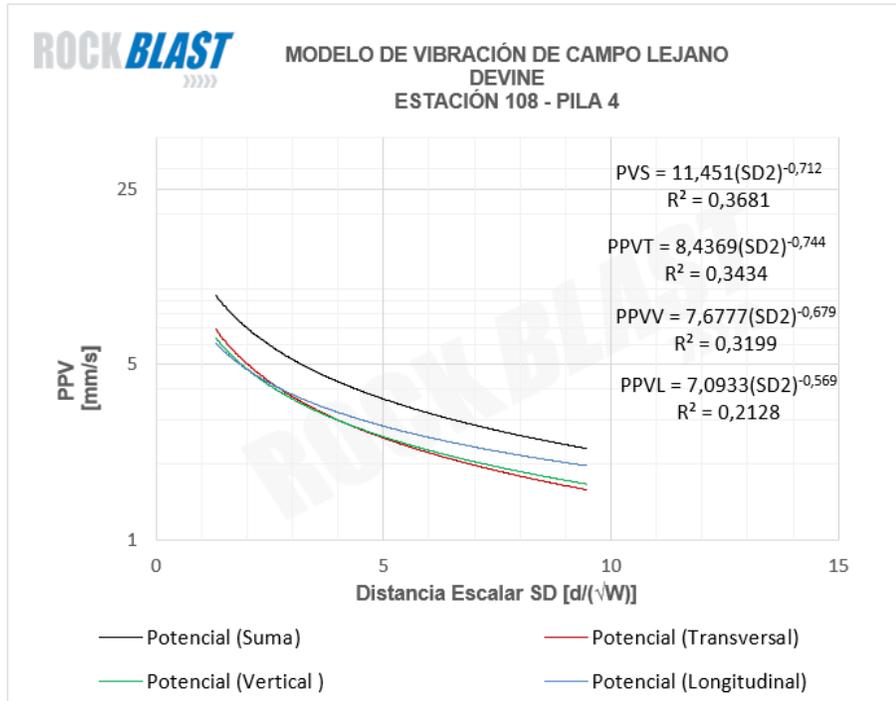


Figura 4.36: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para la Pila 4.

Pila 4	Explosivo (kg) - SD1			Explosivo Equivalente (kg) - SD2		
	K	n	R2	K	n	R2
PPV Suma	11,252	-0,703	0,373	11,451	-0,712	0,368
PPV Transversal	8,375	-0,745	0,357	8,437	-0,744	0,343
PPV Vertical	7,514	-0,667	0,320	7,678	-0,679	0,320
PPV Longitudinal	7,878	-0,680	0,319	7,093	-0,569	0,213

Tabla 4.21: Constantes de los modelos de vibración para la Pila 4.

Los gráficos para cada componente y evento se encuentran en el Anexo 7.2.2.4.

4.4.2.5. Ubicación: Correa CV-05 - Cepa 1

El 13 de abril de 2015 la estación 105 fue reubicada en la Cepa 1 correa CV-05 debido a a sensibilidad de esta estructura a vibraciones, se realizó un monitoreo continuo por 141 días. El modelo tradicional para el vector suma entregó constantes $K = 19,923$ y $n = -1,262$, con un $R^2 = 0,62$, lo que indica una relativamente buena correlación entre la distancia escalada y el PPV [22]. Por su parte, el modelo de equivalencia al ANFO para el vector suma entregó constantes $K = 20,687$ y $n = -1,235$, con un $R^2 = 0,62$. Tampoco existen diferencias importantes entre un enfoque y otro.

En las Figuras 4.37 y 4.38 se muestran los modelos de vibración obtenidos. Además, en la Tabla 4.22 se indican las constantes y el coeficiente de determinación de Pearson para estos modelos.

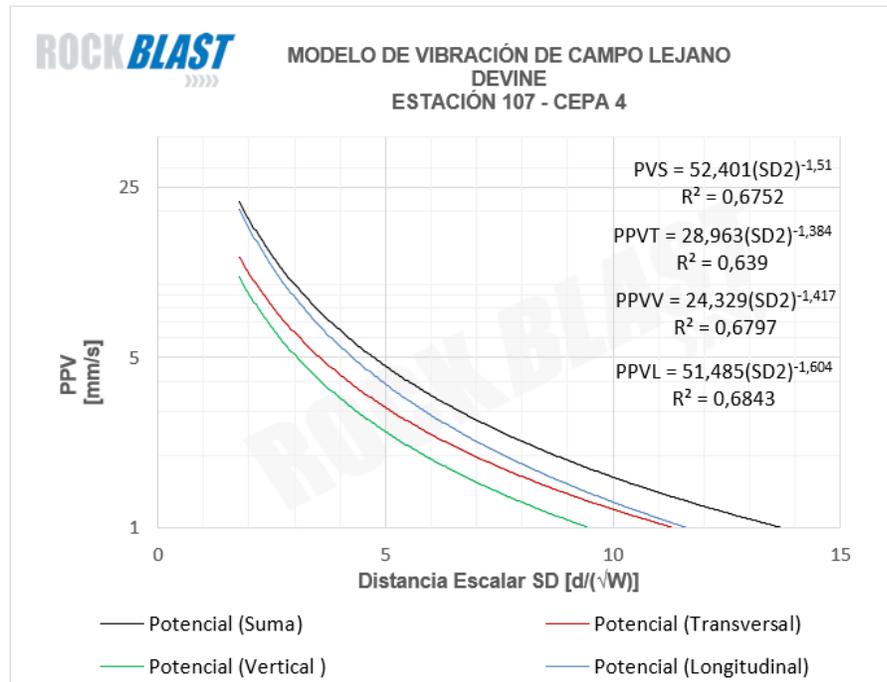


Figura 4.40: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para la Cepa 4.

Cepa 4	Explosivo (kg) - SD1			Explosivo Equivalente (kg) - SD2		
	K	n	R2	K	n	R2
PPV Suma	47,794	-1,499	0,678	52,401	-1,510	0,675
PPV Transversal	26,516	-1,371	0,639	28,963	-1,384	0,639
PPV Vertical	22,539	-1,408	0,684	24,329	-1,417	0,680
PPV Longitudinal	46,706	-1,593	0,688	51,485	-1,604	0,684

Tabla 4.23: Constantes de los modelos de vibración para la Cepa 4.

Los gráficos están disponibles en el Anexo 7.2.2.6.

4.4.2.7. Ubicación: Harneros - Fundación 2

El 13 de abril de 2015, la estación 106 fue reubicada en la fundación 2 de los harneros de la planta N°1, este monitoreo duró 141 días. El modelo tradicional para el vector suma entregó constantes $K = 13,684$ y $n = -1,118$, con un $R^2 = 0,61$, lo que indica una correlación moderada entre la distancia escalada y el PPV [22]. Por su parte, el modelo de equivalencia al ANFO para el vector suma entregó constantes $K = 14,899$ y $n = -1,135$, con un $R^2 = 0,61$. Se observa la misma tendencia entre ambos enfoques.

En las Figuras 4.41 y 4.42 están graficados los modelos para la fundación de los harneros. La Tabla 4.24 resumen estos modelos.

Fundación 2	Explosivo (kg) - SD1			Explosivo Equivalente (kg) - SD2		
	K	n	R2	K	n	R2
PPV Suma	13,684	-1,118	0,606	14,899	-1,135	0,607
PPV Transversal	7,503	-0,994	0,545	8,702	-1,007	0,544
PPV Vertical	12,264	-1,314	0,679	13,493	-1,330	0,677
PPV Longitudinal	11,824	-1,172	0,564	12,936	-1,190	0,565

Tabla 4.24: Constantes de los modelos de vibración para la Fundación 2.

Los gráficos se encuentran en el Anexo 7.2.2.7.

4.4.2.8. Cañerías HDPE

En las Figuras 4.43, 4.44, 4.45 y 4.46 se muestran modelos para las cañerías HDPE con el objetivo de identificar si es posible utilizarlos para estimar las vibraciones en las cañerías HDPE. En las Tablas 4.25 y 4.26 se resumen los resultados de estos modelos.

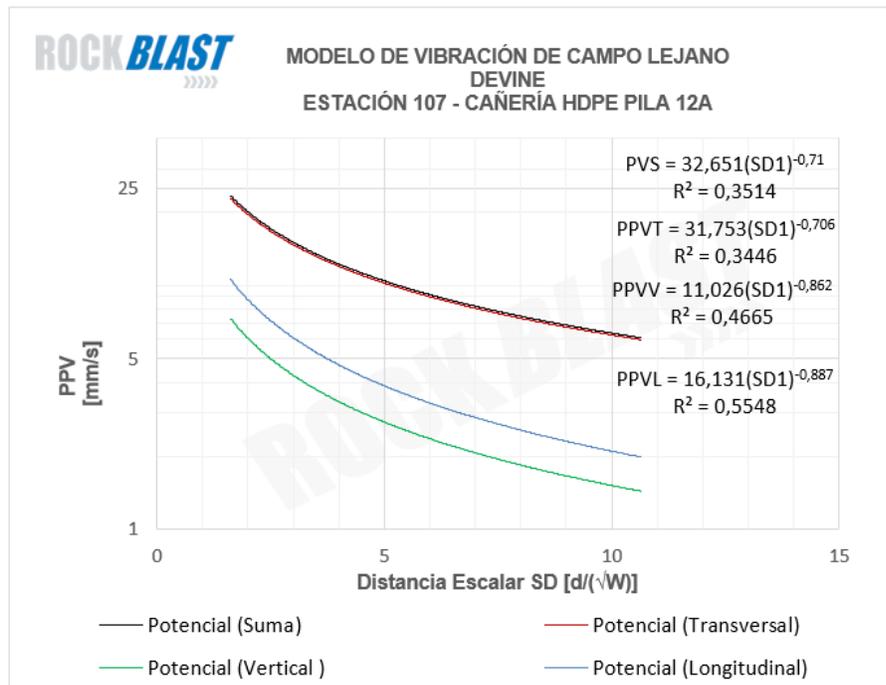


Figura 4.43: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para cañería HDPE - Pila 12A.

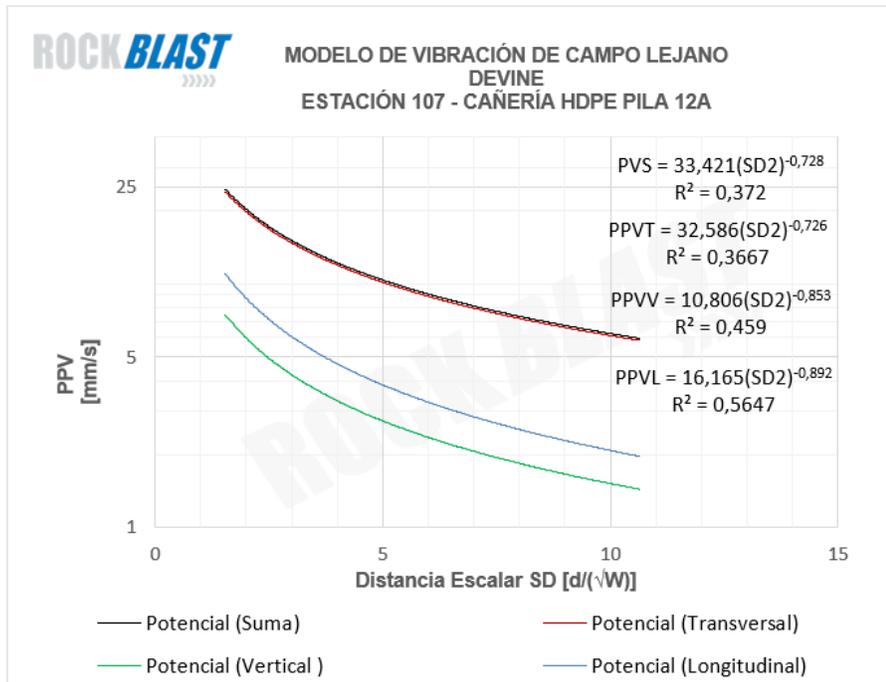


Figura 4.44: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para cañería HDPE - Pila 12A.

Cañería HDPE Pila 12A	Explosivo (kg) - SD1			Explosivo Equivalente (kg) - SD2		
	K	n	R2	K	n	R2
PPV (mm/s)						
PPV Suma	32,651	-0,710	0,351	33,421	-0,728	0,372
PPV Transversal	31,753	-0,706	0,345	32,586	-0,726	0,367
PPV Vertical	11,023	-0,862	0,467	10,806	-0,853	0,459
PPV Longitudinal	16,131	-0,887	0,555	16,165	-0,892	0,565

Tabla 4.25: Constantes de los modelos de vibración para cañería HDPE - Pila 12A.

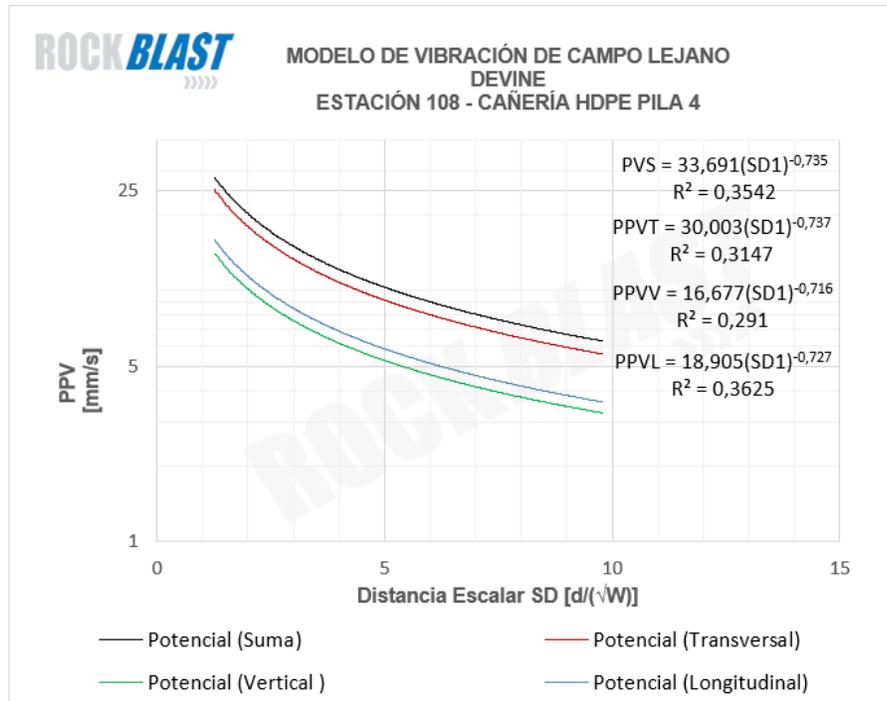


Figura 4.45: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD1 para cañería HDPE - Pila 4.

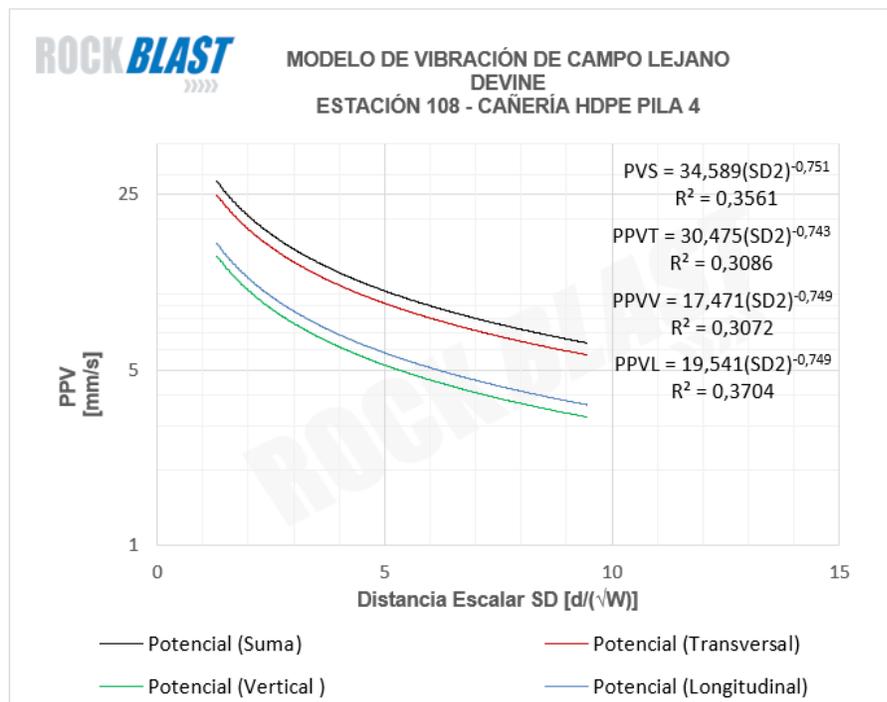


Figura 4.46: Modelos de vibración usando la Ley escalar con SD2 para cañería HDPE - Pila 4.

Cañería HDPE Pila 4	Explosivo (kg) - SD1			Explosivo Equivalente (kg) - SD2		
	K	n	R2	K	n	R2
PPV (mm/s)						
PPV Suma	33,691	-0,735	0,354	34,589	-0,751	0,356
PPV Transversal	30,003	-0,737	0,315	30,475	-0,743	0,309
PPV Vertical	16,677	-0,716	0,291	17,471	-0,749	0,307
PPV Longitudinal	18,905	-0,727	0,363	19,541	-0,749	0,370

Tabla 4.26: Constantes de los modelos de vibración para cañería HDPE - Pila 4.

4.4.2.9. Resumen de la sección

La Tabla 4.27 resume los resultados de las constantes obtenidas para cada uno de los modelos mostrados anteriormente. La correlación entre el PPV y la distancia escalada, SD1 o SD2 según corresponda, es mostrada en una escala de colores.

Modelos de vibración - Categorías A y B		Constantes del modelo							
Ubicación	Modelo - Enfoque	Vector suma		Transversal		Vertical		Longitudinal	
		K	n	K	n	K	n	K	n
Silo 1	Tradicional	14,78	-1,12	10,38	-1,19	13,81	-1,18	9,07	-1,04
	Equivalencia al ANFO	14,92	-1,12	10,67	-1,20	13,97	-1,18	9,15	-1,05
Silo 2	Tradicional	12,81	-1,01	9,86	-1,17	10,37	-1,01	9,66	-1,03
	Equivalencia al ANFO	13,60	-1,02	10,01	-1,18	10,59	-1,02	9,84	-1,04
Pila 12A	Tradicional	13,88	-0,79	7,59	-0,65	10,25	-0,90	12,74	-0,90
	Equivalencia al ANFO	13,88	-0,80	7,64	-0,66	10,15	-0,90	12,67	-0,90
Pila 4	Tradicional	11,25	-0,70	8,38	-0,75	7,51	-0,67	7,88	-0,68
	Equivalencia al ANFO	11,45	-0,71	8,44	-0,74	7,68	-0,68	8,13	-0,70
Correa CV-05 Cepa 1	Tradicional	19,92	-1,26	11,87	-1,24	13,00	-1,23	16,81	-1,27
	Equivalencia al ANFO	20,69	-1,24	12,70	-1,24	13,22	-1,19	17,54	-1,25
Correa CV-07 Cepa 4	Tradicional	47,79	-1,50	26,52	-1,37	22,36	-1,41	46,71	-1,59
	Equivalencia al ANFO	52,40	-1,51	28,96	-1,38	24,33	-1,42	51,49	-1,60
Harneros Fundación 2	Tradicional	13,68	-1,12	7,40	-1,03	11,41	-1,30	10,89	-1,14
	Equivalencia al ANFO	14,90	-1,14	8,07	-1,01	13,49	-1,33	12,94	-1,19
Pila 12A	Tradicional	32,65	-0,71	31,75	-0,71	11,02	-0,86	16,13	-0,89
Cañería HDPE	Equivalencia al ANFO	33,42	-0,73	32,59	-0,73	10,81	-0,85	16,17	-0,89
Pila 4 Cañería HDPE	Tradicional	33,69	-0,74	30,00	-0,74	16,68	-0,72	18,91	-0,73
	Equivalencia al ANFO	34,59	-0,75	30,48	-0,74	17,47	-0,75	19,54	-0,75

R ²	< 50 %	50 - 60 %	60 - 70 %	70 - 80 %	> 80 %
Color de celda					

Tabla 4.27: Tabla resumen de constantes para modelos de vibración - Categorías A y B

Debido a que los resultados de estas categorías presentan menor cantidad de datos, perdiendo robustez y con menor correlación con los modelos, es que se decidió no utilizarlos en el resto del estudio, quedando solo los modelos construidos a partir de todos los datos asociados.

4.5. Elaboración de los modelos de vibración - Modelo de Yang

Para comenzar esta sección es necesario mencionar aquellos requerimientos y alcances iniciales del modelo de Yang. Para calibrar adecuadamente el modelo es necesario llevar a cabo un estudio de campo cercano en el sitio en donde se planea obtener el modelo, ya que algunas constantes que definen la ventana de tiempo de pozos que contribuyen al PPV, T_0 , el efecto de la distancia sobre la longitud de onda de la vibración, constante de calidad Q_d , y

la velocidad de propagación, V_p , en el macizo rocoso, tienen una incidencia importante sobre los resultados. Una de sus limitantes más fuertes de este modelo es la forma en que se define el apantallamiento (del inglés *Screening*: atenuación de las vibraciones que realiza el material previamente tronado por donde circula la onda).

Lamentablemente durante este proyecto no fue posible desarrollar un estudio de campo cercano en el sitio de estudio, sin embargo se intentó aproximar por medio de un estudio desarrollado en un yacimiento de condiciones similares de la misma empresa en el norte del país, esperando que las demás variables del modelo absorbieran las posibles desviaciones al momento de su calibración.

En dicho estudio fue posible establecer los parámetros más importantes del modelo, los cuales se extrapolaron a este proyecto en pos de simular las vibraciones medidas durante el periodo del 1 de Septiembre de 2015 al 30 de Septiembre de 2015.

4.5.1. Antecedentes del estudio de campo cercano

A partir del análisis de una serie de pulsos en la componente vertical, provocados por la detonación de pozos singulares de tronadura en una fila, fue posible obtener la primera de las constantes requeridas utilizando la metodología planteada por Yang en su artículo. Ésta plantea que a partir de la duración de los pulsos de cada pozo, y conociendo su distancia al monitor, es posible determinar como se amplifica la onda con la distancia, y de esta manera determinar Q_d y T_0 , en donde el primero se refiere al factor generalizado de calidad del macizo rocoso propuesto por Gladwin en 1974 [15], y el segundo es la ventana de tiempo inicial considerada para que los pozos detonados se acoplen o contribuyan al PPV final del modelo.

En la Figura 4.47 se muestran las formas de onda de los pozos detonados en la prueba de campo cercano realizada.

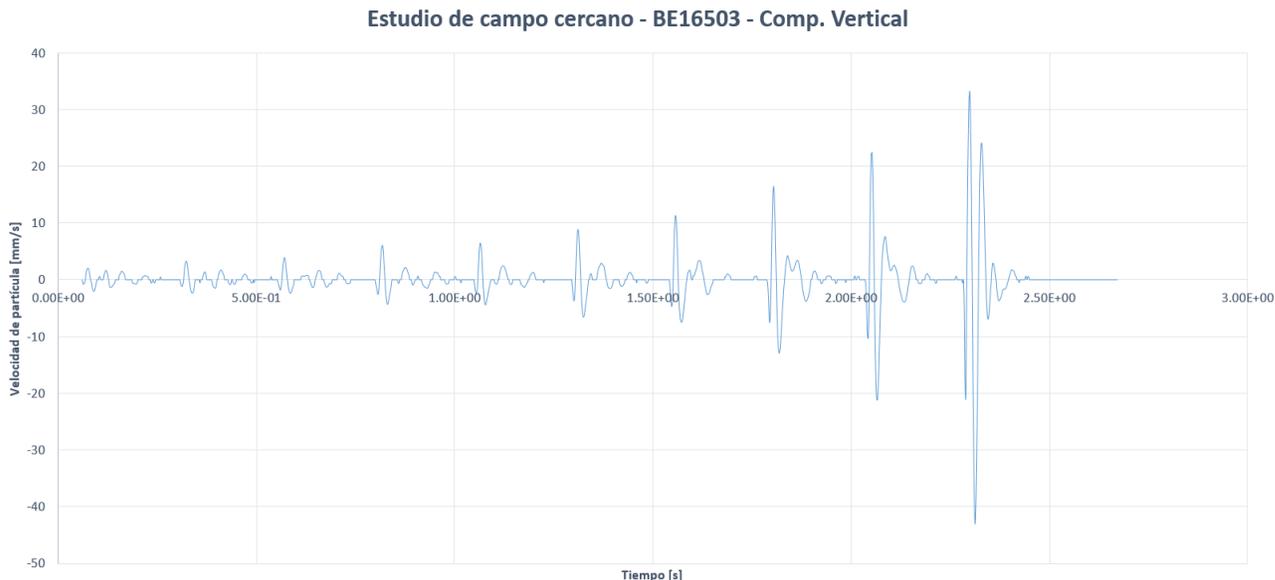


Figura 4.47: Pulsos de pozos singulares - Velocidad vertical - Estudio campo cercano

En el gráfico 4.48 se muestra la regresión lineal realizada para encontrar los valores Q_d y T_0 buscadas.

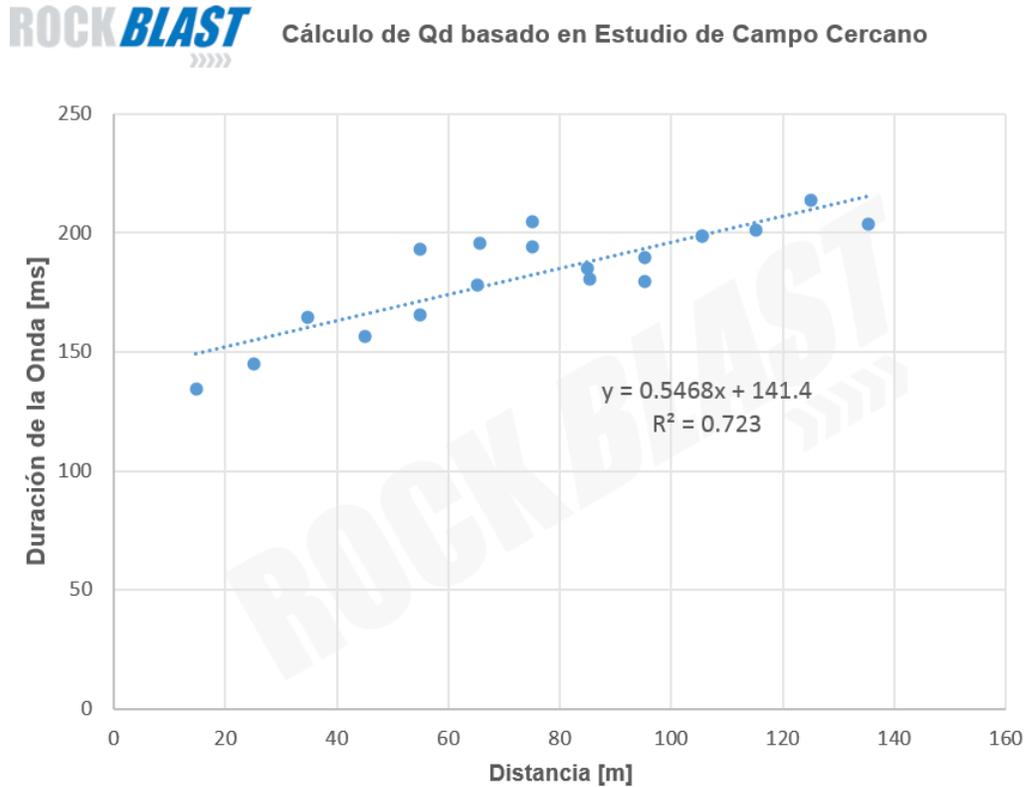


Figura 4.48: Obtención de la pendiente, $K = 1/(Q_d * V_p)$, y T_0 , es el coeficiente en el origen de la regresión - Estudio campo cercano

A partir de la regresión lineal de la figura anterior, que representa la Ecuación 4.5, con $V_p = 2,674$ m/ms (Velocidad de la onda P), obtenida a partir del estudio de campo cercano, es posible obtener Q_d y T_0 .

$$\begin{aligned}
 T &= 0,5468 * (D) + 141,4 \\
 0,5468 &= \frac{1}{Q_d * V_p} \\
 0,5468 &= \frac{1}{Q_d * 2,674} & (4.5) \\
 Q_d &= 0,6838 \\
 T_0 &= 141,4ms
 \end{aligned}$$

Finalmente, se calibra el modelo a los datos históricos medidos mediante la minimización del error absoluto promedio entre velocidades simuladas y medidas. En la Figura 4.49 se muestra el resultado de este proceso, el cual entrega un valor de $\mu = 2$.

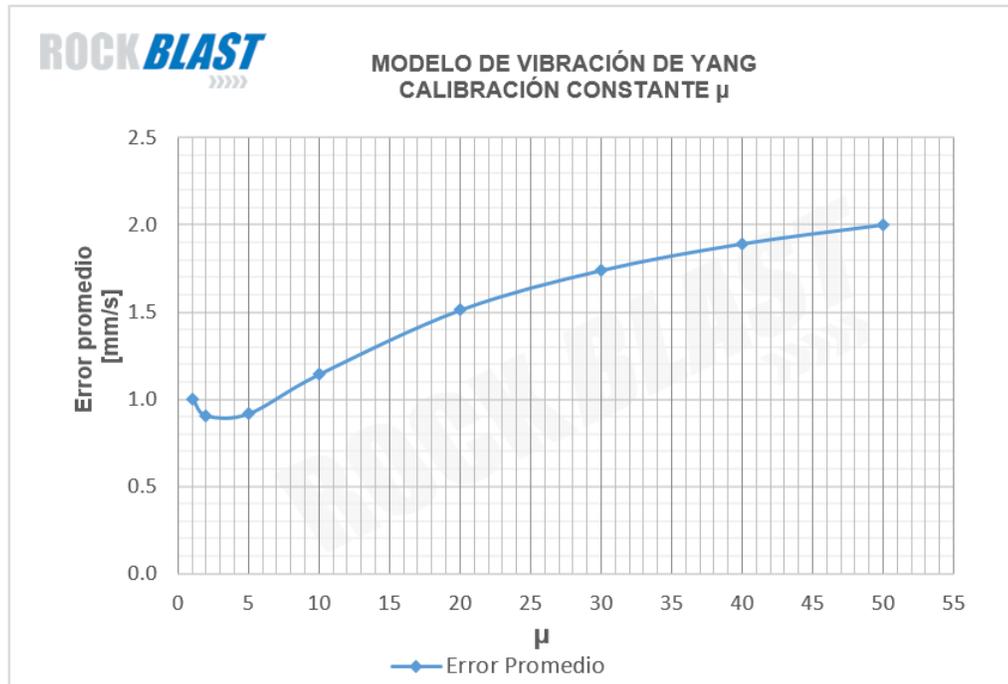


Figura 4.49: Obtención de μ - Estudio campo cercano

A partir de los parámetros anteriormente calculados, es posible comenzar a estimar utilizando la ley escalar obtenida para cada una de las ubicaciones en donde el modelo resultó relativamente confiable.

4.5.2. Parámetros finales para el modelamiento

En la Tabla 4.28 se detallan los parámetros finales usados en todas las simulaciones realizadas. Los parámetros V_p , Q_d , μ y T_0 ya fueron abordados en la sección anterior, mientras que $\lambda = 1$ y $\delta = 6$ se pueden encontrar en el marco teórico sección 2.2.3.2 [5][39].

Debido a las reservas que se tienen sobre la metodología de apantallamiento, es que se ha decidido omitir su efecto sobre los resultados, por tanto se ha escogido un valor de $\lambda = 1$, dejando nulo el factor de atenuación debido a este efecto.

V_p [m/s]	Q_d	μ	λ	T_0 [ms]	δ [m]
2674	0.684	2	1	141	6

Tabla 4.28: Parámetros finales para la simulación de vibraciones - Modelo de Yang

4.5.3. Ley escalar

Las constantes de la ley escalar utilizadas en las simulaciones realizadas con el modelo de Yang corresponden a aquellas obtenidas mediante el modelo de Devine, y cuya correlación promedio en la ubicación evaluada es mayor a 60 %. Es decir, se utilizaron la leyes escalares para las ubicaciones: Silo 1, correa CV-05 cepa 1, correa CV-07 cepa 4 y harneros fundación 2.

4.5.4. Elaboración de los modelos de vibración - Modelo probabilístico de Blair

El modelo de Blair [5] fue programado y se hizo uso de él en varias ocasiones. Lamentablemente su tiempo de procesamiento tomaba días en resolver para el PPV, debido a la gran cantidad de iteraciones que se debían realizar, proceso que se multiplicaba enormemente al aumentar la cantidad de pozos de tronadura evaluados. En ocasiones, y debido a estos acontecimientos, el modelo no terminaba de resolver para una estimación debido a problemas de compatibilidad de Windows y memoria interna insuficiente de los servidores. Es por esta razón que no se lograron calibrar los parámetros del modelo, ni realizar las estimaciones requeridas para un análisis de resultados. Finalmente se terminó por descartar su uso y proponerlo como desafío futuro de estudio.

4.6. Estimación de vibraciones por tronadura

El objetivo de elaborar y verificar los modelos de vibración por tronadura es que se proceda a hacer uso de estos modelos para re-diseñar tronaduras que al ser evaluadas en los modelos entreguen resultados sobre los umbrales de daño permisibles.

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos de las estimaciones de vibración por tronaduras usando tanto el modelo de Devine como el de Yang. Para esto se utilizaron 11 tronaduras ejecutadas durante el mes de septiembre de 2015 y cuyas vibraciones fueron medidas en la Cepa 1, Cepa 4 y fundación 2. En base a estas mediciones se evaluará la exactitud de los resultados obtenidos.

4.6.1. Tronaduras estimadas por los modelos de vibración

A continuación se muestran las tronaduras estimadas por los modelos de vibración y sus características. Éstas se desarrollaron durante el mes de septiembre de 2015 y corresponden a tronaduras de producción. La Tabla 4.29 contiene la información general y técnica básica de las tronaduras estimadas.

La distribución de carga explosiva por pozo y sus tiempos de salida fueron estandarizados para todas las tronaduras. La carga de cada pozo contiene la carga total tronada en la malla dividida por cada pozo.

Fecha	03-09-2015	07-09-2015	08-09-2015	10-09-2015	13-09-2015	14-09-2015
Fase	14	14	14	14	14	14
Banco	2450	2450	2450	2450	2435	2435
Polígono	19	28	23	22	6	7
Total de explosivo [kg]	43.465	23.282	26.529	19.019	26.060	19.080
Roca tronada [kTon]	171,1	66,2	108,3	127,8	373,6	231,6
Retardo entre pozos [ms]	3	3	3	3	3	3
Retardo entre filas [ms]	7	7	7	7	7	7

Fecha	15-09-2019	26-09-2015	27-09-2015	28-09-2015	30-09-2015
Fase	14	14	14	14	13
Banco	2435	2435	2435	2435	2290
Polígono	4	12	13	15	1
Total de explosivo [kg]	37.685	31.322	19.973	24.168	5.591
Roca tronada [kTon]	464,8	322,2	256,8	290,7	52,6
Retardo entre pozos [ms]	3	3	3	3	3
Retardo entre filas [ms]	7	7	7	7	7

Tabla 4.29: Características generales de las tronaduras simuladas

Los diagramas de disparo de cada tronadura se pueden ver en el Anexo 7.3.

4.6.2. Resultados de las estimaciones

El las Tablas 4.30 a la 4.40 se muestran los resultados de las estimaciones realizadas, utilizando el modelo de Devine y Yang, para todas las ubicaciones en donde alguna vez se realizaron mediciones, a excepción de la pila 4, en donde se observa una gran dispersión de los datos, no siendo posible estimarlos a través de modelos.

4.6.2.1. Tronadura 1: 3 de septiembre de 2015

Tronadura 1	Devine - PPV [mm/s]				Yang - PPV [mm/s]			
	Lon	Ver	Tran	Vector suma	Lon	Ver	Tran	Vector suma
SILO 1	3.44	4.63	3.48	5.37	3.2	4.3	3.26	5.01
CEPA 1	2.81	3.1	3.81	5.02	2.58	2.84	3.49	4.53
SILO 2	2.99	4.03	3.08	4.7	2.8	3.76	2.89	4.4
FUNDACION 2	2.57	3.01	3.43	4.52	2.42	2.8	3.21	4.22
PILA 12A	2.77	3.73	2.87	4.36	2.38	3.2	2.51	3.77
CEPA 4	6.51	5.38	9.15	10.44	6.01	4.96	8.35	9.56

Tabla 4.30: Simulaciones de la tronadura 1 - 3 de septiembre de 2015

4.6.2.2. Tronadura 2: 7 de septiembre de 2015

Tronadura 2	Devine - PPV [mm/s]				Yang - PPV [mm/s]			
	Lon	Ver	Tran	Vector suma	Lon	Ver	Tran	Vector suma
SILO 1	2.2	2.94	2.33	3.48	2.07	2.77	2.21	3.28
CEPA 1	1.85	2.01	2.46	3.02	1.72	1.87	2.28	2.77
SILO 2	2.8	3.76	2.89	4.4	1.81	2.43	1.96	2.89
FUNDACION 2	2.42	2.8	3.21	4.22	1.71	1.8	2.14	2.71
PILA 12A	2.38	3.2	2.51	3.77	1.66	2.22	1.82	2.66
CEPA 4	6.01	4.96	8.35	9.56	3.68	2.99	4.72	5.52

Tabla 4.31: Simulaciones de la tronadura 2 - 7 de septiembre de 2015

4.6.2.3. Tronadura 3: 8 de septiembre de 2015

Tronadura 3	Devine - PPV [mm/s]				Yang - PPV [mm/s]			
	Lon	Ver	Tran	Vector suma	Lon	Ver	Tran	Vector suma
SILO 1	1.92	2.57	2.06	3.05	1.69	2.25	1.84	2.7
CEPA 1	1.71	1.85	2.26	2.73	1.61	1.75	2.13	2.55
SILO 2	1.71	2.29	1.86	2.73	1.51	2.02	1.67	2.43
FUNDACION 2	1.63	1.71	2.03	2.56	1.55	1.6	1.92	2.41
PILA 12A	2.73	3.67	2.83	4.3	1.93	2.58	2.08	3.07
CEPA 4	3.42	2.78	4.34	5.09	2.97	2.4	3.69	4.35

Tabla 4.32: Simulaciones de la tronadura 3 - 8 de septiembre de 2015

4.6.2.4. Tronadura 4: 10 de septiembre de 2015

Tronadura 4	Devine - PPV [mm/s]				Yang - PPV [mm/s]			
	Lon	Ver	Tran	Vector suma	Lon	Ver	Tran	Vector suma
SILO 1	1.24	1.65	1.39	2	1.15	1.53	1.3	1.85
CEPA 1	1.2	1.29	1.56	1.78	1.13	1.21	1.47	1.65
SILO 2	1.13	1.5	1.28	1.82	1.05	1.39	1.2	1.7
FUNDACION 2	1.18	1.13	1.39	1.71	1.11	1.06	1.3	1.59
PILA 12A	2.67	3.58	2.77	4.2	1.83	2.45	1.98	2.92
CEPA 4	2.14	1.71	2.51	3.01	1.97	1.57	2.28	2.74

Tabla 4.33: Simulaciones de la tronadura 4 - 10 de septiembre de 2015

4.6.2.5. Tronadura 5: 13 de septiembre de 2015

Tronadura 5	Devine - PPV [mm/s]				Yang - PPV [mm/s]			
	Lon	Ver	Tran	Vector suma	Lon	Ver	Tran	Vector suma
SILO 1	2.41	3.24	2.54	3.81	2.28	3.05	2.41	3.61
CEPA 1	2.31	2.53	3.1	3.95	2.2	2.41	2.95	3.73
SILO 2	4.21	3.43	5.52	6.41	3.97	3.23	5.15	6.01
FUNDACION 2	2.07	2.29	2.67	3.45	1.98	2.18	2.54	3.28
PILA 12A	1.63	2.18	1.78	2.61	1.18	1.57	1.35	1.91
CEPA 4	4.56	3.73	6.06	7.02	4.3	3.51	5.66	6.57

Tabla 4.34: Simulaciones de la tronadura 5 - 13 de septiembre de 2015

4.6.2.6. Tronadura 6: 14 de septiembre de 2015

Tronadura 6	Devine - PPV [mm/s]				Yang - PPV [mm/s]			
	Lon	Ver	Tran	Vector suma	Lon	Ver	Tran	Vector suma
SILO 1	2.06	2.77	2.21	3.28	1.98	2.65	2.12	3.15
CEPA 1	1.93	2.11	2.57	3.18	1.81	1.97	2.4	2.93
SILO 2	3.5	2.84	4.46	5.22	3.32	2.69	4.19	4.92
FUNDACION 2	1.79	1.92	2.26	2.89	1.71	1.8	2.14	2.71
PILA 12A	1.45	1.93	1.61	2.33	1.2	1.6	1.36	1.94
CEPA 4	3.78	3.07	4.87	5.69	3.56	2.89	4.55	5.33

Tabla 4.35: Simulaciones de la tronadura 6 - 14 de septiembre de 2015

4.6.2.7. Tronadura 7: 15 de septiembre de 2015

Tronadura 7	Devine - PPV [mm/s]				Yang - PPV [mm/s]			
	Lon	Ver	Tran	Vector suma	Lon	Ver	Tran	Vector suma
SILO 1	2.09	2.81	2.23	3.32	1.89	2.52	2.03	3
CEPA 1	1.96	2.14	2.61	3.24	1.9	2.07	2.53	3.12
SILO 2	1.9	2.54	2.05	3.02	1.72	2.3	1.87	2.74
FUNDACION 2	1.8	1.93	2.28	2.9	1.67	1.75	2.08	2.63
PILA 12A	3.05	4.1	3.13	4.79	2.08	2.78	2.22	3.3
CEPA 4	3.87	3.15	5	5.84	3.45	2.8	4.38	5.14

Tabla 4.36: Simulaciones de la tronadura 7 - 15 de septiembre de 2015

4.6.2.8. Tronadura 8: 26 de septiembre de 2015

Tronadura 8	Devine - PPV [mm/s]				Yang - PPV [mm/s]			
	Lon	Ver	Tran	Vector suma	Lon	Ver	Tran	Vector suma
SILO 1	3.06	4.12	3.14	4.81	2.43	3.26	2.55	3.83
CEPA 1	2.49	2.74	3.36	4.34	2.11	2.31	2.82	3.55
SILO 2	2.65	3.56	2.76	4.18	2.14	2.87	2.28	3.39
FUNDACION 2	2.32	2.66	3.06	4	1.98	2.18	2.54	3.27
PILA 12A	2.24	3	2.37	3.54	1.55	2.07	1.7	2.48
CEPA 4	5.68	4.68	7.81	8.971	4.47	3.66	5.92	6.87

Tabla 4.37: Simulaciones de la tronadura 8 - 26 de septiembre de 2015

4.6.2.9. Tronadura 9: 27 de septiembre de 2015

Tronadura 9	Devine - PPV [mm/s]				Yang - PPV [mm/s]			
	Lon	Ver	Tran	Vector suma	Lon	Ver	Tran	Vector suma
SILO 1	1.57	2.09	1.72	2.51	1.45	1.93	1.6	2.32
CEPA 1	1.45	1.56	1.9	2.24	1.41	1.52	1.84	2.16
SILO 2	1.41	1.87	1.56	2.26	1.3	1.74	1.46	2.1
FUNDACION 2	1.4	1.41	1.7	2.12	1.37	1.37	1.65	2.05
PILA 12A	2.35	3.15	2.48	3.72	1.68	2.25	1.84	2.69
CEPA 4	2.75	2.22	3.37	3.99	2.6	2.09	3.16	3.75

Tabla 4.38: Simulaciones de la tronadura 9 - 27 de septiembre de 2015

4.6.2.10. Tronadura 10: 28 de septiembre de 2015

Tronadura 10	Devine - PPV [mm/s]				Yang - PPV [mm/s]			
	Lon	Ver	Tran	Vector suma	Lon	Ver	Tran	Vector suma
SILO 1	1.29	1.73	1.45	2.09	1.1	1.47	1.26	1.78
CEPA 1	1.27	1.36	1.65	1.91	1.22	1.3	1.58	1.81
SILO 2	1.19	1.58	1.34	1.92	1.02	1.35	1.17	1.65
FUNDACION 2	1.23	1.2	1.46	1.8	1.08	1.02	1.26	1.54
PILA 12A	3.15	4.24	3.22	4.94	2.69	3.61	2.79	4.23
CEPA 4	2.26	1.81	2.68	3.2	1.89	1.51	2.19	2.63

Tabla 4.39: Simulaciones de la tronadura 10 - 28 de septiembre de 2015

4.6.2.11. Tronadura 11: 30 de septiembre de 2015

Tronadura 11	Devine - PPV [mm/s]				Yang - PPV [mm/s]			
	Lon	Ver	Tran	Vector suma	Lon	Ver	Tran	Vector suma
SILO 1	0.48	0.63	0.6	0.8	0.47	0.61	0.58	0.77
CEPA 1	0.64	0.67	0.8	0.82	0.62	0.65	0.78	0.79
SILO 2	0.75	0.58	0.75	0.93	0.72	0.56	0.72	0.9
FUNDACION 2	0.62	0.51	0.66	0.76	0.6	0.49	0.64	0.73
PILA 12A	0.43	0.56	0.54	0.71	0.39	0.52	0.5	0.66
CEPA 4	0.79	0.62	0.8	1	0.77	0.6	0.76	0.96

Tabla 4.40: Simulaciones de la tronadura 11 - 30 de septiembre de 2015

4.6.3. Comparación entre estimaciones y mediciones

Se comparan los resultados de las estimaciones con las mediciones para el mes de septiembre de 2015. Esto se realizó para las ubicaciones: Correa CV-05 cepa 1, Correa CV-07 cepa 4 y harneros fundación 2. En donde se mantenía vigente el servicio de monitoreo a esa fecha.

4.6.3.1. Mediciones

En las Tablas 4.41 a la 4.43 se detallan los peak de velocidad de partícula medidos, en todas las componentes de la velocidad y el vector suma, para todas las tronaduras simuladas.

Datos medidos - Correa CV-05 Cepa 1					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	3.92	2.89	2.05	3.96
2	07-09-2015	2.57	1.73	1.81	2.77
3	08-09-2015	1.83	1.38	1.14	1.83
4	10-09-2015	1.35	0.94	0.92	1.55
5	13-09-2015	3.75	3.41	3.37	3.99
6	14-09-2015	2.48	1.62	1.17	2.53
7	15-09-2015	1.79	2.19	1.14	2.25
8	26-09-2015	4.14	2.24	2.27	4.31
9	27-09-2015	1.11	0.97	0.84	1.34
10	28-09-2015	1.00	0.71	0.70	1.18
11	30-09-2015	1.08	0.87	0.70	1.10
	Máximo	4.14	3.41	3.37	4.31
	Promedio	2.27	1.72	1.46	2.44

Tabla 4.41: Datos medidos en correa CV-05 Cepa 1 - Septiembre de 2015

Datos medidos - Correa CV-07 Cepa 4					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	8.91	5.11	6.78	9.84
2	07-09-2015	8.38	5.10	5.40	9.40
3	08-09-2015	3.24	2.59	2.81	3.61
4	10-09-2015	1.97	1.40	1.54	2.19
5	13-09-2015	7.43	2.98	4.27	7.66
6	14-09-2015	1.21	0.60	1.49	1.71
7	15-09-2015	3.70	1.90	2.75	3.78
8	26-09-2015	6.52	3.56	4.73	6.88
9	27-09-2015	2.32	2.89	2.75	3.38
10	28-09-2015	1.65	1.24	1.33	1.69
11	30-09-2015	1.62	0.78	1.35	1.67
	Máximo	8.91	5.11	6.78	9.84
	Promedio	4.27	2.56	3.20	4.71

Tabla 4.42: Datos medidos en correa CV-07 Cepa 4 - Septiembre de 2015

Datos medidos - Harneros fundación 2					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	2.97	2.94	2.40	3.29
2	07-09-2015	3.22	1.97	1.75	3.71
3	08-09-2015	1.46	1.49	0.91	1.51
4	10-09-2015	1.43	0.97	0.68	1.55
5	13-09-2015	3.02	2.11	2.02	3.41
6	14-09-2015				
7	15-09-2015	1.38	0.83	1.06	1.41
8	26-09-2015	2.29	1.86	2.46	2.93
9	27-09-2015	0.84	1.05	0.76	1.26
10	28-09-2015	0.83	0.67	0.44	0.86
11	30-09-2015	1.00	0.56	0.73	1.10
	Máximo	3.22	2.94	2.46	3.71
	Promedio	1.84	1.44	1.32	2.10

Tabla 4.43: Datos medidos en harneros fundación 2 - Septiembre de 2015

Se observa que en las tres ubicaciones la componente con mayor PPV es la longitudinal tanto en el máximo mensual como promedio, quedando en segundo lugar la componente vertical y hacia el final la transversal. Esto tendrá incidencia al momento de evaluar los resultados de las simulaciones por componente.

4.6.4. Error absoluto entre simulaciones y mediciones

Se muestra, para cada ubicación, el error absoluto (Ecuación (4.6)) entre los resultados de las simulaciones y las mediciones. Además, se indica el promedio de este error por componente. Se ha escogido el error absoluto debido a que resulta más práctico operacionalmente para el ingeniero de PyT al momento de estimar el PPV, considerar el error absoluto y evaluarlo en los diferentes criterios de daño sobre el terreno o infraestructura.

$$Error_{abs} = |PPV_{estimado} - PPV_{medido}| \quad mm/s \quad (4.6)$$

Para calcular el promedio se promediaron los valores absolutos de los errores obtenidos.

4.6.4.1. Modelo de Devine

La Tabla 4.44 muestra los resultados de las estimaciones para la correa CV-05 cepa 1, se observa un error absoluto promedio de 0,67 mm/s considerando las tres componentes de la velocidad. El menor error se encuentra en la componente vertical, siendo el mayor error en la componente longitudinal.

Error absoluto - Devine - Correa CV-05 Cepa 1					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	-1.11	0.21	1.76	1.06
2	07-09-2015	-0.72	0.28	0.65	0.25
3	08-09-2015	-0.12	0.47	1.12	0.90
4	10-09-2015	-0.15	0.35	0.64	0.23
5	13-09-2015	-1.44	-0.88	-0.27	-0.04
6	14-09-2015	-0.55	0.49	1.40	0.65
7	15-09-2015	0.17	-0.05	1.47	0.99
8	26-09-2015	-1.65	0.50	1.09	0.03
9	27-09-2015	0.34	0.59	1.06	0.90
10	28-09-2015	0.27	0.65	0.95	0.73
11	30-09-2015	-0.44	-0.20	0.10	-0.28
	Promedio	0.63	0.42	0.96	0.55

Tabla 4.44: Error absoluto Cepa 1 - Devine - Septiembre de 2015

En la Tabla 4.45 de la correa CV-07 cepa 4, se tiene un error absoluto promedio de 1,28 mm/s considerando las tres componentes de la velocidad. Al igual que en la Cepa 1, el menor error se encuentra en la componente vertical y el mayor error en la componente longitudinal.

Error absoluto - Devine - Correa CV-07 Cepa 4					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	-2.40	0.27	2.37	0.60
2	07-09-2015	-2.37	-0.14	2.95	0.16
3	08-09-2015	0.18	0.19	1.53	1.48
4	10-09-2015	0.17	0.31	0.97	0.82
5	13-09-2015	-2.87	0.75	1.79	-0.64
6	14-09-2015	2.57	2.47	3.38	3.98
7	15-09-2015	0.17	1.25	2.25	2.06
8	26-09-2015	-0.84	1.12	3.08	2.09
9	27-09-2015	0.43	-0.67	0.62	0.61
10	28-09-2015	0.61	0.57	1.35	1.51
11	30-09-2015	-0.83	-0.16	-0.55	-0.67
	Promedio	1.22	0.72	1.89	1.33

Tabla 4.45: Error absoluto Cepa 4 - Devine - Septiembre de 2015

Para la fundación 2 del harnero, en la Tabla 4.46, el error absoluto promedio es 0,56 mm/s considerando las tres componentes de la velocidad. En este caso, el menor error se encuentra en la componente longitudinal, seguido por la vertical y con mayor error la transversal.

Error absoluto - Devine - Harneros fundación 2					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	-0.40	0.07	1.03	1.23
2	07-09-2015	-0.80	0.83	1.46	0.51
3	08-09-2015	0.17	0.22	1.13	1.05
4	10-09-2015	-0.25	0.16	0.71	0.16
5	13-09-2015	-0.95	0.18	0.65	0.04
6	14-09-2015	1.79	1.92	2.26	2.89
7	15-09-2015	0.42	1.11	1.22	1.49
8	26-09-2015	0.03	0.80	0.60	1.07
9	27-09-2015	0.56	0.36	0.94	0.86
10	28-09-2015	0.41	0.53	1.02	0.94
11	30-09-2015	-0.38	-0.05	-0.07	-0.34
	Promedio	0.56	0.57	1.01	0.96

Tabla 4.46: Error absoluto fundacion 2 - Devine - Septiembre de 2015

4.6.4.2. Modelo de Yang

Las Tablas 4.47, 4.48 y 4.49 se muestran los errores absolutos para las tres ubicaciones estimadas. En general, se obtuvo un menor error absoluto en la componente vertical, mientras que el mayor error se generó en la componente transversal, a excepción de la cepa 4 en donde el mayor error lo tuvo la longitudinal.

Los promedios de error absoluto fueron: 0,63 mm/s para la correa CV-05 cepa 1; 1,14 mm/s para la correa CV-07 cepa 4; y 0,6 mm/s para la fundición 2 del harnero.

Error absoluto - Yang - Correa CV-05 Cepa 1					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	-1.34	-0.05	1.44	0.57
2	07-09-2015	-0.85	0.14	0.47	0.00
3	08-09-2015	-0.22	0.37	0.99	0.72
4	10-09-2015	-0.22	0.27	0.55	0.10
5	13-09-2015	-1.55	-1.00	-0.42	-0.26
6	14-09-2015	-0.67	0.35	1.23	0.40
7	15-09-2015	0.11	-0.12	1.39	0.87
8	26-09-2015	-2.03	0.07	0.55	-0.76
9	27-09-2015	0.30	0.55	1.00	0.82
10	28-09-2015	0.22	0.59	0.88	0.63
11	30-09-2015	-0.46	-0.22	0.08	-0.31
	Promedio	0.72	0.34	0.82	0.49

Tabla 4.47: Error absoluto Cepa 1- Yang - Septiembre de 2015

Error absoluto - Yang - Correa CV-07 Cepa 4					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	-2.90	-0.15	1.57	-0.28
2	07-09-2015	-4.70	-2.11	-0.68	-3.88
3	08-09-2015	-0.27	-0.19	0.88	0.74
4	10-09-2015	0.00	0.17	0.74	0.55
5	13-09-2015	-3.13	0.53	1.39	-1.09
6	14-09-2015	2.35	2.29	3.06	3.62
7	15-09-2015	-0.25	0.90	1.63	1.36
8	26-09-2015	-2.05	0.10	1.19	-0.01
9	27-09-2015	0.28	-0.80	0.41	0.37
10	28-09-2015	0.24	0.27	0.86	0.94
11	30-09-2015	-0.85	-0.18	-0.59	-0.71
	Promedio	1.55	0.70	1.18	1.23

Tabla 4.48: Error absoluto Cepa 4 - Yang - Septiembre de 2015

Error absoluto - Yang - Harneros fundación 2					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	-0.55	-0.14	0.81	0.93
2	07-09-2015	-1.51	-0.17	0.39	-1.00
3	08-09-2015	0.09	0.11	1.02	0.90
4	10-09-2015	-0.32	0.09	0.62	0.04
5	13-09-2015	-1.04	0.07	0.52	-0.13
6	14-09-2015	1.71	1.80	2.14	2.71
7	15-09-2015	0.29	0.93	1.02	1.22
8	26-09-2015	-0.31	0.32	0.08	0.34
9	27-09-2015	0.53	0.32	0.89	0.79
10	28-09-2015	0.26	0.35	0.82	0.68
11	30-09-2015	-0.40	-0.07	-0.09	-0.37
	Promedio	0.64	0.40	0.76	0.83

Tabla 4.49: Error absoluto fundacion 2 - Yang - Septiembre de 2015

4.6.5. Error porcentual entre estimaciones y mediciones

Se calculó el error porcentual de las estimaciones tanto para el modelo de Devine como el de Yang. Esto se realizó con el objetivo de normalizar los errores absolutos obtenidos, ya que, debido a los altos valores de PPV en la componente longitudinal, se tendía a magnificar el error en comparación con las demás componentes, generando un sesgo a la hora de definir que modelo y en que componente se están realizando las mejores estimaciones de PPV.

Este porcentaje se calculó mediante el uso de la Ecuación (4.7).

$$Error_{\%} = \frac{Error_{abs}}{PPV_{medido}} \cdot 100 \% \quad (4.7)$$

El error promedio porcentual se calculó utilizando los valores absolutos del error porcentual de cada estimación.

4.6.5.1. Modelo de Devine

Para la correa CV-05 cepa 1, en la Tabla 4.50, se observa un error porcentual de 46 % considerando las tres componentes de la velocidad. El menor error porcentual se encuentra en la componente longitudinal, siendo el mayor error en la componente transversal.

Error porcentual - Devine - Correa CV-05 Cepa 1					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	28%	7%	86%	27%
2	07-09-2015	28%	16%	36%	9%
3	08-09-2015	7%	34%	98%	49%
4	10-09-2015	11%	38%	69%	15%
5	13-09-2015	38%	26%	8%	1%
6	14-09-2015	22%	30%	120%	26%
7	15-09-2015	9%	2%	129%	44%
8	26-09-2015	40%	22%	48%	1%
9	27-09-2015	31%	61%	126%	67%
10	28-09-2015	27%	90%	136%	62%
11	30-09-2015	41%	23%	15%	25%
Promedio		26%	32%	79%	30%

Tabla 4.50: Error porcentual Cepa 1 - Devine - Septiembre de 2015

En la Tabla 4.51 se muestran los resultados para la correa CV-07 cepa 4, se tiene un error porcentual promedio de 57 % considerando las tres componentes de la velocidad. Al igual que en la Cepa 1, el menor error se encuentra en la componente longitudinal y el mayor error en la componente transversal.

Error porcentual - Devine - Correa CV-07 Cepa 4					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	27%	5%	35%	6%
2	07-09-2015	28%	3%	55%	2%
3	08-09-2015	6%	7%	54%	41%
4	10-09-2015	9%	22%	63%	37%
5	13-09-2015	39%	25%	42%	8%
6	14-09-2015	212%	409%	227%	233%
7	15-09-2015	5%	66%	82%	54%
8	26-09-2015	13%	31%	65%	30%
9	27-09-2015	19%	23%	23%	18%
10	28-09-2015	37%	46%	102%	89%
11	30-09-2015	51%	20%	41%	40%
Promedio		40%	60%	72%	51%

Tabla 4.51: Error porcentual Cepa 4 - Devine - Septiembre de 2015

Para la fundación 2 del harnero, en la Tabla 4.52, el error absoluto promedio es 47 % considerando las tres componentes de la velocidad. Se observa el mismo comportamiento que en las otras ubicaciones, en donde la componente longitudinal presenta el error mínimo y la transversal el máximo.

Error porcentual - Devine - Harneros fundación 2					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	13%	2%	43%	37%
2	07-09-2015	25%	42%	83%	14%
3	08-09-2015	12%	15%	124%	70%
4	10-09-2015	17%	17%	104%	10%
5	13-09-2015	31%	9%	32%	1%
6	14-09-2015				
7	15-09-2015	30%	134%	115%	106%
8	26-09-2015	1%	43%	24%	37%
9	27-09-2015	66%	34%	123%	68%
10	28-09-2015	49%	80%	229%	109%
11	30-09-2015	38%	8%	10%	31%
	Promedio	26%	35%	81%	44%

Tabla 4.52: Error porcentual fundacion 2 - Devine - Septiembre de 2015

4.6.5.2. Modelo de Yang

Para las simulaciones en la correa CV-05 cepa 1 y correa CV-07 cepa 4 se obtuvo el menor error porcentual en la componente longitudinal, mientras que el mayor se presentó en la componente transversal, al igual que las simulaciones de Devine. Sin embargo, en la fundación 2 del harnero se obtuvo un menor error porcentual en la componente vertical y no longitudinal.

Los promedios de error porcentual fueron: 41 % para la correa CV-05 cepa 1; 48 % para la correa CV-07 cepa 4; y 38 % para la fundación 2 del harnero.

Se marcaron de color naranja aquellos errores porcentuales mayores a 100 %. A partir de esto se puede observar que la componente transversal, a lo largo de todas las ubicaciones y para ambos modelos, es aquella que entrega una estimación más errada en términos porcentuales. Mientras que los resultados en la componente longitudinal estiman de mejor manera la realidad bajo esta condición. Esto resulta favorable para los objetivos del proyecto, ya que dicha componente presenta los PPV más altos y por lo tanto, corresponden al peor caso de posible daño sobre la infraestructura monitoreada y en donde se requieren las mejores estimaciones futuras.

Las Tablas 4.53,4.54 y 4.55 resumen los resultados del cálculo del error porcentual para las estimaciones realizadas con el modelo de Yang.

Error porcentual - Yang - Correa CV-05 Cepa 1					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	34%	2%	70%	14%
2	07-09-2015	33%	8%	26%	0%
3	08-09-2015	12%	27%	87%	39%
4	10-09-2015	16%	29%	60%	6%
5	13-09-2015	41%	29%	12%	7%
6	14-09-2015	27%	22%	105%	16%
7	15-09-2015	6%	5%	122%	39%
8	26-09-2015	49%	3%	24%	18%
9	27-09-2015	27%	57%	119%	61%
10	28-09-2015	22%	82%	126%	53%
11	30-09-2015	43%	26%	12%	28%
	Promedio	28%	26%	69%	26%

Tabla 4.53: Error porcentual Cepa 1 - Yang - Septiembre de 2015

Error porcentual - Yang - Correa CV-07 Cepa 4					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	33%	3%	23%	3%
2	07-09-2015	56%	41%	13%	41%
3	08-09-2015	8%	7%	31%	20%
4	10-09-2015	0%	12%	48%	25%
5	13-09-2015	42%	18%	33%	14%
6	14-09-2015	194%	379%	205%	212%
7	15-09-2015	7%	47%	59%	36%
8	26-09-2015	31%	3%	25%	0%
9	27-09-2015	12%	28%	15%	11%
10	28-09-2015	15%	22%	65%	55%
11	30-09-2015	52%	23%	44%	43%
	Promedio	41%	53%	51%	42%

Tabla 4.54: Error porcentual Cepa 4 - Yang - Septiembre de 2015

Error porcentual - Yang - Harneros fundación 2					
Tronadura	Fecha	Lon	Ver	Tran	Vector suma
1	03-09-2015	19%	5%	34%	28%
2	07-09-2015	47%	9%	22%	27%
3	08-09-2015	6%	7%	112%	60%
4	10-09-2015	22%	10%	90%	3%
5	13-09-2015	34%	3%	26%	4%
6	14-09-2015				
7	15-09-2015	21%	112%	96%	87%
8	26-09-2015	14%	17%	3%	12%
9	27-09-2015	63%	30%	117%	63%
10	28-09-2015	31%	53%	184%	78%
11	30-09-2015	40%	12%	12%	34%
	Promedio	27%	23%	63%	36%

Tabla 4.55: Error porcentual fundación 2 - Yang - Septiembre de 2015

4.6.6. Impacto sobre infraestructura a partir de estimaciones

En esta sección se evalúan los resultados obtenidos de las simulaciones sobre los criterios de daño y normas aplicados en secciones anteriores. Debido a que las simulaciones se desarrollan en el dominio de la amplitud y no de la frecuencia, es que se ha considerado la peor situación para graficar los resultados, es decir, se ha usado una frecuencia principal de vibración igual a la frecuencia de resonancia de la infraestructura estudiada [36] [35].

La Tabla 4.56 muestra las frecuencias de resonancia de las infraestructuras evaluadas.

Infraestructura	Frecuencia resonancia [Hz]		
	Lon	Ver	Tran
SILO 1	1.6	1.84	1.6
CEPA 1	14.34	15.99	14.34
SILO 2	1.6	1.84	1.6
FUNDACION 2	10.29	11.47	10.29
CEPA 4	15.02	16.75	15.02

Tabla 4.56: Frecuencias de resonancia usadas en evaluación de infraestructura

Las Figuras 4.50 a la 4.57 contienen los gráficos de criterio de daño y normas contienen todos los datos simulados desde la tronadura 1 a la tronadura 11 (todas basadas en tronaduras ejecutadas durante el mes de septiembre de 2015). La información contenida solo diferencia entre distintas componentes de la velocidad.

4.6.6.1. Modelo de Devine

Bajo ninguno de los criterios se tiene una alta probabilidad de daño para los datos graficados. De hecho, todos los valores se mantienen bajo la recta correspondiente al tipo de estructura analizada.

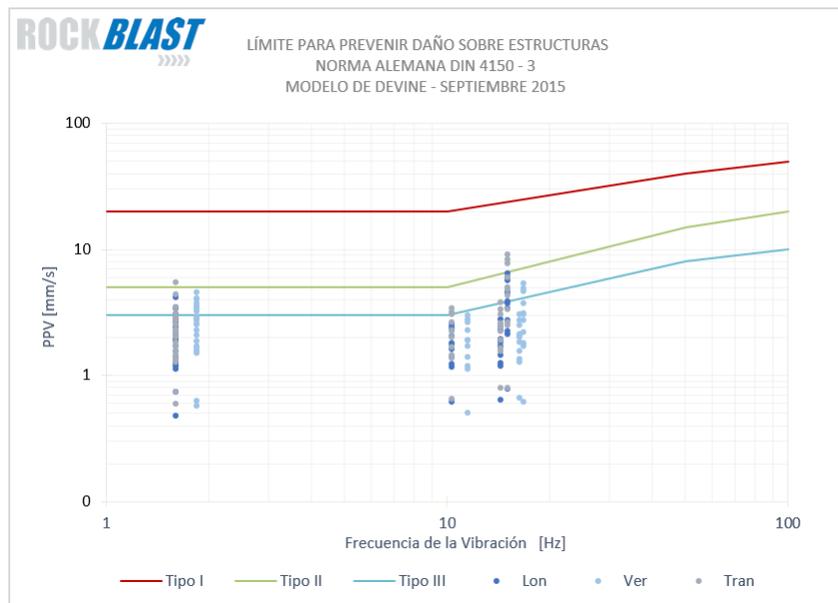


Figura 4.50: DIN 4150-3 - Modelo de Devine - Septiembre de 2015

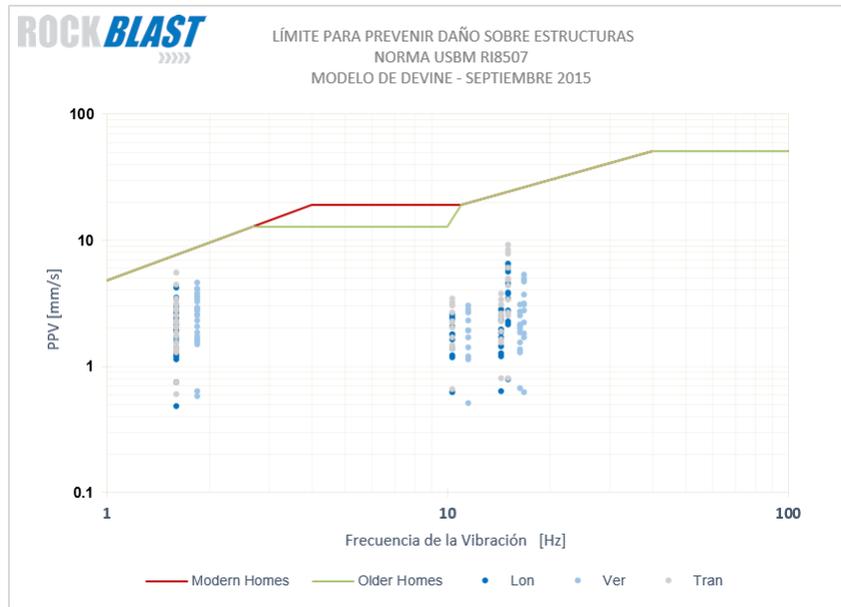


Figura 4.51: USBM RI8507 - Modelo de Devine - Septiembre de 2015

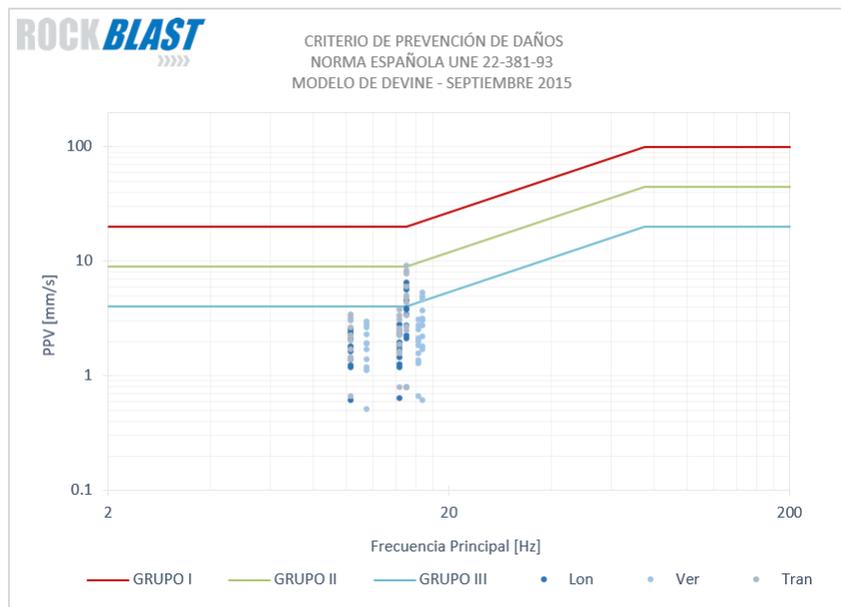


Figura 4.52: UNE 22-381-93 - Modelo de Devine - Septiembre de 2015

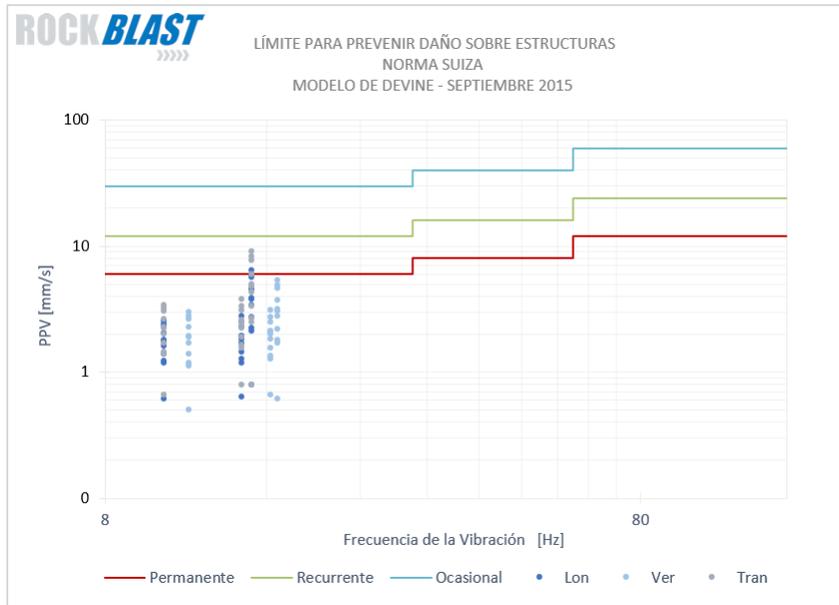


Figura 4.53: Norma SN 640 315a - Modelo de Devine - Septiembre de 2015

Ninguno de los datos simulados supera los umbrales definidos para la Norma SN 460 86 1991.

4.6.6.2. Modelo de Yang

Bajo ninguno de los criterios se tiene una alta probabilidad de daño para los datos graficados. De hecho, todos los valores se mantienen bajo la recta correspondiente al tipo de estructura analizada.

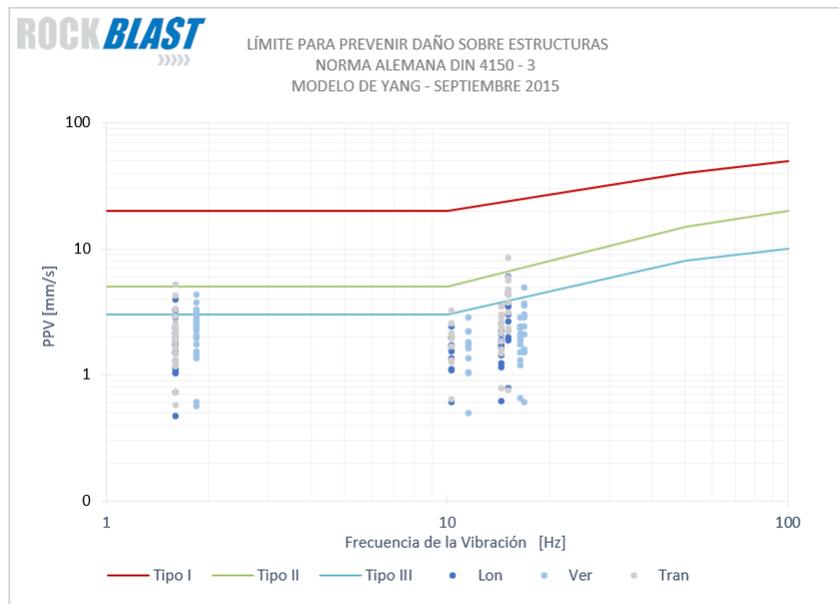


Figura 4.54: DIN 4150-3 - Modelo de Yang - Septiembre de 2015

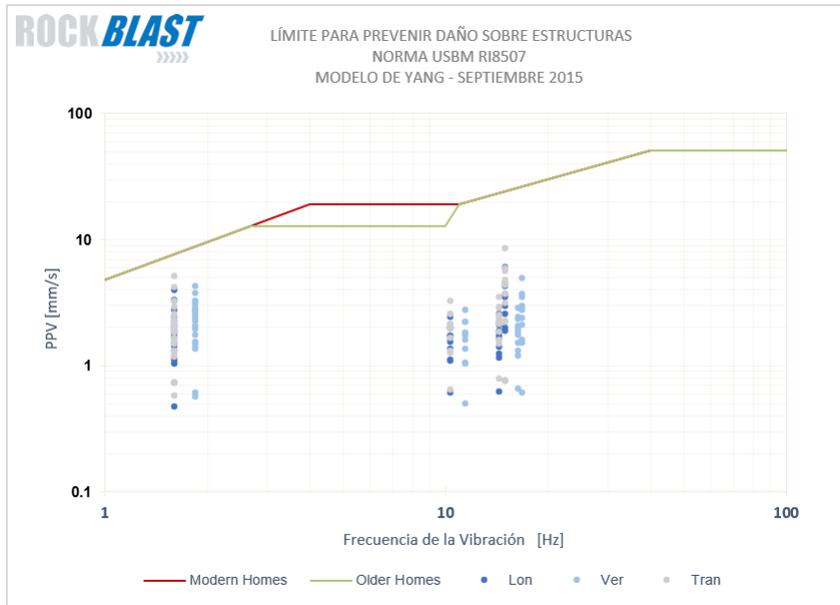


Figura 4.55: USBM RI8507 - Modelo de Yang - Septiembre de 2015

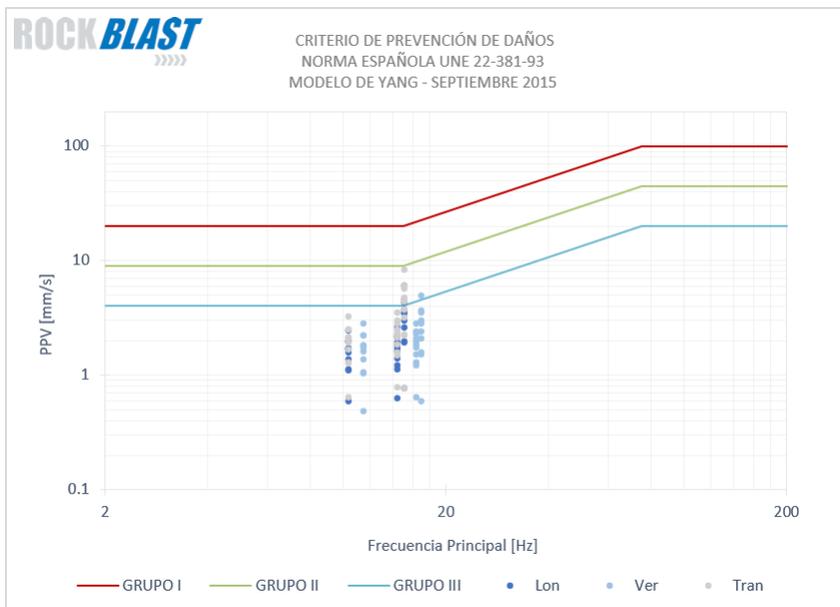


Figura 4.56: UNE 22-381-93 - Modelo de Yang - Septiembre de 2015

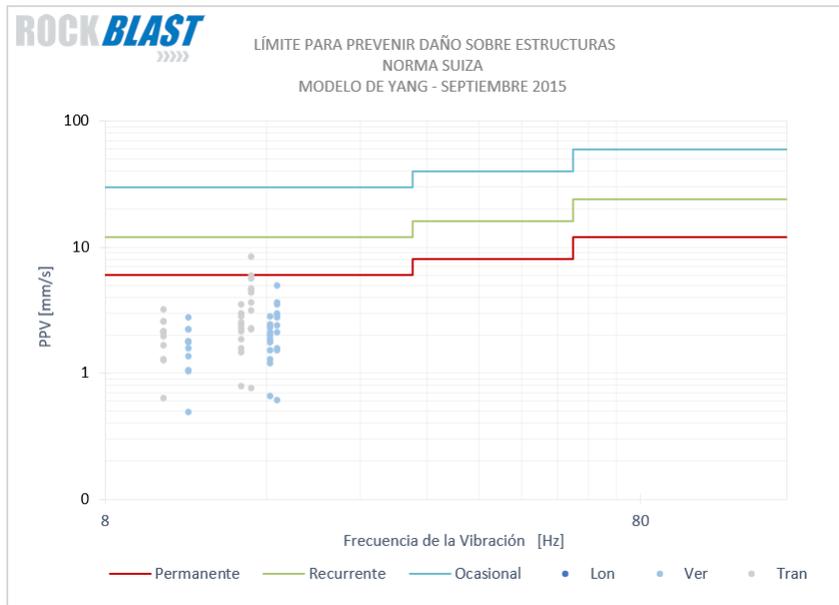


Figura 4.57: Norma SN 640 315a - Modelo de Yang - Septiembre de 2015

Ninguno de los datos simulados supera los umbrales definidos para la Norma SN 460 48 66 1991.

Estos resultados son consecuentes con lo obtenido en la sección de evaluación del impacto en infraestructura sobre los datos medidos, y por lo tanto verifican que las estimaciones realizadas bajo el objetivo del proyecto.

Capítulo 5

Análisis de resultados

5.1. Monitoreo de vibraciones

5.1.1. Periodo del monitoreo de vibraciones

El periodo de monitoreo de vibraciones se definió en base a las necesidades del cliente y las condiciones comerciales acordadas entre la compañía minera y Rockblast. En términos de la cantidad de datos obtenidos se puede decir que resultó suficiente para la elaboración de los modelos de vibración ¹ y concluir respecto al impacto de las vibraciones en la infraestructura a proteger.

No obstante es importante mencionar que en infraestructura sensible a las vibraciones y de alto nivel de inversión, siempre es necesario monitorear variables como vibración, desplazamiento, inclinación, socavamiento, entre otros.

5.1.2. Puntos de monitoreo

Los puntos de monitoreo se escogieron en base a un estudio previo realizado por la compañía minera en conjunto con la empresa Hatch, en donde buscaban analizar la estabilidad de los sectores sensibles a las vibraciones por tronadura en la planta de procesamiento [36] [35]. Existen dos enfoques generales de análisis para este punto.

- Considerando el impacto sobre la infraestructura a cautelar. La ubicación de todos los puntos de monitoreo cumplieron su función, ya que se identificaron los niveles de vibración a los que estarían sometidas las estructuras, y se lograron levantar las alarmas necesarias para generar un plan de mitigación, que bien podría significar reforzar la estructura o disminuir la energía liberada en la tronadura, lo que queda a criterio del cliente. Por lo tanto, se cumplió el propósito principal del monitoreo;
- En cuanto a los modelos de estimación de vibraciones de futuras tronaduras, 4 de las 7 ubicaciones entregaron modelos suficientemente confiables, a partir de los cuales es

¹La cantidad de datos utilizados por Devine para la elaboración de modelos consistió de un promedio de 48 lecturas de velocidad de partícula por eje para cada modelo [9]. En este estudio se utilizó un promedio de 81 lecturas por modelo.

posible estimar las vibraciones en el resto de los puntos extrapolando sus resultados. Por su parte, es necesario mencionar que los modelos de estimación de vibraciones son solo válidos para infraestructura emplazada de forma solidaria al terreno. De todas maneras, para aquellos geófonos instrumentados en las cañerías HDPE se elaboró el modelo basado en ley escalar, pero los resultados no fueron satisfactorios, por lo que solo se usaron con el propósito de evaluar la posibilidad de daño en ese lugar.

En cuanto a las ubicaciones específicas de cada estación se puede decir lo siguiente.

- **Estación 105:** cumplió el objetivo de monitorear las fundaciones del Silo 1 y la cepa 1 de la correa CV-05. Éstas requerían de un monitoreo continuo de vibraciones de acuerdo a estudios de dinámica estructural previos. Se asociaron 203 de los 503 registros de vibración a tronadura, equivalente a un 40.4% del total. De todos los registros asociados, 112 de estos fueron registrados en el Silo 1 y 91 en la cepa 1.
- **Estación 106:** de forma similar a la estación 105, esta estación fue capaz de registrar y asociar una gran cantidad de datos de tronadura. Su implementación en las zonas de Silo 2 y fundación 2 del Harnero también estuvieron sujetas a requerimientos de carácter estructural. En total se registraron 181 eventos asociados a tronadura de un total de 441 eventos de vibración, equivalente a un 41%. 108 de los eventos de tronadura fueron registrados en el Silo 2, mientras los 73 restantes fueron monitoreados en la fundación 2 del harnero.
- **Estación 107:** Se registraron 190 eventos de vibración asociados a tronadura, lo que corresponde al 37.5% del total de eventos de vibración captados por esta estación. En la pila 12A se lograron captar 85 vibraciones por tronadura, mientras que en la correa CV-07 cepa 4 se pudieron medir 105 de estos. Las mediciones en la cañería HDPE permitieron observar una amplificación considerable de las vibraciones transmitidas desde el terreno hacia la cañería, en la cual en varias ocasiones se superaron los umbrales de criterio de daño o normas establecidas en este proyecto. Debido a estos niveles de amplificación, es que se registraron mayor cantidad de eventos en esta estación que en otras. Además, su ubicación es la más cercana a las fases en 13 y 14 en explotación. Su función fue la de resguardar la integridad de las cañerías que conectan los estanques de ácidos mediante un monitoreo continuo, lo cual se cumplió.
- **Estación 108:** estación permanentemente ubicada en la culata de la pila 4, con un pobre desempeño en el registro de vibraciones por tronadura alcanzando solo 103 eventos de vibración asociados a tronadura de un total de 206. Esto no permitió obtener el máximo provecho de la estación de monitoreo, y su ubicación podría haberse modificado en el transcurso del estudio, considerando su comportamiento respecto al resto de las estaciones. Sin embargo, también logró cumplir con el objetivo de resguardar y monitorear el impacto de las vibraciones en la culata de la pila 4 y en la cañería HDPE que se continuó midiendo por la totalidad del proyecto. Así como en la cañería HDPE en la Pila 12A, en la cañería HDPE de la Pila 4. Los niveles de vibración superaron los umbrales por sobre los cuales se percibe una alta probabilidad de daño. En este sentido, se justificó continuar la medición de esta cañería por la duración completa del contrato. Así también, se recomendó reforzar las cañerías con el propósito de mitigar este impacto.

5.1.3. Equipos utilizados, instrumentación en terreno y mantención

En este punto no hay suficiente espacio para el debate, los equipos utilizados cuentan con todas las características necesarias para obtener los mejores resultados en este tipo de estudio. Los geófonos cumplieron con las calibraciones e instalaciones recomendadas por el fabricante, así también los equipos de medición, los cuales son bien reconocidos en la industria minera y por expertos del área.

Los resultados de comunicación entre los equipos instalados en terreno y el servidor de Rockblast sufrieron algunos contratiempos como cualquier sistema en línea que está permanentemente sometido a movimiento y condiciones ambientales propias de la minería, sin embargo se comportó de buena manera, con un *uptime* cercano al 90 %.

En ocasiones fue necesario acudir a terreno para corregir ciertos problemas de falta de energía hacia los equipos de comunicación que perjudicaban el envío de datos. Sin embargo, estos fueron ser rápidamente solucionados a través del reemplazo de piezas como el panel solar o baterías. En dichas ocasiones era probable que los sismógrafos se saturaran de eventos de interferencia (movimiento de camiones, operadores, equipos, entre otros) lo cual se solucionaba rápidamente descargando los datos de manera manual y ajustando el trigger del equipo, con el propósito de filtrar estos eventos.

Con respecto al control desde la oficina, se generaron algunos protocolos de chequeo de comunicación, energía, calibración, entre otros. Esto con el propósito de mantener el sistema en buenas condiciones para advertir al cliente de cualquier evento de alta intensidad en los puntos de monitoreo.

5.2. Análisis de información recopilada

5.2.1. Reportes rápidos y descarga de datos

Los reportes rápidos, si bien no constituían material para el análisis detallado de vibraciones o su relación con los parámetros de tronadura, era de vital importancia para el personal de la compañía minera, ya que era la primera señal o alerta que se recibía después de una tronadura. A través de este reporte se podía identificar el impacto de las vibraciones generadas por las tronaduras en los distintos puntos de monitoreo. Debido a que cada estación enviaba sus propios reportes de vibración, siempre existía certeza acerca de las zonas más sensibles y se podían dirigir los esfuerzos a mitigar el impacto en aquellas áreas. Por ejemplo, en aquellos casos en que los reportes arrojaran altos niveles de vibración provocando un alto impacto sobre estructuras sensibles, era necesario diseñar un plan de mitigación para la tronadura del próximo día o subsiguiente.

Por lo tanto, la evaluación del uso de este tipo de reportes es positiva, si bien no considera un gran abanico de normas o criterios, ni se evalúa la frecuencia dominante mediante el uso

de la FFT, su propósito de entregar un reporte instantáneo y de fácil lectura se cumplió a cabalidad. La norma utilizada en estos reportes correspondió a la DIN 4150-3, según recomendación del estudio de ingeniería previo realizado en la compañía minera sobre los puntos de interés.

En cuanto a la descarga de datos, ésta también se realizaba de forma automática y en general su funcionamiento fue adecuado. Sin embargo, en ocasiones no era posible para la estación de monitoreo enviar los datos de una sola vez debido a la gran cantidad de registros almacenados, llevando al colapso de las vías de comunicación. En aquellas ocasiones fue necesario descargar los datos y agregarlos a la base de datos manualmente. Este proceso tomaba desde 5 minutos a 1 hora dependiendo de la cantidad de datos almacenados.

Todos aquellos procesos de reparación, programación manual, descarga de datos, comunicación, u otros, que de alguna forma presentaron una complicación durante este proyecto, constituyeron la base para crear nuevas tecnologías, protocolos, condiciones y procedimientos que hoy se utilizan en Rockblast, y que han ayudado a mejorar día a día los sistemas de monitoreo en línea que hoy se prestan.

5.2.2. Análisis de señal y asociación a tronadura

La clasificación de señales se llevó a cabo para cada uno de los eventos registrados en todas las estaciones. Mediante esta tarea fue posible reconocer eventos de tronadura, sismos y otros particulares de origen desconocido. Los sismos fueron reconocidos fácilmente debido a sus bajas frecuencias, alta duración y amplitud, además de que se pudieron asociar sin problemas a la información de sismología de la Universidad de Chile. Los eventos de tronadura eran reconocidos debido a su corta duración, rango de frecuencias característicos y un peak único de amplitud seguido por el decaimiento de la onda. No obstante, hubo eventos en donde surgieron ciertas dudas respecto a la procedencia de la vibración debido a su gran semejanza a una onda de tronadura. Dichos eventos fueron considerados como tronadura y se buscó la asociación con la información enviada desde faena.

También existieron activaciones puntuales de los equipos como golpes, maquinaria trabajando a su alrededor, el paso de camiones, entre otros. Estos datos fueron descartados del análisis, pero nunca borrados de la base de datos.

La asociación de las mediciones con la información de tronadura representó el mayor desafío del estudio, principalmente afectados por distintos avisos de tronadura en un día y sin horario confirmado, y varios registros de vibración en horarios similares, resultaba azaroso o imposible asociar un evento de vibración a una única tronadura basado solo en parámetros como explosivo, distancia, fase, amplitud de onda, entre todos los factores posibles. Asociar un dato erróneamente genera problemas al momento de obtener el modelo de vibraciones, ya que la información de base es errada. De la misma forma, afecta las recomendaciones al diseño de tronadura en planes de mitigación subyacentes. Por lo tanto, fue necesario desarrollar una metodología de descarte de datos y asociación que minimizara la posibilidad de error.

El uso de categorías A y B en la asociación fue necesaria para disminuir el error asociado a este proceso, y a la vez no perder una gran cantidad de datos en el proceso de filtrado, permitiendo la asociación de eventos sin un 100 % de confiabilidad (asociaciones de categoría B). Esto produjo una disminución significativa en la cantidad de información recopilada en el largo periodo de monitoreo, pero se compensó con información de calidad que no dió espacio a dudas en los resultados finales del proyecto. Luego de este proceso se procedió a conciliar la información restante que no era posible asociar de forma certera, obteniendo los eventos de categoría X, los que se analizaron al detalle y que llevaron a completar la base de datos utilizada finalmente.

En general, el proceso de asociación de categorías permitió generar un orden en los datos, respaldar decisiones detrás de los análisis y entregar cierto nivel de confianza cuantificable a los resultados obtenidos.

5.3. Evaluación del impacto en infraestructura

5.3.0.1. Ubicación: Silo 1

Para los efectos de evaluación del impacto de las vibraciones sobre los cimientos del Silo 1 (estación 105) se usaron diversas normas y criterios, en donde se ha catalogado el Silo 1 como infraestructura industrial y por lo se ubica dentro del TIPO I para norma Alemana DIN 4150, Modern Homes para criterio USBM RI 8507, GRUPO I para la norma española UNE 22-381-93, estructura poco susceptible para la norma Suiza SN 640 315a y se obtuvo una velocidad crítica de 12.5 mm/s para la norma SN 460 48 66 1991. Se puede decir que solo se superó el umbral de daño para la norma SN 460 48 66 1991 en un 5 % de los datos y a una frecuencia muy superior a la frecuencia de resonancia del Silo 1. De acuerdo a los resultados obtenidos, hay una baja probabilidad de daño sobre el Silo 1, el cual se mantiene intacto estructuralmente.

5.3.0.2. Ubicación: Correa CV-05 - Cepa 1

A través de un proceso homólogo al del Silo 1, se concluye que hay una baja probabilidad de daño sobre la cepa 1 de la correa CV-05. Tampoco se han observado daños a la fecha.

5.3.0.3. Ubicación: Silo 2

Se observa un comportamiento similar al medido en el Silo 1, en donde no se supera ninguna de las normas o criterios gráficos a excepción de la norma SN 460 48 66 1991, para la cual solo el 1 % de los datos sobrepasó el umbral de velocidad crítica. Por lo tanto, si bien existe la posibilidad de daño para el 1 % de las tronaduras, es un caso aislado durante el periodo de monitoreo y cuya frecuencia de vibración es muy superior a la de resonancia, disminuyendo la probabilidad de daño. El Silo 2 se mantuvo intacto durante el este proyecto.

5.3.0.4. Ubicación: Harneros - Fundación 2

Al evaluar todos los datos medidos y asociados a tronaduras en las normas y criterios utilizados en este trabajo, se obtiene que ningún evento fue capaz de superar los umbrales

de posibilidad de daño. Efectivamente no se observó daño en el transcurso de este trabajo.

5.3.0.5. Ubicación: Pila 12A

No se presentan resultados preocupantes en terreno. Sin embargo, en la cañería HDPE existen altas probabilidades de daño por tronadura, en donde el 12% de los eventos sobrepasaron las normas DIN 4150-3, 14% la norma USBM RI 8507 y un 12% la norma UNE 22-381-93. Es inminente que se proceda con un plan de reforzamiento sobre la estructura o de re-diseño de las tronaduras ejecutadas.

5.3.0.6. Ubicación: Correa CV-07 - Cepa 4

Se observan altas probabilidades de daño en la mayoría de las normas y criterios analizados. Por lo tanto es inminente generar un plan de mitigación sobre esta estructura. Este resultado es consecuente con los resultados obtenidos por Hatch ??, en donde se recomienda un plan de refuerzos sobre esta cepa. Por parte de RockBlast se propone disminuir la carga explosiva detonada mediante el uso de los modelos de vibración entregados mes a mes. Se desconoce si se consideró esta recomendación por parte de la compañía minera.

5.3.0.7. Ubicación: Pila 4

Nuevamente, al igual que en el caso de la Pila 12A, no se observan resultados preocupantes en terreno. No obstante, existen altas posibilidades de daño por tronadura en la cañería HDPE, en donde el 36% de los eventos superaron la norma DIN 4150-3, 42% la USBM RI 8507, 37% la UNE 22-381-93 y un 2% la norma Suiza. Es importante que se proceda con un plan de reforzamiento sobre la estructura o de re-diseño de las tronaduras ejecutadas que afecten esta área.

5.4. Elaboración de los modelos de vibración - Ley escalar de Devine

Para analizar estos resultados se dividió esta sección en partes.

5.4.1. Sobre el uso de la carga total detonada como variable

Se hizo uso de la carga total detonada, en reemplazo de la carga detonada por retardo como es típico, esto debido a la falta de información precisa sobre los retardos de los pozos y carga explosiva efectiva de cada pozo. Además, es de conocimiento en la industria que los modelos de vibración en campo lejano tienden a ser más representativos al usar la carga total detonada. No obstante, este era uno de los puntos a probar durante el desarrollo de este trabajo.

5.4.2. Sobre el uso de la carga equivalente al ANFO como variable

Se permitió evaluar la posibilidad de utilizar la carga equivalente al ANFO como variable al momento de obtener los modelos de vibración, principalmente por su concepto energético asociado, el cual debería estar mejor relacionado con la energía transmitida al medio en forma

de vibración que los kilogramos de explosivo detonados. Sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios, obteniendo una gran similitud con los modelos basados en carga explosiva total, pero, en general, siendo peores en términos de estimación de valores y correlación con los datos.

En base a estos resultados se decidió continuar utilizando el modelo de carga total detonada en las secciones subsecuentes.

5.4.3. Sobre la categorización de los datos

Se obtuvieron los modelos de vibración usando dos set de datos por ubicación, sin considerar la subdivisión por carga explosiva y carga equivalente, uno de los set consideraba los datos categoría A, B y X, mientras la otra solo las A y B. En general, el set de datos compuesto por las categorías A, B y X, presentó mejores resultados al momento de generar los modelos. Obteniendo modelos más robustos y con mejor correlación. Sin embargo, a través del uso de este set de datos existía una mayor posibilidad de haber asociado erróneamente un dato, no obstante, esta pérdida se compensaba favorablemente considerando los resultados obtenidos y los escasos datos X que fueron agregados.

5.4.4. Sobre la correlación de los modelos

Los modelos presentaron R^2 entre 0.26 y 0.73, lo cual indica la influencia de la ubicación sobre la validez o factibilidad de obtener un modelo de vibración para dicho sector. Los modelos no se consideraron representativos en los sectores de pilas de lixiviación, lo que dice relación con el terreno en donde se emplaza el geófono, y en el Silo 2, en donde no se encontró una posible causa a este efecto. Finalmente, solo 4 modelos fueron evaluados positivamente con cifras no muy alentadoras de R^2 entre 0.5 a 0.73. En la literatura y en la industria, los modelos de vibración dependientes de la carga explosiva y la distancia entre carga y monitor muestran valores de R^2 mayores a 0.55 si el PPV estimado depende de ambos factores, y valores R^2 mayores o igual a 0.7 cuando solo dependen de la distancia [32] [22]. Por lo tanto, se consideró un valor de $R^2 = 0,55$ sobre el cual fueron aprobados los modelos de vibración. Es importante notar que los modelos más confiables correspondieron a las Cepa 1 y Cepa 4, justamente en donde las vibraciones son mayores y se requiere un resguardo permanente.

Uno de los aspectos negativos de los resultados obtenidos radica en la pobre correlación de los modelos en la componente longitudinal de la velocidad peak de partícula, la cual mostró tener las velocidades máximas de las tres componentes, y por lo tanto, en donde se requiere una mejor estimación. A pesar de esto, al estimar los valores de PPV a partir de los modelos se muestra que este es el más representativo en las tronaduras evaluadas.

5.5. Elaboración de los modelos de vibración - Modelo de Yang

Debido a la naturaleza y concepción del modelo de Yang, el cual es pensado para estimación de vibraciones en campo cercano, se decidió probar este modelo para estimar vibraciones en campo lejano. Una de las primeras observaciones importantes es que el modelo debe ser

calibrado en campo cercano. Debido a la imposibilidad de realizar este tipo de estudio en la compañía minera, se asumió una condición del terreno y comportamiento de la onda de vibración similar a las obtenidas en un estudio de campo cercano realizado en otra minera. A pesar de lo erróneo que podría sonar este tipo de prácticas, se comprobó la factibilidad de llevarlo a cabo mediante la correcta calibración de los componentes del modelo a los datos obtenidos en terreno, generando buenas estimaciones de PPV o similares a las producidas con el modelo de Devine tan usado en la industria.

Evaluar los resultados del estudio de campo cercano no corresponden con esta memoria y, por lo tanto, solo es preciso comentar que se siguió a cabalidad la metodología planteada por Yang para la calibración de los parámetros usados en este modelo.

En cuanto al efecto de apantallamiento que se plantea en el artículo, se ha decidido omitir sus implicancias en los resultados, debido a la poca rigurosidad con que se plantea su puesta en marcha al momento de seleccionar los pozos que apantallan las vibraciones.

La ley escalar usada corresponde a aquellas encontradas mediante el modelo de Devine y que fueron verificadas en las secciones anteriores.

5.6. Estimación de vibraciones por tronadura

Solo fueron usados aquellos modelos con los que se contaba con datos del mes de septiembre de 2015 y que habían sido seleccionados debido a su coeficiente de determinación de Pearson, es decir, los modelos de la correa CV-05 cepa 1, correa CV-07 cepa 4 y fundación 2 de harneros.

Se decidió usar el último mes de monitoreo para evaluar la exactitud de los modelos de vibración, usando los modelos de Devine y Yang. Esto correspondía a 11 tronaduras efectivamente medidas desde el 3 al 30 de septiembre de 2015.

Las estimaciones fueron realizadas utilizando la carga total explosiva distribuida uniformemente en todos los pozos, tiempos de retardo de 3 ms entre pozos y 7 ms entre filas.

A pesar de solo utilizar 3 de las 7 ubicaciones para elaborar los modelos de Devine y Yang definitivos, fueron simulados los PPV en todas las ubicaciones, a excepción de la Pila 4, en donde los valores de las mediciones eran prácticamente aleatorias.

Los resultados de error absoluto para Devine, si bien no son un buen indicio de la calidad de la simulación relativa a las otras componentes de la velocidad, si permiten concluir respecto a cada componente en particular. En este aspecto, se aprecia que el PPV en la componente longitudinal en general es subestimado en la Cepa 1, mientras es sobreestimado en las componentes vertical y transversal. Este comportamiento se mantiene, en menor medida, para la Cepa 4 y en la fundación 2, en donde la componente longitudinal llega a un equilibrio, pero la vertical y transversal continúan sobreestimando las mediciones.

En Yang, se observa un comportamiento similar para todas las ubicaciones, en donde se subestima, en mayor medida que en Devine, la componente longitudinal, mientras se sobreestiman las componentes vertical y transversal.

Estos resultados plantean un problema para los objetivos de la estimación de vibraciones, ya que subestiman la componente históricamente más alta de las vibraciones presentes en

faena, la longitudinal. Por lo tanto, se recomienda ser conservadores con los resultados estimados a partir de los modelos en la dirección longitudinal, que si bien predicen con un alto porcentaje de exactitud, del 74 % a 79 % en promedio (eliminando los outliers presentes en septiembre, tronadura 7 - 14-09-2015), y otorgar cierto margen de seguridad de 10 % a 20 % a la estimación.

Con respecto a las comparaciones porcentuales, se obtuvo un alto grado de exactitud en la componente longitudinal, del 74 % al 79 % en promedio en Devine y 72 % a 77 % en Yang (eliminando la tronadura 7 desarrollada el 14 de septiembre de 2015, debido a que sus valores medidos de PPV fueron considerados un outlier, sobrepasando el PPV en más de 200 % en la estimación). En términos de exactitud lo siguieron la componente vertical y finalmente la transversal. En cuanto a los valores arrojados en la componente transversal, se observa una mala estimación de los PPV, produciendo un alto número de estimaciones sobre 100 % de diferencia con la medición. Este comportamiento fue observado tanto en el modelo de Devine como Yang.

5.7. Impacto sobre infraestructura a partir de simulaciones

Tal como se mencionó en la sección de resultados respectiva, se hizo uso de las frecuencias de resonancia de las distintas infraestructuras analizadas. Estas frecuencias se obtuvieron a partir del estudio previo de ingeniería encargado por la compañía minera a Hatch ?? ?. La razón de utilizar estas frecuencias radica en el hecho de que éstas representan la condición de mayor sensibilidad a la vibración de la infraestructura y por tanto es el peor caso al que se verá enfrentada.

Tanto para las estimaciones realizadas mediante el modelo de Devine, como para el de Yang, no se observan valores que sobrepasen las normas y criterios usados en este estudio, por lo tanto existe una baja probabilidad de daño sobre los sectores analizados. Esto es consecuente con los resultados medidos en terreno para todas las vibraciones por tronadura estimadas a través de los modelos de vibración elaborados en este trabajo.

Capítulo 6

Conclusiones

- En cuanto al sistema de monitoreo en línea de las vibraciones en los puntos de control, se logró brindar un servicio integral en cuanto a la correcta toma de registros de vibración para la evaluación del impacto de estos sobre la infraestructuras del Silo 1, Silo 2, Pila 12A, pila 4, Cepa 1 de la correa CV-05, Cepa 4 de la correa CV-07 y fundación 2 de los harneros. Este servicio, mediante reportes e informes mensuales, logró entregarle al cliente la información técnica y recomendaciones necesarias para efectuar planes de mitigación y refuerzo sobre aquellos sectores más susceptibles al movimiento provocado por las tronaduras.
- Del total de zonas monitoreadas, las más susceptibles a daño por vibraciones provocadas por tronaduras y, por lo tanto, de mayor preocupación fueron, en orden decreciente, la Cepa 4 de la correa CV-07, cañerías HDPE de la pila 4 y pila 12A, Silo 2 y fundación 2 de los harneros. Por lo tanto, se recomienda reforzar las estructuras mencionadas con el propósito de mitigar el efecto de las tronaduras sobre éstas. De igual manera, es posible disminuir los efectos de las tronadura a escala global mediante la minimización de la carga total detonada, distribuir las cargas singulares o pozos, o modificar los tiempos de salida de estos de manera que la detonación libere energía de manera más discreta en el tiempo. No obstante, todos estos cambios podrían tener repercusiones negativas en la producción de la minera, por lo que se recomienda evaluar las alternativas al diseño de tronadura con discreción, procurando no perjudicar financieramente la operación.
- Debido a la naturaleza de las normas y criterios utilizados en este estudio, que fueron la base para la evaluación del daño, es preciso recalcar que estos métodos de evaluación no son absolutos, por lo tanto, no se puede descartar el daño sobre ninguna de las estructuras analizadas, incluso cuando los niveles estén muy por debajo de los umbrales de daño correspondientes. Por lo tanto, no se descarta daño sobre el Silo 1, Cepa 1 de la correa CV-05, pilas 4 y 12A de lixiviación, aun cuando su probabilidad es baja.
- En cuanto a la categorización de los registros de vibración, en base a la confiabilidad de asociación con la información de tronadura otorgada por la minera, no se observaron cambios significativos en los resultados de elaboración de los modelos de vibración. Por lo tanto, se puede concluir que la información de tronadura de menor confiabilidad fue

correctamente asociada con los registros de vibración, entregando mayor soporte a los modelos obtenidos.

- En relación al uso de la carga explosiva total por tronadura para la obtención de los modelos de vibración y las simulaciones a partir de estos, resultó ser completamente factible y se validó con respecto a las mediciones. Por su parte, el uso de la carga explosiva equivalente al ANFO no entregó mayores beneficios ni perjuicios para la elaboración de los modelos de vibración por lo tanto no es posible concluir sobre su uso y se deja a criterio del cliente o el lector su uso y verificación. No obstante, los resultados obtenidos en términos de las constantes de atenuación y decaimiento de la amplitud de la vibración con la distancia, resultaron similares en ambas aproximaciones.
- Con respecto a la confianza, correlación y validez de los modelos obtenidos, es posible concluir que solo aquellos modelos de vibración obtenidos a partir de los datos de las estaciones ubicadas en el Silo 1, Cepa 1 de la correa CV-05, Cepa 4 de la correa CV-07 y fundación 2 de los harneros resultaron útiles para la estimación de vibraciones en campo lejano. Sin perjuicio de aquello, sus resultados mostraron ser extrapolables a distintas ubicaciones en términos de valores de medición y evaluación del impacto en infraestructura. En consecuencia, su uso puede ser aplicado en distintas zonas de la mina y obtener una estimación de los PPV para tronaduras futuras, aplicar los criterios y normas mencionados y de esta forma prevenir que un mal diseño de tronadura pudiese perjudicar la infraestructura de la mina.
- En relación al uso del modelo de Devine o Yang, ambos probaron ser buenos estimadores de las vibraciones en campo lejano cuando son correctamente calibrados y utilizados. Los resultados de ambos modelos muestran una estrecha similitud, resultando el modelo de Yang con una dispersión mayor al de Devine. A pesar de sus similitudes en los datos, es importante mencionar que el modelo de Yang considera mayor cantidad de variables de tronadura que el de Devine, por lo tanto, se podría considerar como una herramienta más completa a la hora de re-diseñar la tronadura para los ingenieros de perforación y tronadura.
- Fue posible utilizar y extrapolar datos de campo cercano de otra faena minera a las condiciones de esta minera para el modelo de Yang, entregando buenos resultados finales. Esto se debe realizar con precaución y solo en situaciones en que las condiciones del terreno son similares, además, se debe tener extremo cuidado al momento de calibrar los parámetros del modelo. Además, es importante considerar que en el campo lejano la ecuación de Yang converge en la de Devine, y por tanto, las variables K y n de la ley escalar tienen un peso mayor que las de Yang.
- En cuanto a los resultados de las estimaciones de los modelos de vibración, se concluye que es posible estimar correctamente el impacto de las tronaduras futuras sobre la infraestructura. Es de importancia notar que el criterio del operador de estos modelos es de extrema relevancia, ya que los modelos solo estiman con cierto nivel de confianza, en casos subestimando la vibración como en el caso de la componente longitudinal de la velocidad, otras veces sobreestimando. Por lo tanto se recomienda utilizar ciertos márgenes de 10 % a 20 % sobre el valor obtenido y siempre graficar sobre la frecuencia de resonancia de la infraestructura a evaluar.

- El modelo de Blair fue considerado como parte de esta memoria y su rutina de cálculo fue programada, al igual que la de Yang y Devine. No obstante, existieron dificultades de procesamiento de los datos que no permitían finalizar las simulaciones en un tiempo prudente, incluso demorando días en procesarse. Esto no permitió realizar las simulaciones requeridas ni comparar distintos resultados a fin de calibrar sus variables. Muchas de estas estimaciones no finalizaban debido a incompatibilidades de Windows y problemas de memoria interna de los servidores. Finalmente se decidió descartarlo y su uso queda propuesto para estudios futuros.

Capítulo 7

Anexos

7.1. Evaluación del impacto en infraestructura

7.1.1. Evaluación del impacto en infraestructura - Silo 1

7.1.1.1. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3

Se considera el Silo 1 como una estructura de TIPO I debido a su origen industrial y material de construcción. Bajo esta clasificación, de acuerdo a la Figura 7.1.1.1 no hay datos del periodo que superen el umbral para que exista probabilidad de daño según la norma DIN 4150-3.

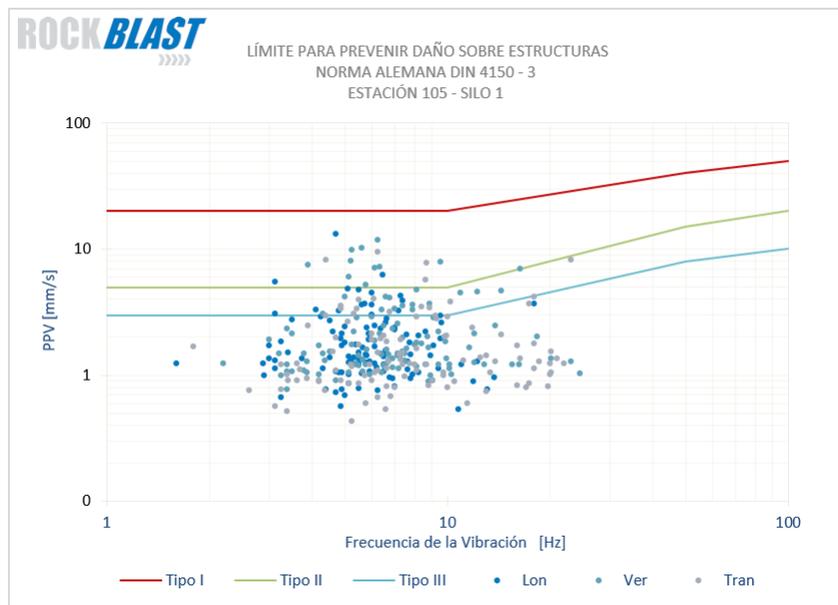


Figura 7.1: Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Silo 1

7.1.1.2. Evaluación sobre criterio USBM RI 8507

Incluso cuando su aplicación es complicada en esta situación, debido a que no estamos evaluando construcciones residenciales, se podría considerar el Silo 1 como una estructura firme perteneciente a la clasificación de Modern Homes. En la Figura 7.1.1.2 se muestra que bajo esta clasificación no existen vibraciones con altas probabilidades de generar daño en la estructura.

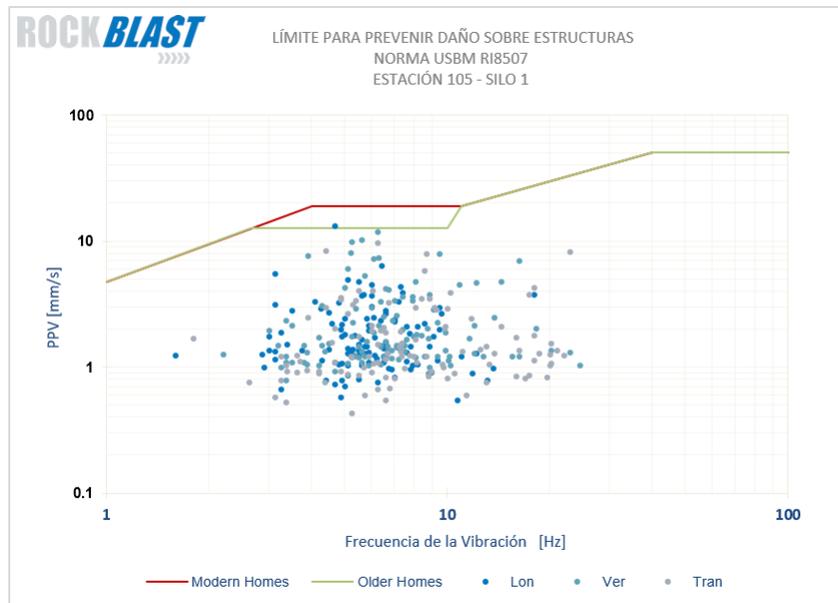


Figura 7.2: Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Silo 1

7.1.1.3. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93

De acuerdo a sus características estructurales, se considera el Silo 1 en el GRUPO I de la clasificación española. En la Figura 7.1.1.3 se observa que ninguna de las vibraciones que percibió en el periodo tiene probabilidad de ocasionar daño.

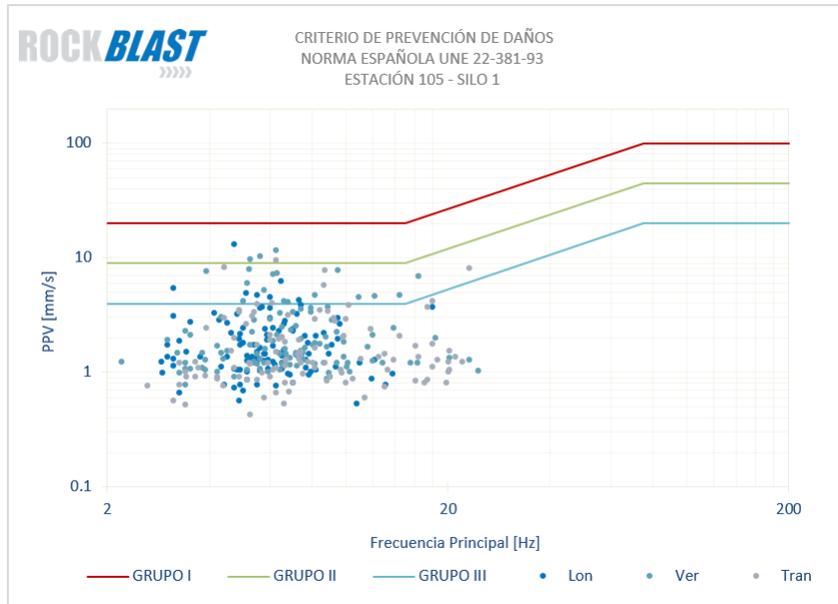


Figura 7.3: Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Silo 1

7.1.1.4. Evaluación sobre Norma SN 640 315a

En la Figura 7.1.1.4 se tiene que considerando la frecuencia de las vibraciones y la clasificación estructural de esta norma, la cual ubicaría al Silo 1 en una estructura poco susceptible, no existe posibilidad de daño sobre este.

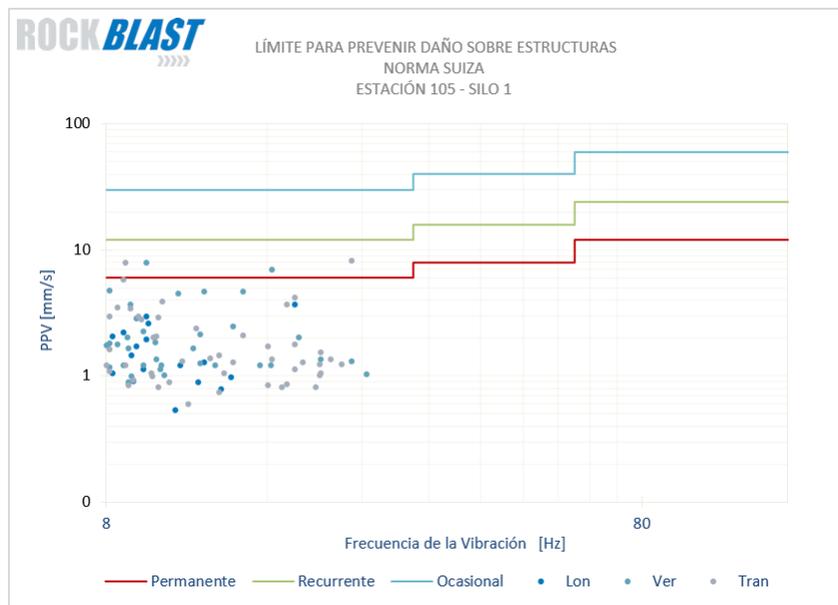


Figura 7.4: Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Silo 1

7.1.1.5. Evaluación sobre Norma SN 460 48 66 1991

El terreno en que se emplaza el Silo 1 podría ser considerado como una combinación entre dos tipos de terrenos consolidados para la obtención de los valores de velocidad vertical

indicativos, mediante la Ecuación (7.1) se obtiene v_0 como el promedio de ambas velocidades.

$$v_0 = 35 + 70/2 = 52,5 \quad (7.1)$$

Considerando un tipo de edificación industrial, $F_b = 1,2$, y tipo de material de concreto reforzado, $F_m = 1,2$, a través de la Ecuación (7.2) se tiene el valor de $F_k = 1,44$.

$$F_k = 1,2 * 1,2 = 1,44 \quad (7.2)$$

Ahora, tomando en cuenta la distancia se tiene $F_d = 0,22$, y el trabajo de mina, $F_t = 0,75$. Por lo tanto el umbral de velocidad para la probabilidad de daño en el Silo 1, v , será según la Ecuación (7.3).

$$v = 52,5 * 1,44 * 0,22 * 0,75 = 12,5 \text{ mm/S} \quad (7.3)$$

Ninguno de los registros de vibración en la componente vertical supera este valor en esta ubicación.

7.1.2. Evaluación del impacto en infraestructura - Correa CV-05 - Cepa 1

7.1.2.1. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3

Se mantiene la clasificación de acuerdo al TIPO de estructura según la norma alemana DIN 4150-3 para la Cepa 1 de la correa CV-05. De acuerdo a la Figura 7.1.2.1, ninguno de los registros de vibración supera el umbral requerido para aumentar la probabilidad de daño.

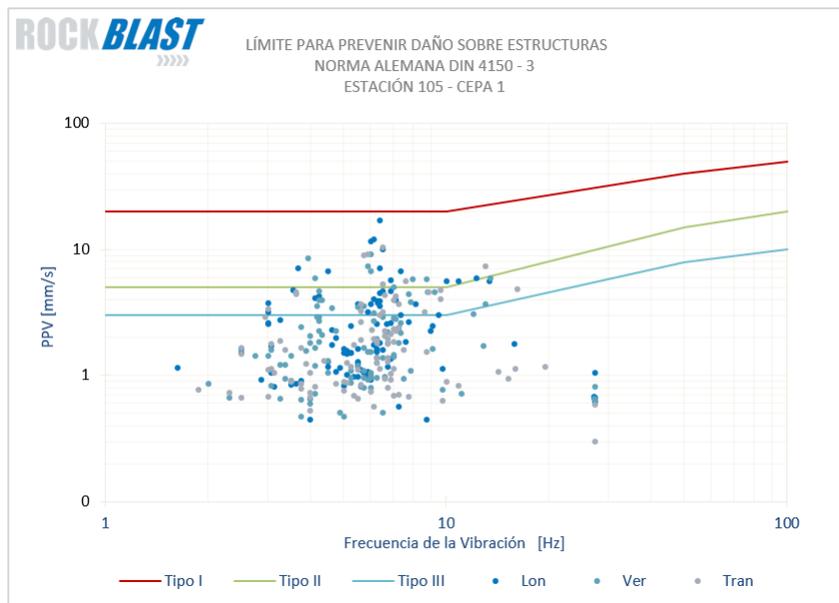


Figura 7.5: Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Cepa 1

7.1.2.2. Evaluación sobre criterio USBM RI 8507

Nuevamente se considera la estructura como Modern Homes, y por tanto, ningún valor de vibración supera los umbrales necesario para ocasionar daño en la Figura 7.1.2.2.

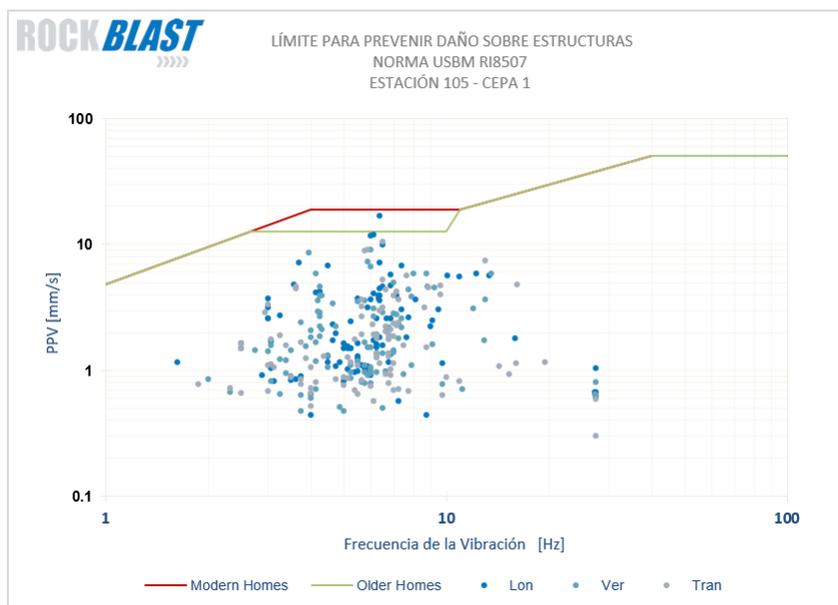


Figura 7.6: Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Cepa 1

7.1.2.3. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93

La estructura se clasifica de GRUPO I. En la Figura 7.1.2.3 no hay evento de vibración que supere este umbral, por tanto no se ven posibilidades de daño en el punto.

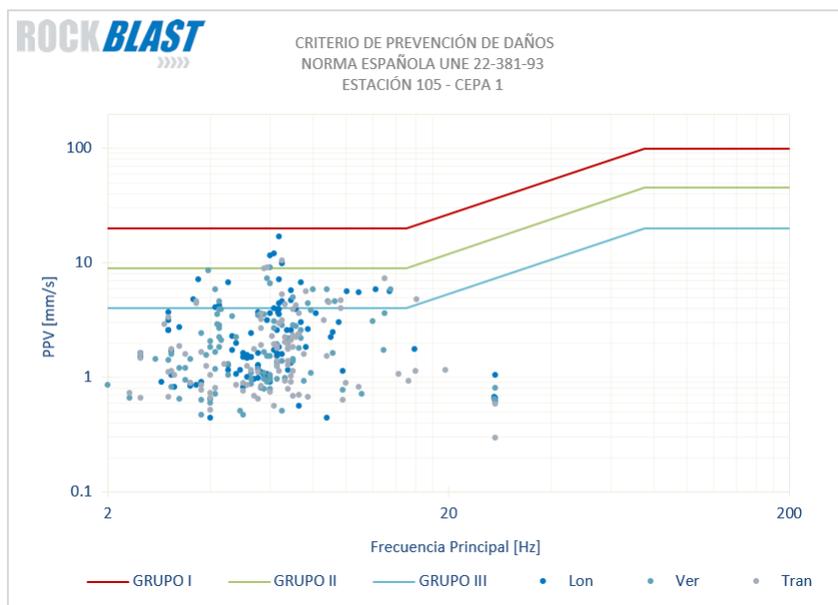


Figura 7.7: Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Cepa 1

7.1.2.4. Evaluación sobre Norma SN 640 315a

La Cepa 1 se considera una estructura poco susceptible a vibraciones frecuentes, por tanto ninguno de los registros de vibración supera el umbral requerido para ocasionar daño de acuerdo a la Figura 7.1.2.4.

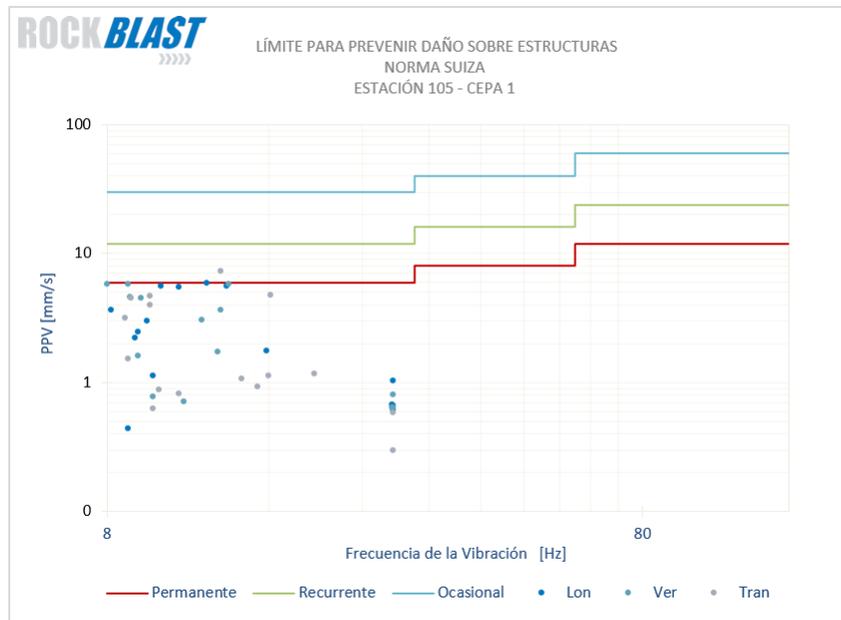


Figura 7.8: Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Cepa 1

7.1.2.5. Evaluación sobre Norma SN 460 48 66 1991

Llevando a cabo un proceso similar al del primer periodo, se considera una velocidad umbral para la probabilidad de daño de 12.5 mm/s, el que es superado por 0% de los registros de vibración en la vertical en la Cepa 1.

7.1.3. Evaluación del impacto en infraestructura - Silo 2

7.1.3.1. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3

El Silo 2, al igual que el Silo 1, se considera una estructura de TIPO I, por lo tanto, de acuerdo a la Figura 7.1.3.1 ningún evento de vibración superó el umbral para generar una probabilidad de daño en la infraestructura.

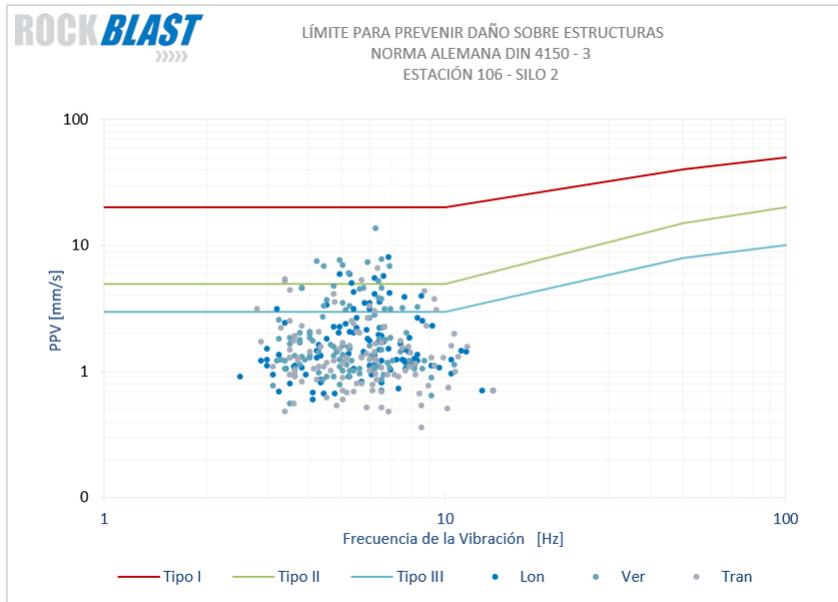


Figura 7.9: Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Silo 2

7.1.3.2. Evaluación sobre criterio USBM RI 8507

Se considera el Silo 2 como Modern Home, ante lo lo cual ningún evento de vibración genera la velocidad necesaria para incrementar la posibilidad de daño en el Silo 2, tal como se aprecia el la Figura 7.1.3.2.

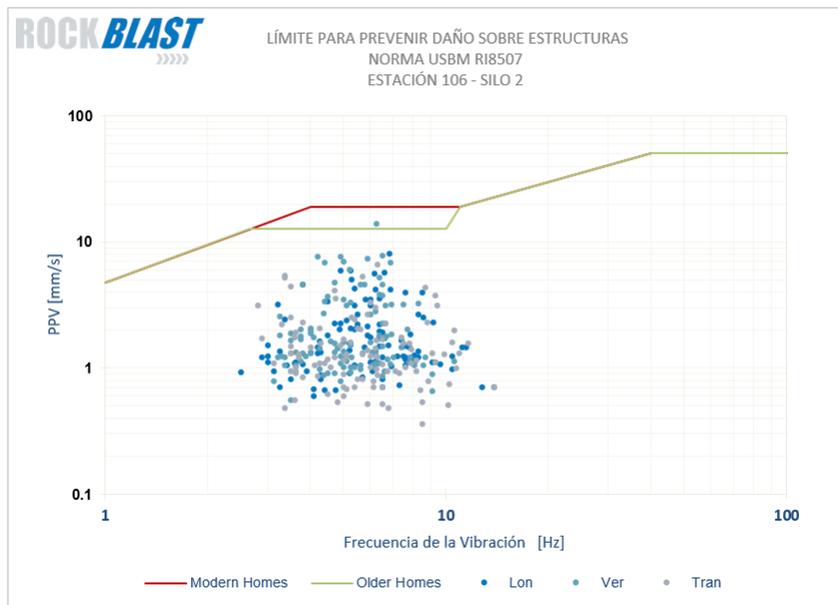


Figura 7.10: Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Silo 2

7.1.3.3. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93

El Silo 2 pertenece al GRUPO I de la norma española. En la Figura 7.1.3.3 se muestra que ningún evento analizado supera este umbral.

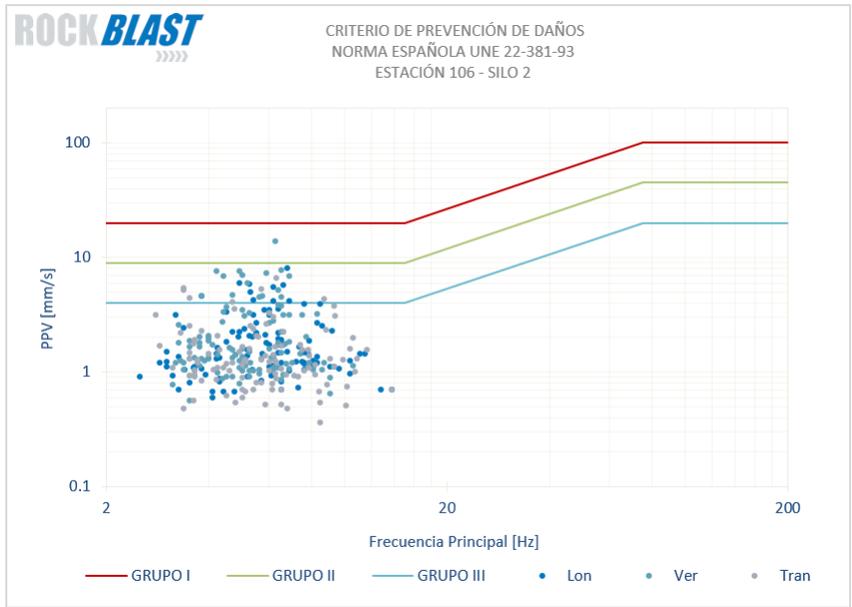


Figura 7.11: Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Silo 2

7.1.3.4. Evaluación sobre Norma SN 640 315a

Considerando el Silo 2 como una estructura poco susceptible, se tiene según la Figura 7.1.3.4 que ninguno de los eventos de tronadura supera el mínimo umbral para la ocurrencia de daño.

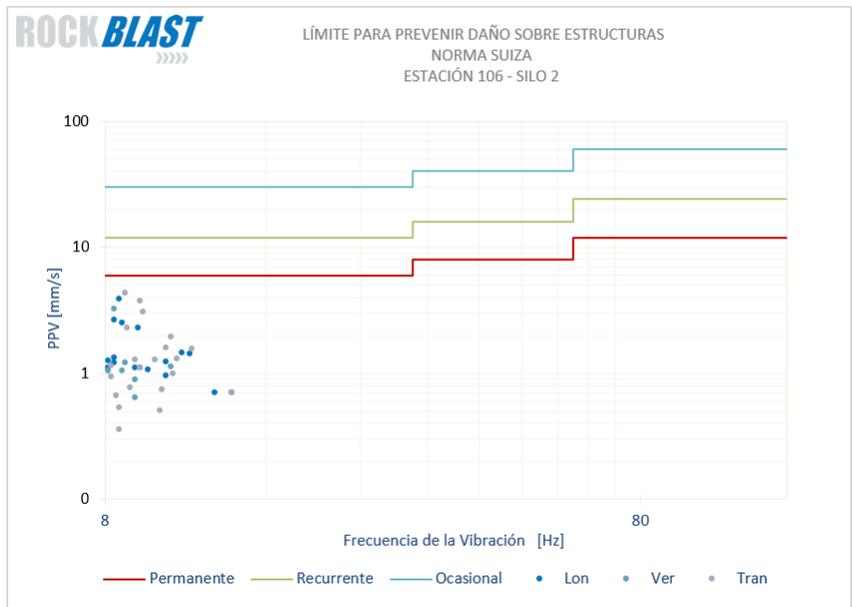


Figura 7.12: Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Silo 2

7.1.3.5. Evaluación sobre Norma SN 460 48 66 1991

Llevando a cabo cálculos homólogos a los realizados en el Silo 1 se tiene que $v = 12,5 \text{ mm/s}$. Umbral que es superado por menos del 1% de los valores de vibración en la componente

vertical. Esto podría constituir un pequeño indicio de peligro para el Silo 2. Sin embargo, el volumen de eventos que supera este valor es muy bajo, siendo solo 1 evento de categoría A de 108 totales. Posterior a este evento, ninguna otra tronadura produjo un valor superior a los 12,5 mm/s en la vertical.

7.1.4. Evaluación del impacto en infraestructura - Harneros - Fundación 2

7.1.4.1. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3

La fundación se comporta como estructura TIPO I. De acuerdo a la Figura 7.1.4.1 no hay niveles de vibración sobre este umbral.

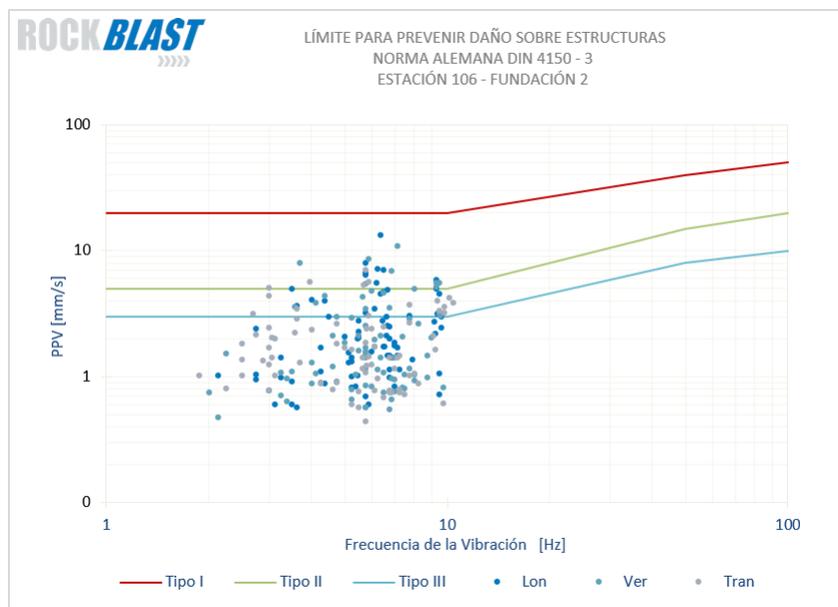


Figura 7.13: Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Fundación 2

7.1.4.2. Evaluación sobre criterio USBM RI 8507

De la Figura 7.1.4.2 se puede observar que no existen valores de velocidad sobre el umbral para esta estructura.

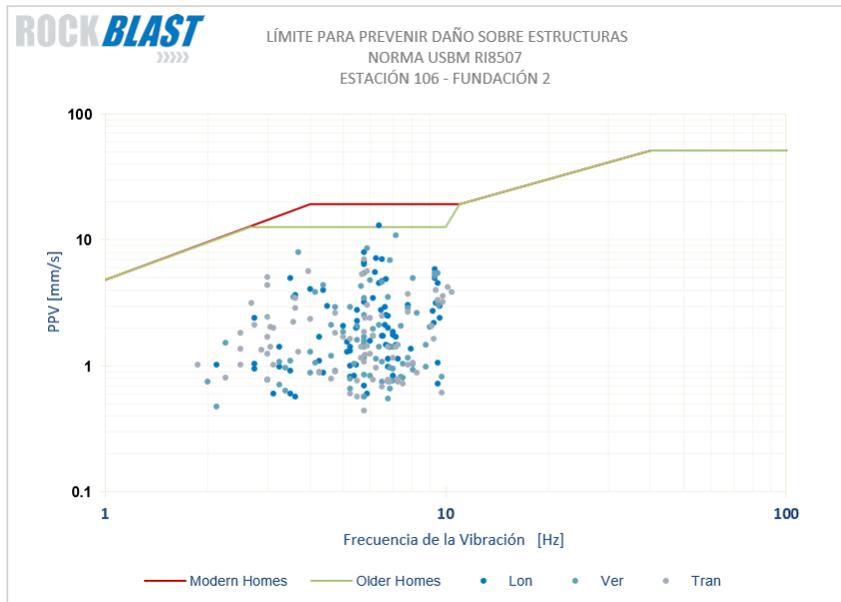


Figura 7.14: Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Fundación 2

7.1.4.3. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93

Infraestructura perteneciente al GRUPO I de la norma. De la Figura 7.1.4.3 se desprende que no existen eventos de vibración que puedan provocar peligro.

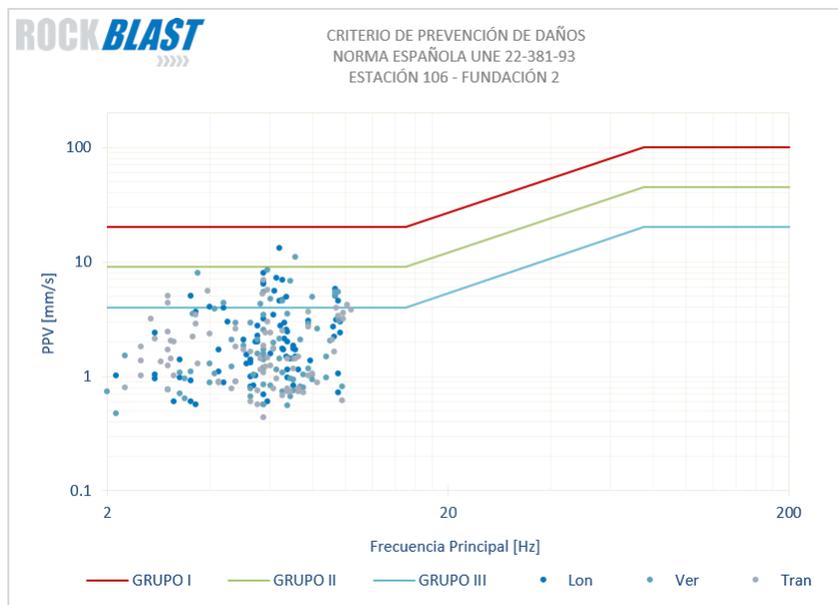


Figura 7.15: Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Fundación 2

7.1.4.4. Evaluación sobre Norma SN 640 315a

En la Figura 7.1.4.4 se aprecia que no existen niveles de vibración que puedan ocasionar daño sobre la estructura.

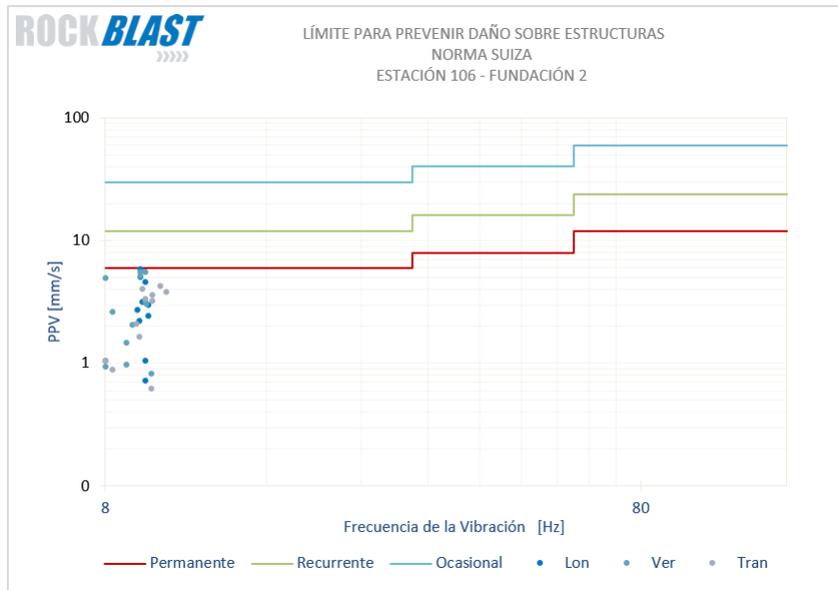


Figura 7.16: Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Fundación 2

7.1.4.5. Evaluación sobre Norma SN 460 48 66 1991

El valor de velocidad vertical indicativo, v_0 , se obtiene de la Ecuación (7.4).

$$v_0 = 35 + 70/2 = 52,5 \text{ mm/s} \quad (7.4)$$

Considerando un tipo de edificación industrial, $F_b = 1,2$, y tipo de material, $F_m = 1,2$, se tiene que $F_k = 1,44$ de acuerdo a la Ecuación 7.5 .

$$F_k = 1,2 * 1,2 = 1,44 \quad (7.5)$$

Ahora, tomando en cuenta la distancia se tiene $F_d = 0,22$, y el trabajo de mina, $F_t = 0,75$. Por lo tanto el umbral de velocidad para la probabilidad de daño en el Silo 1 sería de 12,5 mm/s según la Ecuación (7.6).

$$v = 52,5 * 1,44 * 0,22 * 0,75 = 12,5 \text{ mm/s} \quad (7.6)$$

Ninguno de los datos medidos supera el umbral calculado para este periodo.

7.1.5. Evaluación del impacto en infraestructura - Pila 12A

7.1.5.1. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3, geófono en terreno

En la Figura 7.1.5.1 no se observan eventos que podrían haber generado daño en terreno.

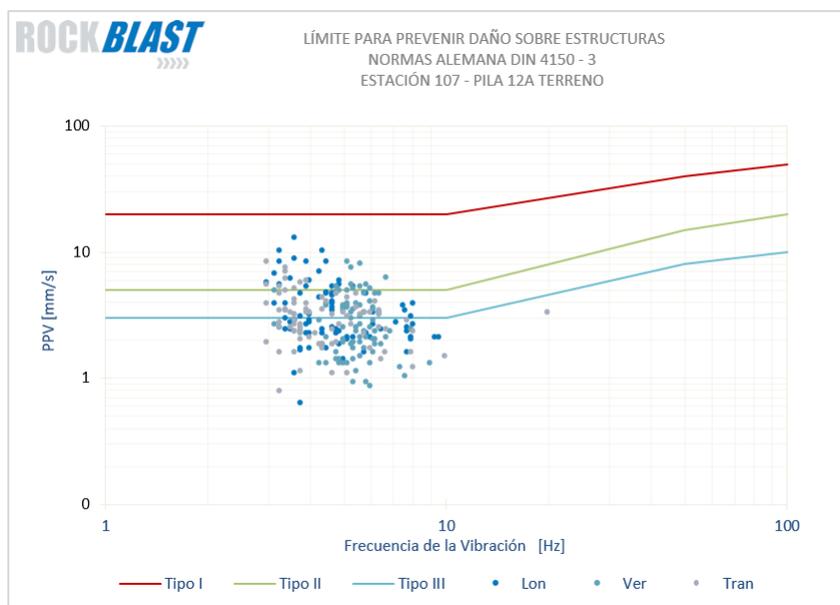


Figura 7.17: Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Pila 12A - Terreno

7.1.5.2. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3, geófono en cañería HDPE

Al analizar la Figura 7.1.5.2 se ve que existe una creciente probabilidad de daño incluso en el mejor escenario estructural posible para la cañería HDPE.

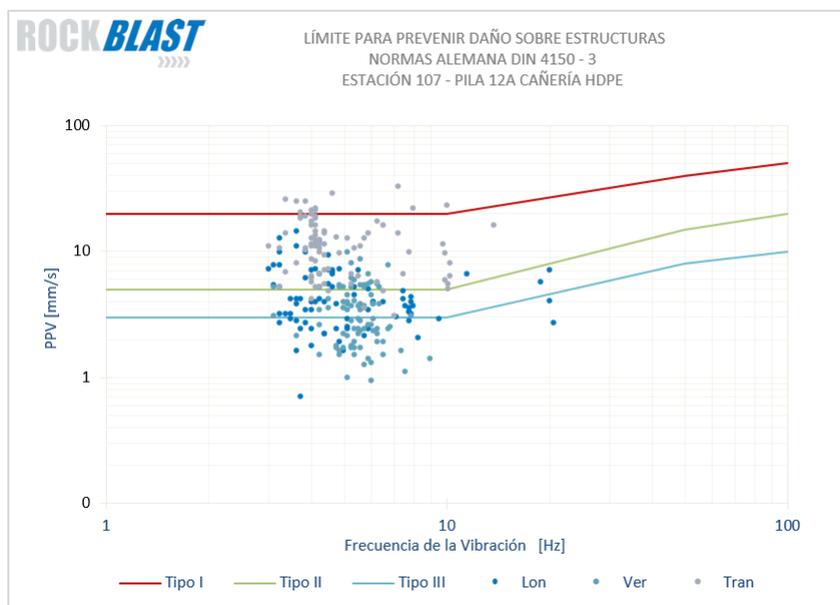


Figura 7.18: Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Pila 12A - HDPE

7.1.5.3. Evaluación sobre criterio USBM RI 8507, geófono en terreno

De la Figura 7.1.5.3 no se observan datos sobrepasando el umbral de daño.

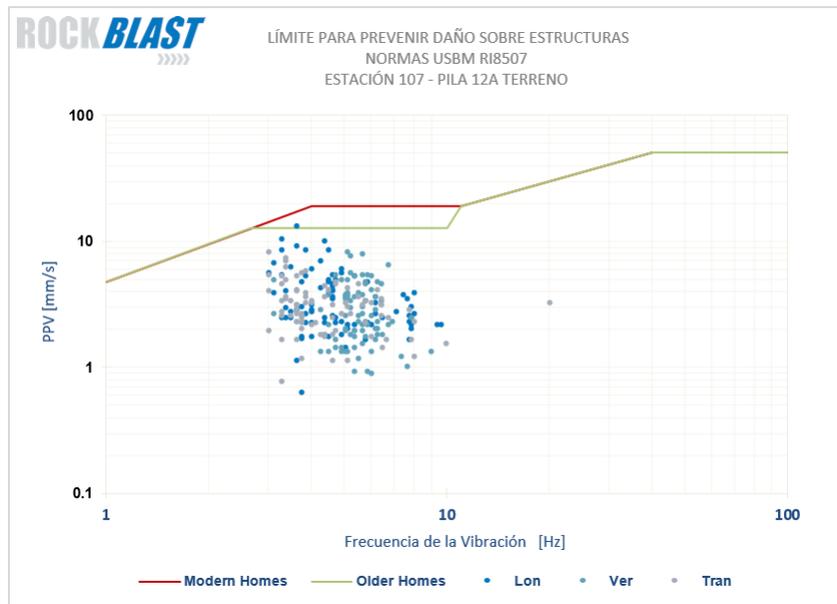


Figura 7.19: Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Pila 12A - Terreno

7.1.5.4. Evaluación sobre criterio USBM RI 8507, geófono en cañería HDPE

Existe, al igual que bajo el criterio Alemán, una probabilidad de daño sobre la cañería HDPE según la Figura 7.1.5.4.

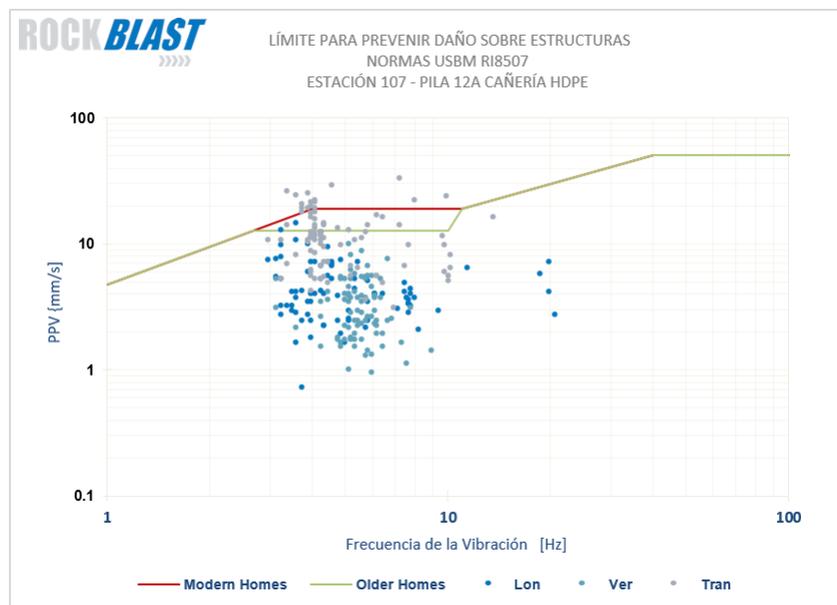


Figura 7.20: Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Pila 12A - HDPE

7.1.5.5. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93, geófono en terreno

De la Figura 7.1.5.5 no se desprende alguna alerta de daño en terreno.

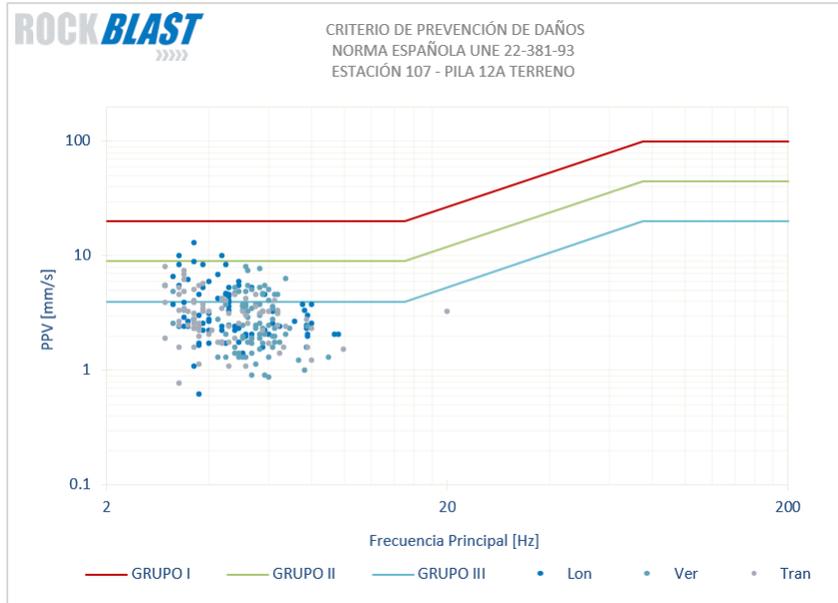


Figura 7.21: Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Estación 107 Terreno - Primer periodo

7.1.5.6. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93, geófono en cañería HDPE

Para esta norma se vuelven a repetir las alertas que dan cuenta de un posible daño sobre l cañería HDPE de acuerdo a la Figura 7.1.5.6.

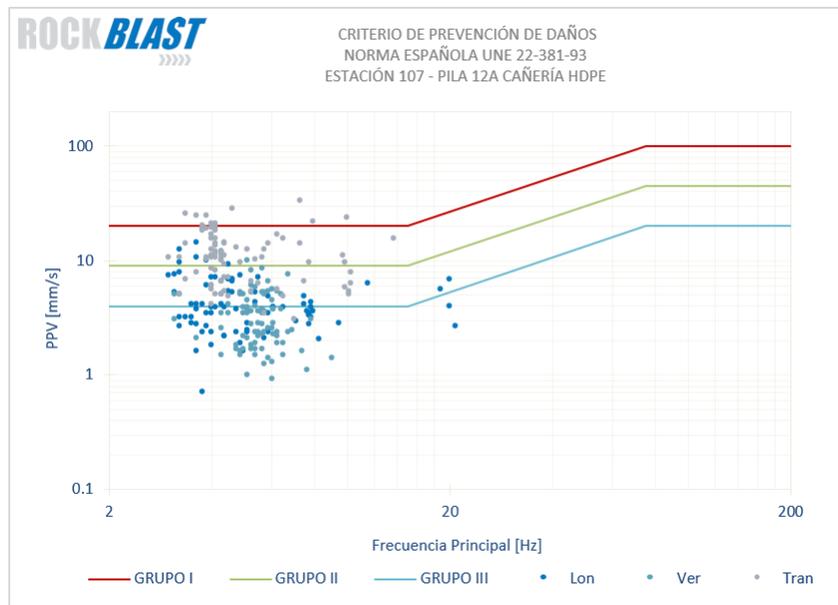


Figura 7.22: Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Pila 12A - HDPE

7.1.5.7. Evaluación sobre Norma SN 640 315a, geófono en terreno

En la Figura 7.1.5.7 no se observan datos que sobrepasen el umbral de daño.

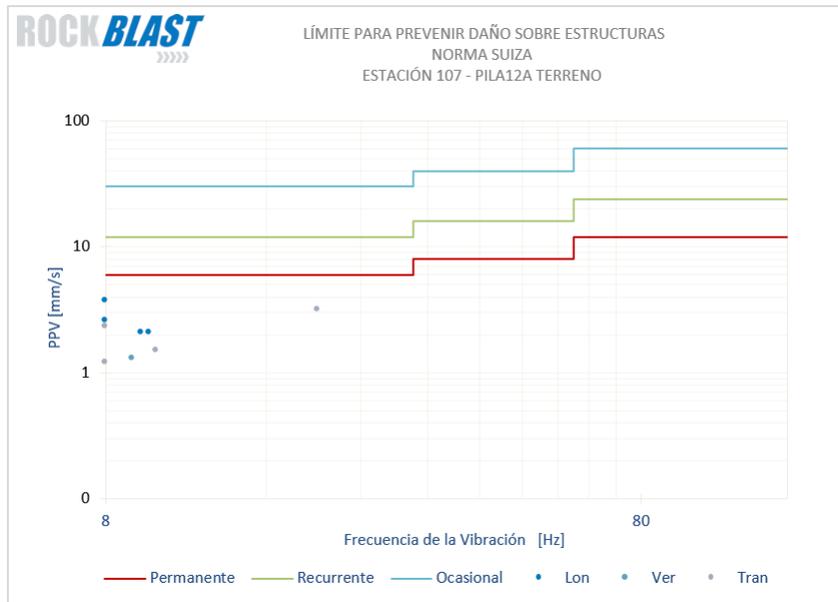


Figura 7.23: Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Estación 107 Terreno - Primer periodo

7.1.5.8. Evaluación sobre Norma SN 640 315a, geófono en cañería HDPE

No se observan valores de velocidad en la Figura 7.1.5.8 en los que se supere el umbral de daño dentro del rango de frecuencias que analiza este criterio.

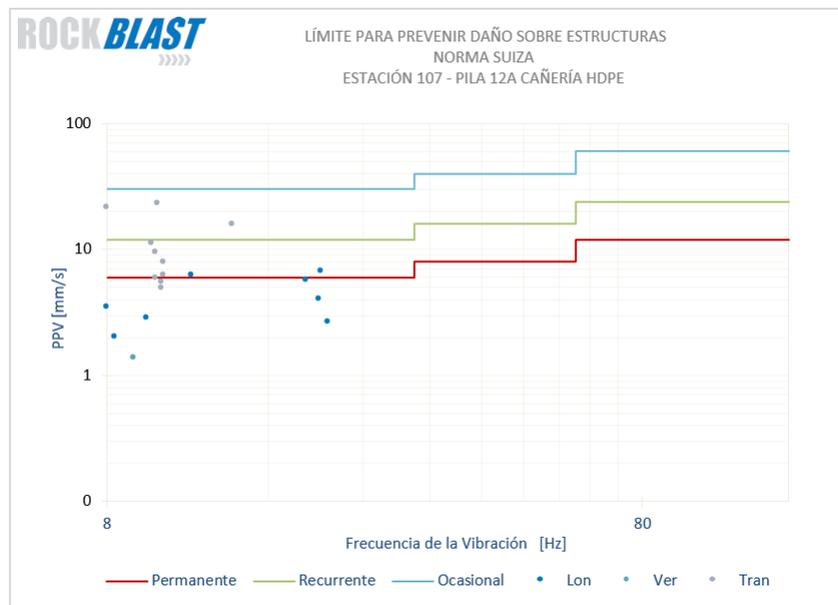


Figura 7.24: Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Pila 12A - HDPE

7.1.5.9. Evaluación sobre Norma SN 460 48 66 1991, geófono en terreno

Esta norma no se puede evaluar sin conocer las propiedades de la estructura estudiada.

7.1.5.10. Evaluación sobre Norma SN 460 48 66 1991, geófono en cañería HDPE

No existe una categoría para cañerías HDPE.

7.1.6. Evaluación del impacto en infraestructura - Correa CV-07 - Cepa 4

7.1.6.1. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3

Al igual que la Cepa 1, se considera la Cepa 4 como una estructura de alta resistencia estructural de acuerdo a esta norma. En la Figura 7.1.6.1 se ve que existen niveles de vibración que superan este umbral, por lo que existe una alta probabilidad de daño sobre la Cepa 4.

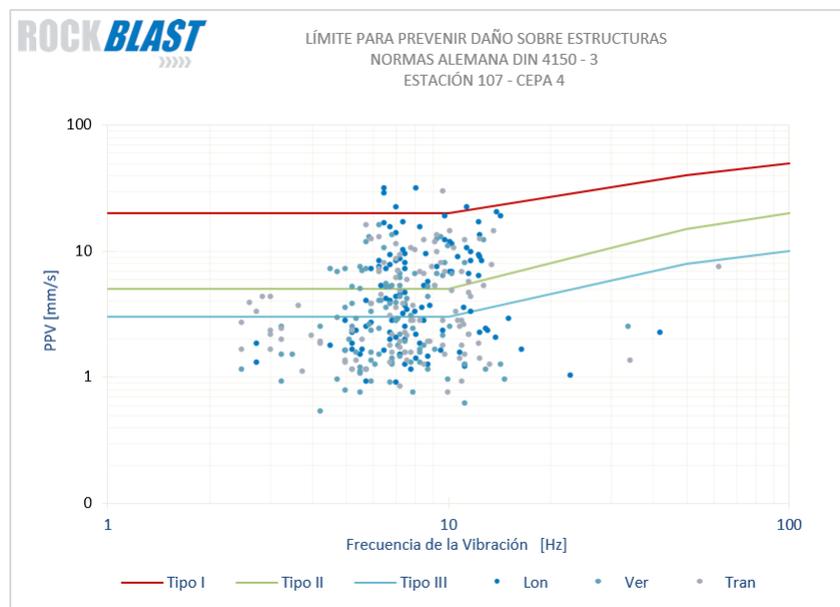


Figura 7.25: Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Cepa 4

7.1.6.2. Evaluación sobre criterio USBM RI 8507

Se puede observar en la Figura 7.1.6.2 como la evaluación sobre este criterio entrega resultados similares a los del criterio Alemán, en donde la estructura tiene gran riesgo de sufrir daño por vibraciones.

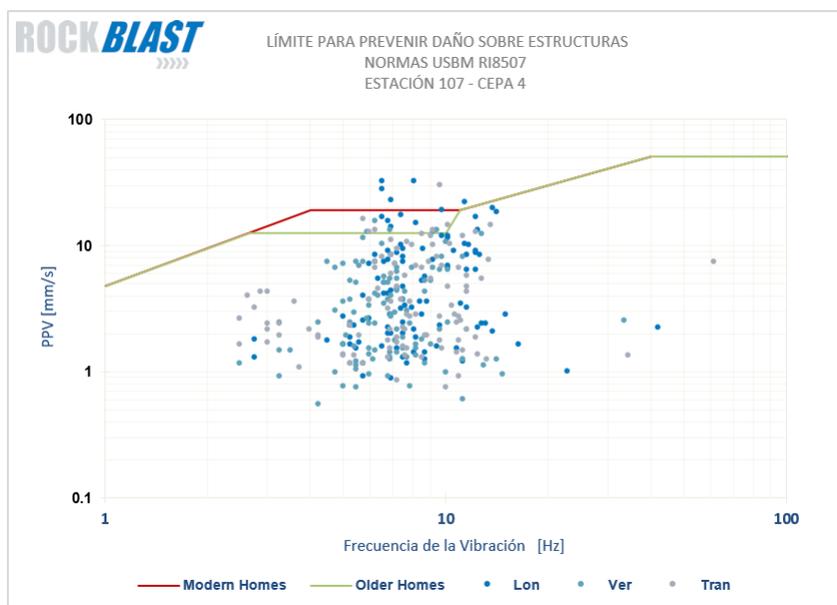


Figura 7.26: Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Cepa 4

7.1.6.3. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93

Se mantienen los resultados anteriormente vistos para el criterio español. En la Figura 7.1.6.3 que las vibraciones que aumentan a niveles en donde la probabilidad de daño es alta.

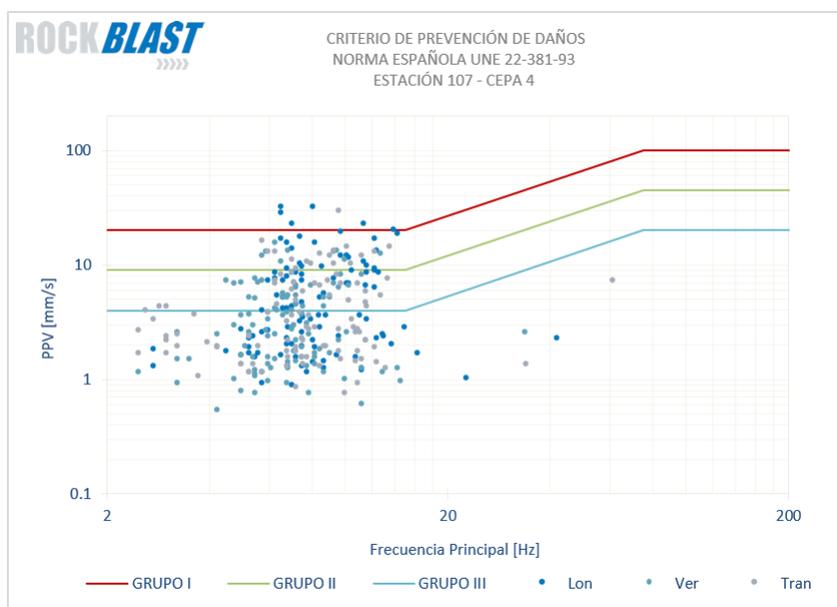


Figura 7.27: Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Cepa 4

7.1.6.4. Evaluación sobre Norma SN 640 315a

Nuevamente esta norma genera resultados menos conservadores en cuanto a evitar el impacto de las vibraciones sobre infraestructura. Ninguno de los valores reflejados en la Figura 7.1.6.4 entrega indicios de posible daño sobre la estructura. No obstante, es importante

considerar que el rango de frecuencias que considera esta norma podría estar sesgando los resultados.

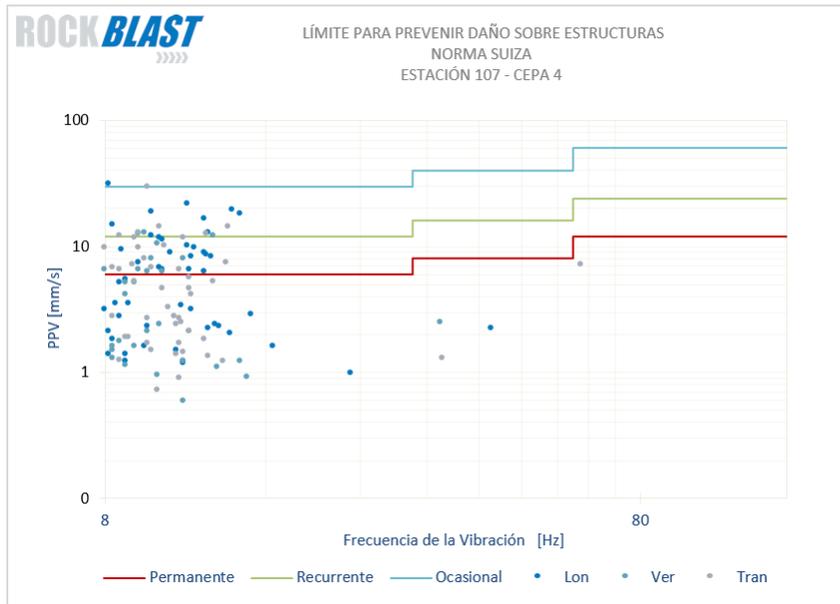


Figura 7.28: Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Cepa 4

7.1.6.5. Evaluación sobre Norma SN 460 48 66 1991

Se considera la misma velocidad umbral que para la Cepa 1 de 12.5 mm/s. Para este valor, 4% de las mediciones de velocidad de partícula lo superan, indicando que solo unos pocos eventos de vibración tienen alta probabilidad de generar daño.

7.1.7. Evaluación del impacto en infraestructura - Pila 4

7.1.7.1. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3, geófono en terreno

En la Figura 7.1.7.1 no se observan datos que sobrepasen los niveles de daño en terreno.

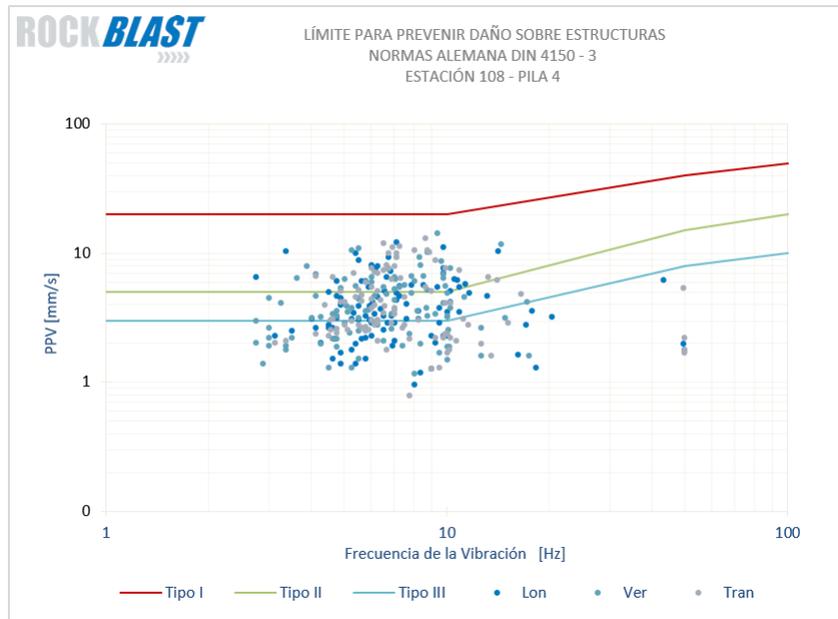


Figura 7.29: Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Pila 4 - Terreno

7.1.7.2. Evaluación sobre Norma DIN 4150-3, geófono en cañería HDPE

Al graficar los datos obtenidos en el geófono en la cañería HDPE en la Figura 7.1.7.2, se observan una gran cantidad de datos sobre los umbrales de daño.

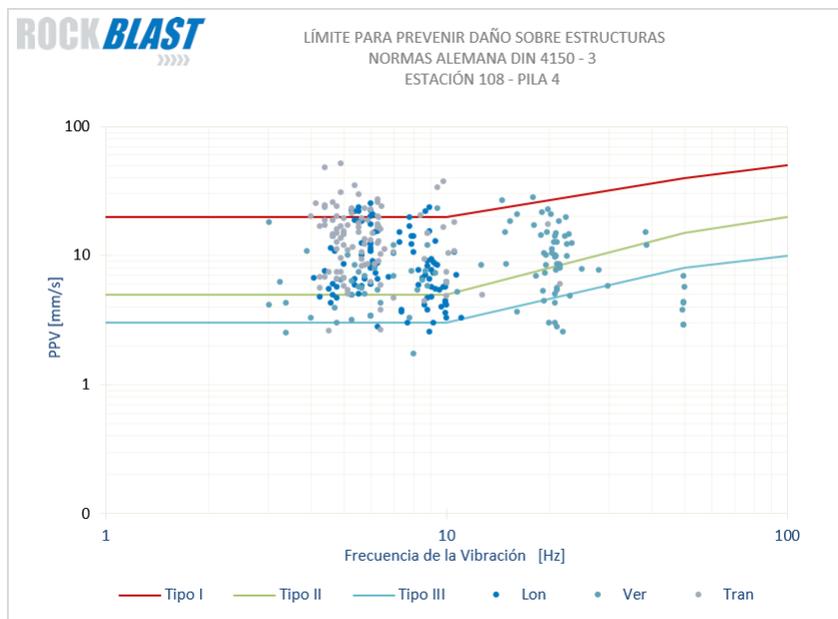


Figura 7.30: Evaluación sobre Norma DIN 4150-3 - Pila 4 - HDPE

7.1.7.3. Evaluación sobre criterio USBM RI 8507, geófono en terreno

La Figura 7.1.7.3 muestra que no hay eventos que pudiesen afectar la infraestructura en terreno.

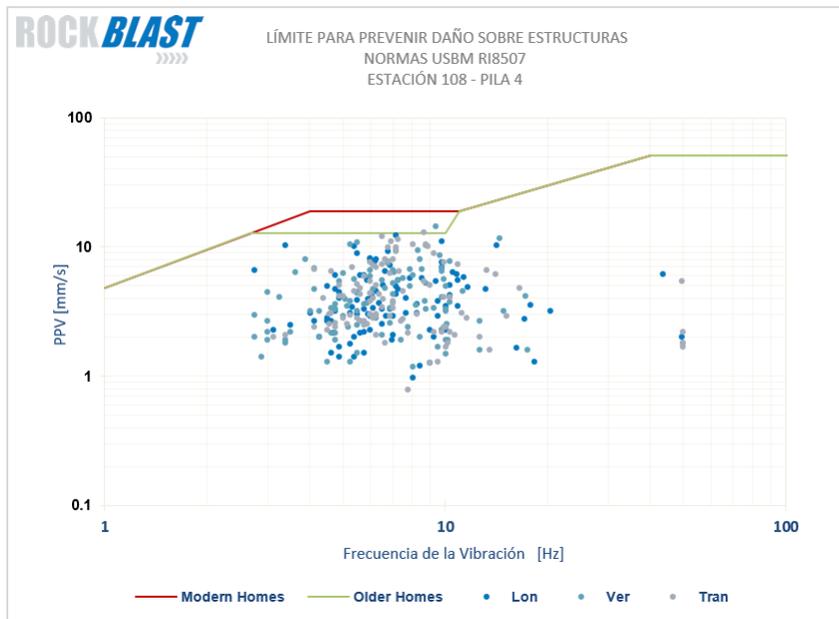


Figura 7.31: Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Pila 4 - Terreno

7.1.7.4. Evaluación sobre criterio USBM RI 8507, geófono en cañería HDPE

El geófono en la cañería capturó eventos que si sobrepasan el umbral de daño planteado por este criterio, tal como se ve en la Figura 7.1.7.4.

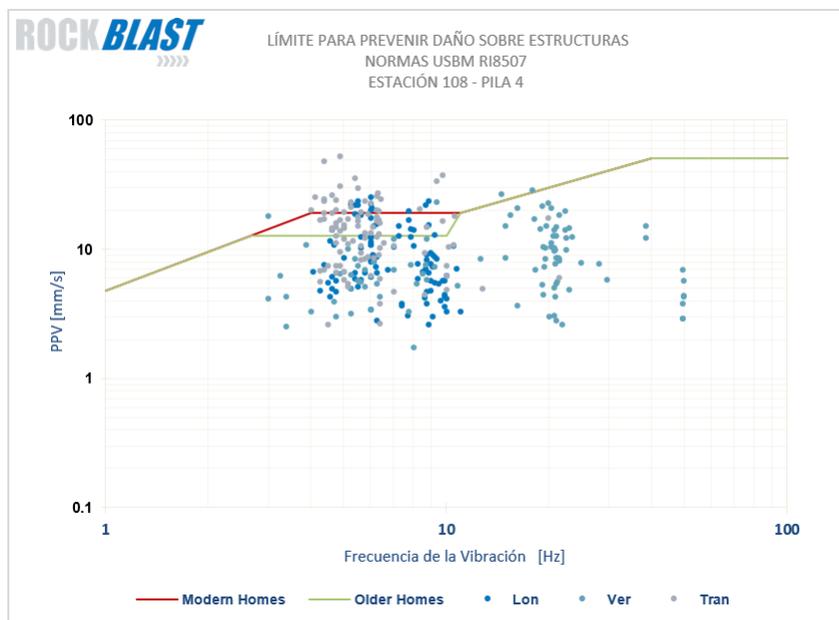


Figura 7.32: Evaluación sobre Criterio USBM RI8507 - Pila 4 - HDPE

7.1.7.5. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93, geófono en terreno

Según la norma española, en la Figura 7.1.7.5, se puede ver que ninguno de los datos sobrepasó los valores para generar un potencial daño.

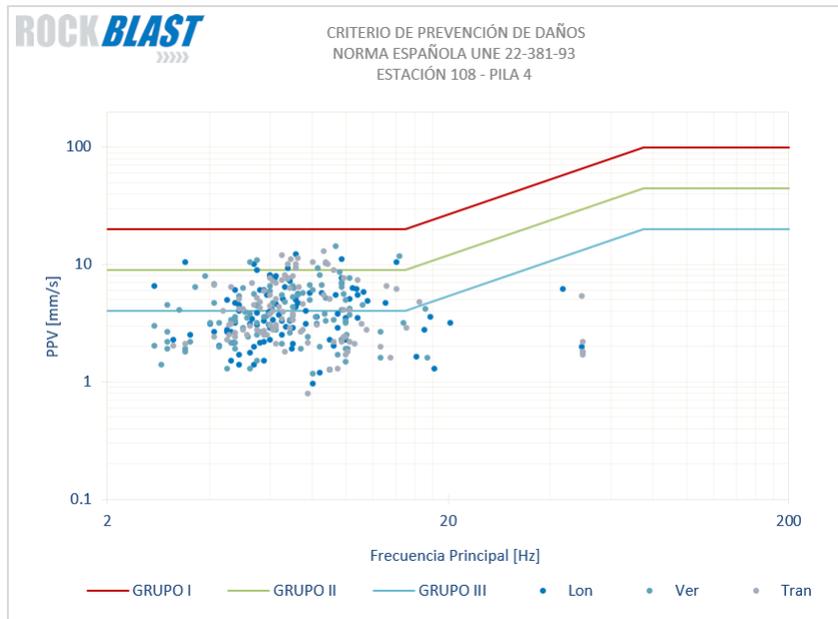


Figura 7.33: Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Pila 4 - Terreno

7.1.7.6. Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93, geófono en cañería HDPE

Al evaluar los datos de la cañería, como en la Figura 7.1.7.6, se observa que al igual que los criterios vistos anteriormente, hay eventos que podrían provocar daños en la infraestructura.

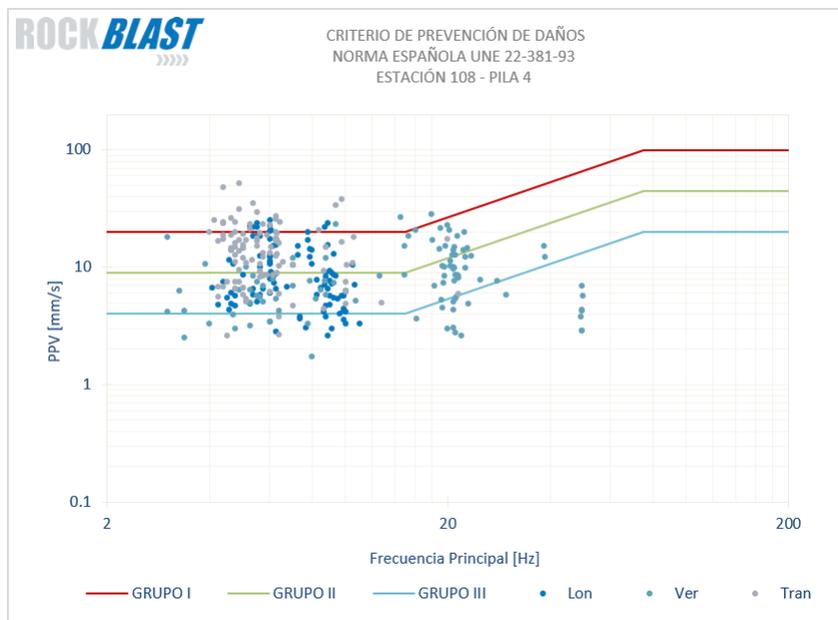


Figura 7.34: Evaluación sobre Norma UNE 22-381-93 - Pila 4 - HDPE

7.1.7.7. Evaluación sobre Norma SN 640 315a, geófono en terreno

Los datos proyectados sobre esta norma en la Figura 7.1.7.7, reflejan que no se debería generar daño sobre el terreno.

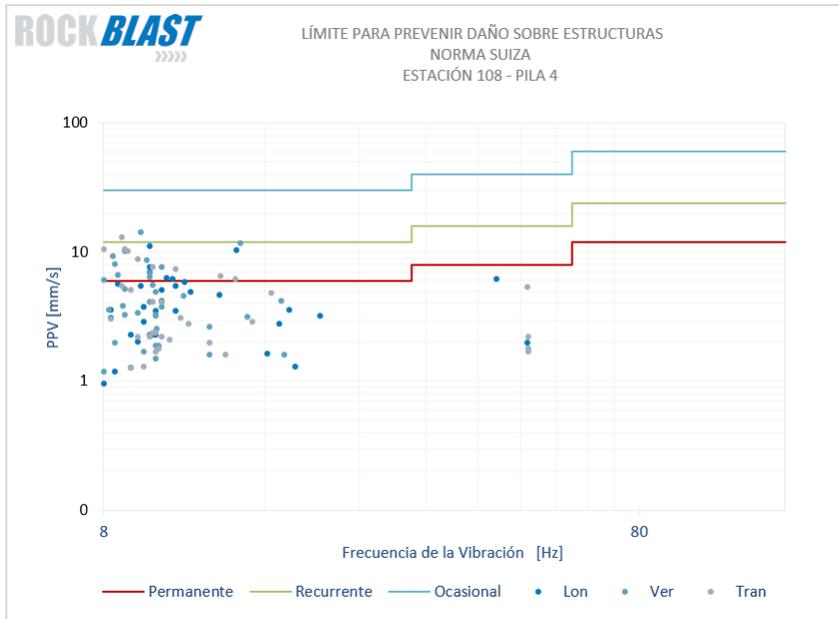


Figura 7.35: Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Pila 4 - Terreno

7.1.7.8. Evaluación sobre Norma SN 640 315a, geófono en cañería HDPE

En la Figura 7.1.7.8 se ve que algunos datos sobrepasan el umbral de daño, complementando los resultados anteriores sobre la cañería.

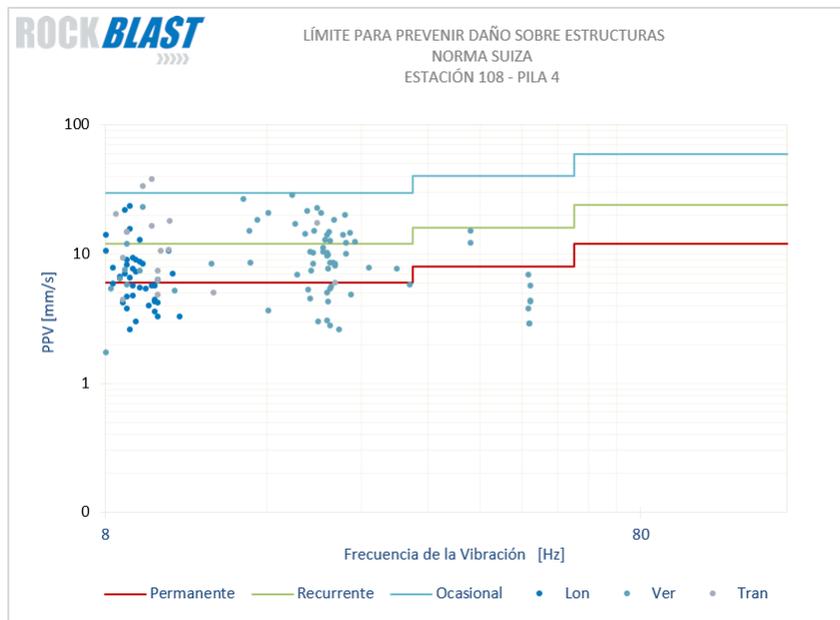


Figura 7.36: Evaluación sobre Norma SN 640 315a - Pila 4 - HDPE

7.1.7.9. Evaluación sobre Norma SN 460 48 66 1991, geófono en terreno

No es posible evaluar el terreno bajo esta norma.

7.1.7.10. Evaluación sobre Norma SN 460 48 66 1991, geófono en cañería HDPE

No existe una categoría para esta estructura descrita en la norma.

7.2. Elaboración de los modelos de vibración - Ley escalar de Devine

7.2.1. Ley escalar por estación para todos los datos asociados

7.2.1.1. Ubicación: Silo 1

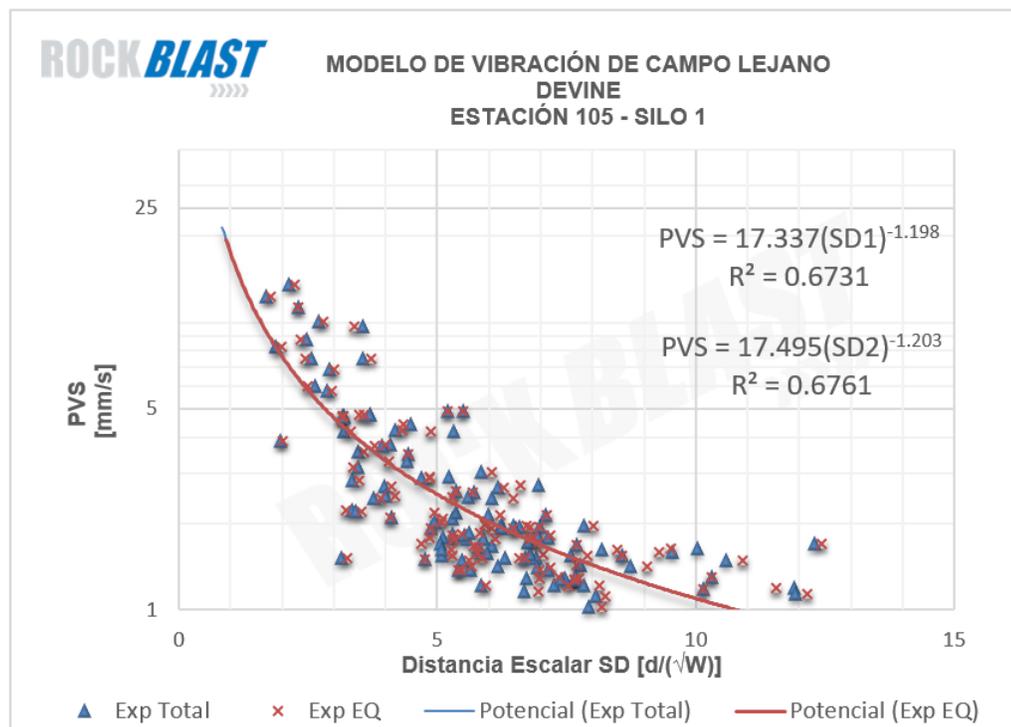


Figura 7.37: Modelos de vibración - Vector suma - SILO 1 - Categorías A,B y X

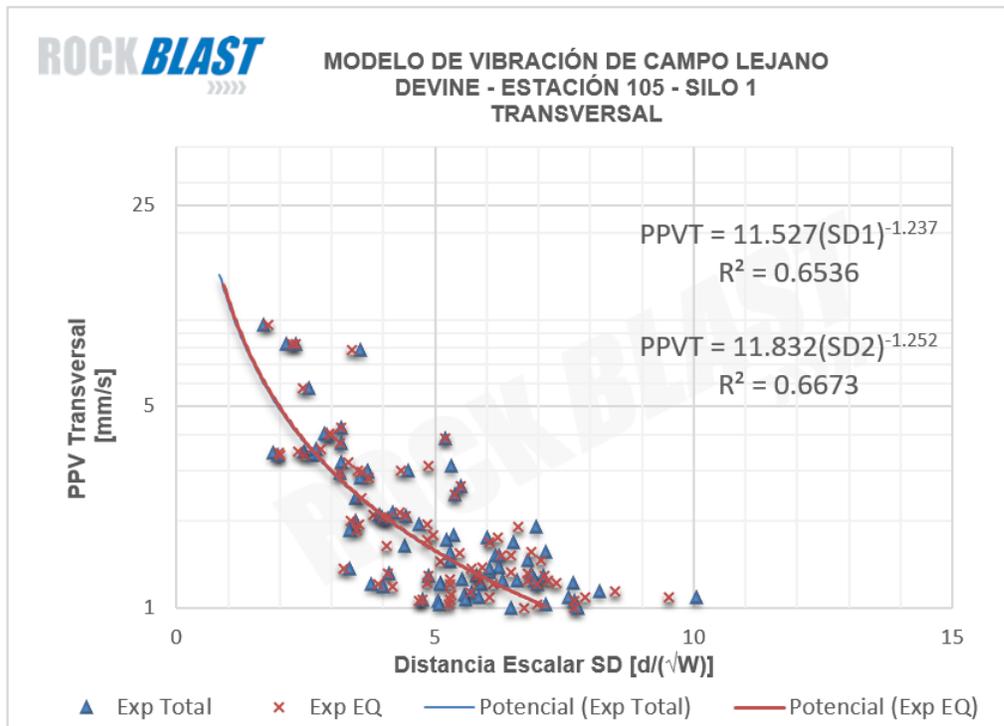


Figura 7.38: Modelos de vibración - Transversal - SILO 1 - Categorías A,B y X

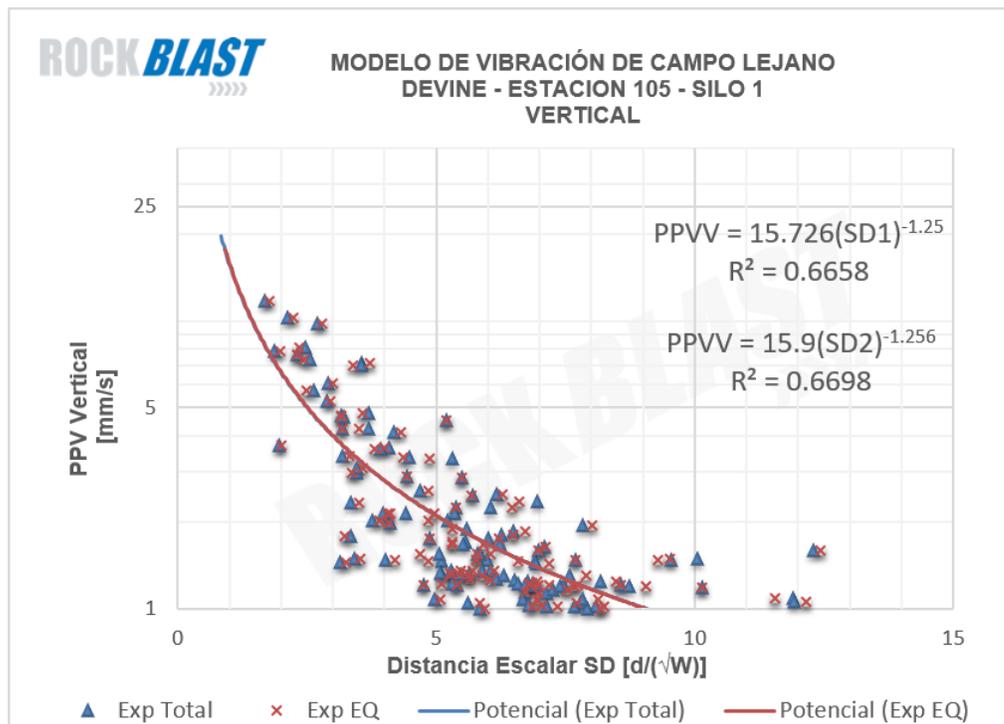


Figura 7.39: Modelos de vibración - Vertical - SILO 1 - Categorías A,B y X

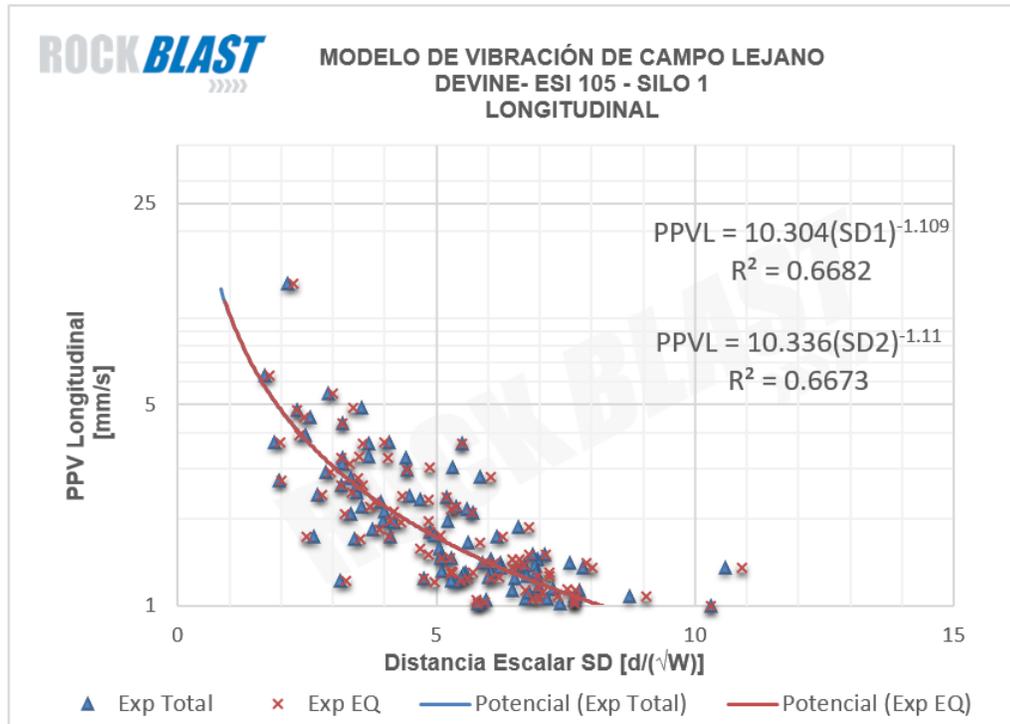


Figura 7.40: Modelos de vibración - Longitudinal - SILO 1 - Categorías A,B y X

7.2.1.2. Ubicación: Silo 2

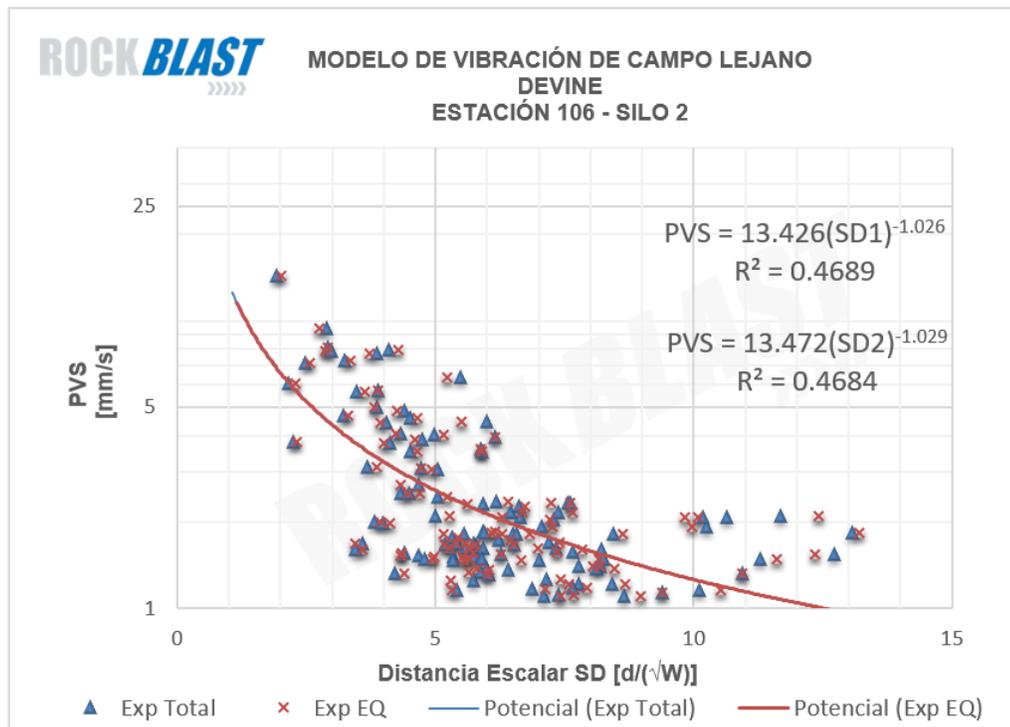


Figura 7.41: Modelos de vibración - Vector suma - SILO 2 - Categorías A,B y X

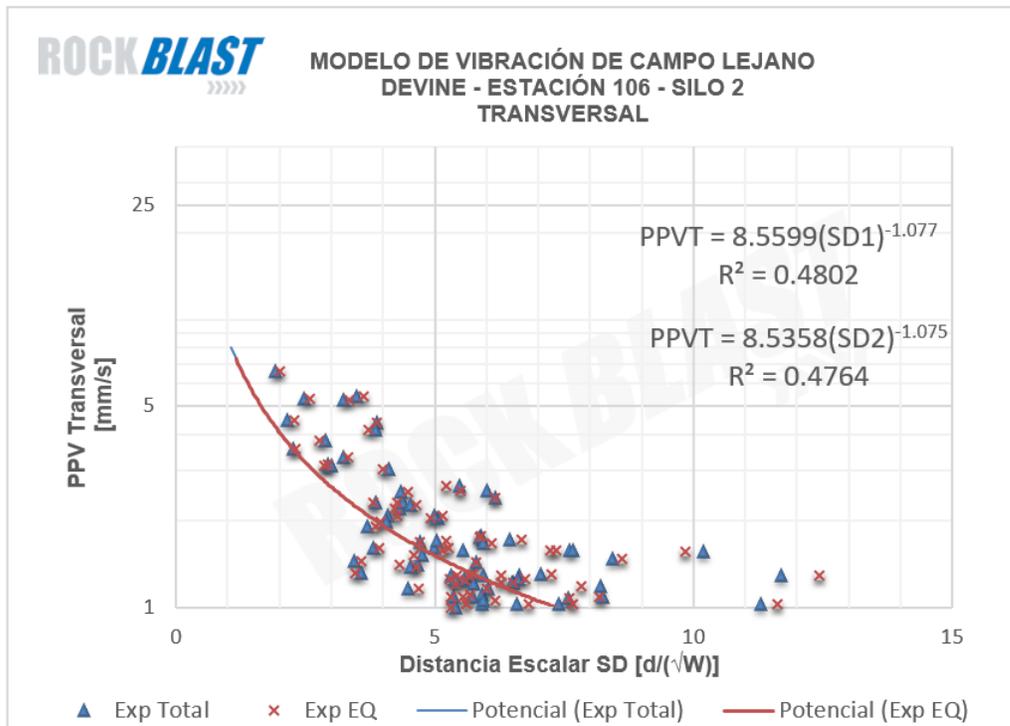


Figura 7.42: Modelos de vibración - Transversal - SILO 2 - Categorías A,B y X

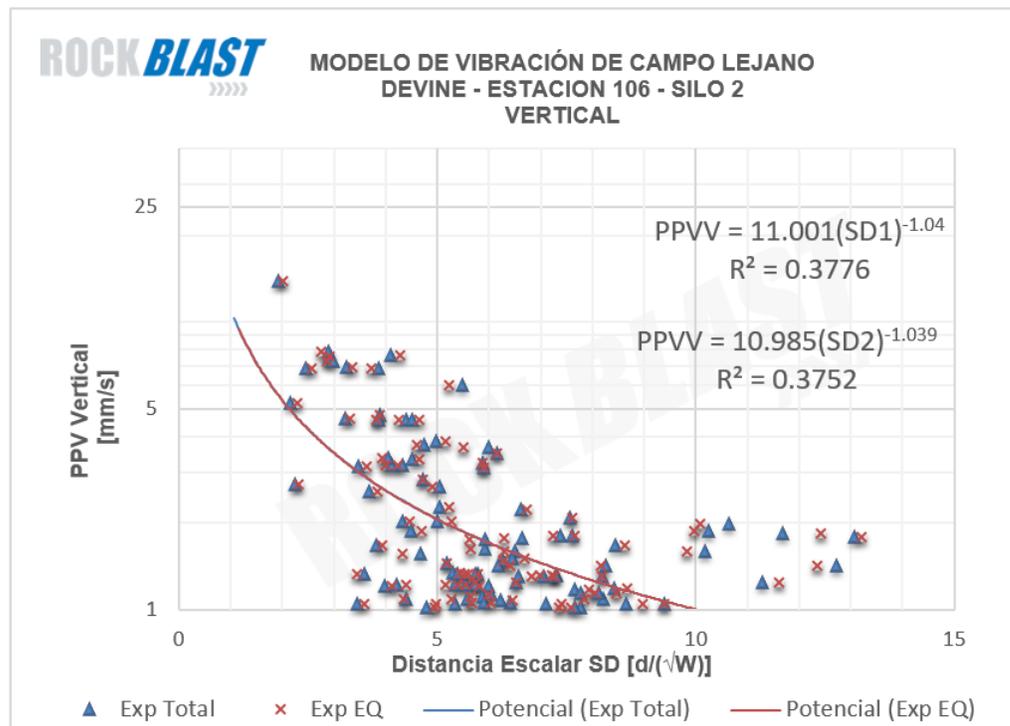


Figura 7.43: Modelos de vibración - Vertical - SILO 2 - Categorías A,B y X

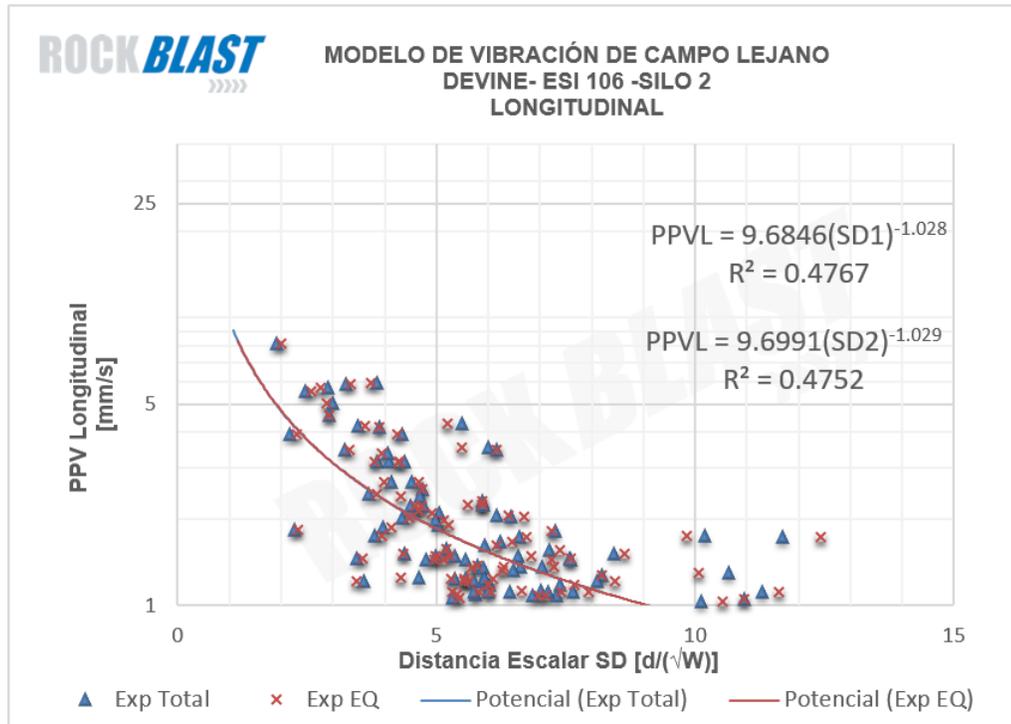


Figura 7.44: Modelos de vibración - Longitudinal - SILO 2 - Categorías A,B y X

7.2.1.3. Ubicación: Pila 12A

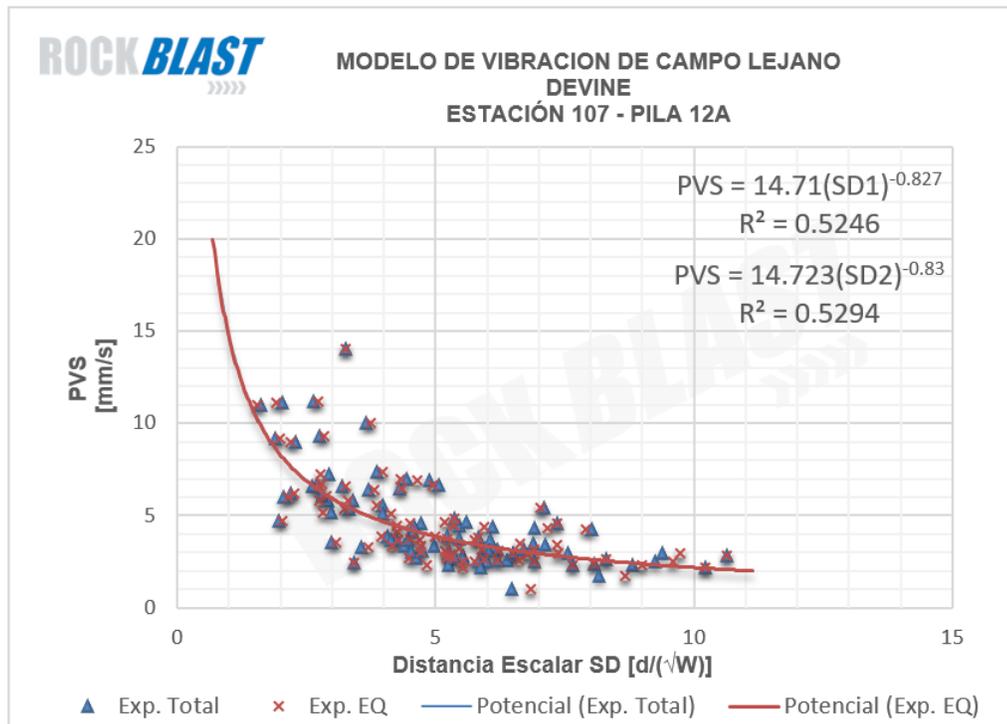


Figura 7.45: Modelos de vibración - Vector suma - PILA 12A - Categorías A,B y X

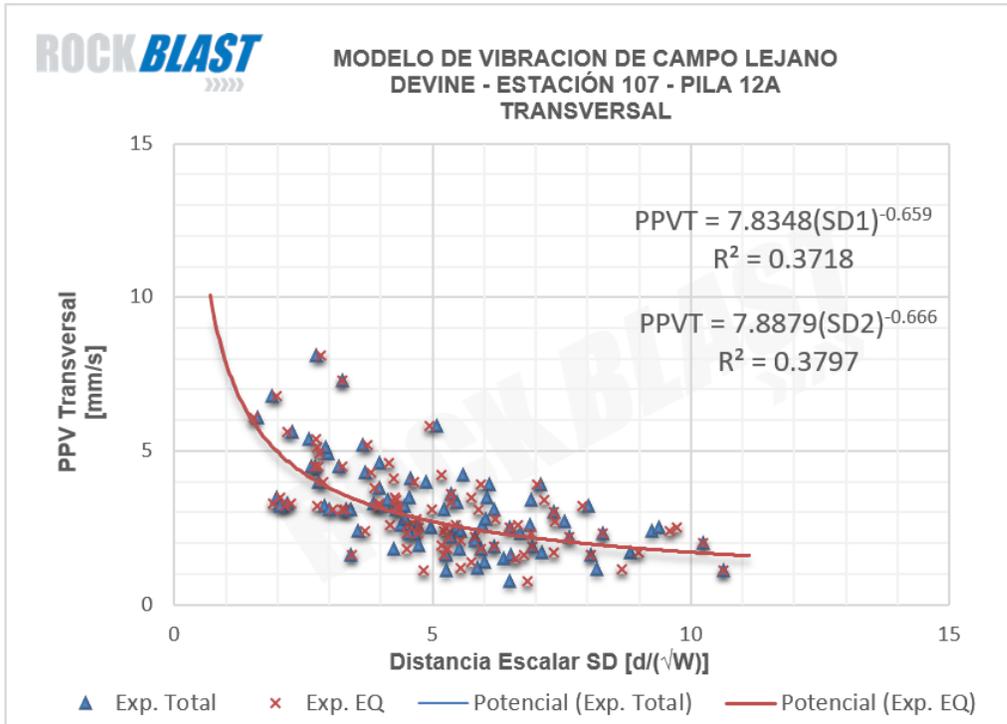


Figura 7.46: Modelos de vibración - Transversal - PILA 12A - Categorías A,B y X

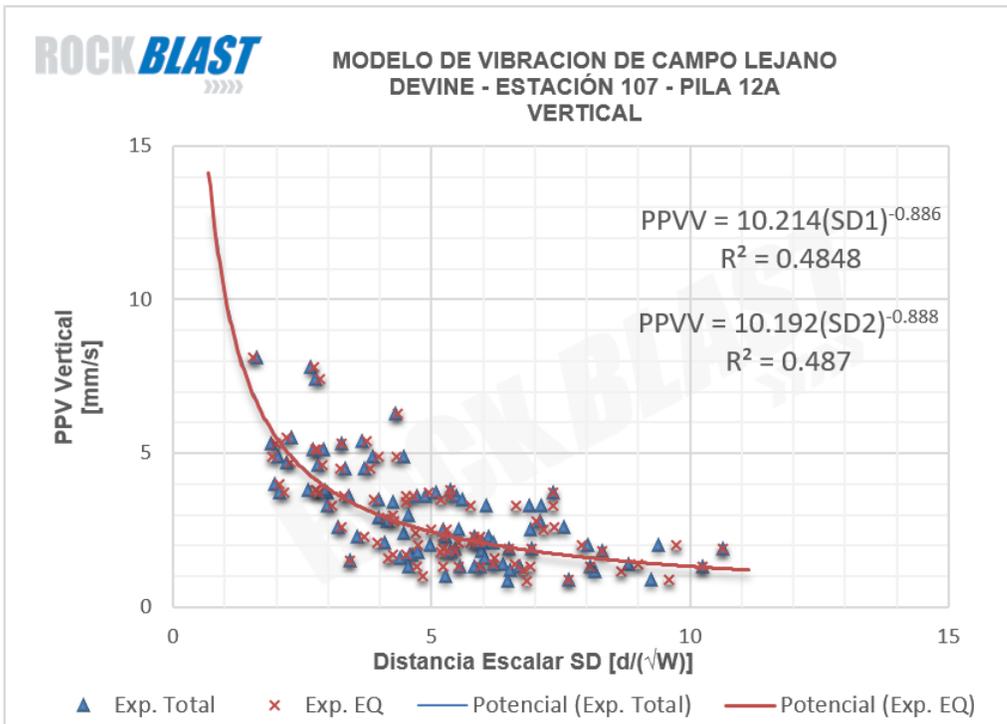


Figura 7.47: Modelos de vibración - Vertical - PILA 12A - Categorías A,B y X

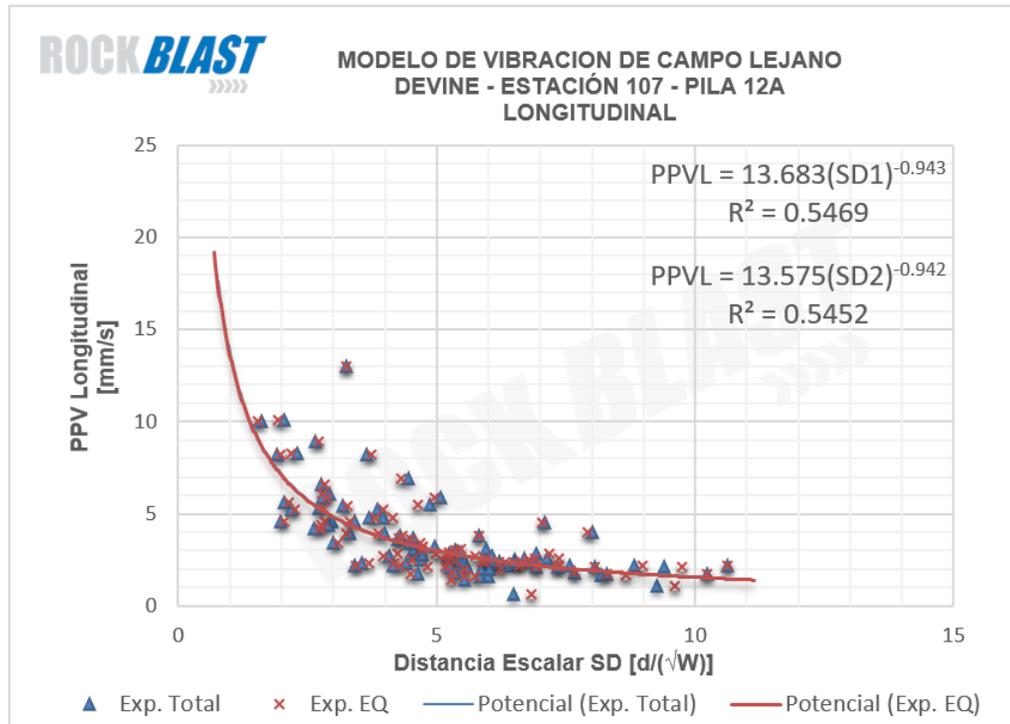


Figura 7.48: Modelos de vibración - Longitudinal - PILA 12A - Categorías A,B y X

7.2.1.4. Ubicación: Pila 4

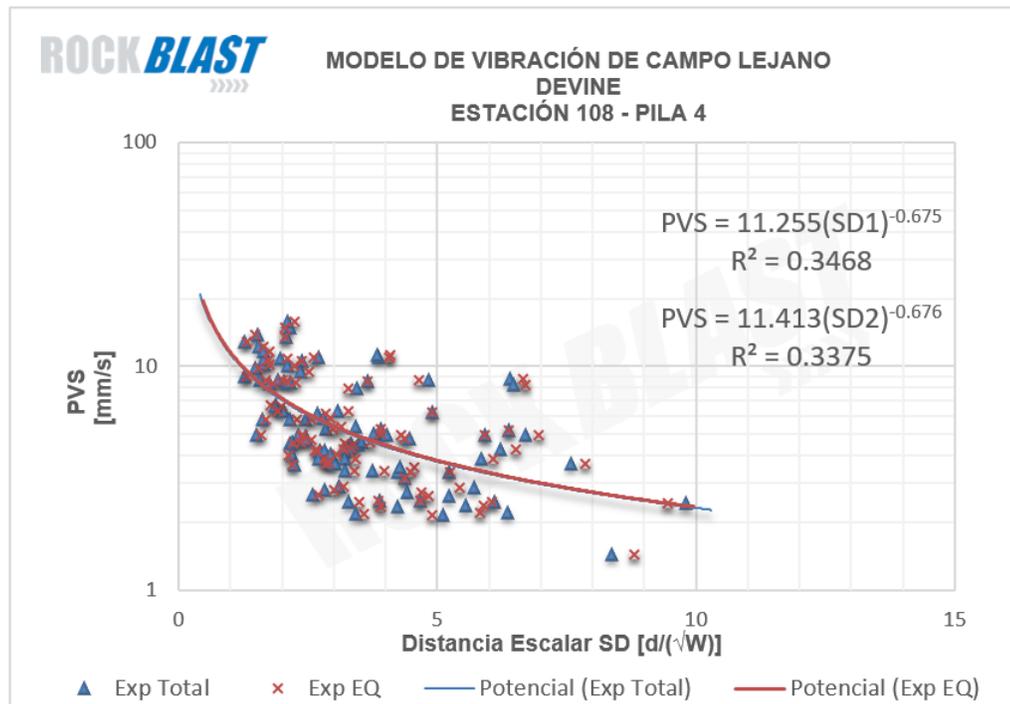


Figura 7.49: Modelos de vibración - Vector suma - PILA 12A - Categorías A,B y X

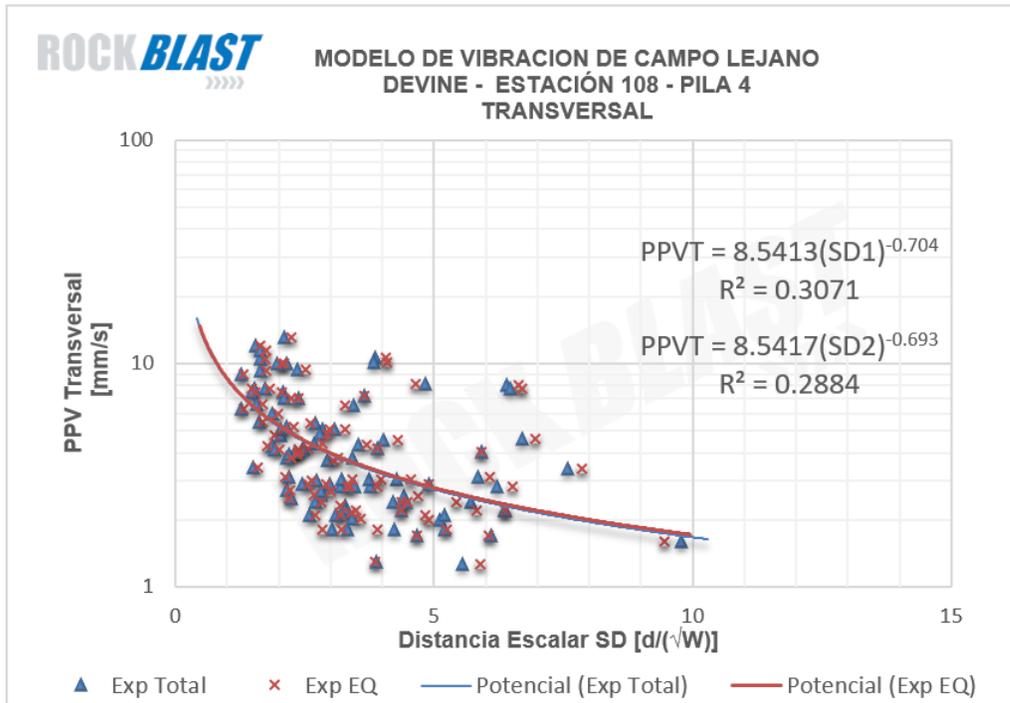


Figura 7.50: Modelos de vibración - Transversal - PILA 4 - Categorías A,B y X

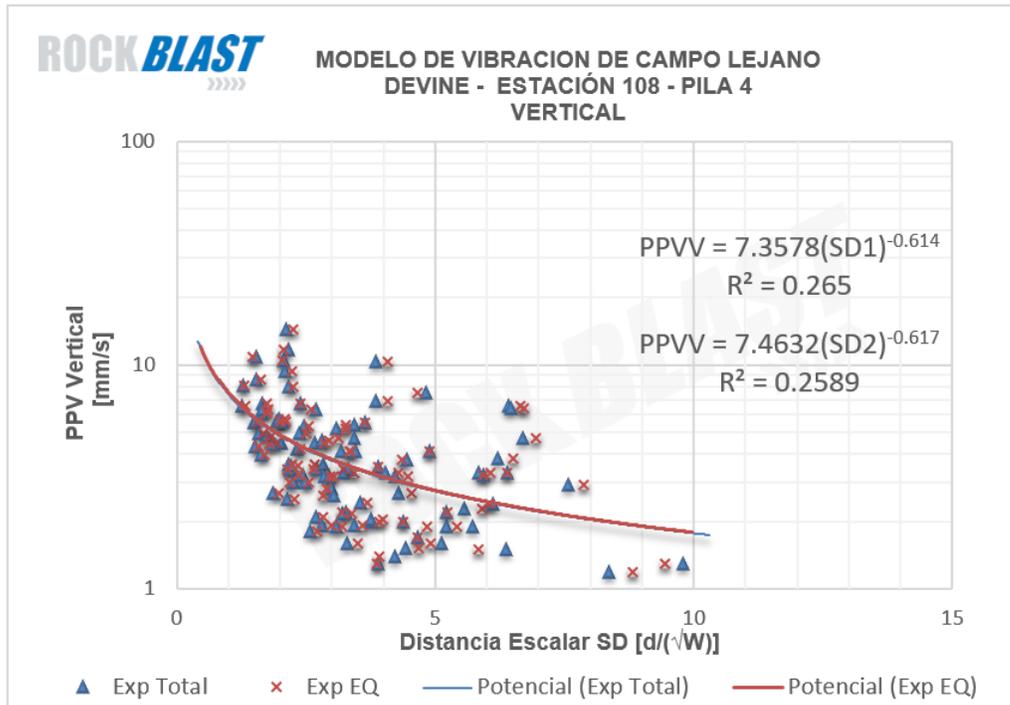


Figura 7.51: Modelos de vibración - Vertical - PILA 4 - Categorías A,B y X

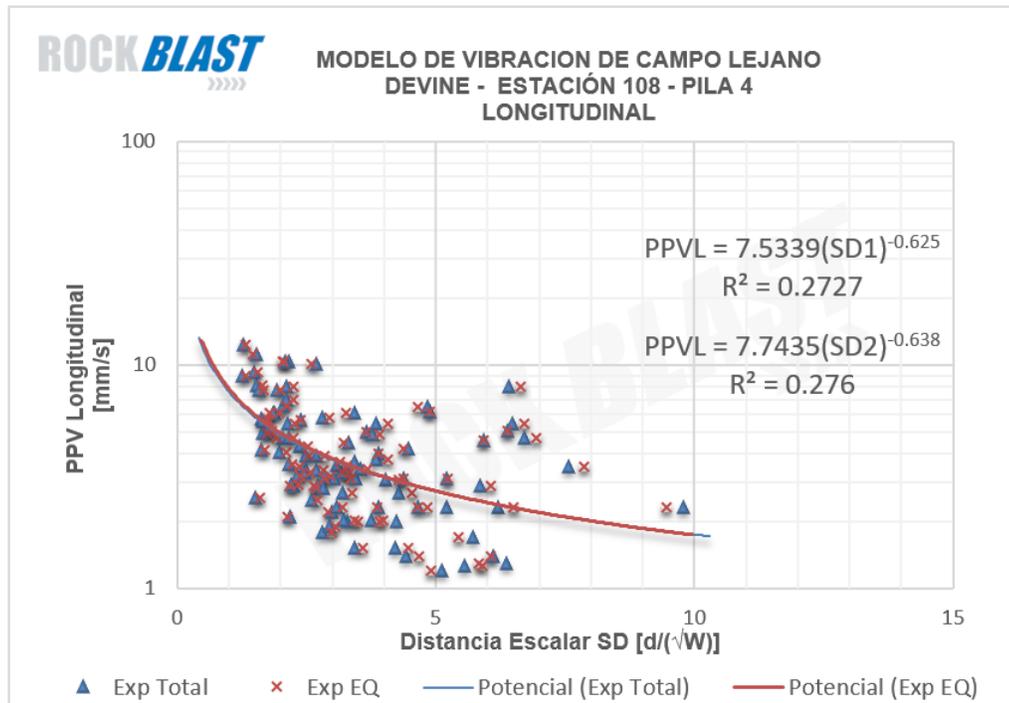


Figura 7.52: Modelos de vibración - Longitudinal - PILA 4 - Categorías A,B y X

7.2.1.5. Ubicación: Correa CV-05 - Cepa 1

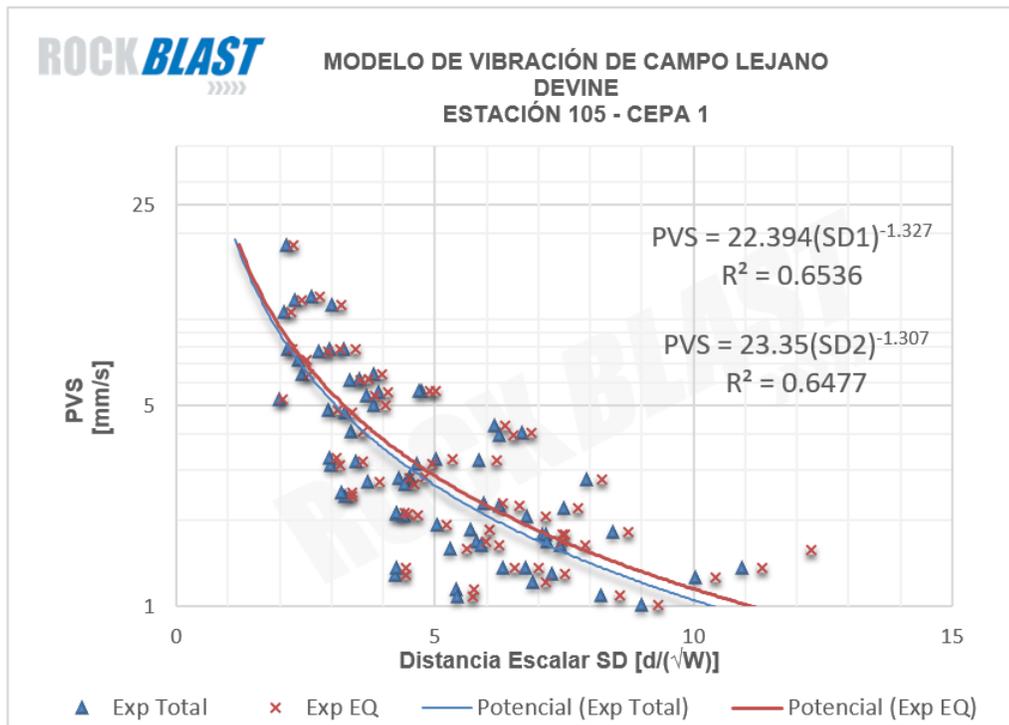


Figura 7.53: Modelos de vibración - Vector suma - CEPA 1 - Categorías A,B y X

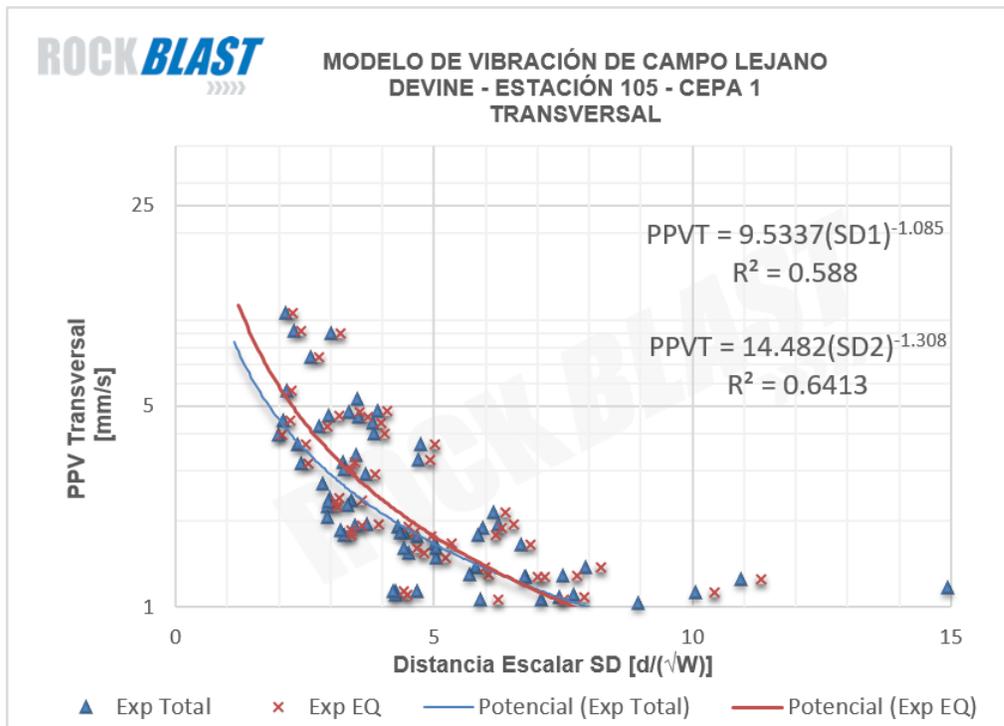


Figura 7.54: Modelos de vibración - Transversal - CEPA 1 - Categorías A,B y X

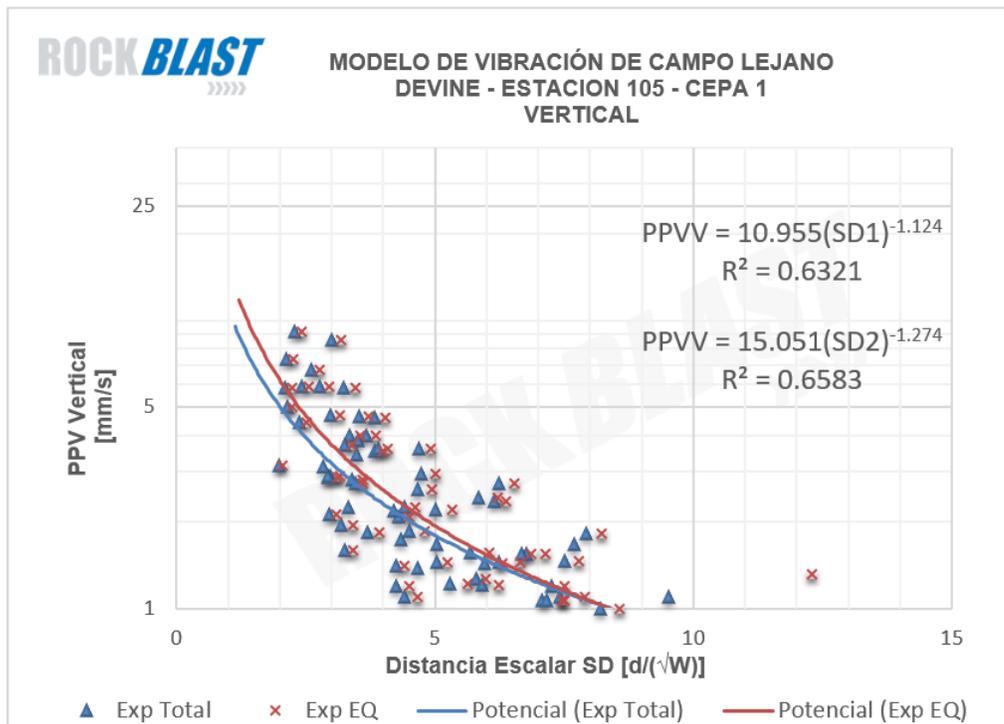


Figura 7.55: Modelos de vibración - Vertical - CEPA 1 - Categorías A,B y X

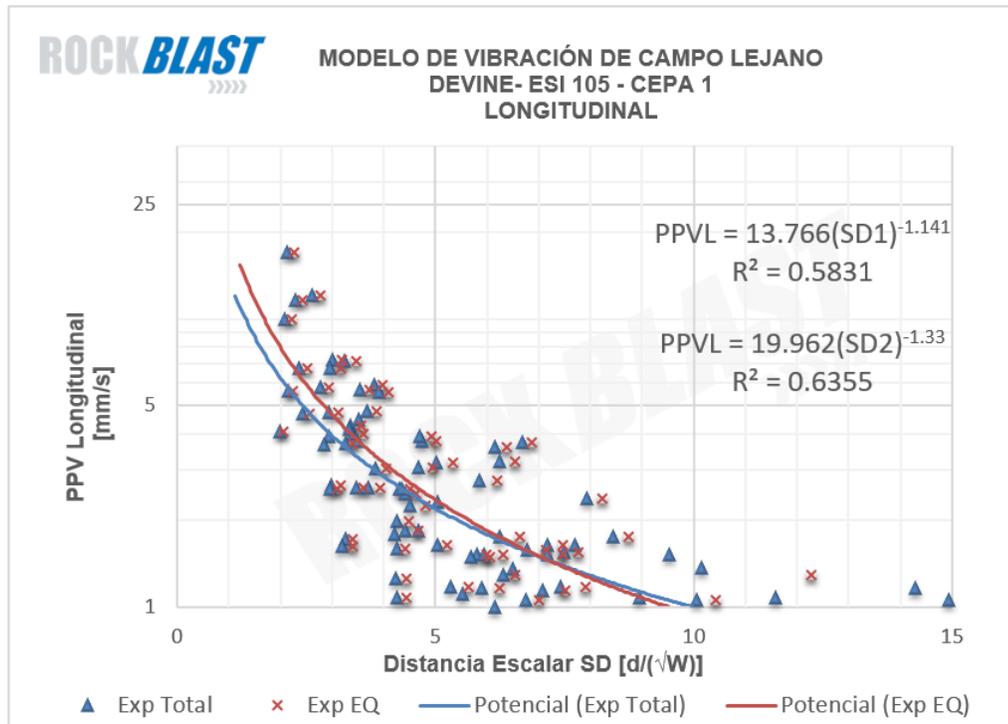


Figura 7.56: Modelos de vibración - Longitudinal - CEPA 1 - Categorías A,B y X

7.2.1.6. Ubicación: Correa CV-07 - Cepa 4

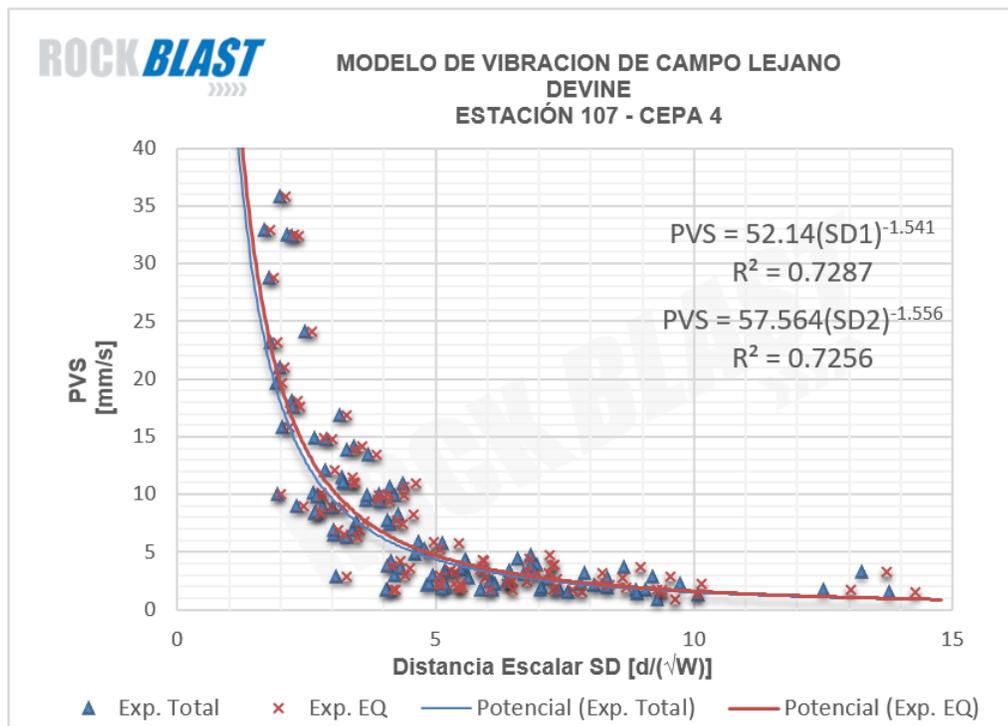


Figura 7.57: Modelos de vibración - Vector suma - CEPA 4 - Categorías A,B y X

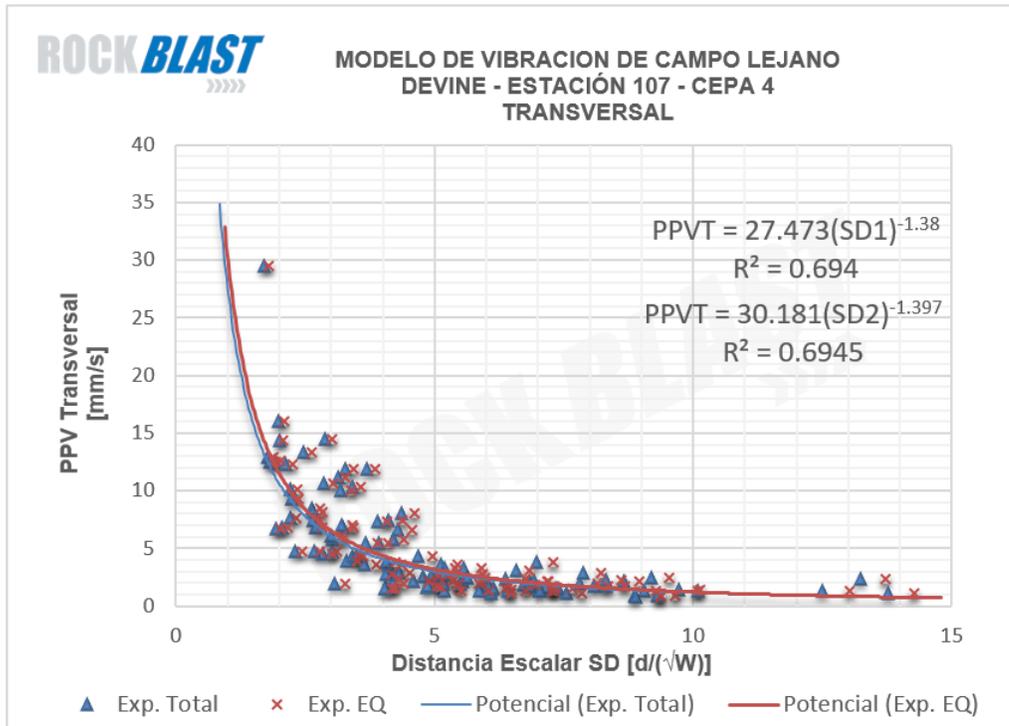


Figura 7.58: Modelos de vibración - Transversal - CEPA 4 - Categorías A,B y X

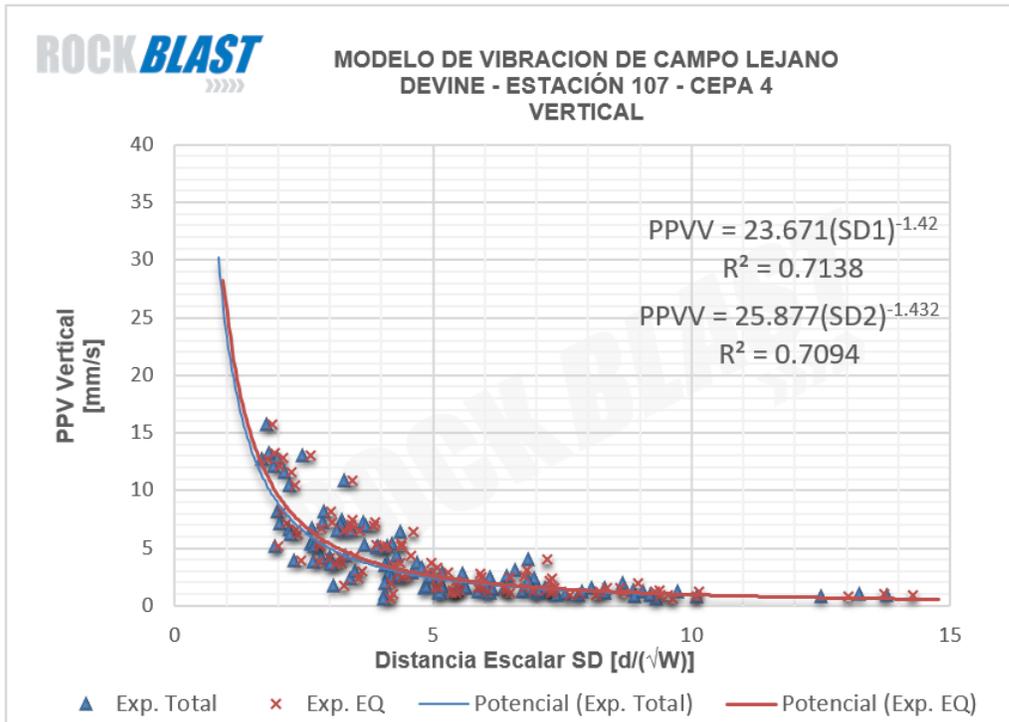


Figura 7.59: Modelos de vibración - Vertical - CEPA 4 - Categorías A,B y X

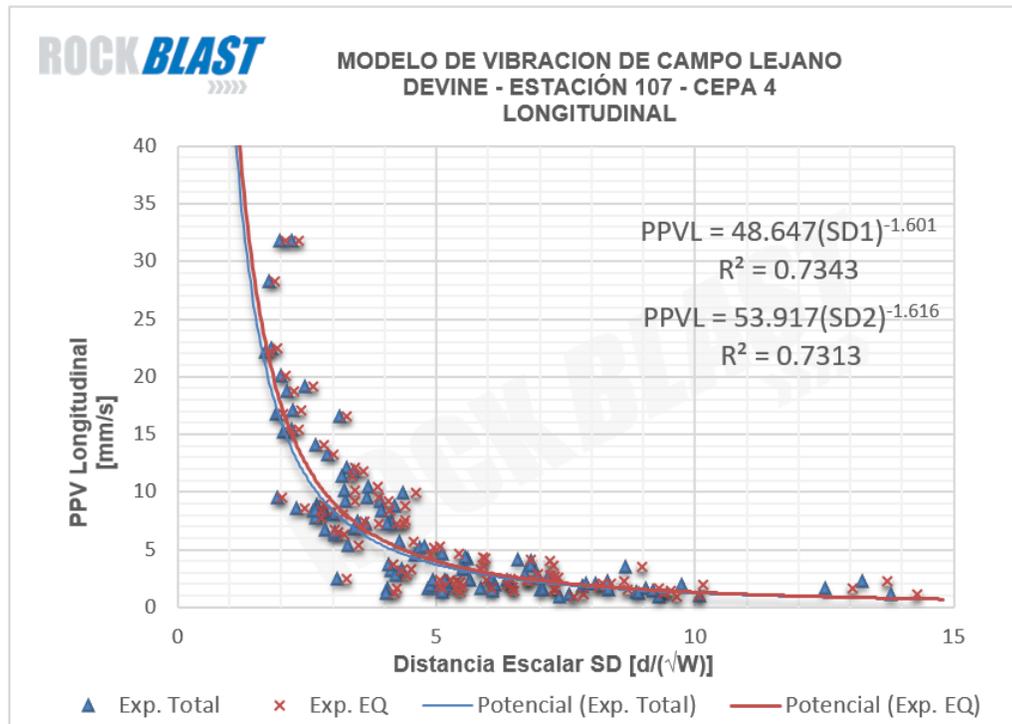


Figura 7.60: Modelos de vibración - Longitudinal - CEPA 4 - Categorías A,B y X

7.2.1.7. Ubicación: Harneros - Fundación 2

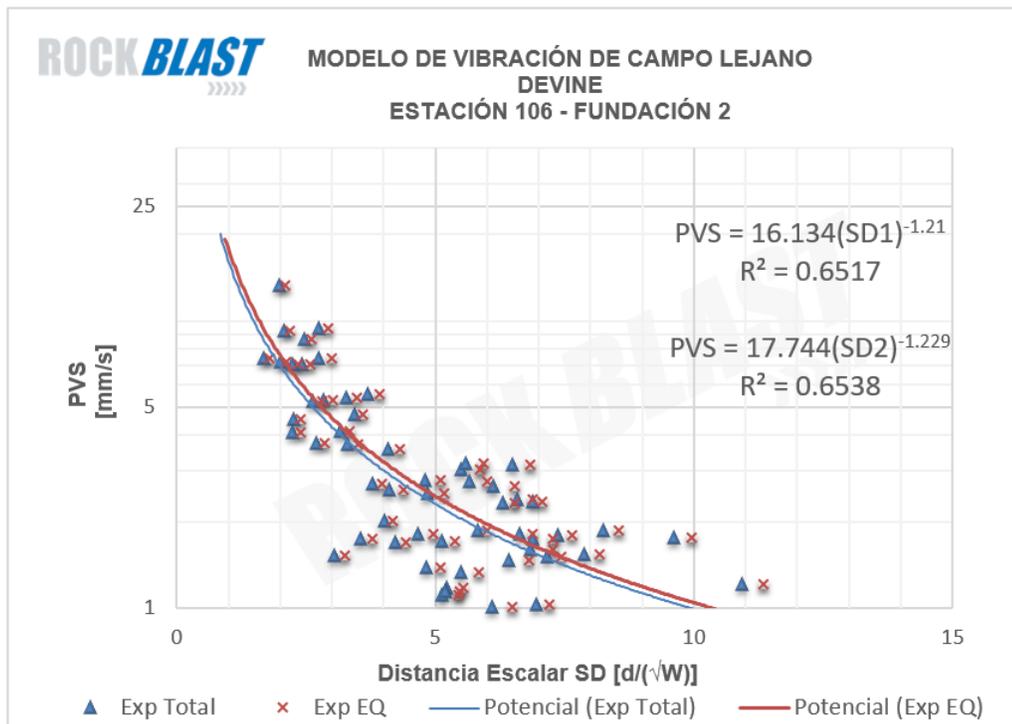


Figura 7.61: Modelos de vibración - Vector suma - Fundación 2 - Categorías A,B y X

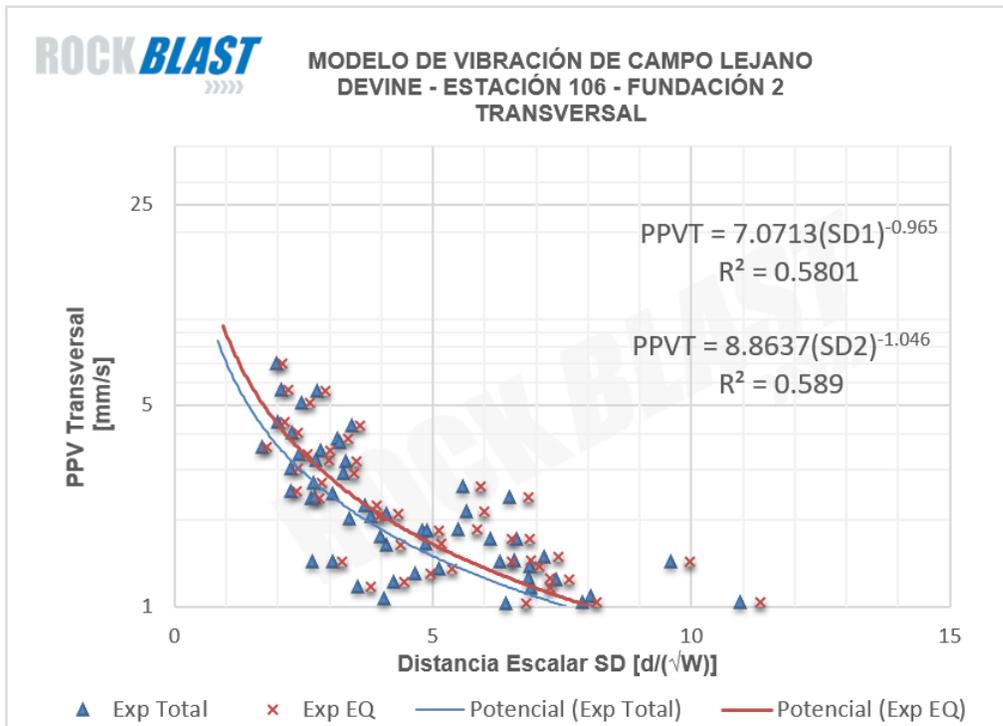


Figura 7.62: Modelos de vibración - Transversal - Fundación 2 - Categorías A,B y X

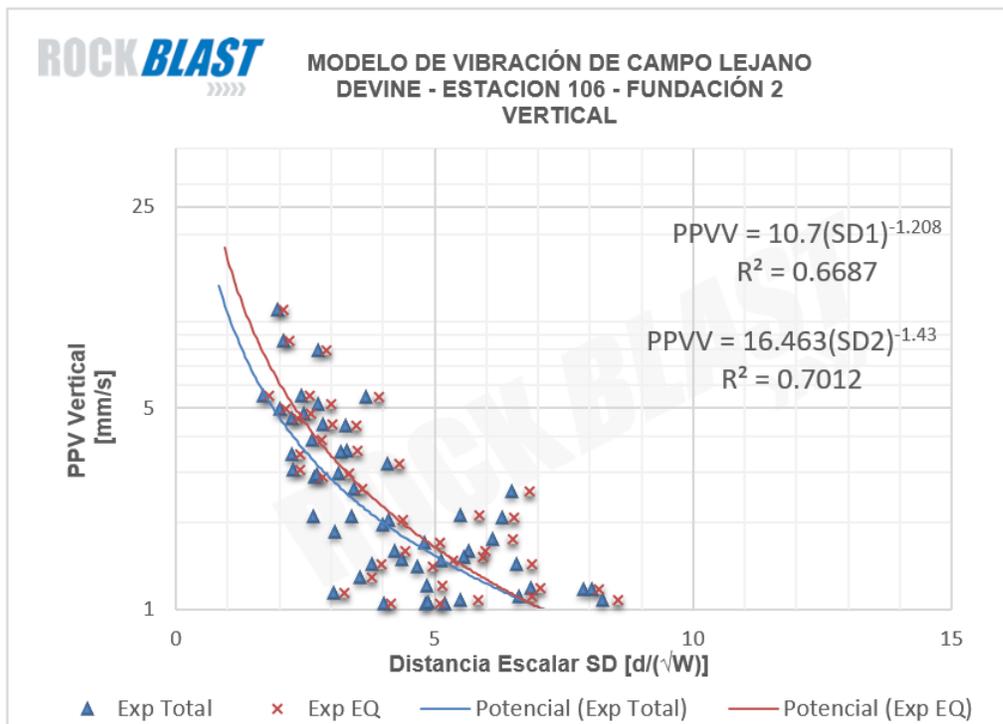


Figura 7.63: Modelos de vibración - Vertical - Fundación 2 - Categorías A,B y X

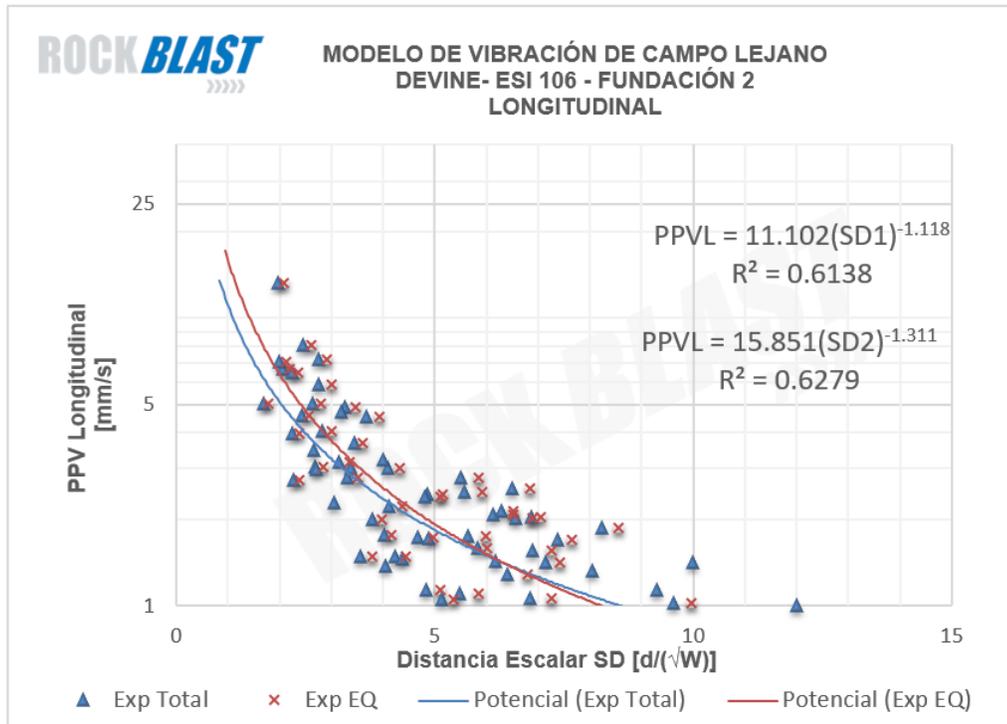


Figura 7.64: Modelos de vibración - Longitudinal - Fundación 2 - Categorías A,B y X

7.2.2. Ley escalar por estación para datos categoría A y B

7.2.2.1. Ubicación: Silo 1

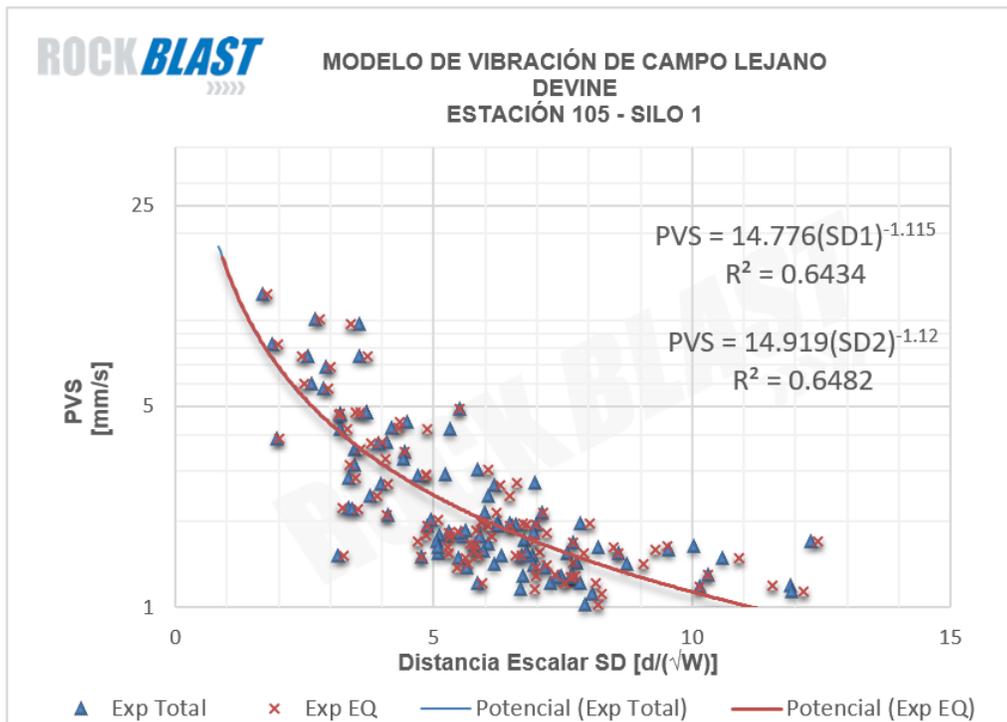


Figura 7.65: Modelos de vibración - Vector suma - SILO 1 - Categorías A y B

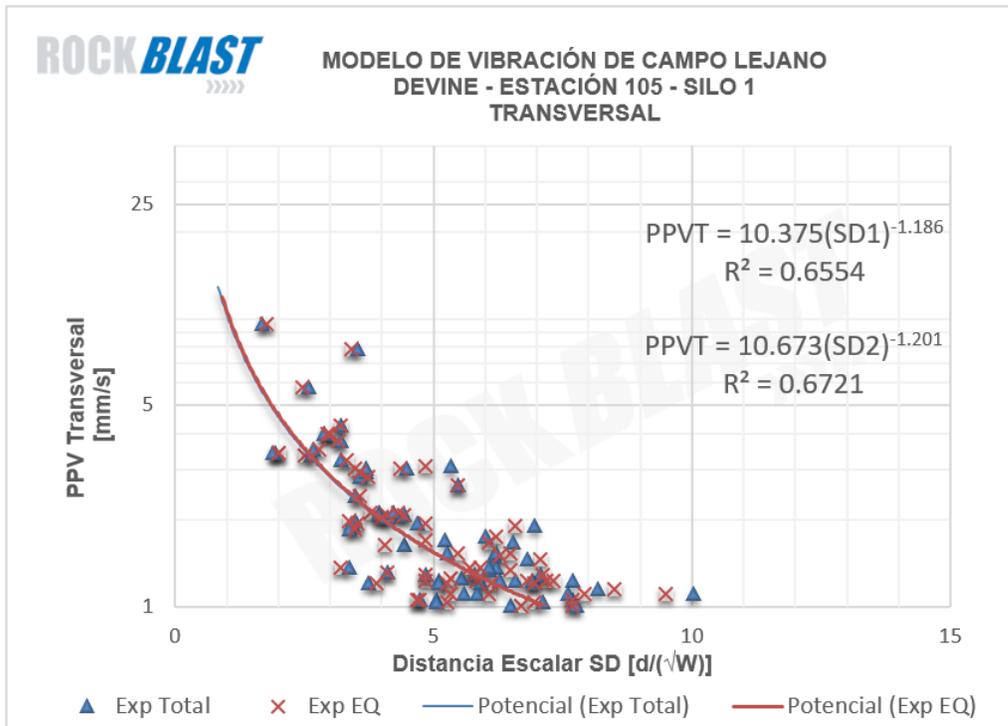


Figura 7.66: Modelos de vibración - Transversal - SILO 1 - Categorías A y B

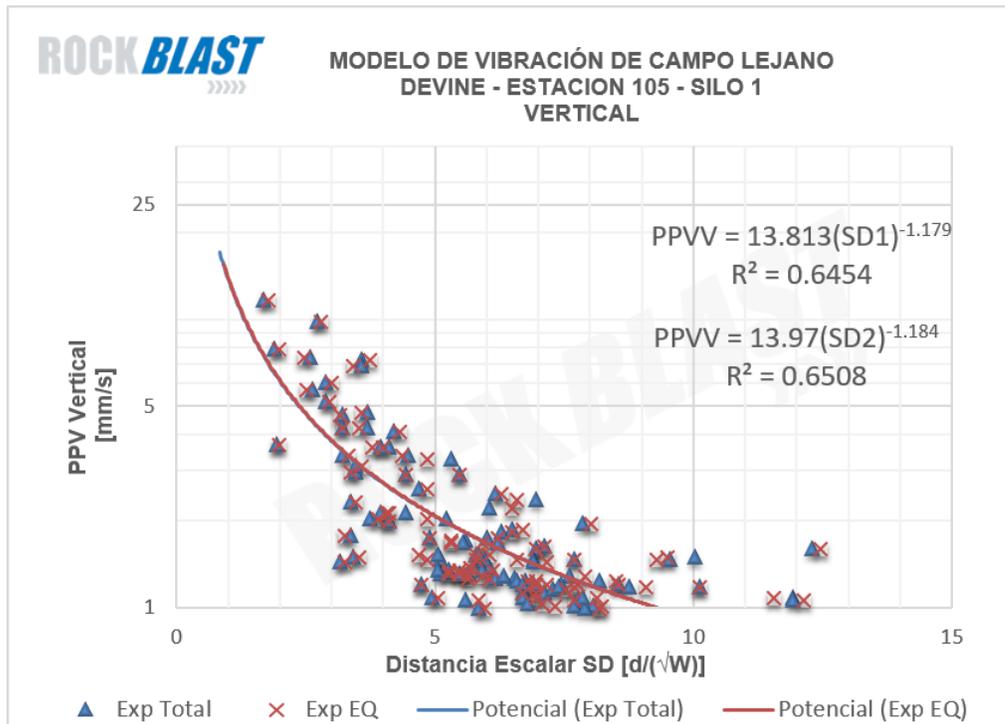


Figura 7.67: Modelos de vibración - Vertical - SILO 1 - Categorías A y B

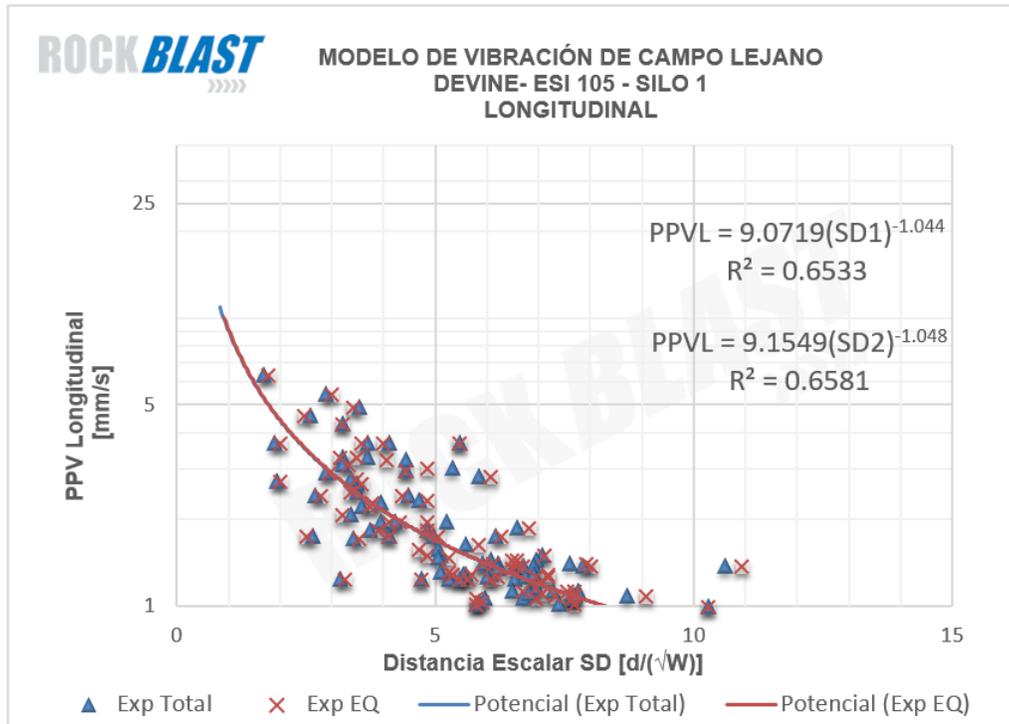


Figura 7.68: Modelos de vibración - Longitudinal - SILO 1 - Categorías A y B

7.2.2.2. Ubicación: Silo 2

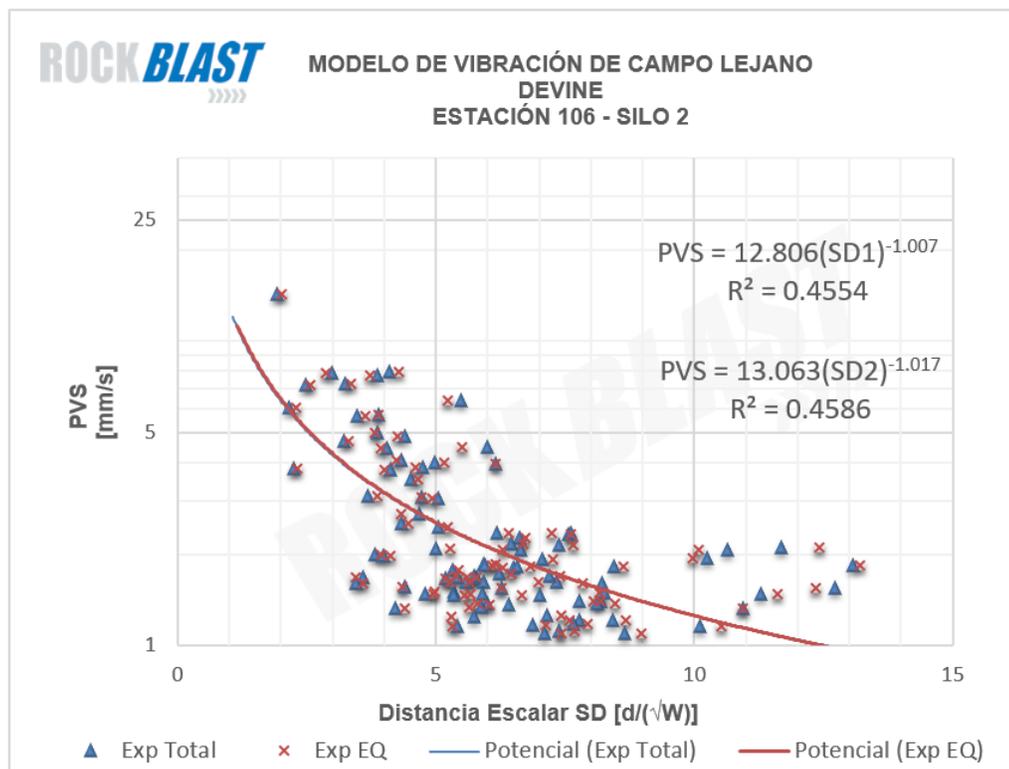


Figura 7.69: Modelos de vibración - Vector suma - SILO 2 - Categorías A y B

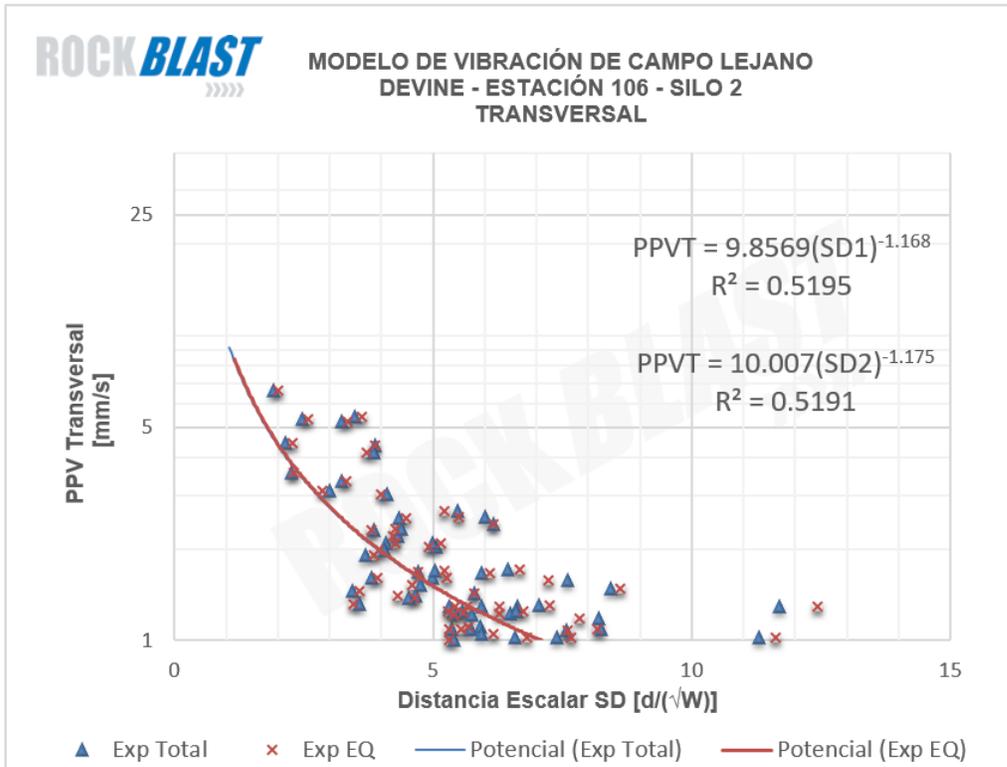


Figura 7.70: Modelos de vibración - Transversal - SILO 2 - Categorías A y B

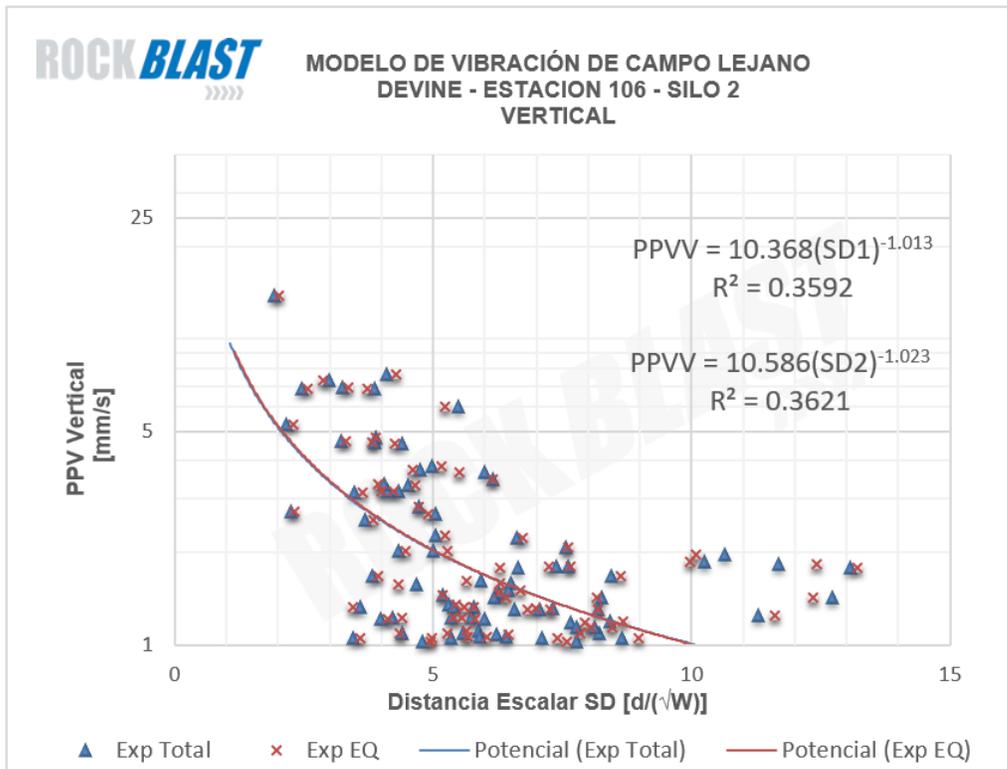


Figura 7.71: Modelos de vibración - Vertical - SILO 2 - Categorías A y B

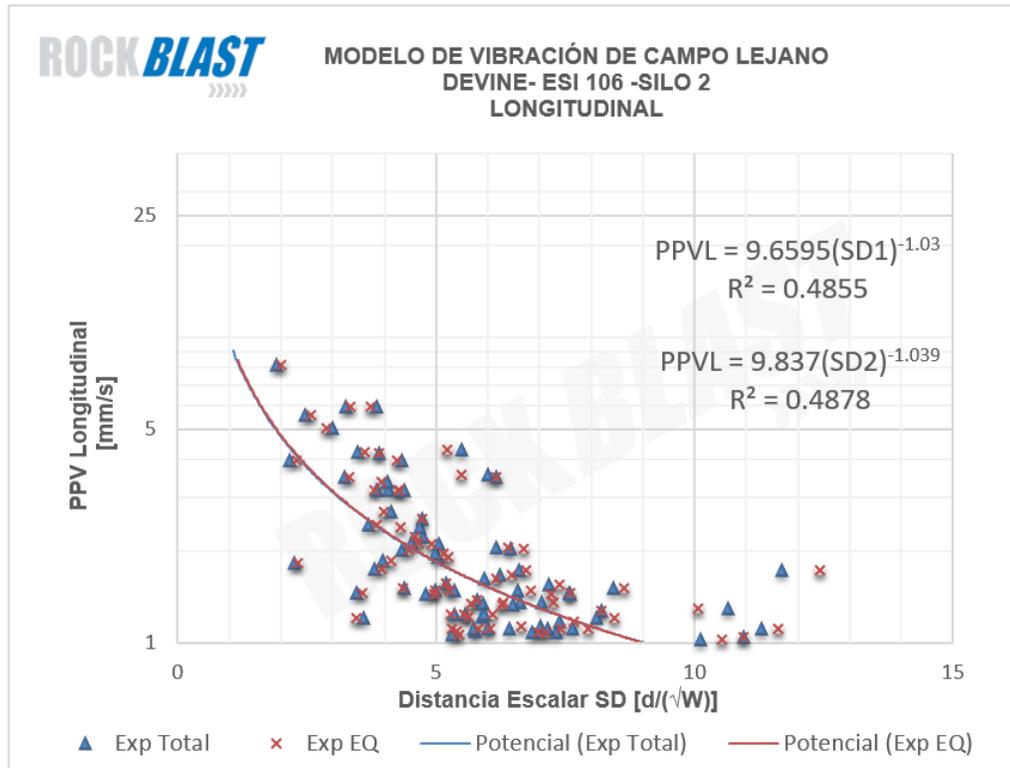


Figura 7.72: Modelos de vibración - Longitudinal - SILO 2 - Categorías A y B

7.2.2.3. Ubicación: Pila 12A

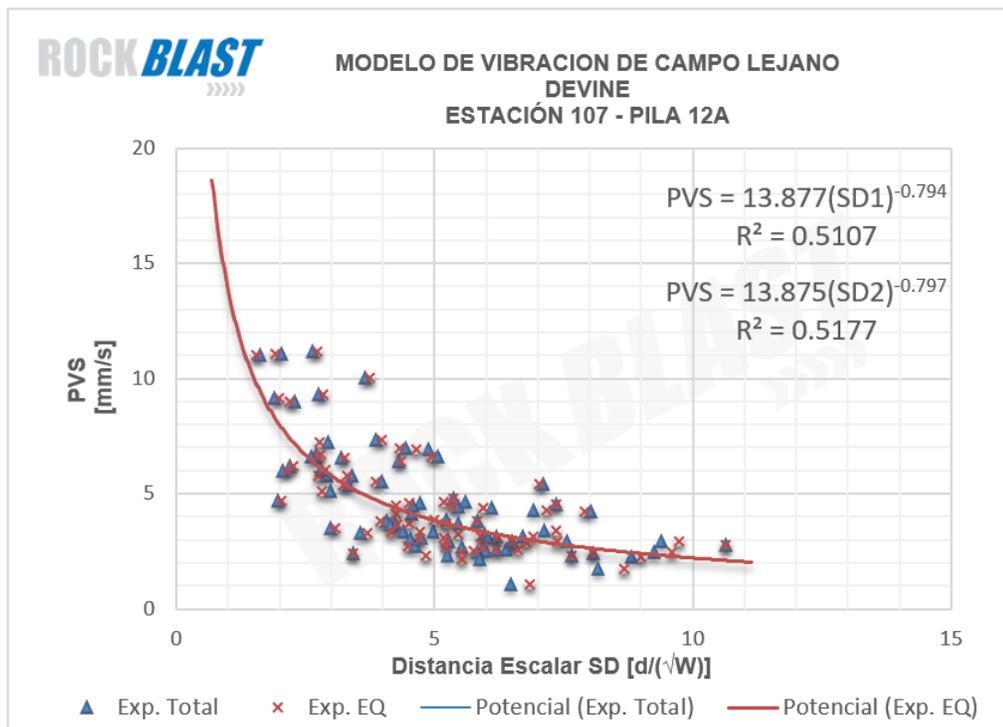


Figura 7.73: Modelos de vibración - Vector suma - PILA 12A - Categorías A y B

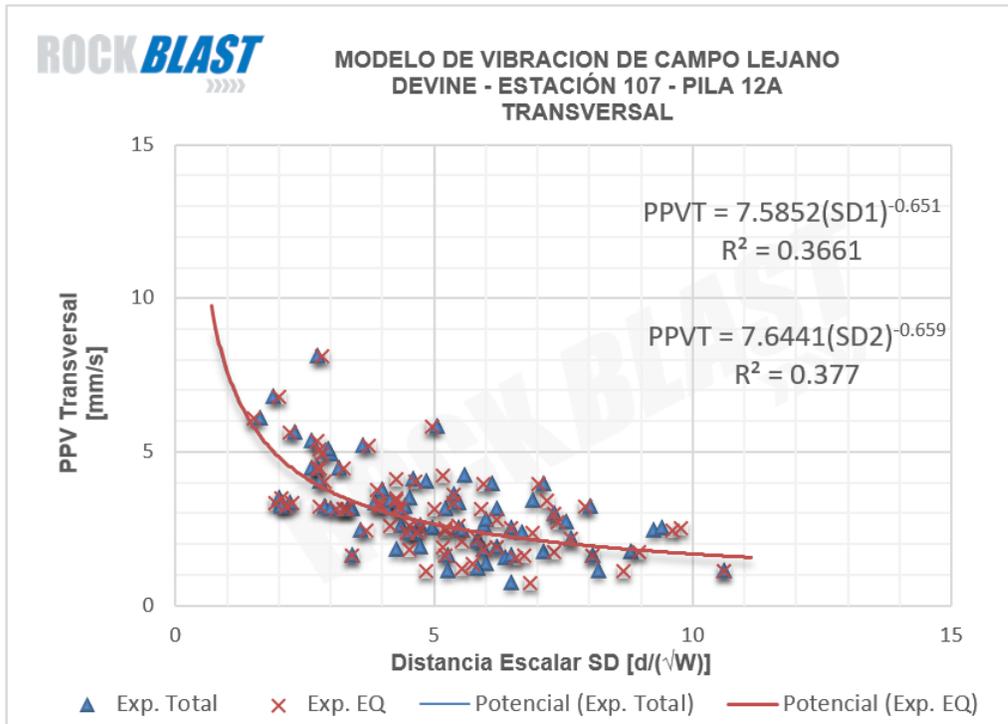


Figura 7.74: Modelos de vibración - Transversal - PILA 12A - Categorías A y B

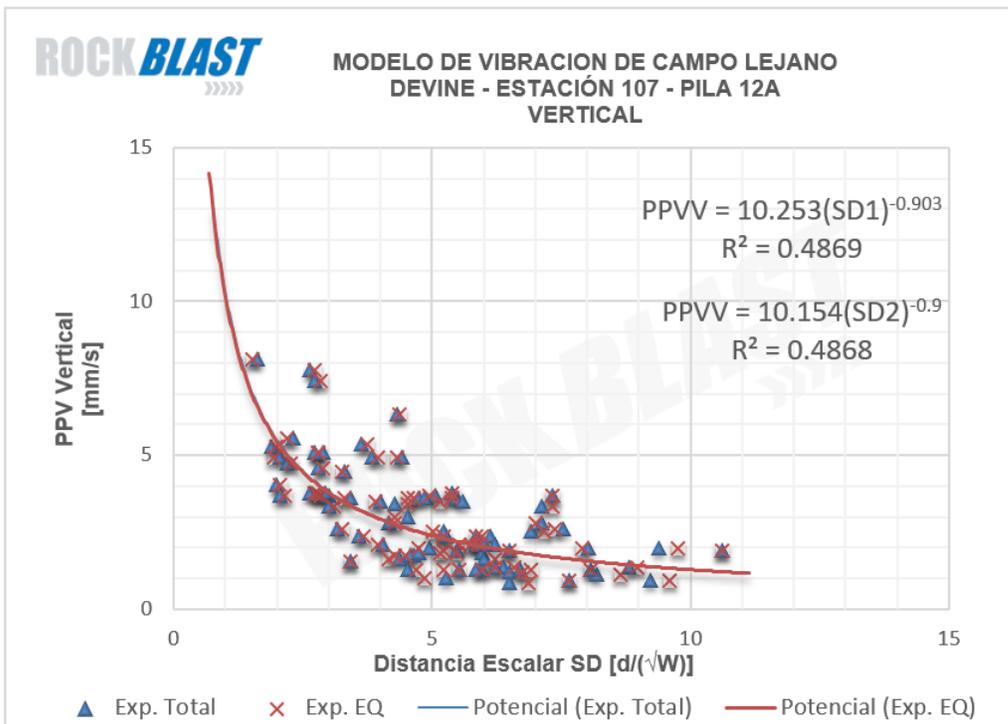


Figura 7.75: Modelos de vibración - Vertical - PILA 12A - Categorías A y B

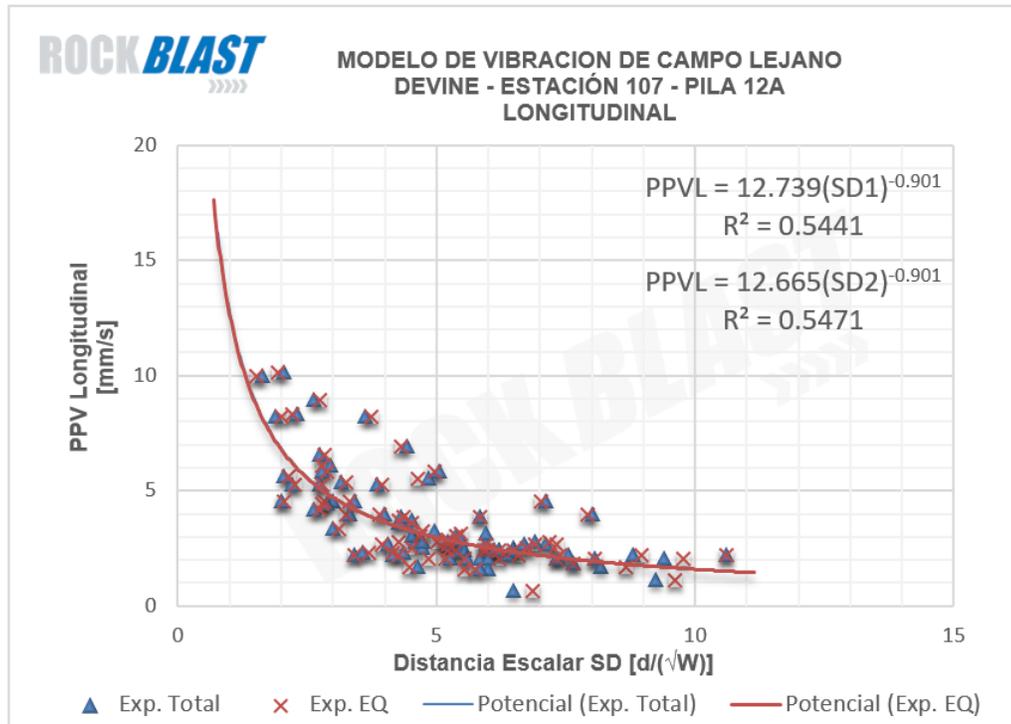


Figura 7.76: Modelos de vibración - Longitudinal - PILA 12A - Categorías A y B

7.2.2.4. Ubicación: Pila 4

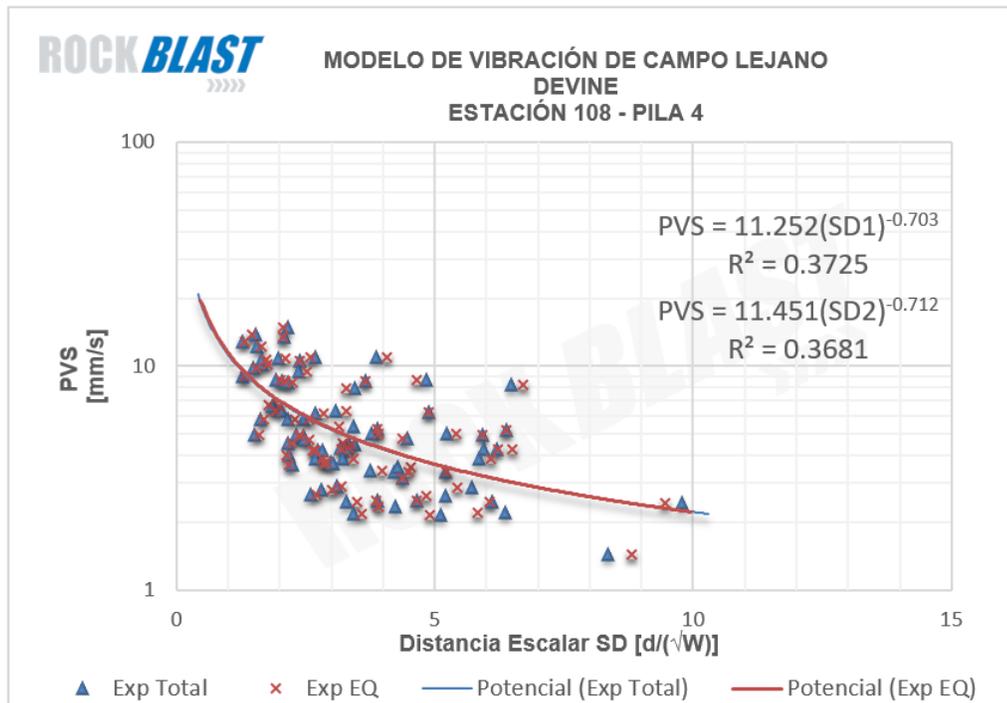


Figura 7.77: Modelos de vibración - Vector suma - PILA 12A - Categorías A y B

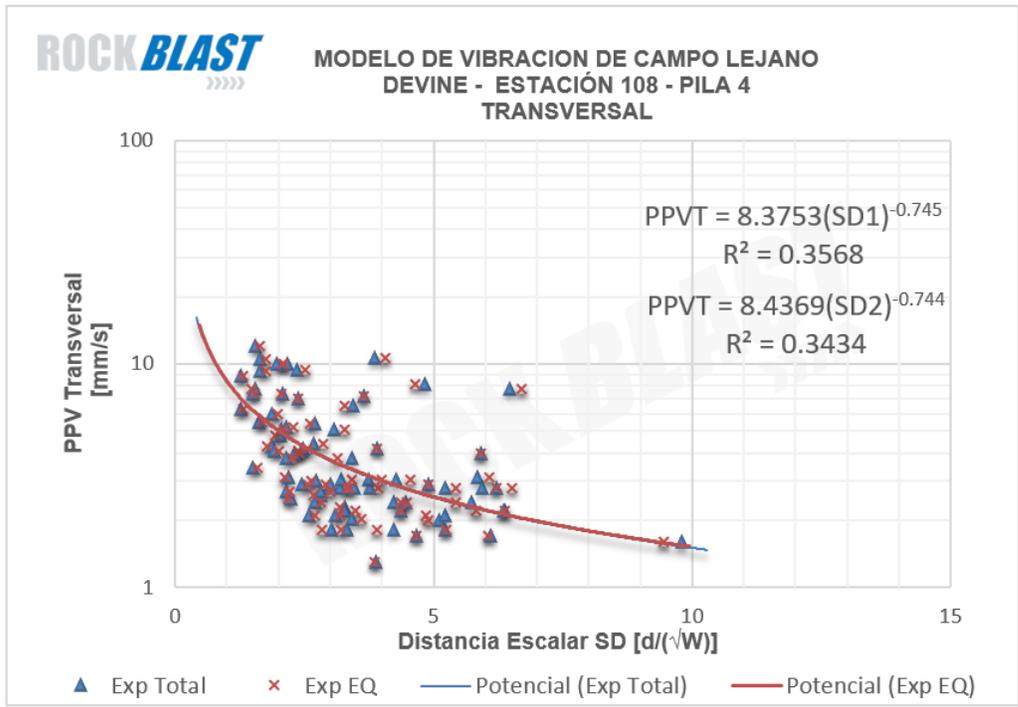


Figura 7.78: Modelos de vibración - Transversal - PILA 4 - Categorías A y B

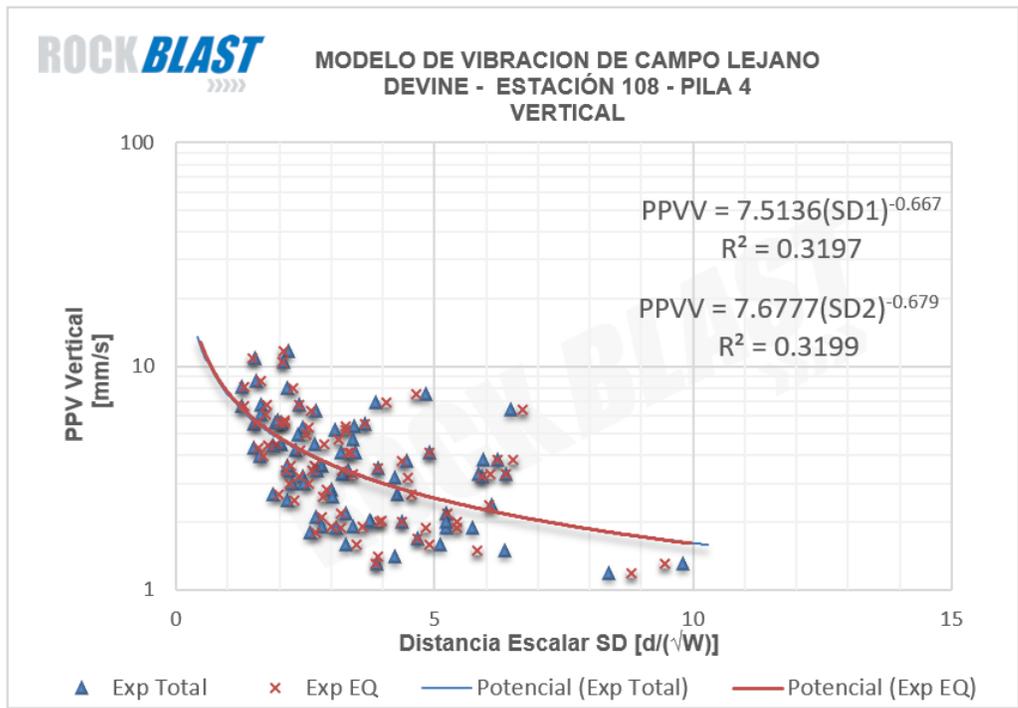


Figura 7.79: Modelos de vibración - Vertical - PILA 4 - Categorías A y B

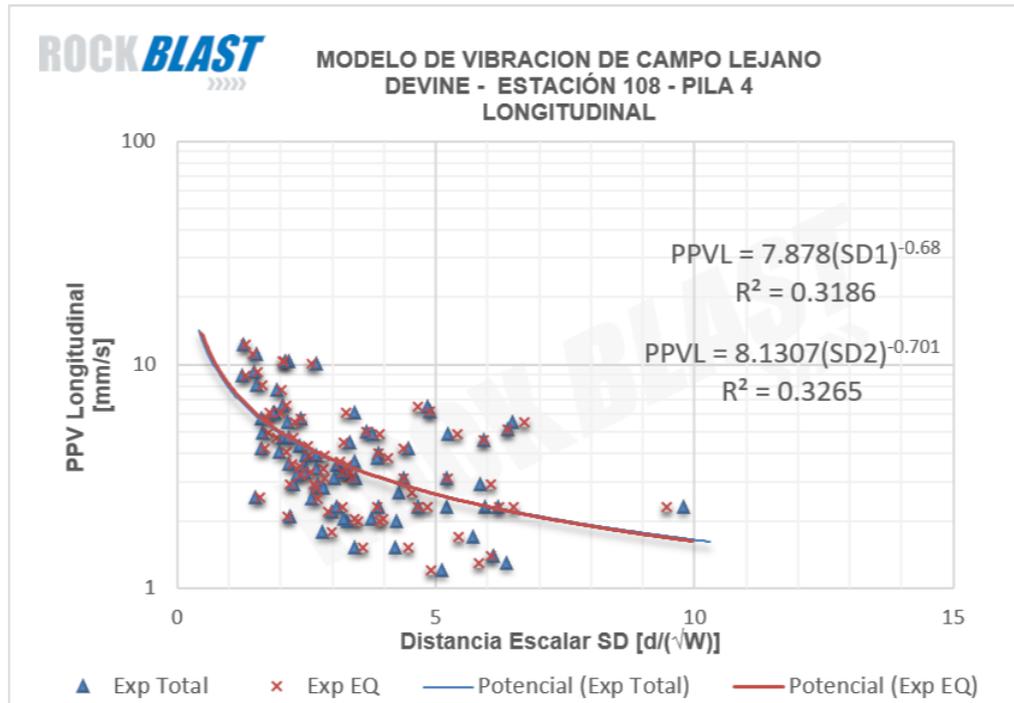


Figura 7.80: Modelos de vibración - Longitudinal - PILA 4 - Categorías A y B

7.2.2.5. Ubicación: Correa CV-05 - Cepa 1

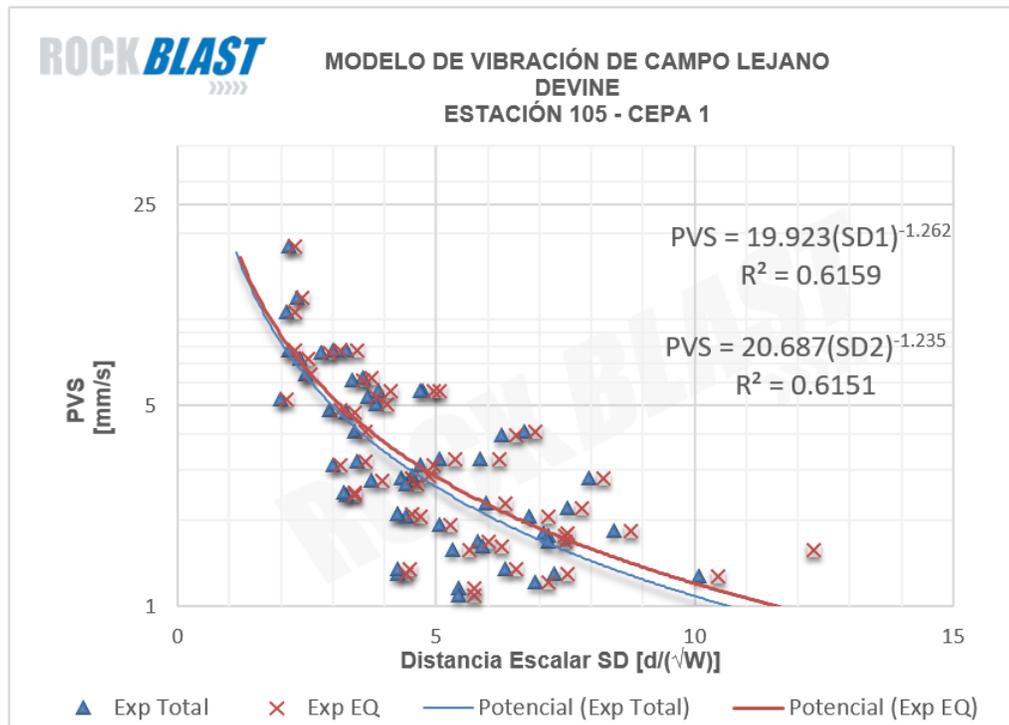


Figura 7.81: Modelos de vibración - Vector suma - CEPA 1 - Categorías A y B

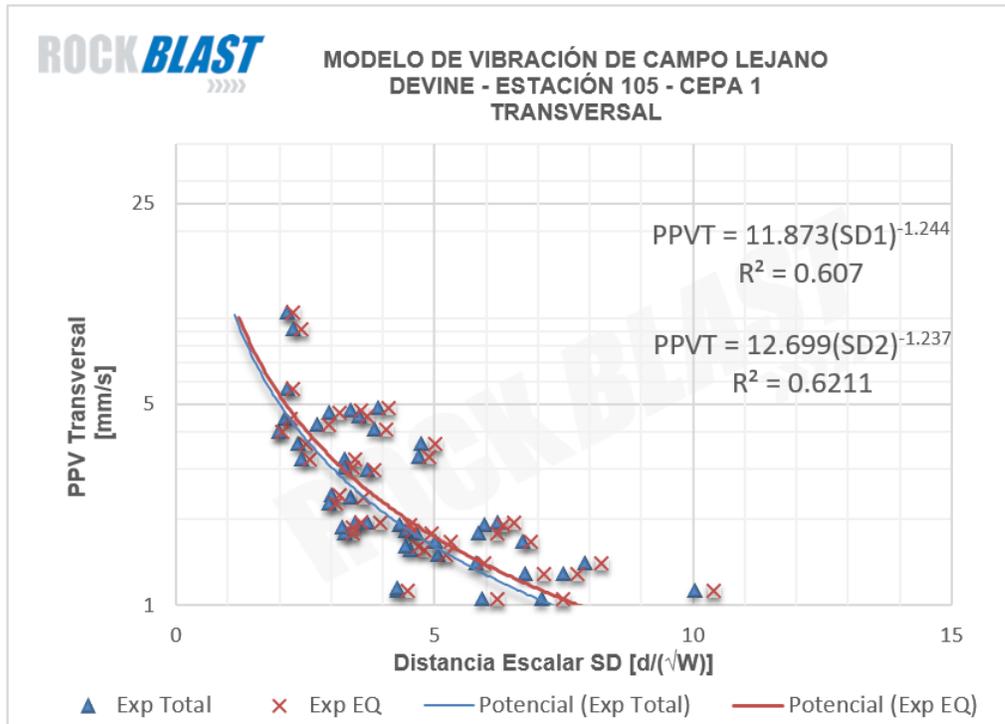


Figura 7.82: Modelos de vibración - Transversal - CEPA 1 - Categorías A y B

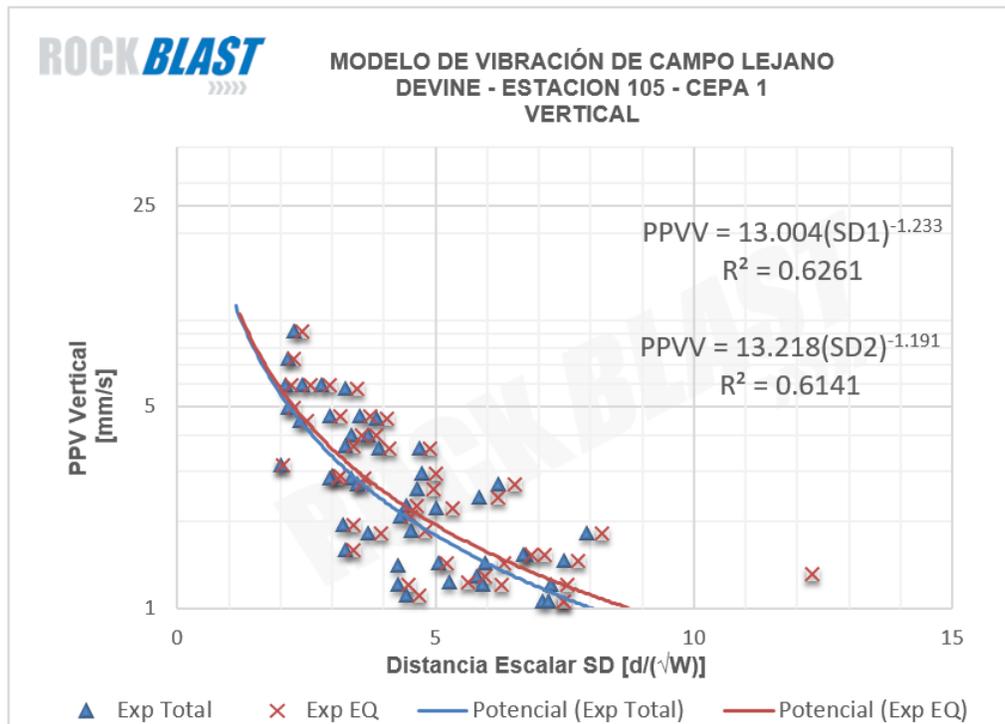


Figura 7.83: Modelos de vibración - Vertical - CEPA 1 - Categorías A y B

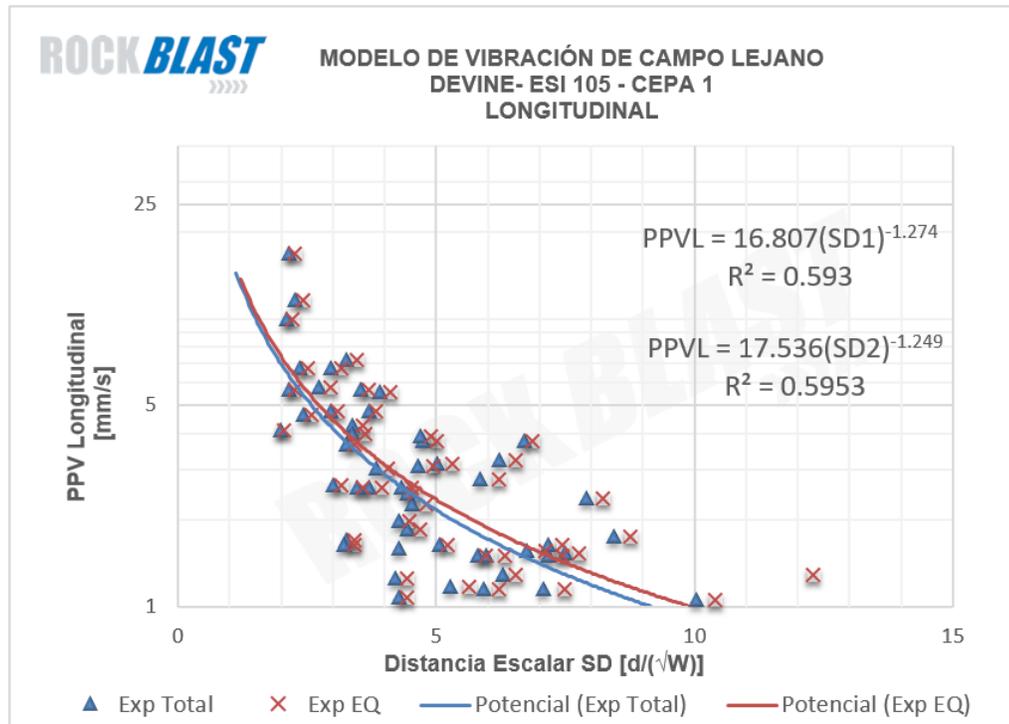


Figura 7.84: Modelos de vibración - Longitudinal - CEPA 1 - Categorías A y B

7.2.2.6. Ubicación: Correa CV-07 - Cepa 4

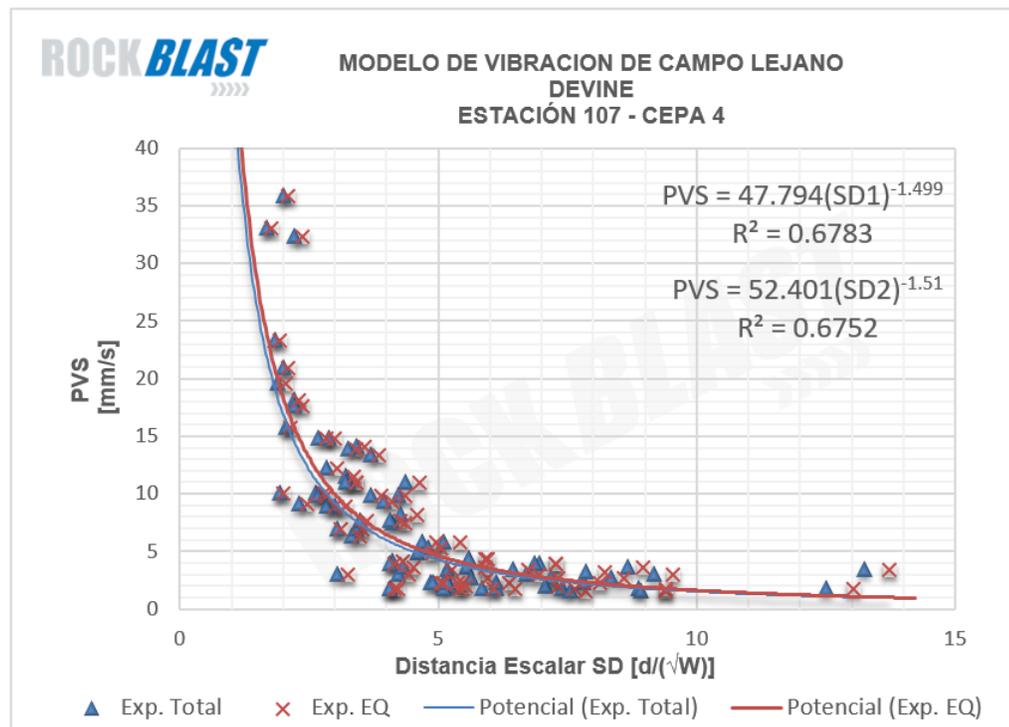


Figura 7.85: Modelos de vibración - Vector suma - CEPA 4 - Categorías A y B

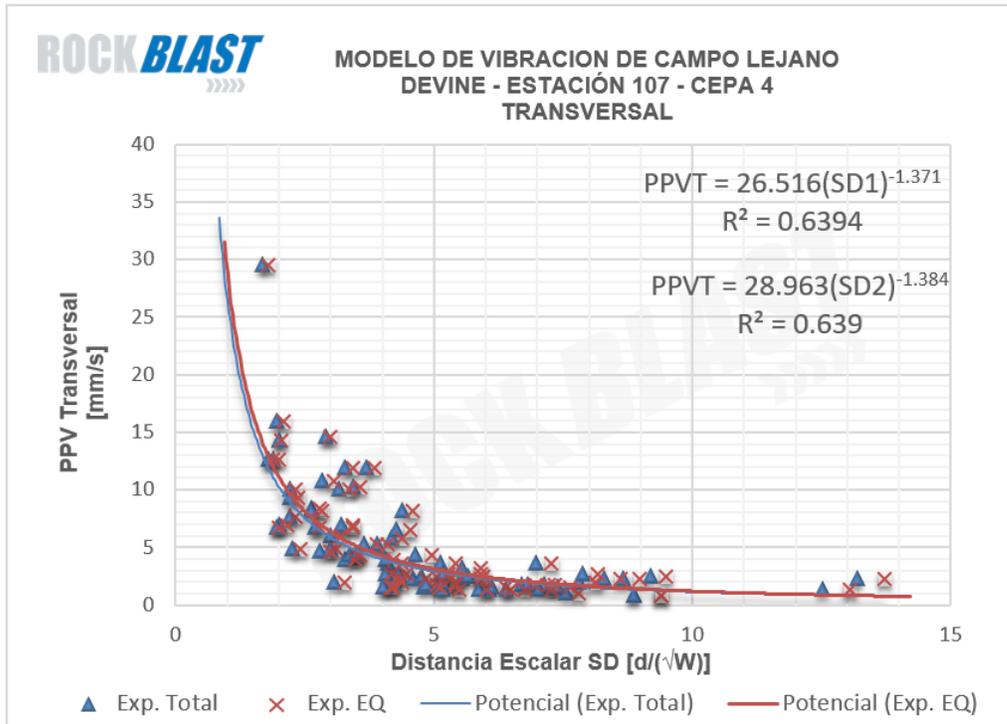


Figura 7.86: Modelos de vibración - Transversal - CEPA 4 - Categorías A y B

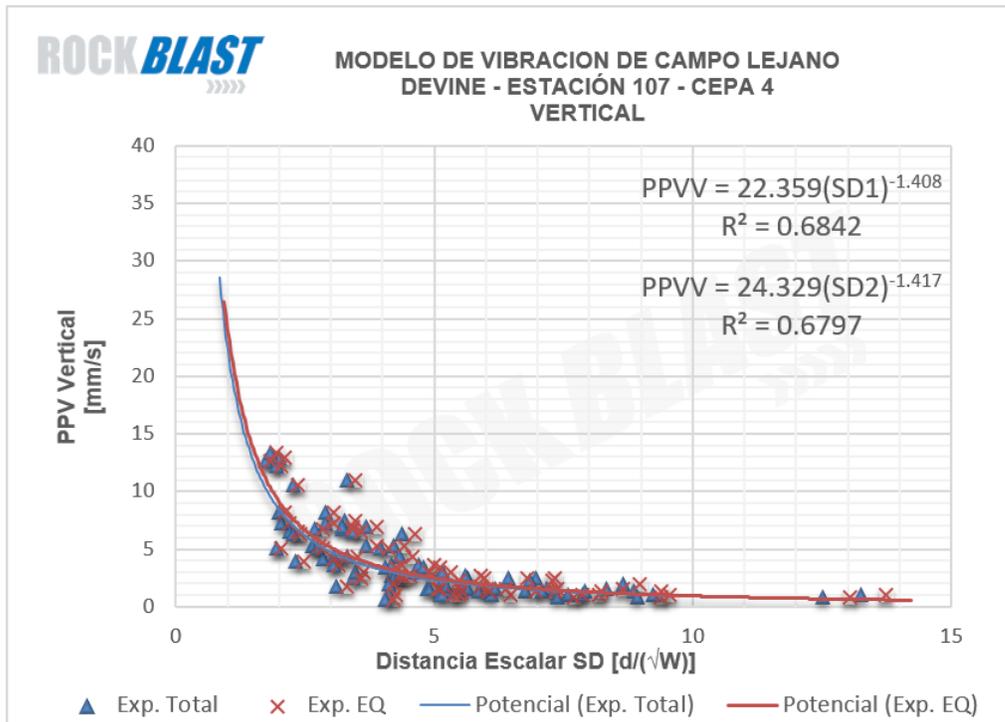


Figura 7.87: Modelos de vibración - Vertical - CEPA 4 - Categorías A y B

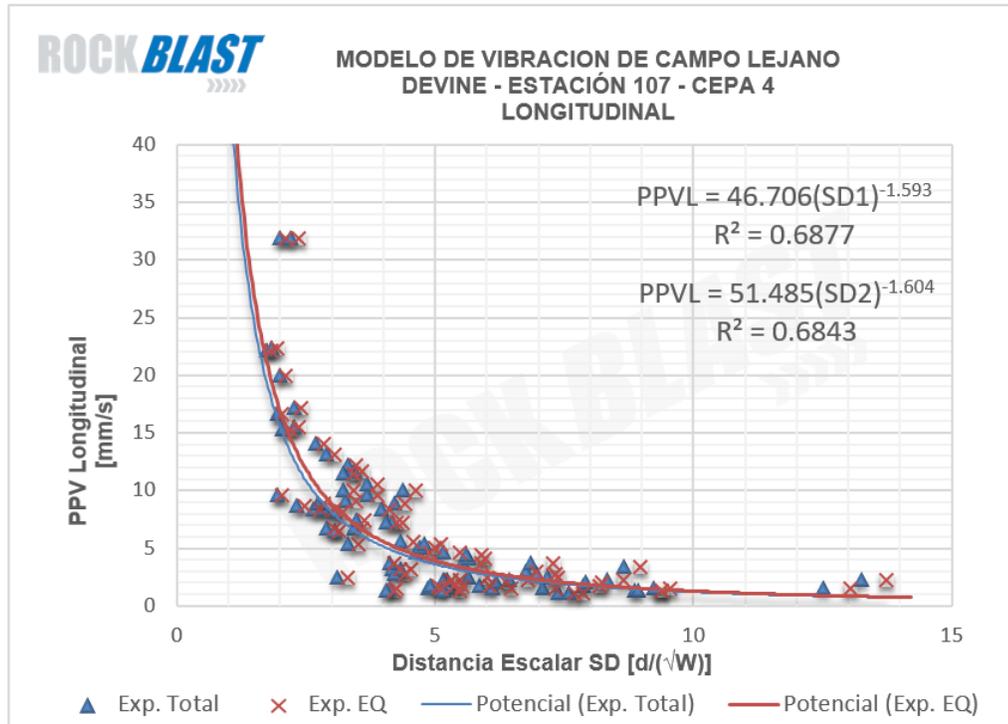


Figura 7.88: Modelos de vibración - Longitudinal - CEPA 4 - Categorías A y B

7.2.2.7. Ubicación: Harneros - Fundación 2

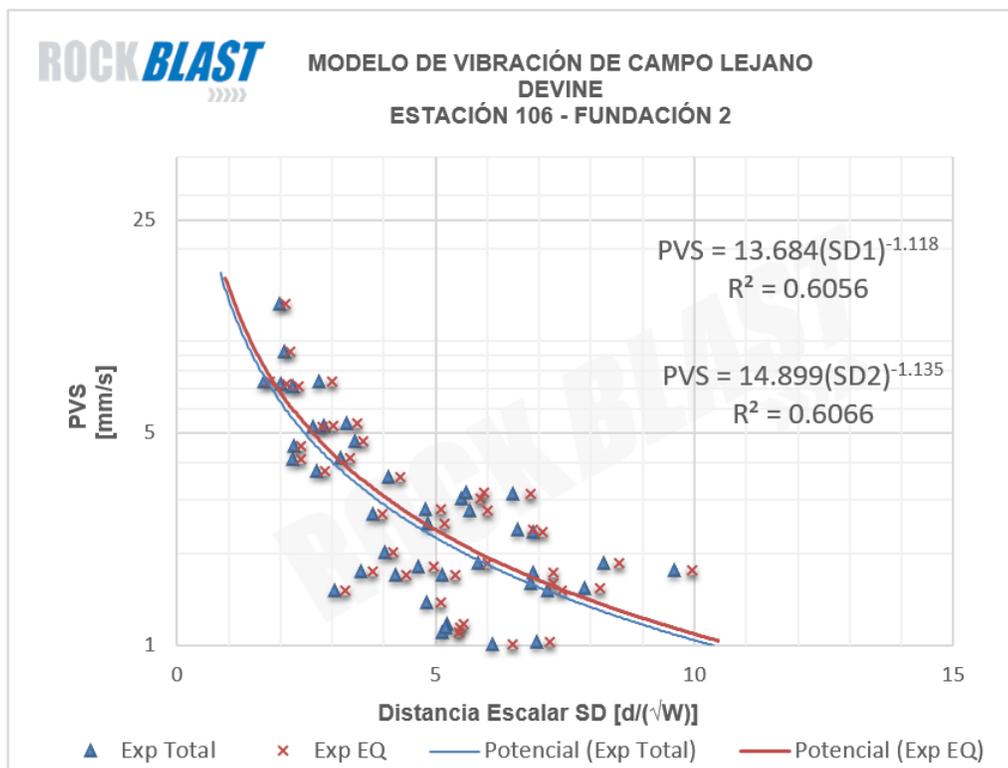


Figura 7.89: Modelos de vibración - Vector suma - Fundación 2 - Categorías A y B

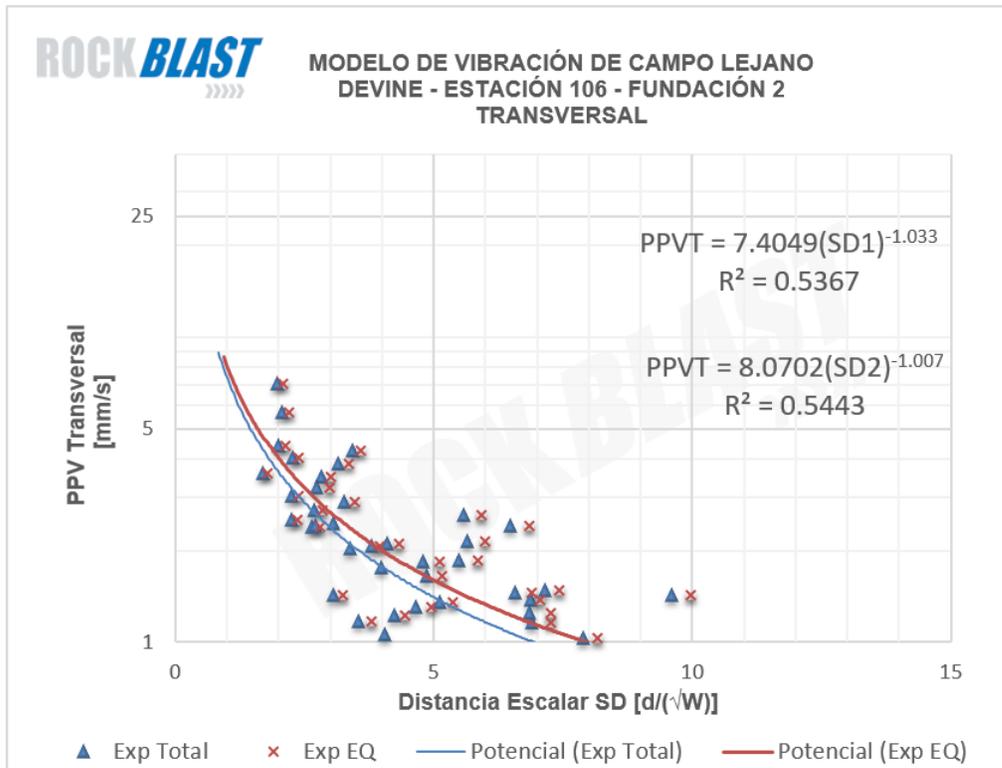


Figura 7.90: Modelos de vibración - Transversal - Fundación 2 - Categorías A y B

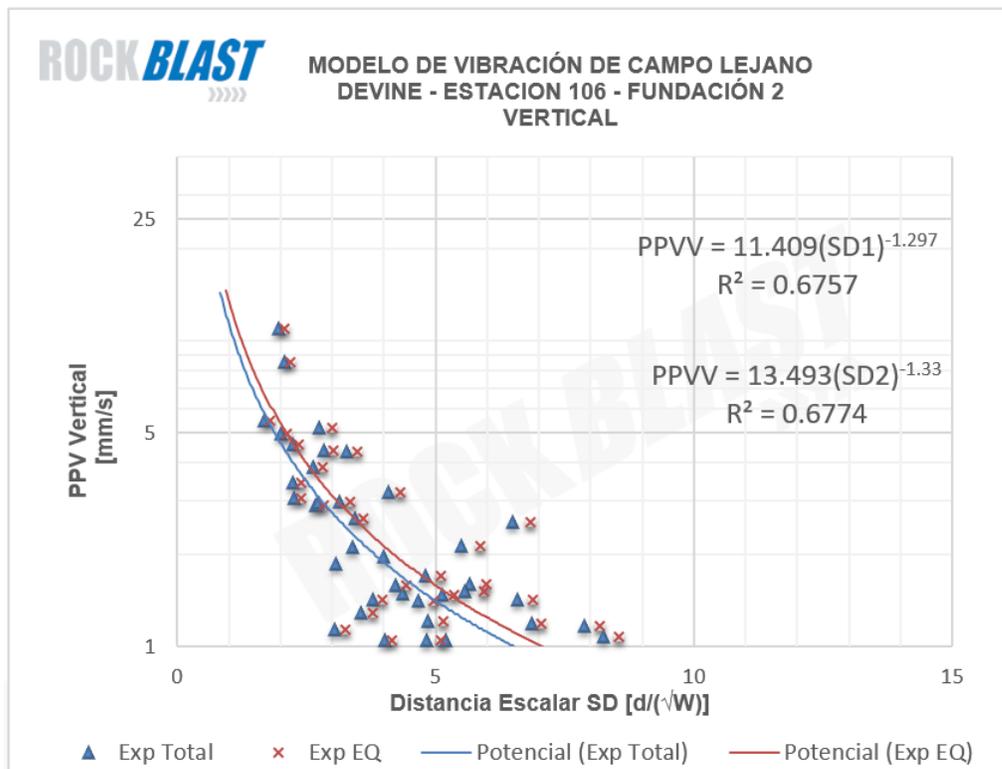


Figura 7.91: Modelos de vibración - Vertical - Fundación 2 - Categorías A y B

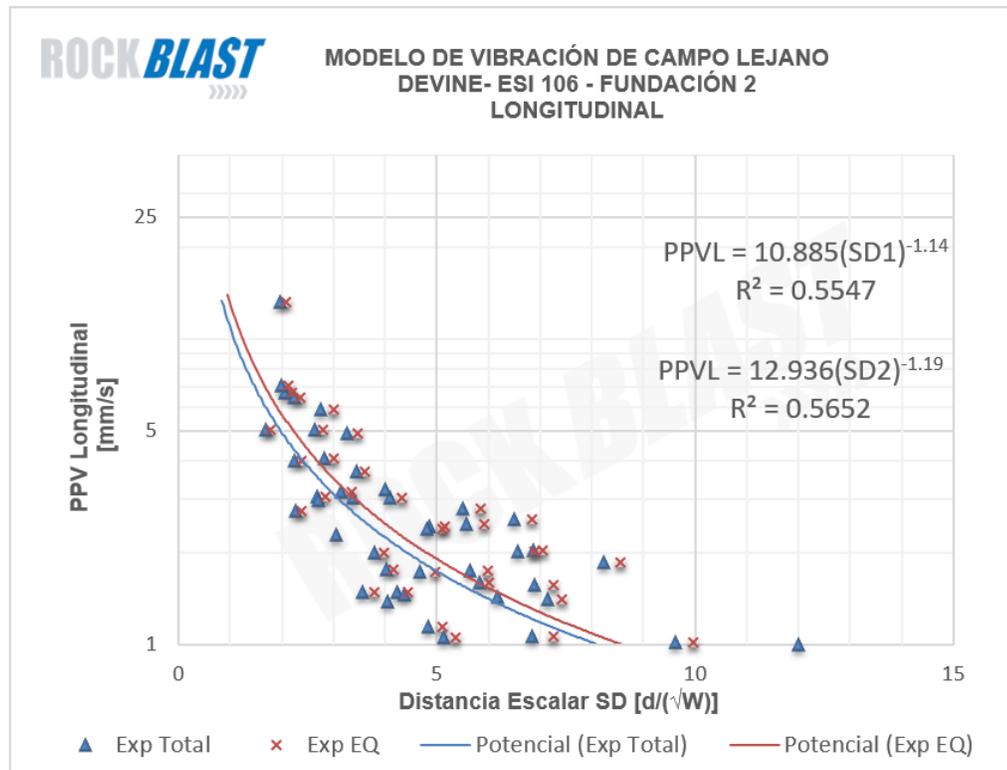


Figura 7.92: Modelos de vibración - Longitudinal - Fundación 2 - Categorías A y B

7.3. Tronaduras simuladas

7.3.1. Tronadura 1: 3 de septiembre de 2015

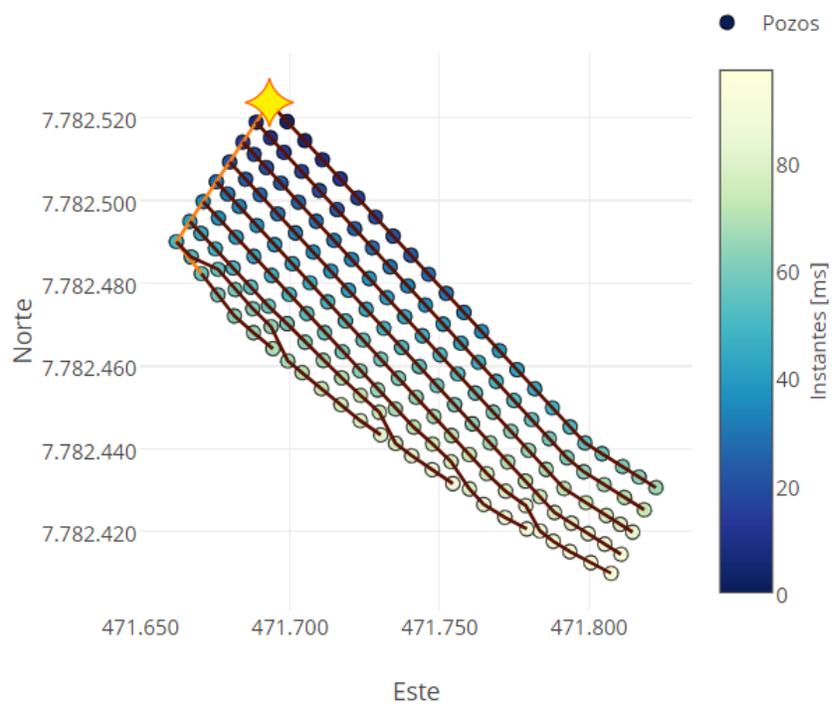


Figura 7.93: Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 1 - 3 de septiembre de 2015

7.3.2. Tronadura 2: 7 de septiembre de 2015

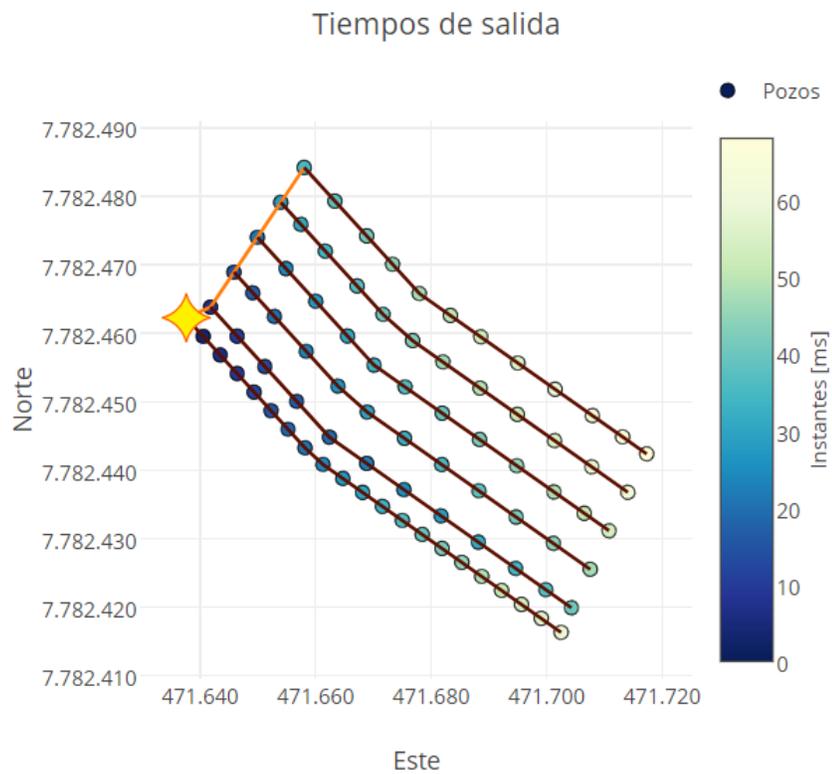


Figura 7.94: Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 2 - 7 de septiembre de 2015

7.3.3. Tronadura 3: 8 de septiembre de 2015

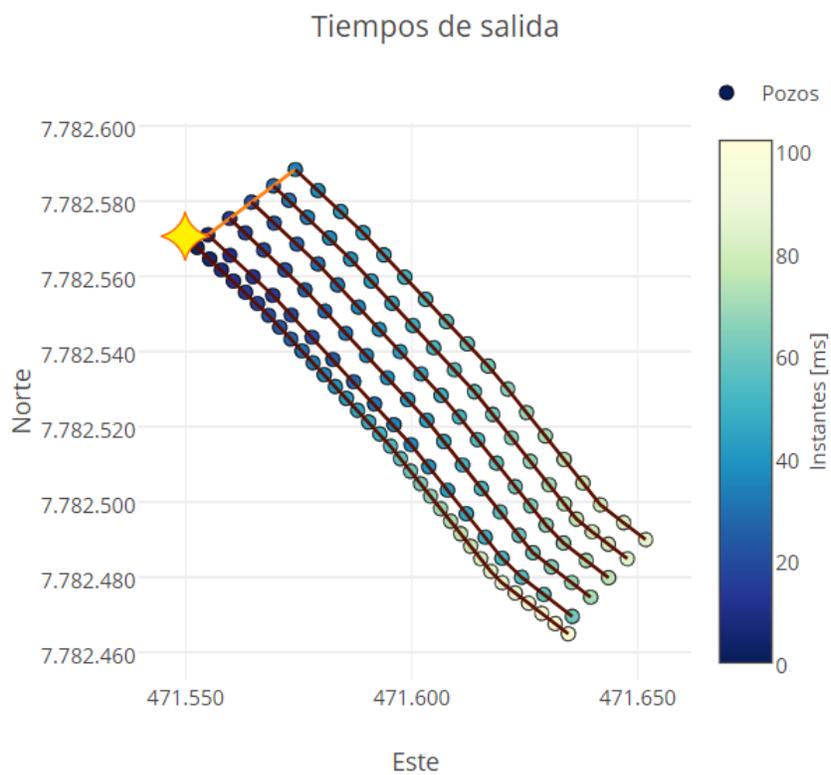


Figura 7.95: Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 3 - 8 de septiembre de 2015

7.3.4. Tronadura 4: 10 de septiembre de 2015

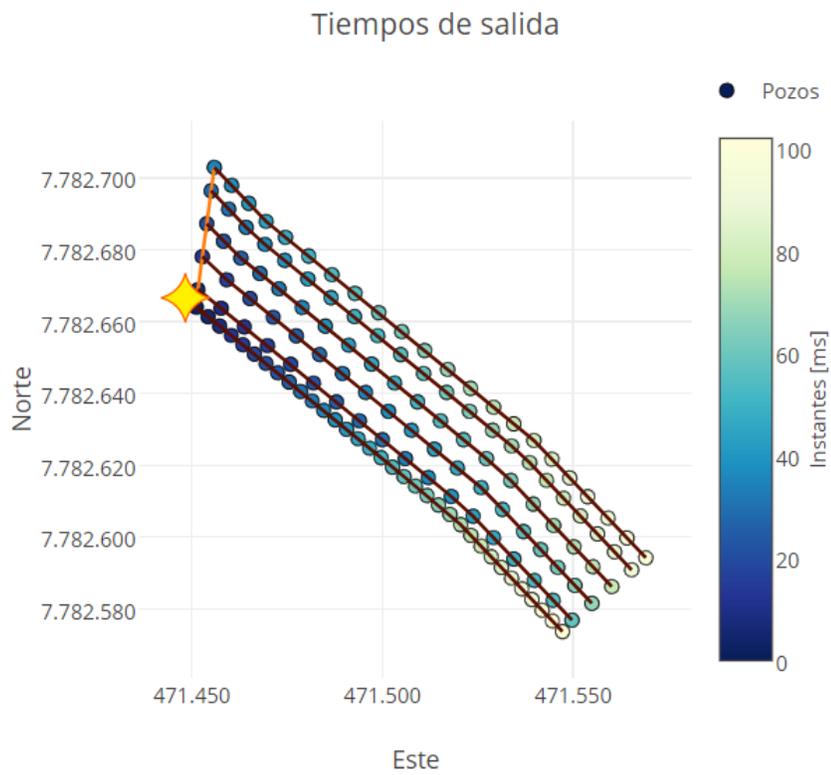


Figura 7.96: Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 4 - 10 de septiembre de 2015

7.3.5. Tronadura 5: 13 de septiembre de 2015

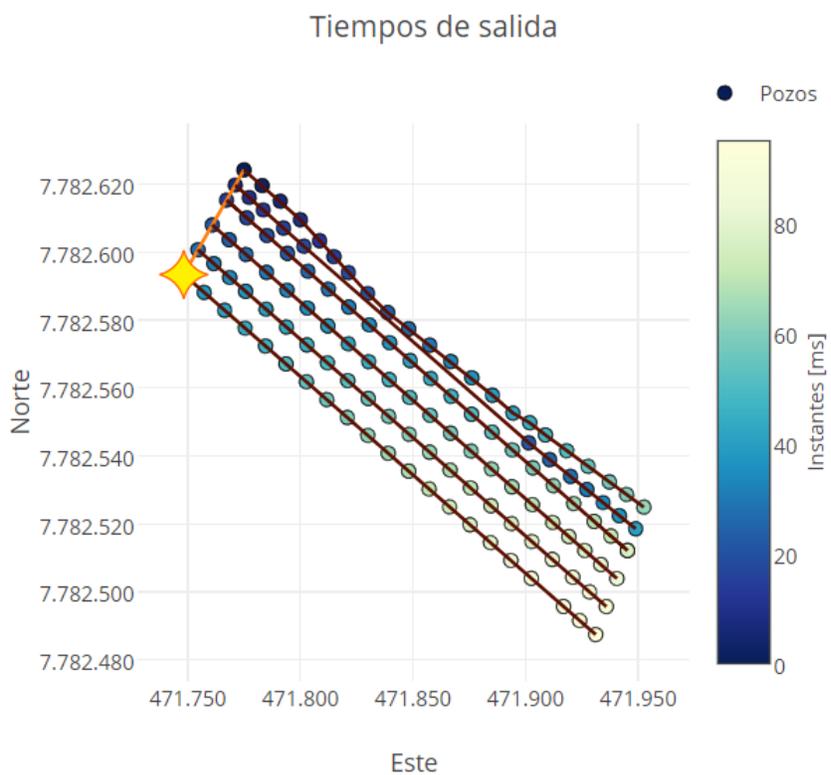


Figura 7.97: Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 5 - 13 de septiembre de 2015

7.3.6. Tronadura 6: 14 de septiembre de 2015

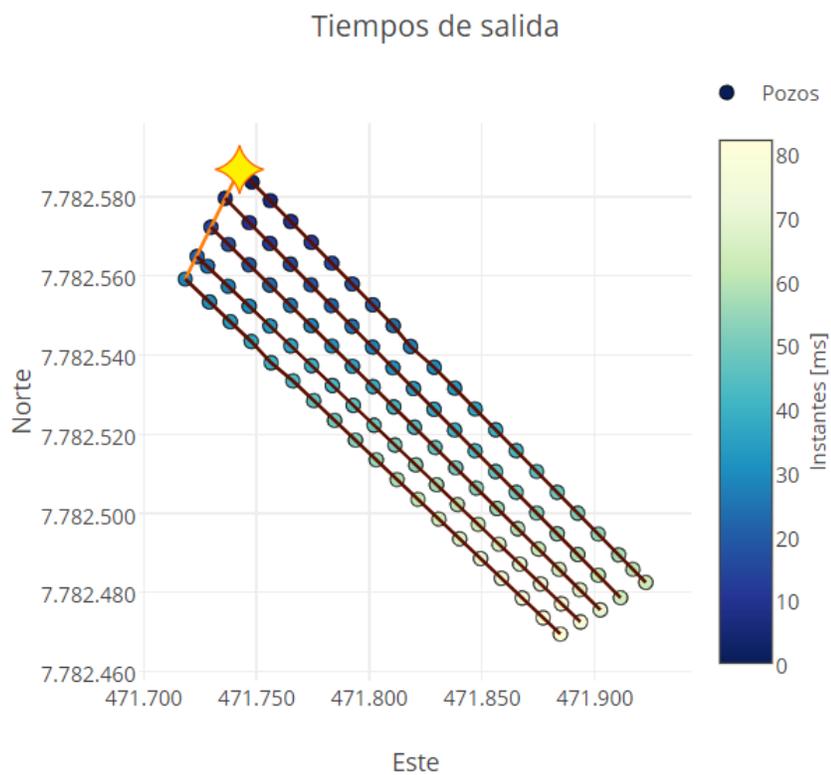


Figura 7.98: Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 6 - 14 de septiembre de 2015

7.3.7. Tronadura 7: 15 de septiembre de 2015

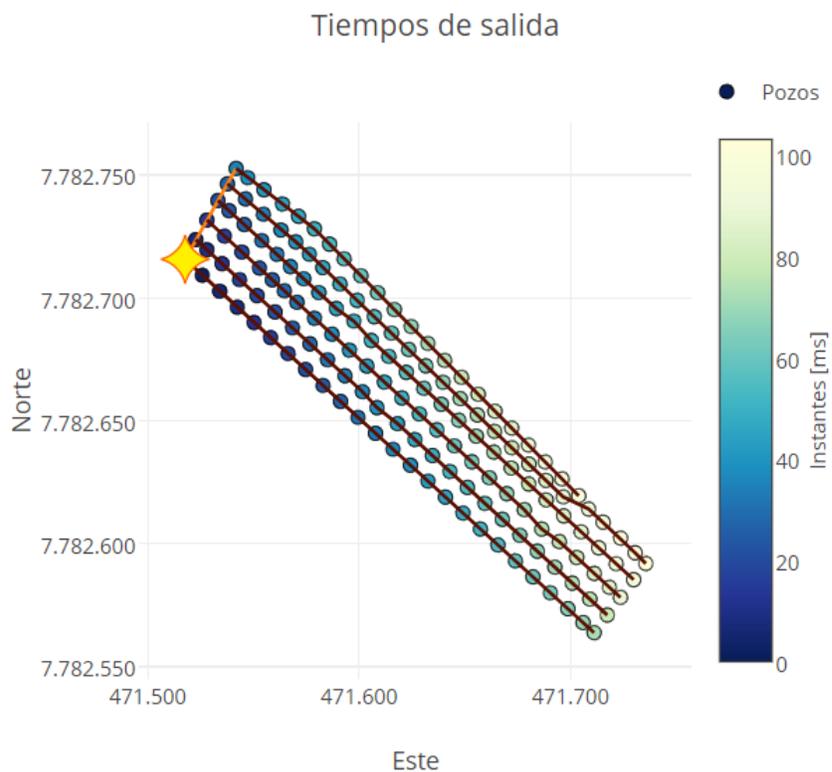


Figura 7.99: Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 7 - 15 de septiembre de 2015

7.3.8. Tronadura 8: 26 de septiembre de 2015

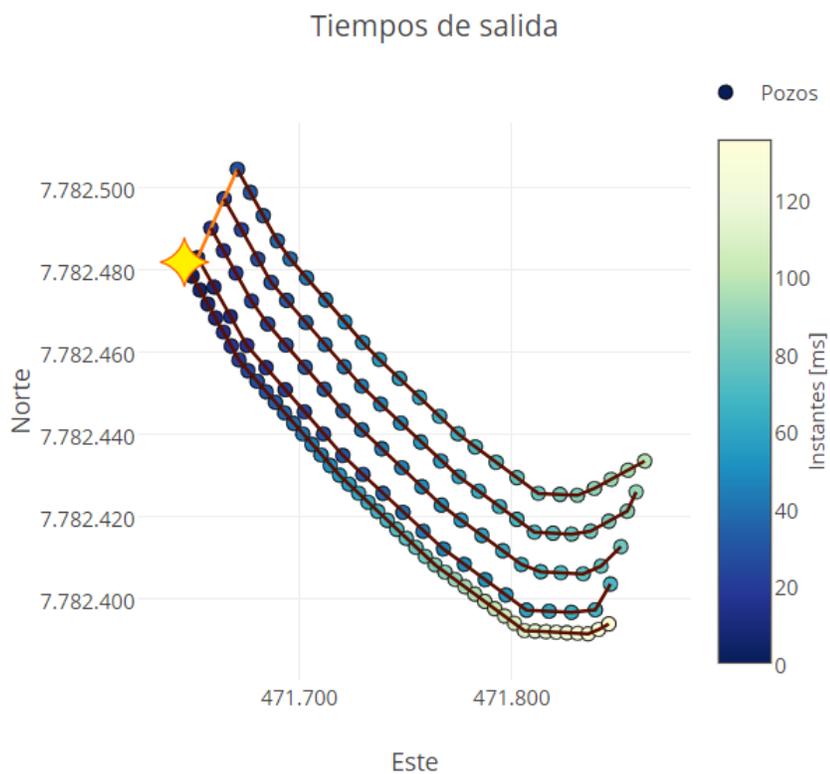


Figura 7.100: Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 8 - 26 de septiembre de 2015

7.3.9. Tronadura 9: 27 de septiembre de 2015

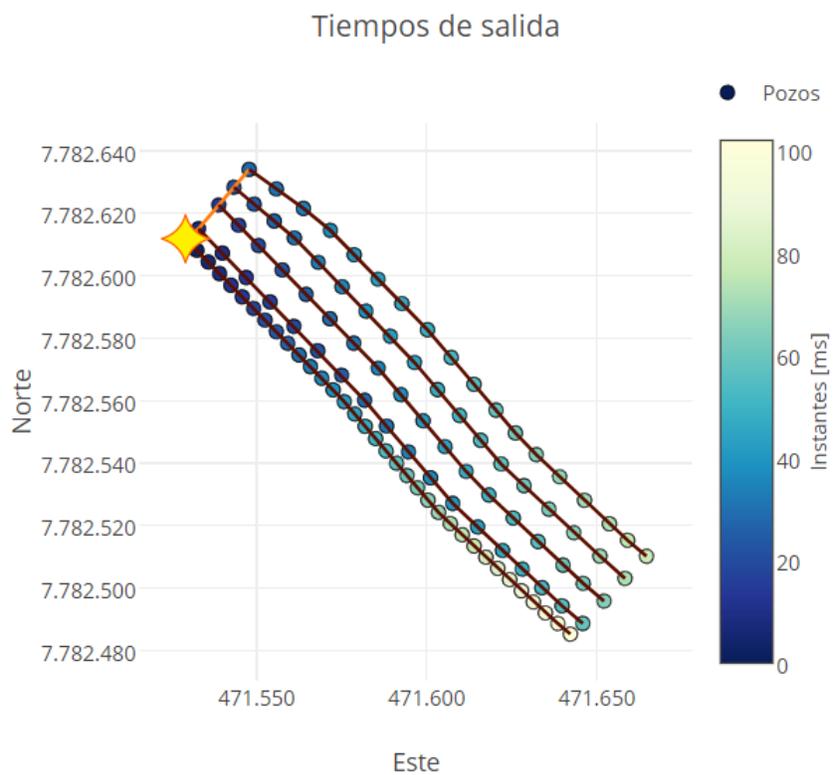


Figura 7.101: Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 9 - 27 de septiembre de 2015

7.3.10. Tronadura 10: 28 de septiembre de 2015

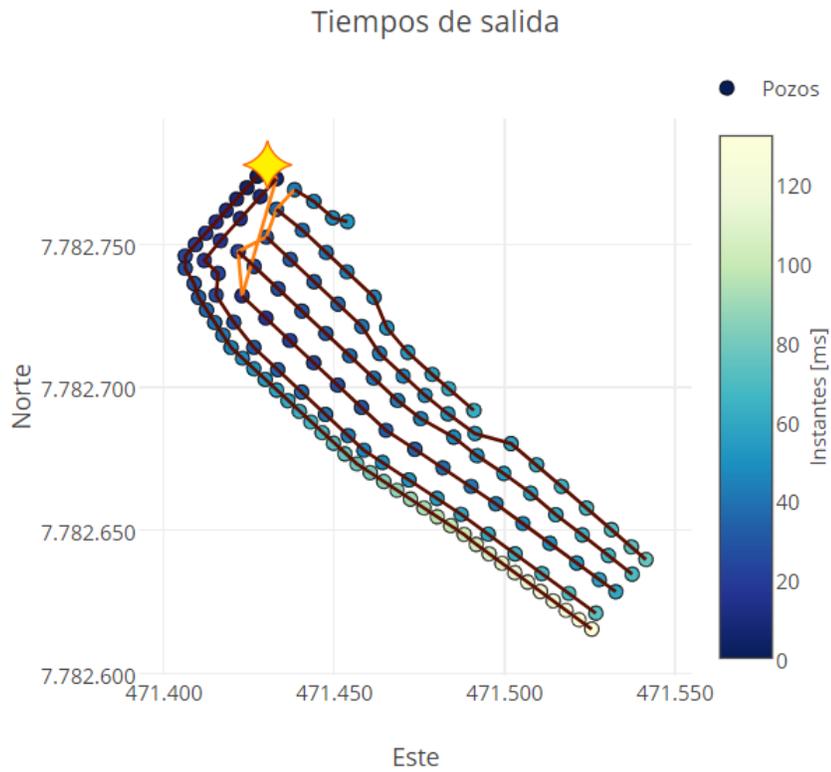


Figura 7.102: Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 10 - 28 de septiembre de 2015

7.3.11. Tronadura 11: 30 de septiembre de 2015

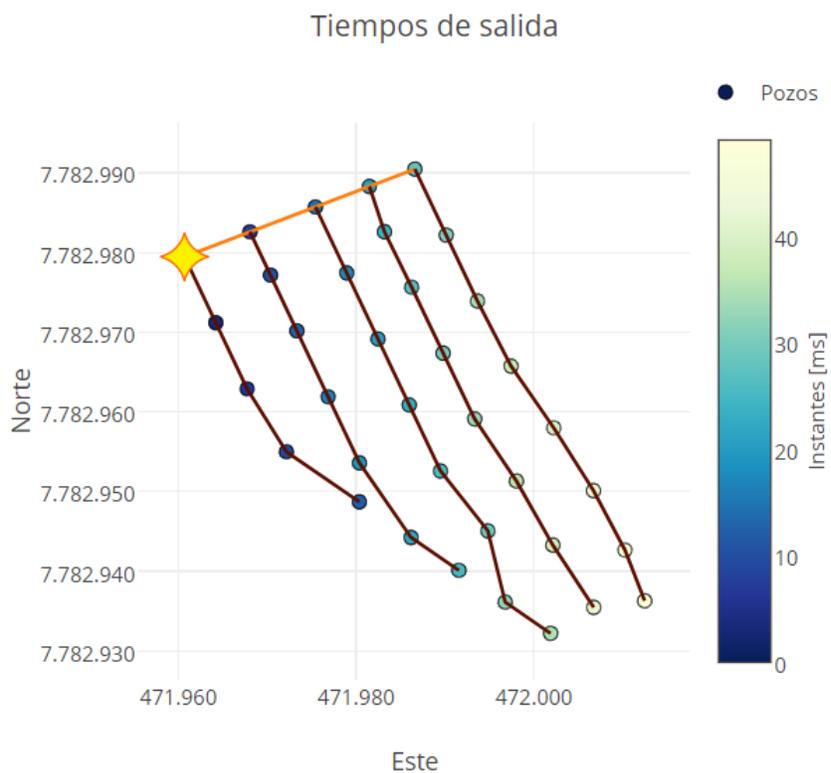


Figura 7.103: Malla de perforación y tiempos de salida de la tronadura 11 - 30 de septiembre de 2015

Bibliografía

- [1] Ways to identify outliers in regression and ANOVA - Minitab, 2019. Retrieved from <https://support.minitab.com/en-us/minitab/19/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/supporting-topics/model-assumptions/ways-to-identify-outliers/>.
- [2] J. M. Benjumea. Vibraciones causadas por actividad humana: Caracterización, efectos y manejo en la ingeniería civil, 2003.
- [3] D. Blair. The measurement, modeling and control of ground vibrations due to blasting. *Int'l. Symp. Fragmentation on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, Colorado*, 1:88–101, 01 1987.
- [4] D. Blair and A. Minchinton. Near-field blast vibration models. *Proc. 8th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast*, 8:152–159, 01 2006.
- [5] D. P. Blair. Statistical models for ground vibration and airblast. *Fragblast*, 3(4):335–364, 1999.
- [6] D. P. Blair. Non-linear superposition models of blast vibration. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2008.
- [7] B.M.N. *Blast vibration monitoring and control*, volume 22 of *Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and*. Prentice-Hall, 1985.
- [8] CINTEX. *Manual de monitoreo de vibraciones generadas por tronaduras, analisis y modelamiento*. Enaex, 2005.
- [9] J. P. Devine and W. I. Duvall. Effect of Charge Weight on Vibration Levels for Millisecond Delayed Quarry Blasts. *Seismol. Res. Lett.*, 34(2):16–24, 1966.
- [10] C. H. Dowding. *Construction Vibrations*. Prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics. International Society of Explosives, 2000.
- [11] ENAEX S.A. Manual De Tronadura Enaex S.a., 2012.
- [12] I. S. o. E. Engineers. *Manual Del Especialista En Voladura*. International Society of Explosives Engineers, 2008.
- [13] T. D. E. Estudio, D. E. V. Requerido, and A. Emplear. Control de vibraciones producidas, 1993.

- [14] D. I. für Normung e.V. *Vibration in Buildings - Part 3: Effects on Structures*, 1999.
- [15] M. T. Gladwin and F. D. Stacey. Anelastic degradation of acoustic pulses in rock. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1974.
- [16] ISEE. *ISEE Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs*, 2015.
- [17] M. KHANDELWAL, P. K. KANKAR, and S. P. HARSHA. Evaluation and prediction of blast induced ground vibration using support vector machine. *Min. Sci. Technol.*, 2010.
- [18] M. Khandelwal and T. N. Singh. Evaluation of blast-induced ground vibration predictors. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 27(2):116–125, 2007.
- [19] M. Khandelwal and T. N. Singh. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2009.
- [20] E. Kjartansson. Constant Q-wave propagation and attenuation. *J. Geophys. Res.*, 84(B9):4737–4748, 1979.
- [21] L. D. Leet. *Vibrations from Blasting Rock*. Harvard University Press, 2014.
- [22] C. Mathewson and M. Pope. a Case Study of Blast Vibration Modelling in the Hanason Servtex Quarry , Garden Ridge City , Texas, 2016.
- [23] M. Monjezi, M. Ghafurikalajahi, and A. Bahrami. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural networks. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 2011.
- [24] R. C. Morhard. *Explosives and Rock blasting*. Field Technical Operations, Atlas Powder Company, 1987.
- [25] S. Normen-Vereinigung. SN-640312a: Les ébranlements – Effet des ébranlements sur les constructions(Swiss Standard on vibration effects on buildings), 1992.
- [26] P. A. Person, R. Holmberg, and J. Lee. *Rock blasting and explosives engineering*. CRC Press, 1994.
- [27] D. Rudenko. An analytical approach for diagnosing and solving blasting complaints. *Proc. Annu. Conf. Explos. Blasting Tech.*, I:393–406, 2002.
- [28] S I S. Svensk Standard SS 460 48 64 Vibration och stöt – Mätning och riktvärden för bedömning av komfort i byggnader, 2004.
- [29] O. M. Services. *Bulk systems - product reference chart*, 2010.
- [30] D. E. Siskind, M. S. Stagg, J. W. Kopp, and C. H. Dowding. Structure Response and Damage Produced By Ground Vibration From Surface Mine Blasting. *Rep. Investig. - United States, Bur. Mines*, (8507), 1980.
- [31] D. E. Siskind, M. S. Stagg, J. W. Kopp, and C. H. Dowding. Structure Response and

- Damage Produced By Ground Vibration From Surface Mine Blasting. *Rep. Investig. - United States, Bur. Mines*, (8507), 1980.
- [32] A. Spathis and M. Noy. *Vibrations from Blasting: Workshop hosted by Fragblast 9 - the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. CRC Press, 2009.
- [33] I. ©Inc. Minimate Plus Operator Manual - 716U0101 Rev 15, 2013. Retrieved from <https://www.instantel.com/file/125/download?token=8FFR0QPG>.
- [34] I. ©Inc. Sensor Guide, 2018. Retrieved from https://www.instantel.com/file/1231/download?token=_R0eFWD0.
- [35] H. TM. Informe de diagnóstico, estudio de vibraciones por tronadura F14. Technical report, Compañía Minera Cerro Colorado - BHP Billiton, 2015.
- [36] H. TM. Informe efecto tronadura sobre la infraestructura adyacente, estudio de vibraciones por tronadura F14. Technical report, Compañía Minera Cerro Colorado - BHP Billiton, 2015.
- [37] A. Veletsos and N. M. Newmark. Effect of inelastic behavior on the response of simple systems to earthquake motions. 1960.
- [38] H. S. Venkatesh. Influence of total charge in a blast on the intensity of ground vibrations - Field experiment and computer simulation. *Fragblast*, 9(3):127–138, 2005.
- [39] R. L. Yang and D. S. Scovira. A model to predict the peak particle velocity for near field blast vibration-based on dominant charge, waveform broadening, delay time modeling, and non-linear charge weight superposition. *Blast Fragn*, 2:91–116, 2008.
- [40] Z. Zhang and G. E. Karniadakis. *Brownian motion and stochastic calculus*, volume 196. Springer, Berlin, 2nd edition, 2017.