



**ANÁLISIS DE LAS SEÑALES SÍSMICAS GENERADAS POR VOLADURAS EN MINAS A
CIELO ABIERTO CON URBANIZACIÓN CRECIENTE EN SU
ENTORNO: YUMBO**

Trabajo de grado para adoptar el título de
Ingeniero Civil

Julio Armando Toro Paz
Daniel Alejandro Prado Cobo

Directora
Ing. Sandra Liliana Cano Moya, Ph.D.

Universidad del Valle Facultad de Ingeniería
Escuela de ingeniería Civil y Geomática-cod:3747
Santiago de Cali, Colombia

2025

Dedicatoria

A Dios, por el regalo de la vida, por darme la responsabilidad, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi formación profesional.

A mis padres, por su apoyo incondicional, tanto moral como afectivo; por enseñarme a nunca desistir y a luchar siempre por lo que me propongo. Son para mí un ejemplo vivo de perseverancia, dedicación y amor.

A mi hermano, por estar siempre presente, brindándome ánimo y convirtiéndose en uno de los motores que me impulsaron a alcanzar este logro.

A mi abuela Mercedes Castro, quien ya no está físicamente, pero vive siempre en mi mente y corazón. Ella anhelaba verme graduado, y aunque no pueda estar aquí para celebrarlo, este logro se lo dedico con todo mi amor.

A la profesora, jefe, amiga, Sandra Cano, por su invaluable guía, por compartir generosamente sus conocimientos y experiencias, y por transmitirme la confianza necesaria para avanzar en cada etapa de este proyecto.

A mis amigos, quienes han estado a mi lado en los buenos y malos momentos, y que con su apoyo hicieron más llevadero este camino universitario.

Julio Armando Toro Paz

A Dios, por la vida, por escucharme, por cuidarme y por darme la oportunidad de llegar hasta aquí, iluminando mi camino incluso en los momentos más difíciles.

A mi madre, por ser mi mayor inspiración, ejemplo de fortaleza incansable, resiliencia y apoyo incondicional en cada paso de este camino, por enseñarme que las metas se logran con esfuerzo y dedicación.

A mi hermana, cuyo apoyo ha sido fundamental para que este logro sea posible, y por enseñarme responsabilidad y entrega en todo lo que hacemos en nuestras vidas.

A mi abuela y a mi tía, quienes han sido como segundas madres para mí, brindándome cuidado, consejos y un cariño que ha marcado mi vida.

A mi abuelo, por sus enseñanzas y por luchar contra todo prejuicio, por quererme incondicionalmente y apoyarme en todo.

A mi tutora la profesora Sandra Cano, por su orientación, por depositar su confianza en mí desde el primer momento, por su paciencia y por su compromiso en el proceso académico de cada uno de sus estudiantes.

A los docentes ingenieros de la facultad de ingeniería civil de la Universidad del Valle, por guiarme e inspirarme a superarme cada día.

Y a mi mascota, compañera silenciosa que ha estado conmigo en mis momentos de tristeza y estrés, recordándome con su presencia que incluso en el silencio hay compañía y consuelo.

Daniel Alejandro Prado Cobo

ÍNDICE

Dedicatoria.....	2
Glosario.....	10
RESUMEN	11
Abstract.....	12
CAPITULO I- INTRODUCCIÓN	13
1. Generalidades	14
1.1. Antecedentes.....	14
1.2. Descripción de la problemática.....	15
1.3. Formulación de la pregunta de investigación	16
1.4. Objetivos:	16
1.4.1. Objetivo General	16
1.4.2. Objetivos Específicos	16
1.5. Justificación	17
1.6. Alcances y limitaciones de la investigación	18
1.6.1. Alcances	18
1.6.2. Limitaciones:.....	18
CAPITULO II - MARCO DE REFERENCIA.....	18
2.1. Marco teórico	18
2.1.1. Ondas sísmicas.....	18
2.1.2. Parámetros de las ondas	18
2.1.3. Parámetros de vibración	19
2.1.4. Ondas sísmicas generadas por voladuras	20
2.1.5. Caso específico de voladuras	21
2.1.6. Parámetros que influyen en las vibraciones	27
2.1.7. Instrumento para monitorear vibraciones.....	28
2.1.8. Efectos de la voladura	29
2.1.9. Modelo de vibraciones	30
2.1.10 Efecto de las vibraciones sobre las personas.....	33
2.2. Marco legal	34
2.3. Estado del arte	37
2.4. Propósito de la investigación	38
CAPITULO III – METODOLOGÍA	39
3.1. Etapa 1: Caracterización de las señales sísmicas.....	39
3.2. Etapa 2: Evaluación de efectos en el entorno cercano	40
3.3. Etapa 3: Documentación de condiciones y limitaciones del estudio	40
CAPITULO IV-DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS CON VOLADURA	41
4.1. Propagación de las ondas sísmicas	42
4.2. parámetros de las vibraciones.....	42
4.3. Parámetros operativos de la voladura.....	44
4.4. Efectos sobre el macizo rocoso.....	45
4.5. Procedimiento de ejecución de pruebas	45
CAPITULO V – TRABAJO DE CAMPO	46

5.1 Ubicación zonas de estudio	46
5.2. Procedimiento para recolección de datos	47
CAPITULO VI – ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	56
CAPITULO VII – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
7.1. Conclusiones	66
7.2. Recomendaciones.....	67
CAPITULO VIII - BIBIOGRAFIA	68
CAPITULO IX- ANEXOS.....	74
9.1. Anexo A- Caracterización y resultados de voladuras.....	74
9.1.1. Voladura Perea y Cia SAS 20-03-2025	74
9.1.2. Voladura Perea y Cia SAS 13-05-2025	77
9.1.3. Voladura la roca 24-05-2025	80
9.1.4. Voladura Cantera MATERIALES Y AGREGADOS EMT SAS 29-05-2025	83
9.1.5. Voladura cantera Perea y Cia SAS 29-07-2025	86
9.1.6. Voladura cantera Perea y Cia SAS 29-07-2025	89
9.1.7. Voladura cantera Perea y Cia SAS 30-07-2025	92
9.1.8. Voladura cantera Perea y Cia SAS 30-07-2025	95
9.1.9. Voladura cantera Perea y Cia SAS 30-07-2025	98
9.2. Anexo B- Código de Phyton	101
9.2.1. Código generar conversión de unidades y parámetros generales.....	101
9.2.2. Código para generar desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud Vs tiempo	102
9.2.4. Código para espectro de frecuencias (FFT)	104
9.2.5. Código para frecuencia vs VPP - limites DIN 4150	104
9.3. Anexo C-Galería de fotos	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Movimiento de las ondas y sus parámetros. Fuente: Los autores.....	19
Figura 2. Esquema ondas internas y superficiales. Fuente: https://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/21_ondas_ssmicas.html	21
Figura 3. Esquema general voladura. Fuente: EXSA S.A	22
Figura 4. Esquema general voladura. Fuente: EXSA S.A	22
Figura 5. Causas y efectos de voladuras bajo diferentes cargas de explosivo. Fuente: EXSA S.A.....	23
Figura 6. Diseño de malla. Fuente: EXSA S.A.....	24
Figura 7. Configuraciones de malla más utilizadas. Fuente: EXSA S.A	24
Figura 8. Ejemplo distribución de una voladura en tramos. Fuente: EXSA S.A	25
Figura 9. Esquemas de voladuras en una fila en tramos. Fuente: EXSA S.A.....	25
Figura 10. Esquemas de voladuras en múltiples filas en tramos. Fuente: EXSA S.A	26
Figura 11- Sismógrafo. Fuente: Los autores	29
Figura 12- Cantera Agregados LA ROCA S.A.S	46
Figura 13-Cantera PEREA & CIA S.A.S- Arroyo Hondo.....	46
Figura 14-Cantera PEREA & CIA S.A.S- Guabinas	47
Figura 15-Cantera Materiales y agregados EMT S.A.S.....	47
Figura 16-Parcelacion campestre Laguna Seca-Guabinas	47
Figura 17-Ubicacion canteras para caso de estudio a parcelación campestre laguna seca.	47
Figura 18- Sismógrafo instalado in situ cantera Pera y Cia SAS. Fuente: Los autores	49
Figura 19- Antes y después voladura (Fecha registro 20-03-2025) Fuente: Los autores	50
Figura 20- Sismógrafo instalado in situ cantera Pera y Cia SAS. Fuente: Los autores	50
Figura 21-Antes y después voladura (fecha registro 13-05-2025). Fuente: Los autores	51
Figura 22- Sismógrafo instalado in situ cantera LA ROCA. Fuente: Los autores.....	51
Figura 23-Antes y después voladura (Fecha registro 24-05-2025). Fuente: Los autores	52
Figura 24-Sismógrafo instalado in situ cantera MATERIALES Y AGREGADOS EMT SAS. Fuente: Los autores.....	52
Figura 25-Antes y después voladura (Fecha registro 29-05-2025).Fuente: Los autores	53
Figura 26- Sismógrafo instalado in situ cantera Pera y Cia SAS. Fuente: Los autores	53
Figura 27- Antes y después voladura (Fecha registro 29-07-2025) Fuente: Los autores	54
Figura 28-Sismógrafo instalado in situ cantera Pera y Cia SAS. Fuente: Los autores	54
Figura 29-Antes y después voladura (Fecha registro 30-07-2025) Fuente: Los autores	55
Figura 30-Sismógrafo instalado in situ cantera Pera y Cia SAS. Fuente: Los autores	55
Figura 31-Velocidad pico partícula Vs Frecuencia ZC. Fuente: Los autores	58
Figura 32-Frecuencia vs VPP caso estudio unidad residencial LAGUNA SECA. Fuente: Los autores	61
Figura 33-Frecuencia vs VPP caracterización voladuras. Fuente: Los autores	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 .Limites de vibraciones según frecuencia de onda - norma USBM RI-8507. Fuente: Los autores	35
Tabla 2. clasificación de respuesta estructura l- norma USBM RI-8507. Fuente: Los autores	35
Tabla 3.Valores límites de PPV - norma DIN 4150-3. Fuente: Los autores.....	36
Tabla 4. clasificación de efectos en edificaciones - norma DIN 4150-3. Fuente: Los autores	36
Tabla 5. Normas internacionales para control de vibraciones. Fuente: Los autores	37
Tabla 6-Registro características de voladura. Fuente: Los autores	56
Tabla 7- Resultados obtenidos. Fuente: Los autores.....	57
Tabla 8-Ondas longitudinales. Fuente: Los autores	57
Tabla 9-Ondas transversales. Fuente: Los autores	58
Tabla 10-Ondas verticales. Fuente: Los autores	58
Tabla 11- Registro prueba para caso vivienda unidad laguna seca. Fuente: Los autores	59
Tabla 12-Cuadro comparativo PPV (EHZ, EHN Y EHE). Fuente: Los autores	62
Tabla 13-Cuadro comparativo aceleración pico (EHZ, EHN Y EHE). Fuente: Los autores.....	64

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1. Voladura 20/03/25, empresa Perea S.A.S, cantera Arroyo hondo.....	107
Fotografía 2. Zona de la voladura 09/04/25, empresa Agregados La Roca., cantera Guabinas.	107
Fotografía 3. Preparación del explosivo para la voladura 09/04/25, empresa Agregados La Roca., cantera Guabinas.	108
Fotografía 4. Instalación del sismógrafo en la voladura 13/05/25, empresa Perea S.A.S., cantera Arroyo hondo.	108
Fotografía 5. Zona de la voladura 13/05/25, empresa Perea S.A.S, cantera Arroyo hondo.....	109
Fotografía 6. Detonación voladura 13/05/25, empresa Perea S.A.S, cantera Arroyo hondo.	109
Fotografía 7. Terreno después de la voladura 13/05/25, empresa Perea S.A.S, cantera Arroyo hondo....	110
Fotografía 8. Detonación de la voladura 29/07/25, empresa Perea S.A.S, cantera Guabinas.....	110
Fotografía 9. Detonador electrónico usado en la voladura 29/07/25, empresa Perea S.A.S, cantera Guabinas.	111
Fotografía 10- Detonación de la voladura 30/07/25, empresa Perea S.A.S, cantera Guabinas	111

LISTA DE FIGURAS ANEXO A

[illegible]

amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores	90
Figura anexo A 34. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.	90
Figura anexo A 35. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores	91
Figura anexo A 36. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.	91
Figura anexo A 37. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores	92
Figura anexo A 38. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.	92
Figura anexo A 39. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores	93
Figura anexo A 40. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.	93
Figura anexo A 41. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores	94
Figura anexo A 42. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.	94
Figura anexo A 43. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores	95
Figura anexo A 44. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.	95
Figura anexo A 45. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores	96
Figura anexo A 46. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.	96
Figura anexo A 47. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores	97
Figura anexo A 48. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.	97
Figura anexo A 49. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores	98
Figura anexo A 50. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.	98
Figura anexo A 51. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores	99
Figura anexo A 52. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.	99
Figura anexo A 53. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores	100
Figura anexo A 54. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.	100

Glosario

Voladura: Proceso controlado empleado para fracturar y desplazar roca mediante el uso de explosivos, los cuales se alojan en perforaciones previamente realizadas. Al detonar, la energía liberada genera altas presiones que provocan tanto la fragmentación del material como su desplazamiento, en un fenómeno tridimensional que combina efectos mecánicos y dinámicos.

Detonador: Dispositivo diseñado para iniciar la reacción de explosivos de alta potencia. Contiene en su interior cargas explosivas de alta sensibilidad (primaria y secundaria) y puede incorporar sistemas de retardo que permiten secuenciar las detonaciones con precisión, optimizando así el control del proceso de voladura.

Onda: Es una alteración o cambio en las condiciones de un medio que se desplaza a través de él o incluso en el vacío, llevando energía de un punto a otro sin trasladar materia de forma permanente. En el caso de las voladuras, las ondas sísmicas viajan por el terreno transmitiendo energía que, dependiendo de su intensidad y frecuencia, puede influir en la estabilidad de suelos y en la integridad de las estructuras cercanas.

Onda sísmica: Vibración mecánica generada por la liberación repentina de energía en el terreno, como ocurre en una voladura. Puede presentarse como ondas de cuerpo (P y S), que atraviesan el subsuelo, o como ondas superficiales, que se propagan por la capa externa, cada una con distinta velocidad y capacidad de generar vibraciones o daños.

Sismógrafo: Es un equipo utilizado para detectar y registrar los movimientos del suelo, ya sean provocados por fenómenos naturales, como los sismos, o por acciones humanas, como las voladuras en minería. Su funcionamiento se basa en un sensor llamado sismómetro, el cual percibe las vibraciones del terreno y las envía a un sistema de registro que las transforma en información visual o digital, permitiendo su interpretación y análisis detallado.

Vibración: Oscilación mecánica de un cuerpo o medio alrededor de una posición de equilibrio. Se caracteriza por su amplitud, frecuencia y duración, y puede ser originada por fuentes naturales o por actividades humanas, como maquinaria pesada, tránsito o explosiones controladas.

Retardo electrónico: Sistema de sincronización en voladuras que utiliza dispositivos programables para detonar cargas explosivas en intervalos precisos, mejorando el control del impacto y reduciendo vibraciones.

Fragmentación: Resultado de la voladura que consiste en la división del macizo rocoso en partículas o bloques de diferentes tamaños, dependiendo de la energía aplicada y de las características de la roca.

Atenuación: Disminución progresiva de la amplitud y energía de una onda a medida que se propaga por un medio, causada por la absorción y dispersión de la energía.

RESUMEN

Este trabajo de investigación analiza el impacto de las vibraciones generadas por voladuras en las canteras Perea y Cia SAS, agregados La ROCA SAS y materiales y agregados Emt SAS, con el fin de identificar los parámetros clave para su control y garantizar que se mantengan dentro de los límites permitidos por la normativa vigente.

Para ello, se realizaron múltiples visitas de campo en las que se registraron datos durante la ejecución de las voladuras, utilizando un sismógrafo Raspberry shake 3D, RAFDA. Estos instrumentos permitieron medir las vibraciones en tres direcciones: vertical, horizontal y transversal. A partir de la información recolectada, se evaluaron variables como amplitud, frecuencia y duración, contrastándolas con los valores establecidos en la normativa colombiana y en regulaciones internacionales.

El estudio también consideró la relación entre la cantidad de explosivo utilizada y el nivel de vibración producido, con el fin de establecer criterios para diseñar voladuras controladas que cumplan sus objetivos operativos sin generar afectaciones significativas en edificaciones o predios cercanos.

Los resultados obtenidos fueron analizados para determinar el alcance de las vibraciones y su posible incidencia en el entorno inmediato de las canteras. Finalmente, se presentan conclusiones y recomendaciones orientadas a mejorar las prácticas de voladura en zonas donde la actividad minera convive con desarrollos urbanos, contribuyendo así a la seguridad estructural y a la sostenibilidad de la operación.

Palabras clave: vibraciones, voladuras, canteras, monitoreo sísmico, amplitud, frecuencia, duración de onda, normativa colombiana, sismógrafo, seguridad estructural, control de vibraciones, minería urbana.

Abstract

This research study analyzes the impact of vibrations generated by blasting at the Perea y Cia SAS, agregados La ROCA SAS and materiales y agregados Emt SAS quarries, in order to identify key parameters for their control and ensure they remain within the limits permitted by current regulations.

To this end, multiple field visits were made, during which data was recorded during the blasting operations using a Raspberry shake 3D, RAFDA seismograph. These instruments measured vibrations in three directions: vertical, horizontal, and transverse. Based on the information collected, variables such as amplitude, frequency, and duration were evaluated, comparing them with the values established in Colombian and international regulations.

The study also considered the relationship between the amount of explosive used and the level of vibration produced, with the aim of establishing criteria for designing controlled blasts that meet their operational objectives without causing significant damage to nearby buildings or properties. The results obtained were analyzed to determine the extent of the vibrations and their potential impact on the immediate surroundings of the quarries. Finally, conclusions and recommendations are presented aimed at improving blasting practices in areas where mining activity coexists with urban development, thus contributing to the structural safety and sustainability of the operation.

Keywords: vibrations, blasting, quarries, seismic monitoring, amplitude, frequency, wavelength, Colombian regulations, seismograph, structural safety, vibration control, urban mining.

CAPITULO I- INTRODUCCIÓN

La extracción de agregados en canteras, utilizando voladuras, es una práctica común en la industria de la construcción y una de las formas más efectivas para obtener grandes volúmenes de material. Sin embargo, esta práctica genera vibraciones sísmicas que pueden impactar edificaciones, infraestructuras y la calidad de vida en zonas residenciales, especialmente cuando la expansión de las zonas urbanas ha reducido progresivamente la distancia entre áreas residenciales y canteras en operación, como sucede en el municipio de Yumbo, Valle del Cauca, el cual corresponde al lugar de estudio. Realizar la evaluación y caracterización de estas señales sísmicas es clave para comprender su comportamiento y mitigar riesgos.

Las vibraciones producidas por las detonaciones varían según la cantidad de explosivos, las condiciones geológicas del terreno y la proximidad de estructuras sensibles. Parámetros como la amplitud máxima (pico de señal), frecuencia y duración de las ondas sísmicas determinan el impacto de estas voladuras en las construcciones cercanas. Sin un control adecuado, estas vibraciones pueden generar daños estructurales progresivos o representar un riesgo para la seguridad de las edificaciones y sus habitantes.

Este trabajo analiza las señales sísmicas generadas por voladuras en minas a cielo abierto ubicadas en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca) y su impacto. A través del registro y análisis de parámetros sísmicos fundamentales, se busca evaluar la magnitud de estas vibraciones y su efecto en infraestructuras cercanas. Además, se documentarán las condiciones del entorno y los desafíos identificados para generar información útil en la planificación de futuras voladuras en contextos urbanos.

Este trabajo se centra en analizar las señales sísmicas producidas por voladuras en canteras del municipio de Yumbo enfocadas en la producción de materiales para la construcción, con el propósito de determinar cómo pueden afectar, de forma inmediata, a las edificaciones que se encuentran en sus alrededores. Mediante herramientas computacionales avanzadas, se caracterizarán las ondas sísmicas en términos de amplitud, frecuencia y duración, estableciendo parámetros que permitan identificar riesgos y diseñar estrategias de mitigación. Los resultados contribuirán al desarrollo de protocolos de monitoreo sísmico más precisos y mejora de prácticas de voladuras, promoviendo un equilibrio entre la explotación minera y la seguridad de las comunidades afectadas.

1. Generalidades

1.1. Antecedentes

El estudio de las señales sísmicas generadas por voladuras a cielo abierto en entornos urbanos ha cobrado relevancia debido a su impacto potencial en la infraestructura y la seguridad de las comunidades cercanas. Las voladuras con explosivos en canteras y proyectos de minería generan vibraciones que pueden propagarse a través del suelo y afectar edificaciones, servicios públicos y ecosistemas circundantes. Por ello, la caracterización y análisis de estas señales es fundamental para establecer medidas de mitigación y control.

Investigaciones previas han demostrado que las vibraciones inducidas por voladuras a cielo abierto pueden clasificarse en ondas de compresión y de cizalla, cuya propagación depende de factores como la geología del sitio, la cantidad de explosivo utilizado y la técnica de voladura empleada (Kahrman, 2004). En terrenos poco consolidados, estas vibraciones pueden amplificarse, aumentando el riesgo de daños estructurales en edificaciones cercanas (Lu et al., 2019).

Estudios realizados en países con alta actividad minera, como Canadá y Australia, han desarrollado modelos predictivos para estimar la respuesta estructural de edificaciones ante vibraciones de voladuras. Estos modelos consideran parámetros clave como la velocidad de partícula pico (PPV, por sus siglas en inglés) y la frecuencia dominante de la señal sísmica, los cuales permiten evaluar el impacto de las explosiones en entornos urbanos (Jiang et al., 2021). Además, el uso de sismógrafos en tiempo real ha sido una herramienta efectiva para registrar y analizar la propagación de ondas sísmicas, permitiendo ajustar los parámetros de voladura y minimizar su impacto (Zhao et al., 2018).

A nivel normativo, diversas regulaciones internacionales establecen límites de vibración para voladuras a cielo abierto en áreas urbanas. La norma ISO 4866:2010 proporciona directrices para la medición y evaluación de vibraciones en estructuras, mientras que países como Estados Unidos y Alemania han definido valores máximos permitidos de PPV en función de la distancia entre la fuente de explosión y las edificaciones protegidas (Dowding, 2020). Estas normativas sirven de referencia para el control de impactos sísmicos en operaciones mineras y de construcción en todo el mundo.

En el contexto colombiano, los estudios sobre el impacto de voladuras en canteras urbanas son aún limitados. Sin embargo, investigaciones recientes han resaltado la necesidad de fortalecer el monitoreo y control de vibraciones en actividades mineras cercanas a zonas pobladas (Mendoza et al., 2022). La expansión urbana en áreas de explotación minera ha generado preocupaciones sobre la estabilidad de edificaciones y la calidad de vida de las comunidades aledañas, impulsando la búsqueda de estrategias que mitiguen los efectos de las detonaciones.

El presente estudio se fundamenta en estos antecedentes y busca contribuir al conocimiento sobre la caracterización de señales sísmicas generadas por voladuras a cielo abierto en canteras

urbanas. Para ello, se emplearán herramientas computacionales como PYTHON, con el fin de analizar los parámetros sísmicos y evaluar su impacto en edificaciones cercanas.

1.2. Descripción de la problemática

La explotación de canteras mediante el uso de explosivos con zonas urbanas cercanas representa un desafío significativo debido a sus impactos en la infraestructura, la seguridad pública y la calidad de vida de la población. Esta actividad minera es fundamental para la obtención de agregados como grava, arena y piedra, materiales esenciales para la industria de la construcción. Sin embargo, la proximidad de estas operaciones a zonas densamente habitadas plantea riesgos importantes relacionados con las vibraciones inducidas, las afectaciones estructurales y la percepción del riesgo por parte de la comunidad.

Las voladuras utilizadas en minas a cielo abierto para la fragmentación del material generan ondas sísmicas que se propagan a través del suelo, afectando potencialmente edificaciones, redes de infraestructura y equipamientos urbanos. Según estudios previos, la magnitud de estas vibraciones está influenciada por factores como la carga explosiva empleada, la profundidad de perforación, la composición geológica del subsuelo y la distancia entre la fuente de detonación y las estructuras expuestas (Dowding, 2020). En suelos poco consolidados o con características geotécnicas adversas, la propagación de las ondas sísmicas puede amplificarse, generando efectos que comprometen la estabilidad estructural de edificaciones cercanas.

Desde un punto de vista ingenieril, las ondas generadas por las detonaciones pueden clasificarse principalmente en ondas de compresión y ondas de cizalla (ondas S), cada una con un comportamiento específico en su interacción con el terreno y las estructuras. Estudios especializados han evidenciado que, en determinadas condiciones, estas vibraciones pueden provocar fisuras, desplazamientos diferenciales y, en casos extremos, fallas progresivas en elementos estructurales, especialmente en edificaciones antiguas o con baja capacidad portante (Hustrulid, 2019). Estos riesgos han motivado la creación de normas y estándares internacionales, como la ISO 4866:2010, que establecen límites máximos de vibración para zonas con presencia de población.

Además de los efectos estructurales, las detonaciones generan impactos en la percepción y el bienestar de la población residente en las cercanías de la cantera. Estudios en el ámbito de la psicología ambiental han señalado que la exposición continua a vibraciones y ruidos de alta intensidad puede provocar estrés crónico, ansiedad y alteraciones en los ciclos de sueño en comunidades expuestas a actividades mineras (World Health Organization, 2018). La incertidumbre sobre los posibles daños estructurales derivados de las voladuras también incrementa la sensación de inseguridad y el rechazo hacia la actividad minera, generando conflictos socioambientales que pueden afectar su sostenibilidad.

En este contexto, la implementación de estrategias de monitoreo y análisis de las señales sísmicas generadas por voladuras es una necesidad imperante.

La recopilación y el procesamiento de datos sobre la amplitud, frecuencia y duración de las vibraciones permiten no solo caracterizar la magnitud del impacto, sino también establecer límites seguros de operación que minimicen los efectos adversos sobre la comunidad y la infraestructura circundante. Tecnologías como los sismógrafos de alta sensibilidad y el análisis de señales mediante software especializado, como PYTHON, han demostrado ser herramientas efectivas para la evaluación de estos fenómenos (Kijko, 2018).

1.3. Formulación de la pregunta de investigación

- ¿Cómo se pueden analizar las señales sísmicas generadas por voladuras en canteras a cielo abierto para caracterizar su impacto en edificaciones e infraestructuras cercanas bajo la normativa internacional DIN 4150-3, considerando parámetros como amplitud, frecuencia y duración de las ondas?
- ¿Cuáles son las características principales de las señales sísmicas generadas por voladuras en cantera a cielo abierto y cómo afectan la estabilidad estructural de edificaciones en su entorno urbano?

1.4. Objetivos:

1.4.1. Objetivo General

Analizar las señales sísmicas generadas por voladuras en minas a cielo abierto en entornos urbanos para caracterizar su impacto en edificaciones e infraestructuras cercanas y contribuir al desarrollo de estrategias de monitoreo y mitigación de riesgos.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las señales sísmicas resultantes de las voladuras en minas a cielo abierto, analizando parámetros como amplitud, frecuencia y duración de las ondas sísmicas.
- Determinar los posibles efectos inmediatos causados por las vibraciones generadas por voladuras en minas a cielo abierto en el entorno cercano, basado en los criterios de evaluación de los valores límites PPV y la clasificación de los efectos en edificaciones según el valor de PPV de la normativa internacional DIN 4150-3.
- Documentar las condiciones y limitaciones del levantamiento y análisis de datos para establecer una base de referencia que oriente futuros estudios y estrategias de monitoreo que mitiguen el impacto de las voladuras en zonas urbanas.

1.5. Justificación

El municipio de Yumbo (Valle del Cauca), es reconocido como la capital industrial del departamento y se caracteriza por una fuerte expansión urbana e industrial en los últimos tiempos, lo que ha incrementado la interacción entre comunidades y las zonas de explotación minera. En particular, en las veredas Arroyo Hondo y Guabinas donde se localizan empresas mineras como Perea S.A.S, agregados La Roca S.A.S, entre otras, cuya principal actividad es la extracción de material para la construcción mediante voladura en minas a cielo abierto. La cercanía de estas operaciones (detonaciones) con áreas habitadas, infraestructuras y equipamientos urbanos han convertido en una necesidad la evaluación y el control de las vibraciones sísmicas que se generan, con el fin de prevenir posibles afectaciones a las estructuras cercanas y minimizar molestias a la población.

Este tema ha cobrado mucha relevancia para este territorio en los últimos años, por lo cual, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y la ANLA han desarrollado procesos de control y seguimiento ambiental, incluyendo la audiencia pública ambiental realizada el 15 de noviembre del 2023 donde se habló sobre la modificación del plan de manejo ambiental en canteras de Yumbo, y las resoluciones emitidas por la ANLA el 29 de noviembre del 2023 que establecen compromisos en materia de mitigación en proyectos extractivos del municipio. Esto refleja la importancia de este tema tanto para las autoridades ambientales como para las comunidades cercanas, las cuales han manifestado preocupaciones por posibles impactos en la calidad de vida y seguridad de las construcciones aledañas.

El análisis de estas señales permitirá evaluar la magnitud y características de las ondas sísmicas, facilitando la identificación de posibles efectos adversos sobre edificaciones e infraestructuras cercanas. Esto resulta crucial para establecer estrategias de control y prevención, con el fin de que los datos obtenidos pueden contribuir a la actualización y mejora de normativas y regulaciones que rigen los límites de vibración permitidos en entornos urbanos.

A nivel técnico, se reconoce que en Colombia no existe normativas específicas que regulen los límites de vibración por voladuras, lo que obliga a adoptar estándares internacionales como el estudio USBM RI-8507 de 1980 o la norma DIN 4150-3 del 2016. Dichos documentos establecen valores de referencia de velocidad pico de partícula (PPV) y rangos de frecuencia considerados seguros para evitar daños en edificaciones. Sin embargo, las condiciones geológicas particulares de Yumbo hacen necesario generar datos propios que permitan ajustar estos estándares a la realidad local.

Asimismo, este estudio cobra relevancia social, ya que una mejor comprensión de los efectos de las voladuras permitirá fortalecer la comunicación entre las empresas mineras y la comunidad, reduciendo la incertidumbre y los conflictos asociados a esta actividad. La percepción del riesgo y la seguridad estructural son factores clave en la aceptación social de proyectos mineros, por lo que contar con datos técnicos sólidos favorecerá la generación de medidas de mitigación y estrategias de socialización adecuadas.

Finalmente, los resultados de esta investigación podrán servir como referencia para futuras evaluaciones de impacto en otras canteras urbanas, contribuyendo al desarrollo de protocolos estándar para el monitoreo y control de vibraciones en minería a cielo abierto. Con ello, se busca aportar insumos técnicos que fortalezcan los planes de manejo ambiental exigidos por la CVC y la ANLA. De esta manera se pretende contribuir a promover una explotación minera más segura, sostenible y compatible con el desarrollo urbano.

1.6. Alcances y limitaciones de la investigación

1.6.1. Alcances

Los alcances son a nivel nacional, debido a que su aporte puede contribuir a la mitigación de los efectos producidos por voladuras en canteras y con esto lograr mejorar la relación entre la industria y la comunidad cercana.

1.6.2. Limitaciones:

Tuvimos algunas limitaciones en nuestra investigación, la principal fue lograr la aceptación de las minas para la realización de nuestro trabajo de grado y la segunda fue la inestabilidad en la conexión a internet del sismógrafo.

CAPITULO II - MARCO DE REFERENCIA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son “ondas que viajan a través de la tierra. Estas ondas representan la transmisión de la energía a través de la capa sólida de la tierra. Otros tipos de transmisión de energía son las ondas sonoras, las ondas de luz y las ondas de radio. Los terremotos generan ondas sísmicas. La ciencia que estudia los terremotos es la sismología; el nombre se deriva de la palabra griega seísmo que significa agitar. Además de las ondas sísmicas generadas naturalmente, existen muchas fuentes de ondas sísmicas usadas por el hombre. Cuando estas ondas sísmicas creadas por el hombre son sensibles, esto es, que se pueden sentir, se les nombra "vibración".” (Ortiz, A.E 2016)

2.1.2. Parámetros de las ondas

Los parámetros de una onda son las características esenciales que permiten describir y analizar su comportamiento. A través de ellos es posible medir y cuantificar aspectos como su forma, intensidad y ritmo de propagación. En el estudio del movimiento ondulatorio particularmente en el caso del movimiento armónico simple estos parámetros resultan clave para interpretar tanto la oscilación como la vibración que se genera. El *grafico 1* muestra un ejemplo de este tipo de

movimiento, el cual puede expresarse matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$y = A * \text{sen}(\omega t)$$

donde:

- y: desplazamiento en cualquier tiempo t, medido desde la línea cero o eje del tiempo
- A (Amplitud): desplazamiento máximo desde la posición de equilibrio, relacionado con la energía de la onda.
- t: tiempo
- T (Periodo): tiempo requerido para completar un ciclo de oscilación.
- f (Frecuencia): número de oscilaciones por segundo, en Hertz (Hz)
- ω (Frecuencia angular): velocidad de oscilación en radianes por segundo, dada por

$$\omega = 2\pi f.$$

Estos parámetros permiten interpretar la energía, duración y repetitividad de las ondas, aspectos esenciales en la evaluación del impacto sísmico sobre estructuras cercanas.

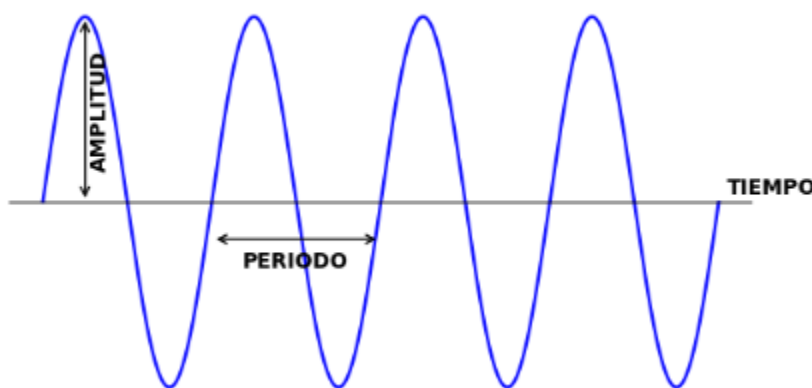


Figura 1. Movimiento de las ondas y sus parámetros. Fuente: Los autores

El período y la frecuencia son recíprocos, por lo tanto:

$$f = \frac{1}{T} \text{ ó } T = \frac{1}{f}$$

La longitud de onda, representada con la letra L, corresponde a la distancia entre dos puntos equivalentes en el ciclo de la onda, ya sea de cresta a cresta o de valle a valle. Su medida se expresa en metros y se obtiene multiplicando el período de la onda por su velocidad de propagación (V).

$$L = V * T$$

2.1.3. Parámetros de vibración

Tras haber abordado los parámetros de las ondas, es pertinente describir los parámetros de la vibración, los cuales constituyen las propiedades físicas esenciales para caracterizar el comportamiento dinámico del suelo ante la propagación de ondas sísmicas. Estos parámetros son: desplazamiento, velocidad, aceleración y frecuencia.

Cuando una onda sísmica atraviesa un medio rocoso, las partículas del material se apartan de su posición de equilibrio y oscilan alrededor de ella. Este cambio de posición recibe el nombre de desplazamiento. A medida que la partícula se mueve, adquiere una velocidad, la cual describe la rapidez del movimiento en función del tiempo. A su vez, la variación de esta velocidad genera una aceleración, que está directamente relacionada con la fuerza ejercida por la partícula sobre el medio, de acuerdo con la segunda ley de Newton. La frecuencia indica cuántas oscilaciones completas ocurren por segundo y se expresa en hertz (Hz).

Definiciones y consideraciones técnicas:

- Desplazamiento (D): distancia que recorre una partícula del terreno desde su posición de reposo, medida en milímetros. Se puede calcular mediante la expresión $D = \frac{V}{2\pi f}$, donde V es la velocidad de la partícula y f la frecuencia.
- Velocidad (V): rapidez con la que la partícula se mueve desde su punto de reposo. Parte de un valor nulo, alcanza un máximo y retorna a cero durante cada ciclo. Se mide en milímetros por segundo (mm/s).
- Aceleración (a): tasa de cambio de la velocidad de la partícula. La fuerza ejercida por la partícula en vibración es proporcional a su aceleración. Puede expresarse como $a = \frac{2\pi f V}{9810}$ en fracciones de la aceleración de la gravedad (g).
- Frecuencia (f): número de oscilaciones o vibraciones completas por segundo, expresada en hertz (Hz).

En la práctica, los sismógrafos para vibración suelen registrar la velocidad de partícula, dado que las normativas para la evaluación de daños estructurales se basan en este parámetro. No obstante, existen equipos diseñados para medir desplazamiento y aceleración, y algunos sismógrafos de velocidad cuentan con sistemas electrónicos capaces de integrar o diferenciar la señal, generando así registros equivalentes de desplazamiento o aceleración.

2.1.4. Ondas sísmicas generadas por voladuras

Las vibraciones originadas por las voladuras se propagan a través de los materiales en forma de ondas sísmicas, cuyo frente avanza de manera radial desde el punto de detonación. Estas ondas se clasifican en dos grandes grupos: internas y superficiales.

Dentro de las ondas internas, se distinguen dos tipos principales:

- Ondas primarias o de compresión (P): se desplazan a través del medio generando compresiones y dilataciones sucesivas. El movimiento de las partículas se produce en la misma dirección de propagación de la onda. Son las más rápidas y provocan cambios en el

volumen del material, aunque no modifican su forma.

- Ondas transversales o de cizallamiento (S): inducen un movimiento de las partículas en dirección perpendicular a la propagación de la onda. Su velocidad es menor que la de las ondas P, pero mayor que la de las superficiales. Bajo su acción, los materiales experimentan cambios de forma sin alterar su volumen.

Por otro lado, se encuentran las ondas superficiales, que suelen predominar en los efectos generados por las voladuras en roca. Entre ellas destacan:

- Ondas Rayleigh (R): producen un movimiento elíptico retrógrado de las partículas, semejante al oleaje en la superficie del agua.
- Ondas Love (L): generan un movimiento horizontal transversal a la dirección de propagación, sin componente vertical.

Existen además otros tipos de ondas superficiales, como las ondas Canal y las ondas Stonelly; sin embargo, su importancia práctica es limitada, ya que aportan escasa información en el estudio de vibraciones producidas por voladuras.

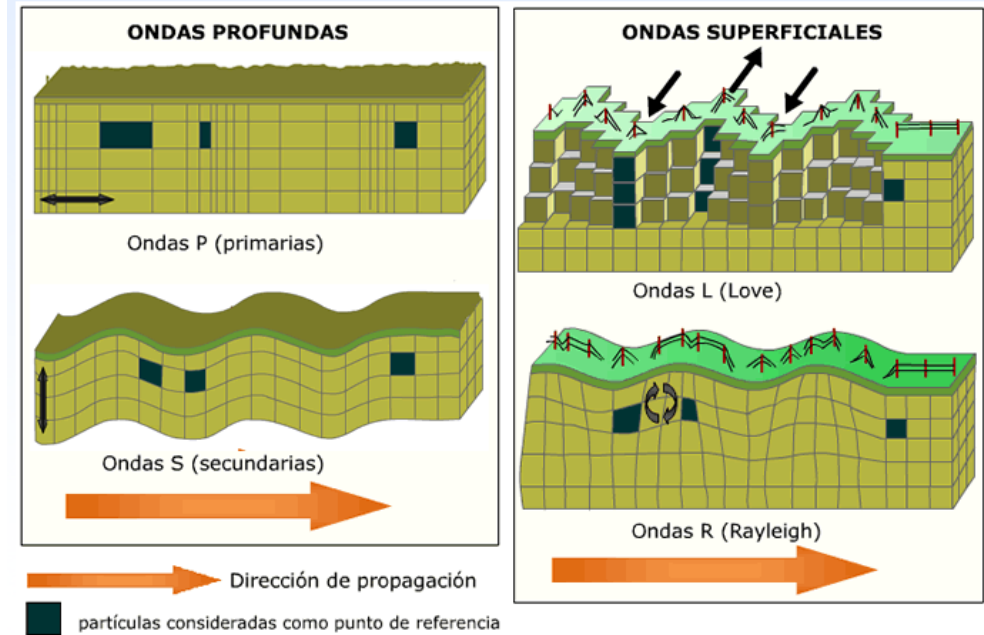


Figura 2. Esquema ondas internas y superficiales. Fuente:

https://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/21_ondas_ssmicas.html

2.1.5. Caso específico de voladuras

En determinados escenarios, la liberación de energía producto de una voladura puede ocurrir de manera simultánea en todos los puntos cargados, lo que se conoce como voladura instantánea. En esta modalidad, la energía se libera en un único instante de tiempo, generando un frente de onda de mayor magnitud.

Por otro lado, es posible controlar el proceso mediante el uso de retardadores, dispositivos

diseñados para introducir intervalos de tiempo entre la detonación de los diferentes barrenos. Esta técnica permite que la energía se libere de forma secuencial y controlada, dando lugar a una serie continua de pequeñas voladuras instantáneas desplazadas en el tiempo (t). Con ello se busca mejorar la fragmentación de la roca, reducir los niveles de vibración transmitida al terreno y optimizar la seguridad de la operación.

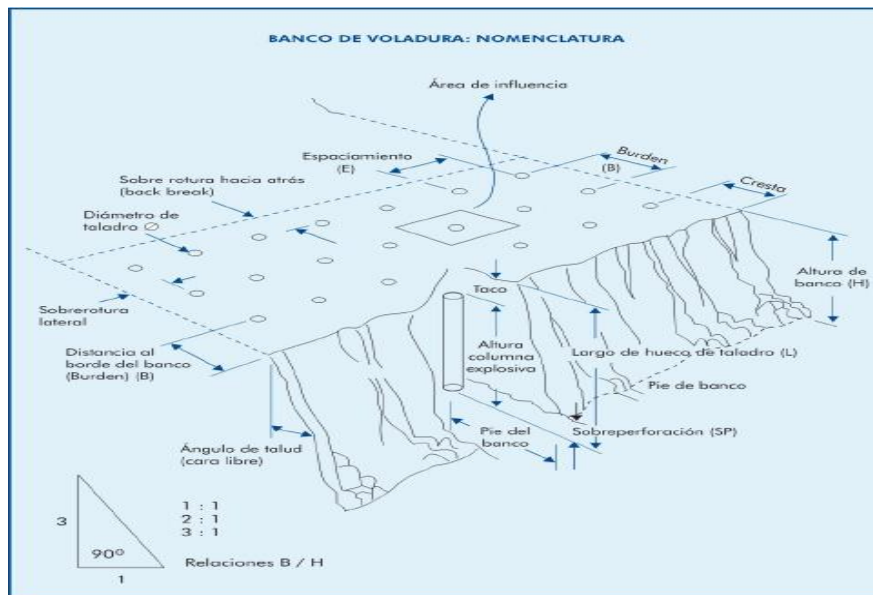


Figura 3. Esquema general voladura. Fuente: EXSA S.A

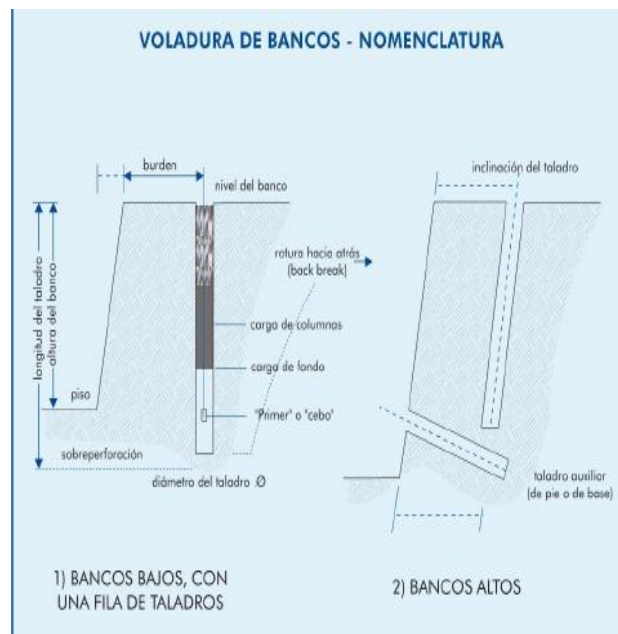


Figura 4. Esquema general voladura. Fuente: EXSA S.A

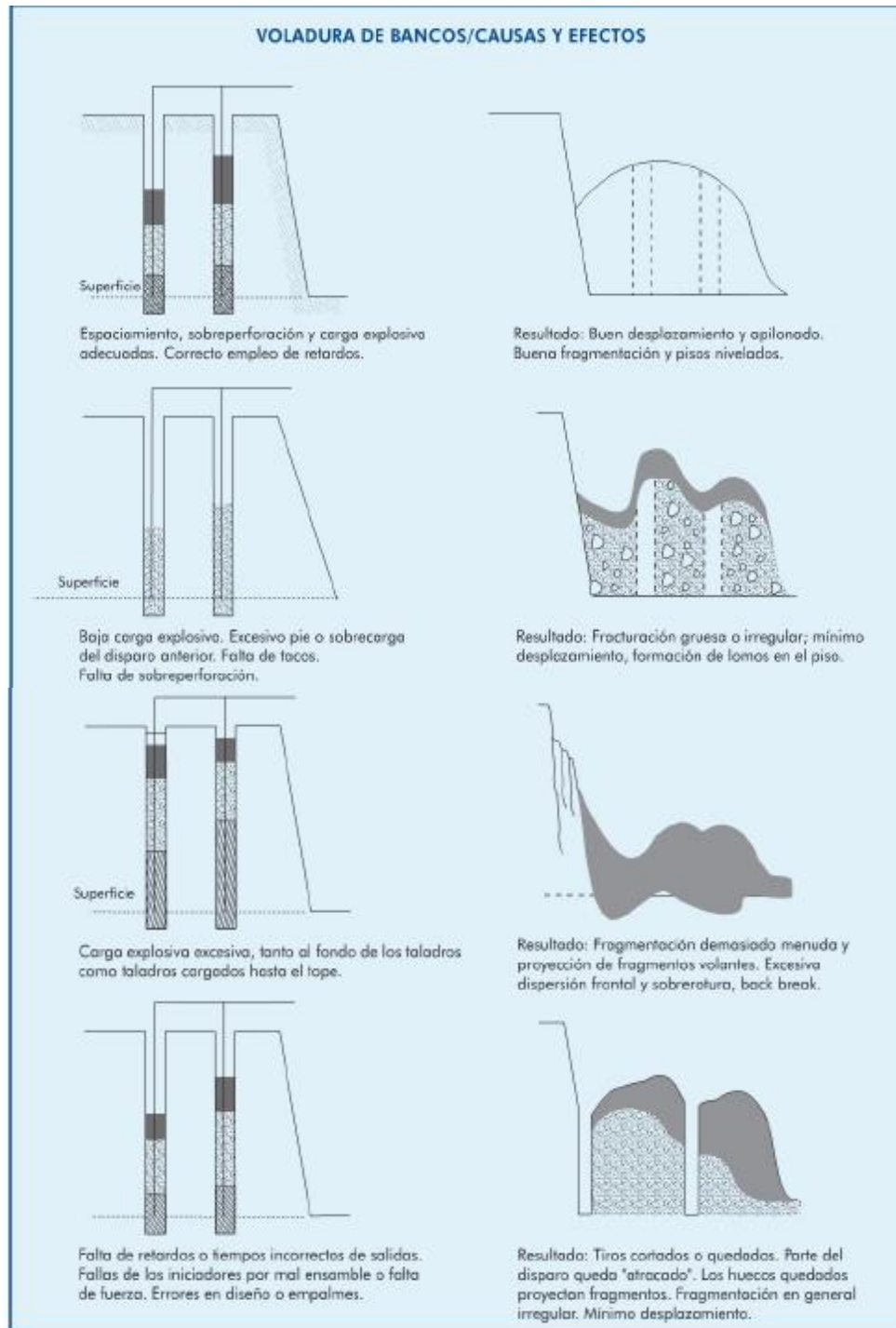


Figura 5. Causas y efectos de voladuras bajo diferentes cargas de explosivo. Fuente: EXSA S.A

2.1.5.1. Voladura instantánea

La voladura instantánea ocurre cuando la liberación de energía se produce en un único instante de tiempo, ya sea en un solo barreno (punto puntual) o en varios barrenos dispuestos en línea (pre-corte). El tipo de onda vibracional generado puede representarse como una onda senoidal–

compresional con un impulso inicial de gran magnitud seguido de oscilaciones cuya amplitud decrece de forma exponencial. La atenuación dependerá de las propiedades físicas del medio.

En la imagen 5 se aprecia la disposición de las perforaciones empleadas en una voladura, cuya configuración responde principalmente a la relación entre el burden y el espaciamiento, vinculados de manera directa con la profundidad de las perforaciones. El diseño de una malla de perforación puede adoptar diferentes trazos, de acuerdo con las condiciones geomecánicas y el objetivo de la fragmentación, siendo las más comunes la malla cuadrada, rectangular y triangular (o alterna). La selección del patrón depende de las dimensiones del burden y busca optimizar la eficiencia de la voladura, mejorar el control de la fragmentación y reducir los efectos indeseados como vibraciones o sobre roturas.

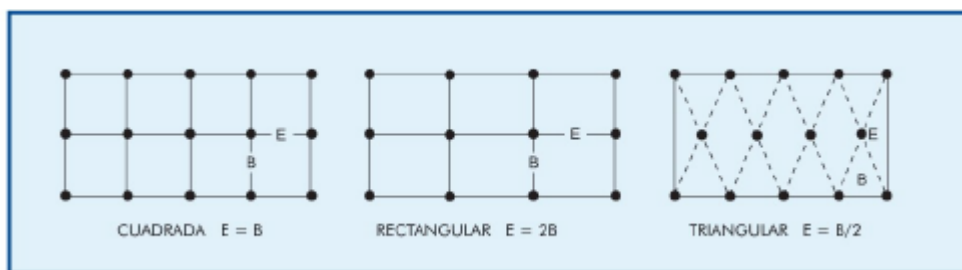


Figura 6. Diseño de malla. Fuente: EXSA S.A

Existen diferentes formas de amarre de los accesorios y variaciones en los tiempos de encendido de los taladros, las cuales se aplican con el propósito de obtener la fragmentación más adecuada y una disposición óptima de la pila del material volado, facilitando así las operaciones posteriores de cargue y transporte.

El diseño de los amarres de conexión entre los taladros, de acuerdo con el trazo de perforación, determina el tipo de malla de salida que se implementa en la voladura. Entre las configuraciones más utilizadas se encuentran la longitudinal, en cuña, diagonal, trapezoidal y las combinadas (ver imagen 6). Cada una de estas variantes responde a condiciones específicas del macizo rocoso, a los objetivos de fragmentación y a los requerimientos operativos de la mina o cantera.

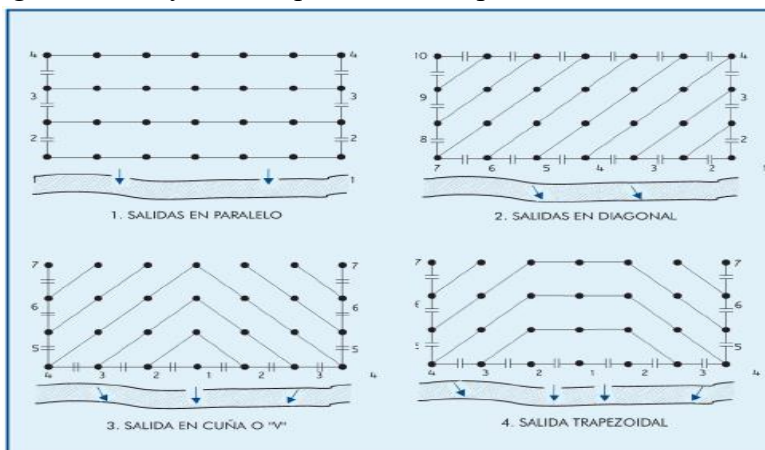


Figura 7. Configuraciones de malla más utilizadas. Fuente: EXSA S.A

2.1.5.2. Voladura con retardos

La voladura con retardos se caracteriza por la liberación de energía en intervalos de tiempo controlados, mediante el uso de dispositivos retardadores. De esta manera, los barrenos no detonan de forma simultánea, sino que lo hacen en una secuencia programada. Esto genera una sucesión de ondas vibracionales de menor amplitud, que se superponen parcialmente y cuya propagación es más controlada. El resultado es una reducción de las vibraciones globales, mejor fragmentación del macizo rocoso y mayor seguridad operativa.



Figura 8. Ejemplo distribución de una voladura en tramos. Fuente: EXSA S.A

2.1.5.2.1. Voladuras con una fila de taladros

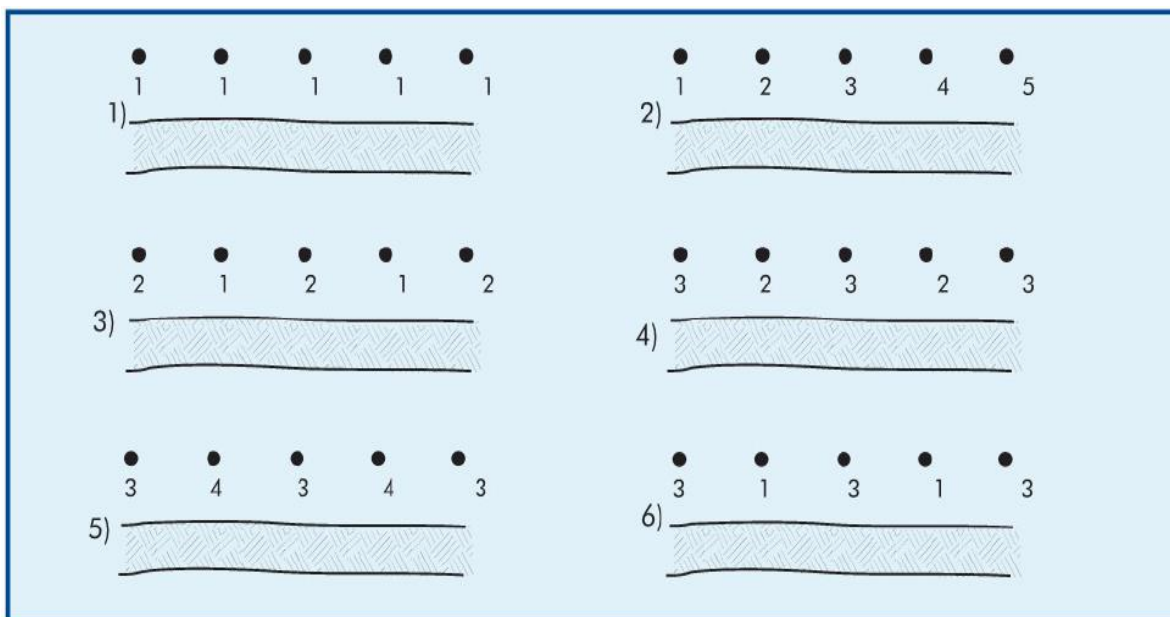


Figura 9. Esquemas de voladuras en una fila en tramos. Fuente: EXSA S.A

- 1) Salida simultánea, para fuerte proyección y rotura gruesa. Alta vibración y fuerte rotura hacia atrás.
- 2) Serie progresiva para reducir la vibración y mejorar la fragmentación. Cuando hay notorios planos de estratificación puede presentar mayor rotura hacia atrás. El orden de salidas puede invertirse si conviene de acuerdo con la estratificación de la roca.
- 3) Serie alternada de periodo corto para roca que no cede fácilmente, agrietada por la voladura anterior, que se desintegra rápidamente al primer impulso con riesgo de cortes. El segundo impulso debe llegar antes que la roca se haya desplazado demasiado lejos.
- 4) El incremento de periodos de retardo mejora la fragmentación, reduce la proyección, el ruido y la excesiva rotura hacia atrás.
- 5) El incremento de periodos de retardo mejora la fragmentación, reduce la proyección, el ruido y la excesiva rotura hacia atrás.
- 6) Serie alternada de periodo largo para rocas muy compresibles, debido a su tenacidad, esponjamiento y resiliencia. La primera serie de taladros las comprime hasta el límite antes de recibir el impacto de la segunda que las desplaza.

2.1.5.2.2. Voladura con múltiples filas de taladros

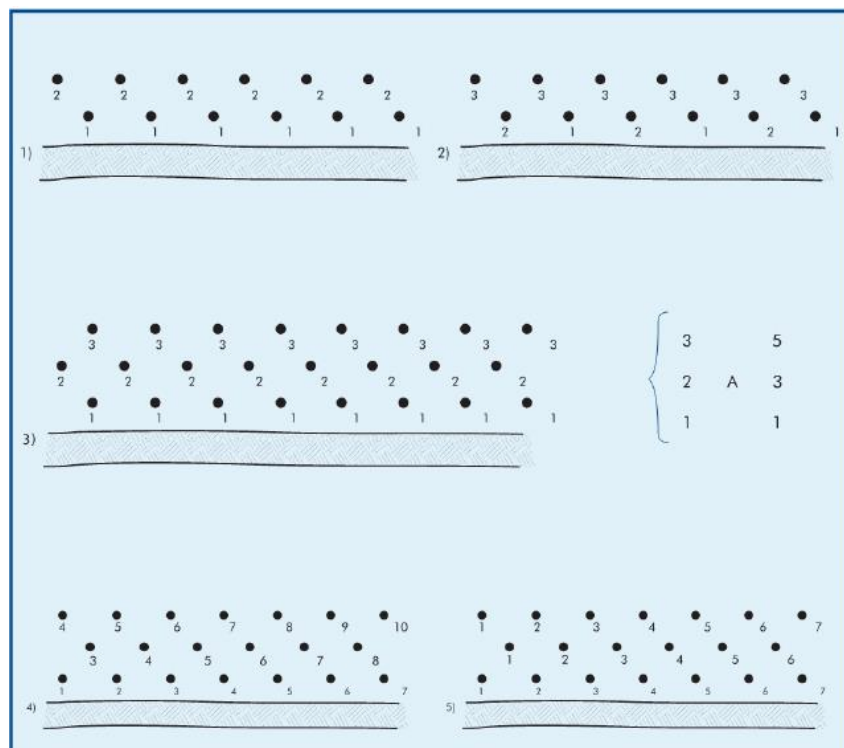


Figura 10. Esquemas de voladuras en múltiples filas en tramos. Fuente: EXSA S.A

- 1) Salidas simultáneas por filas: se emplean retardos de un mismo número en cada fila con el fin de mejorar la fragmentación y conformar una pila de escombros baja y extendida. En caso de utilizar detonadores instantáneos, el resultado sería una mayor vibración y

proyección del material, aunque con una fragmentación más deficiente.

- 2) Doble hilera alternada: esta disposición genera un mejor nivel de fragmentación en la primera línea de disparos, mientras que la segunda hilera reduce la proyección del material, contribuyendo a un control más adecuado de la pila de escombros.
- 3) Filas múltiples en paralelo: permiten alcanzar una buena fragmentación y, al mismo tiempo, una sobre-rotura controlada en macizos rocosos de difícil fracturamiento. En este esquema, suele incrementarse el intervalo de los retardos entre filas, por ejemplo, en secuencias 1-3-5 en lugar de 1-2-3 para optimizar los resultados.
- 4) Múltiples hileras alternadas secuencialmente: recomendadas en bancos donde se presentan altos niveles de vibración. En estos casos, es posible invertir la secuencia de disparo en función de la orientación de los planos de estratificación, con el fin de evitar la ruptura hacia atrás.
- 5) Salidas en diagonal: aplicadas en situaciones donde existe riesgo de rompimiento en la base de la cara libre, lo que tiende a generar proyecciones excesivas. Para mitigar este efecto, se emplean tiempos de retardo más cortos.

2.1.6. Parámetros que influyen en las vibraciones

Las vibraciones generadas por las voladuras no dependen únicamente de la energía liberada por el explosivo, sino también de diversos factores físicos y operativos que condicionan su propagación y atenuación. Entre los parámetros más relevantes se destacan:

- Geología local y características del macizo rocoso: La composición y estructura de las rocas influyen de manera determinante en la propagación de las ondas sísmicas. En macizos homogéneos, la transmisión de la vibración es relativamente uniforme en todas las direcciones; sin embargo, en formaciones geológicas heterogéneas o con presencia de fracturas, diaclasas o cambios litológicos, la propagación puede variar, generando direccionalidad en la atenuación y comportamientos irregulares en la transmisión de energía.
- Cantidad de explosivo empleado: Este factor guarda una relación directa con la magnitud de las vibraciones. A mayor volumen de explosivo detonado en un solo instante, mayor será la energía liberada y, en consecuencia, la intensidad de la onda generada. No obstante, un exceso de carga puede incrementar significativamente el riesgo de inestabilidad del terreno y generar daños en estructuras cercanas, razón por la cual se deben aplicar criterios técnicos de dosificación y fragmentación controlada.
- Distancia al punto de voladura: La energía vibracional disminuye a medida que se incrementa la distancia entre el punto de detonación y el receptor. Este fenómeno responde a leyes de propagación que dependen tanto del medio como de la geometría del disparo. En términos prácticos, la intensidad de la vibración es inversamente proporcional a la distancia, lo que implica que estructuras más alejadas están menos expuestas a niveles críticos de vibración.

2.1.7. Instrumento para monitorear vibraciones

El sismógrafo utilizado corresponde a un Raspberry Shake, un dispositivo de bajo costo diseñado para el monitoreo sísmico ciudadano y académico. Este equipo integra geófonos de alta sensibilidad con una unidad de adquisición basada en Raspberry Pi, lo que le permite registrar vibraciones del suelo y transformarlas en datos digitales para su posterior análisis. Su configuración compacta y portátil facilita la instalación en campo, como se observa en la imagen 10, donde el sistema se encuentra protegido en una caja hermética que asegura el resguardo de los componentes electrónicos frente al ambiente externo.

El dispositivo está conectado a sensores de tipo geofónico y cuenta con un sistema de registro digital en formato estándar (MSEED), lo que garantiza compatibilidad con software especializado de análisis sísmico. Adicionalmente, emplea GPS externo para sincronización precisa del tiempo, aspecto fundamental en la interpretación de señales sísmicas.

Características generales del sismógrafo

- Red y estación: Pertenece a la red AM (Raspberry Shake Network), bajo el código de estación RAFDA.
- Canales registrados: Tres componentes ortogonales (EHZ, EHN y EHE), que corresponden a las direcciones vertical, norte-sur y este-oeste, respectivamente.
- Frecuencia de muestreo: 100 Hz, lo que permite registrar señales de alta resolución en intervalos muy cortos de tiempo.
- Formato de datos: MiniSEED (MSEED), estándar internacional para el almacenamiento de registros sísmicos.
- Sensores: Geófonos Sunfull PS-4.5B con resistencia de 375 Ohm, capaces de detectar vibraciones en el rango de velocidad del suelo.
- Sensibilidad: 3.6×10^8 (m/s a counts), definida a 5 Hz, con procesamiento en tres etapas (PolesZeros, Coefficients y FIR).
- Ubicación y condiciones: El dispositivo puede instalarse en campo de manera sencilla; la fotografía evidencia el montaje en superficie con conexiones eléctricas y de adquisición protegidas en un gabinete.
- Sincronización: Dispone de GPS para asegurar una correcta referencia temporal en la adquisición de datos.
- Acceso y uso: El sistema es abierto y puede integrarse en plataformas de análisis sísmico como ObsPy, facilitando la investigación académica.

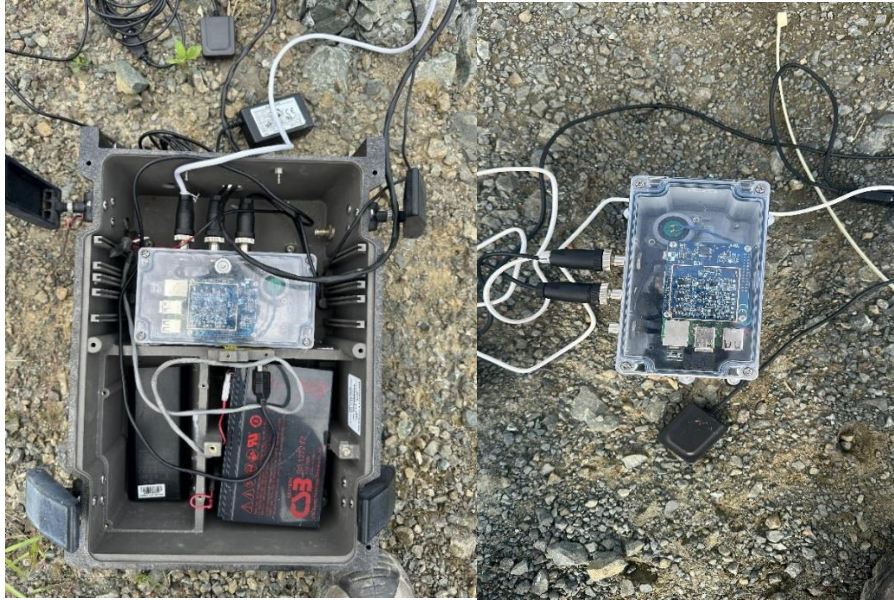


Figura 11- Sismógrafo. Fuente: Los autores

2.1.8. Efectos de la voladura

En términos generales, las voladuras generan vibraciones que se transmiten a través del macizo rocoso y que pueden producir distintos efectos adversos. Dichas vibraciones no solo afectan a las infraestructuras cercanas como edificaciones, puentes o instalaciones industriales e hidroeléctricas, sino que también representan un riesgo potencial para la seguridad de las personas y para la estabilidad del propio macizo rocoso, al favorecer la apertura o propagación de discontinuidades naturales como fallas.

Por esta razón, el estudio detallado de las vibraciones inducidas resulta fundamental. En particular, parámetros como la velocidad pico de partícula (PPV) y la frecuencia de las ondas juegan un papel decisivo en la evaluación de los posibles efectos sobre el entorno. El análisis de estas variables permite no solo anticipar el grado de afectación en estructuras sensibles, sino también definir criterios técnicos que orienten el diseño de voladuras más seguras y controladas.

2.1.8.1. Análisis de la velocidad pico partícula

Al realizar la medición del nivel de vibraciones es indispensable definir la magnitud física que se desea cuantificar, siendo las más utilizadas el desplazamiento, la velocidad y la aceleración. Dentro de estas, la Velocidad Pico Partícula (VPP) también denominada *Peak Particle Velocity*, *PPV* corresponde al valor máximo alcanzado por cualquiera de dichas magnitudes durante un intervalo de tiempo determinado.

De los parámetros mencionados, la velocidad de vibración es universalmente reconocida como el mejor indicador del nivel de vibración y, por ende, de los daños potenciales que puede ocasionar tanto en edificaciones como en la salud de las personas.

En el caso específico de las voladuras, los efectos se encuentran directamente relacionados con la cantidad de energía liberada y transmitida al macizo rocoso en forma de vibraciones, las cuales se cuantifican mediante las velocidades sísmicas. Existe, por lo tanto, una relación directa entre la naturaleza e intensidad del daño y la magnitud de la VPP registrada durante el disparo.

Finalmente, cabe resaltar que los límites máximos permisibles establecidos por distintas normativas internacionales se basan en la medición de la Velocidad Pico Partícula. Por ello, la adecuada medición, registro y análisis de este parámetro no solo resulta fundamental, sino también crítico para garantizar la seguridad y sostenibilidad de cualquier operación de voladura.

2.1.8.2. Análisis de frecuencia

No solo la Velocidad Pico Partícula (VPP) constituye un índice de peligrosidad respecto al impacto de una vibración sobre una estructura. La frecuencia de la vibración también desempeña un papel fundamental en la determinación de los efectos que esta puede generar.

Las estructuras presentan dos tipos principales de respuesta en función del rango de frecuencias:

- Altas frecuencias: los componentes individuales de la estructura tienden a vibrar de manera localizada. Este fenómeno se conoce como respuesta *midwall*, y suele ocasionar daños superficiales, como fisuras en elementos no estructurales.
- Bajas frecuencias: en este caso, se induce el movimiento global de toda la estructura, lo cual es más crítico, ya que las edificaciones poseen una frecuencia natural de oscilación generalmente comprendida entre 5 y 20 Hz.

Cuando la frecuencia de la onda sísmica generada por la voladura coincide con la frecuencia natural de la estructura, se produce un fenómeno de resonancia, que implica la máxima absorción de energía por parte de la misma. Este efecto incrementa significativamente la probabilidad de daños estructurales severos.

Por tal motivo, resulta esencial identificar las frecuencias dominantes del tren de ondas generado en una voladura. Dado que dicho tren suele estar compuesto por un amplio rango de frecuencias, el análisis debe centrarse en aquellas que predominan, lo cual se logra a través de la obtención del espectro de frecuencias mediante herramientas de procesamiento de señales.

2.1.9. Modelo de vibraciones

2.1.9.1. Velocidad pico partícula

Para estimar los efectos de una voladura en el terreno y su posible impacto en el entorno construido, se emplean modelos empíricos que permiten predecir el nivel de vibraciones generado. Estos modelos se fundamentan en tres factores principales:

- La intensidad de vibraciones producidas por la detonación de la carga explosiva.
- La cantidad de explosivo utilizado en cada evento de voladura.

- La distancia entre el punto de carga y el sitio donde se registra la vibración.

De forma general, la predicción de la velocidad de partícula pico (PPV) se expresa mediante la siguiente relación:

$$PPV = K * D^{\alpha}$$

Donde:

- PPV: Velocidad de partícula (mm/s).
- K: Factor de intercepto o constante de velocidad, dependiente de las condiciones locales.
- α : Exponente de decaimiento, que describe cómo se atenúa la vibración con la distancia.
- D: Coeficiente escalar que combina la distancia al punto de registro y la cantidad de explosivo detonado.

El coeficiente escalar se define como:

$$D = \frac{d}{\sqrt[3]{W}}$$

Siendo:

- d: Distancia entre la carga y el punto de registro (m).
- W: Carga explosiva detonada (kg).

El parámetro α está controlado por la geometría del frente de onda en expansión, y el coeficiente de atenuación de la roca. Sin embargo, el valor de K está controlado principalmente por el explosivo y la eficiencia con la cual la presión de detonación es transmitida a la roca circundante como un esfuerzo.

En relación con esta formulación matemática existen varios criterios derivados de los cuales se emplea comúnmente el de DEVINE.

2.1.9.2. Ecuación Devine

Uno de los modelos más empleados para estimar la velocidad de partícula (V) generada por las voladuras en minería a cielo abierto es la ecuación de Devine, que se expresa como:

$$V = K * \left(\frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-\alpha}$$

Donde:

- V: Velocidad de partícula (mm/s).
- d: Distancia al punto de registro (m).
- W: Carga explosiva instantánea (kg).
- K: Constante que depende de las características del explosivo y su eficiencia en la transferencia de energía.
- α : Exponente de atenuación, relacionado con la geometría de propagación de la onda y las propiedades de la roca.

Este modelo es considerado como uno de los que mejor representa el comportamiento de las vibraciones en el campo lejano (aproximadamente cuando la distancia es mayor a tres veces la longitud de la carga). En este rango, la energía transmitida puede describirse con mayor precisión debido a que las columnas explosivas tienden a comportarse de manera más homogénea en su propagación.

2.1.9.3. Frecuencia de paso por cero (Zero Crossing Rate, ZCR)

La frecuencia de paso por cero constituye un parámetro útil en el análisis de señales, ya que permite estimar la cantidad de cambios de polaridad que experimenta una onda en un intervalo de tiempo determinado. En términos simples, corresponde al número de veces que la señal cruza el eje de referencia (cero), lo cual refleja la rapidez con la que oscila.

Para calcularla, se toma el total de muestras de la señal y se contabilizan las transiciones de signo entre valores consecutivos. El resultado se normaliza dividiéndolo entre el número de muestras, de manera que el valor obtenido sea comparable independientemente de la duración de la ventana analizada.

Matemáticamente, se expresa como:

$$ZCR = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} \text{sgn}(x[n]) \neq \text{sgn}(x[n-1])$$

donde:

- N es el número total de muestras de la señal.
- $x[n]$ representa el valor de la señal en el instante n.
- sgn es la función signo, que devuelve -a si el valor es negativo, 1 si es positivo y 0 si es cero.

En términos prácticos, el ZCR mide cuán oscilatoria o “rápida” es una señal. Un mayor número de cruces por cero suele asociarse con componentes de alta frecuencia, mientras que señales más suaves o de baja frecuencia presentan valores de ZCR reducidos.

Este parámetro tiene gran relevancia en el análisis de vibraciones y procesamiento de señales, ya que proporciona información complementaria a la amplitud o la energía. Por ejemplo, en estudios de vibraciones inducidas por voladuras, el ZCR puede ayudar a identificar la predominancia de componentes de alta frecuencia en el tren de ondas, lo cual es determinante al evaluar la respuesta dinámica de estructuras o la propagación en el macizo rocoso.

2.1.9.4. Transformada de Fourier

Permite descomponer la señal en sus componentes frecuenciales, facilitando la identificación de patrones y frecuencias dominantes (Florez-Gongora & Lozano- Lozano, 2007).

Uno de los principales retos al analizar señales vibratorias es que resulta complejo asociar una frecuencia dominante a un instante de tiempo específico. Para abordar este problema se recurre a la Transformada de Fourier (TF), una herramienta matemática que permite descomponer una señal en sus diferentes componentes de frecuencia, utilizando para ello funciones exponenciales complejas de duración infinita.

La Transformada de Fourier convierte la representación de una señal del dominio temporal al

dominio frecuencial, lo que permite identificar la energía distribuida en las distintas frecuencias que conforman la señal. A la inversa, también es posible reconstruir la señal en el tiempo a partir de su espectro en frecuencia. De esta forma, se obtiene una visión global del comportamiento de la vibración, independientemente del instante de tiempo en el que se origine.

Matemáticamente, la transformada directa se expresa como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

Mientras que la transformada inversa, que permite regresar al dominio temporal, se define como:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega$$

En la práctica, las señales registradas en campo son discretas, es decir, se obtienen como un conjunto finito de puntos medidos por sensores en intervalos de tiempo determinados. Por este motivo, en el procesamiento digital de datos se emplea la Transformada Discreta de Fourier (DFT) o su versión computacional optimizada, la Transformada Rápida de Fourier (FFT), que permiten trabajar directamente con registros discretizados y analizar de manera eficiente la distribución de frecuencias de la señal.

2.1.9.5. Transformada Wavelet

Proporciona un análisis más detallado en el tiempo y la frecuencia, lo que es útil para señales no estacionarias típicas en ambientes mineros (Florez-Gongora & Lozano-Lozano, 2007) (Gómez Cano, 2016) (Kristeková, Kristek, Moczo, & Day, 2006), (Kristeková, Kristek, & Moczo, 2009).

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi * \left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

donde:

- a es el parámetro de escala (inversamente proporcional a la frecuencia),
- b representa la traslación en el tiempo,
- ψ es la wavelet madre
- ψ^* es su conjugado complejo.

2.1.10 Efecto de las vibraciones sobre las personas

Uno de los factores que deben considerarse en la ejecución de voladuras es el efecto fisiológico y perceptivo de las vibraciones en las personas. Incluso cuando los niveles de vibración se encuentran por debajo de los valores máximos admisibles para evitar daños en estructuras, estas pueden ser percibidas sensorialmente por los ocupantes de viviendas, trabajadores o comunidades cercanas. Esta percepción subjetiva puede generar intranquilidad, temor o la

creencia de que existen daños potenciales, aunque técnicamente no se hayan producido.

Por lo tanto, además del control estricto de las Velocidades Pico Partícula (VPP), es fundamental contemplar este aspecto humano en la planificación de voladuras, ya que la aceptación social de la actividad minera o constructiva depende en gran medida de la percepción de seguridad por parte de las comunidades afectadas.

2.2. Marco legal

El marco normativo que regula la explotación minera a cielo abierto en Colombia está conformado por disposiciones de carácter constitucional, legal y reglamentario que buscan garantizar el aprovechamiento de los recursos minerales en condiciones de sostenibilidad, seguridad y respeto por las comunidades cercanas. En este contexto, el análisis de las vibraciones generadas por voladuras se inserta en una red de normas que, aunque no contemplan parámetros específicos sobre límites de vibración, sí establecen obligaciones generales de prevención, monitoreo y mitigación de impactos.

A nivel superior, la Constitución Política de 1991 establece en los artículos 79 y 80 la obligación del Estado de proteger el ambiente y planificar el uso de los recursos naturales con criterios de prevención y sostenibilidad. Estos lineamientos dan origen a la estructura jurídica que regula actividades mineras y a la exigencia de estudios técnicos que permitan anticipar y controlar sus efectos.

La Ley 685 de 2001 (Código de Minas) constituye la principal herramienta normativa en materia de exploración y explotación de minerales. Esta ley define el marco de derechos y deberes de los titulares mineros, estableciendo que toda actividad debe cumplir con los requisitos ambientales y de seguridad que dicten las autoridades competentes. Aunque no regula directamente las vibraciones, sí condiciona la operación minera a la adopción de medidas técnicas que aseguren la integridad de personas, bienes y ecosistemas.

Por su parte, la Ley 99 de 1993 organizó el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y otorgó a las autoridades ambientales la competencia para evaluar, autorizar y supervisar proyectos mineros. En el ámbito del Valle del Cauca, la CVC es la entidad encargada de ejercer estas funciones, en coordinación con la ANLA cuando se trata de proyectos de mayor escala. Estas instituciones poseen facultades para requerir monitoreo de vibraciones y para exigir la adopción de medidas de manejo específicas en los planes ambientales.

En cuanto a la reglamentación, el Decreto 1076 de 2015 recopila la normatividad ambiental y establece criterios de licenciamiento y seguimiento, mientras que el Decreto 1886 de 2015 fija normas de seguridad minera aplicables al uso de explosivos, estableciendo procedimientos para el diseño y ejecución de voladuras. Ambos decretos son de obligatorio cumplimiento para los operadores de minas a cielo abierto.

En relación con los impactos físicos, la Resolución 627 de 2006 regula los niveles máximos de ruido ambiental permitidos en el país. Aunque no hace referencia directa a las vibraciones, sí

establece un antecedente normativo relevante para la evaluación de molestias generadas por actividades extractivas. Ante la ausencia de una normativa nacional específica para vibraciones, en Colombia es común el uso de estándares internacionales como referencia técnica:

El estudio USBM RI-8507 (1980), donde su objetivo fue establecer límites de vibración segura para proteger estructuras frente a voladuras en minería a cielo abierto. El estudio analizó la respuesta dinámica de distintos tipos de edificaciones (mampostería, concreto, madera) frente a vibraciones del terreno.

El parámetro adoptado fue la Velocidad Pico de Partícula (PPV, Peak Particle Velocity), medida en mm/s o in/s, por ser el indicador más confiable de potencial de daño en comparación con la aceleración o la frecuencia.

A partir de los ensayos, se propusieron límites de PPV en función de la frecuencia de la onda sísmica, generando un criterio de control ampliamente utilizado en todo el mundo hasta hoy.

Límites de vibraciones según frecuencia de la onda		
Rango de frecuencia de la onda	Límite de PPV (mm/s)	Límite de PPV (in/s)
< 40 Hz	51	2.0
40 - 100 Hz	76	3.0
> 100 Hz	127	5.0

Tabla 1 .Límites de vibraciones según frecuencia de onda - norma USBM RI-8507. Fuente: Los autores

Además, también propone una clasificación de respuestas estructural:

Velocidad pico de partícula (ppv)	Efecto esperado en estructuras comunes
<13 mm/s	Generalmente sin daños
13 - 51 mm/s	Posibles daños cosmeticos
51 mm/s	Riesgos de daños estructurales

Tabla 2. clasificación de respuesta estructura l- norma USBM RI-8507. Fuente: Los autores

y la norma DIN 4150-3 (2016), establece los criterios de evaluación de vibraciones inducidas en el suelo por actividades humanas (voladuras, tránsito, maquinaria, etc.) y su impacto sobre edificaciones y estructuras.

Su objetivo es prevenir daños estructurales y funcionales mediante el control de la Velocidad Pico de Partícula (PPV, Peak Particle Velocity) en función del tipo de construcción.

Esta norma se diferencia del USBM RI-8507 porque clasifica los límites según la tipología estructural y no solo según la frecuencia.

Valores límites de PPV para evitar daños estructurales			
Tipo de estructura	Frecuencia <10Hz (mm/s)	10 - 50 Hz (mm/s)	50 - 100 Hz (mm/s)
Edificaciones en general (estructuras estandar, no muy sensibles).	3	De 3 a 8	De 8 a 10
sensibilidad especial (ej: edificios historicos de valor patrimonial).	3	De 3 a 8	De 8 a 10 (se recomienda usar el límite inferior)
Estructuras industriales (naves, plantas, contrucciones pesadas).	10	De 10 a 20	De 20 a 50

Tabla 3.Valores límites de PPV - norma DIN 4150-3. Fuente: Los autores

Clasificación de efectos en edificaciones según PPV (criterio practico)	
PPV (mm/s)	Interpretación
< 3	Vibración generalmente imperceptible o sin riesgo de daño.
De 3 a 10	Posible afectación en acabados (daños cosmeticos menores).
De 10 a 50	Nivel admisible para estructuras industriales sin riesgo estructural.
> 50	Riesgo elevado de daños estructurales graves.

Tabla 4. clasificación de efectos en edificaciones - norma DIN 4150-3. Fuente: Los autores

Así como estas existen otras normativas como lo son:

Normas internacionales para el control de vibraciones		
Estados unidos	USBM RI-8507	1980
Estados unidos	OSM 817.67	1983
Alemania	DIN 4150, parte 3	1999
R.D.Alemana	Directriz KDT 046	1972
España	UNE 22.381-93	1993
Suecia	SS 460 48 46	1991
Francia	GFEE	2001
Escocia	PAN50	2000
Inglaterra	BS 7385, parte 2	1993
Canadá	NPC 2001	1983
Suiza	SN 640 312a	1992
Portugal	NP2074	1983
Italia	UNI 9916	1991
Internacional	ISO 4866	1990
India	CMRI	1991
Australia	AS2187.2	1993
Brasil	NBR 9653	1986

Tabla 5. Normas internacionales para control de vibraciones. Fuente: Los autores

Finalmente, es importante resaltar la relación de este marco normativo con la normativa de construcción en Colombia. El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), si bien se centra en las vibraciones en la superficie de la tierra de origen natural, ofrece parámetros que permiten analizar la vulnerabilidad estructural de edificaciones expuestas a vibraciones generadas por la actividad humana, convirtiéndose en un referente complementario para estudios como el presente.

2.3. Estado del arte

El monitoreo y análisis de las señales sísmicas generadas por voladuras en canteras a cielo abierto ha sido un tema de interés en la ingeniería sísmica y geotécnica debido a su impacto en el entorno urbano. La propagación de las ondas sísmicas generadas por explosiones es un aspecto crucial para evaluar los efectos de estas actividades sobre edificaciones, ecosistemas y la seguridad de las comunidades cercanas.

Uno de los aspectos fundamentales en este tipo de análisis es la caracterización de las señales sísmicas producidas por las voladuras. Estudios como los de Liu et al. (2020) han demostrado que las frecuencias y amplitudes de estas señales dependen de factores como la profundidad de la voladura, el tipo de material rocoso y la configuración de la carga explosiva. La identificación de

las ondas P y S en estos eventos es clave para determinar su impacto en la zona circundante, ya que su amplitud y duración pueden influir en la estabilidad del suelo y estructuras cercanas.

En el contexto de las zonas urbanas, la energía liberada por estas voladuras puede generar vibraciones que afectan la infraestructura y el bienestar de las personas. Según Zhang et al. (2018), la duración de las ondas sísmicas está directamente relacionada con el impacto en el terreno, ya que vibraciones prolongadas pueden inducir asentamientos diferenciales y afectar edificaciones vulnerables. En este sentido, se han desarrollado métodos de monitoreo para predecir y mitigar estos efectos, utilizando sensores y software especializado como PYTHON para la evaluación de las señales registradas.

El monitoreo y análisis de señales sísmicas en voladuras urbanas también enfrentan desafíos significativos. Gao et al. (2021) resaltan que la interpretación de los datos se ve influenciada por la geología local y la falta de registros previos en ciertas zonas. Además, la dispersión de las ondas sísmicas en entornos urbanos complejos puede dificultar la predicción precisa de sus efectos, lo que subraya la necesidad de implementar tecnologías avanzadas de monitoreo.

En cuanto a la gestión de riesgos asociados a estas voladuras, Liu et al. (2022) proponen la combinación de análisis sísmico y estudios geotécnicos para optimizar el diseño de las voladuras y reducir los impactos negativos en las comunidades aledañas. Estas estrategias incluyen el ajuste de la cantidad de explosivo, la configuración de las cargas y el uso de barreras de protección para minimizar la transmisión de vibraciones.

En conclusión, la evaluación de las señales sísmicas generadas por voladuras en canteras urbanas es un tema de gran relevancia para la seguridad y la mitigación de impactos ambientales y estructurales. Aunque se han logrado avances significativos en la caracterización de estas señales y en el desarrollo de estrategias de control, aún existen desafíos relacionados con la interpretación de datos en entornos urbanos complejos. El uso de herramientas avanzadas como PYTHON y la integración de metodologías de monitoreo continuo son esenciales para mejorar la gestión de riesgos y la sostenibilidad de estas operaciones.

2.4. Propósito de la investigación

El propósito principal de esta investigación es analizar las señales sísmicas generadas durante las voladuras realizadas en la producción de materiales para la construcción en minas a cielo abierto con zonas urbanas circundantes. Como ingeniero civil, mi enfoque está en caracterizar estas señales sísmicas, comprendiendo aspectos clave como la amplitud máxima, la frecuencia y la duración de las ondas, con el objetivo de evaluar los efectos inmediatos que estas vibraciones pueden generar en el entorno cercano. Este análisis busca proporcionar una comprensión detallada de cómo las ondas sísmicas afectan tanto las estructuras cercanas como también la tranquilidad y seguridad de las personas que viven cerca de las minas.

A través de este estudio, también se busca documentar las condiciones y limitaciones encontradas durante la recolección y el análisis de los datos sísmicos, lo que permitirá establecer una base de referencia sólida para futuras investigaciones y proyectos de monitoreo. Esta

investigación no solo tiene el fin de contribuir a la seguridad de las áreas cercanas a las minas, sino también de ofrecer recomendaciones para mitigar los efectos adversos de las vibraciones sísmicas en zonas sensibles, promoviendo así prácticas más seguras y sostenibles en la extracción de materiales para la construcción.

CAPITULO III – METODOLOGÍA

La metodología de esta investigación se desarrollará en tres etapas principales, correspondientes a los objetivos específicos planteados. Cada etapa incluye el diseño de actividades de campo, el procesamiento de la información recolectada y el análisis técnico de los resultados obtenidos, con el fin de evaluar las señales sísmicas generadas por voladuras en minas a cielo abierto con urbanización creciente en su entorno.

3.1.Etapa 1: Caracterización de las señales sísmicas

Objetivo asociado: Caracterizar las señales sísmicas resultantes de las voladuras en la cantera, centrando el análisis en parámetros como amplitud máxima, frecuencia y duración de las ondas.

Propósito:

El propósito de este objetivo es obtener una comprensión detallada de las características de las señales sísmicas generadas durante las voladuras controladas. El análisis de parámetros como la amplitud máxima, la frecuencia y la duración de las ondas permitirá determinar cómo se propagan las vibraciones a través del suelo y qué tan intensos son los efectos que pueden generar en el entorno inmediato, considerando y diferenciando el tipo de detonadores usados, tipo de explosivo, el uso de micro retardos y la cantidad de explosivo.

Actividades:

1. **Recolección de datos sísmicos:** Se utilizará el sismógrafo para registrar las señales generadas por las voladuras en la cantera en tiempo real. Estos datos incluirán las variaciones de las ondas sísmicas a lo largo del tiempo, que servirán como base para el análisis.
2. **Análisis de las señales:** Se llevará a cabo un análisis en el que se extraerán y caracterizarán los parámetros principales de las señales sísmicas, como la amplitud máxima, la frecuencia y la duración. Este análisis se realizará utilizando software especializado para procesar las señales PYTHON, que permitirán obtener estos parámetros de manera precisa.
3. **Comparación y evaluación:** Las señales serán comparadas entre sí para determinar las variaciones entre las diferentes voladuras y en función de las condiciones del terreno, la distancia y otros factores que puedan influir en los resultados. Este análisis también permitirá identificar

cualquier patrón recurrente en las señales obtenidas.

3.2.Etapa 2: Evaluación de efectos en el entorno cercano

Objetivo asociado: Determinar los posibles efectos inmediatos causados por las vibraciones generadas por voladuras en minas a cielo abierto en el entorno cercano, basado en los criterios de evaluación de los valores límites PPV y la clasificación de los efectos en edificaciones según el valor de PPV de la normativa internacional DIN 4150-3.

Propósito:

El objetivo es evaluar de manera técnica y objetiva los posibles efectos inmediatos que generan las vibraciones inducidas por voladuras en minas a cielo abierto sobre las edificaciones cercanas, empleando como criterio de referencia los valores límite de velocidad de partícula pico (PPV) establecidos en la normativa internacional DIN 4150-3. De esta manera, se busca determinar si los niveles de vibración registrados se encuentran dentro de rangos aceptables, o si representan un potencial riesgo para la integridad estructural o la percepción de los habitantes del entorno.

Actividades:

1. Revisión y análisis de la normativa internacional DIN 4150-3: Se realizará una lectura detallada de la norma DIN 4150-3, la cual establece los valores límite de velocidad de partícula pico (PPV) y los criterios de clasificación de los efectos en edificaciones. Esta etapa permitirá definir con claridad los umbrales normativos que servirán de referencia para la comparación con los datos obtenidos en campo.
2. Obtención y procesamiento de datos de campo: Durante las voladuras programadas se recopilarán los registros de vibración en los puntos de monitoreo previamente definidos. Los datos obtenidos serán procesados mediante software especializado (Python) que permita identificar los valores máximos de velocidad de partícula en los tres ejes principales de vibración (longitudinal, transversal y vertical). Este procesamiento garantizará que la información registrada sea precisa y pueda ser utilizada en la fase de comparación con la normativa.
3. Comparación de los valores registrados con los límites normativos: Una vez procesados los datos, se procederá a contrastar los valores de PPV medidos con los límites establecidos en la DIN 4150-3. Esta comparación permitirá identificar en qué categoría normativa se ubican los resultados, es decir, si los niveles de vibración corresponden a valores imperceptibles, perceptibles sin riesgo de daño, o potencialmente dañinos para las edificaciones.

3.3.Etapa 3: Documentación de condiciones y limitaciones del estudio

Objetivo asociado: Documentar las condiciones y limitaciones del levantamiento y análisis de datos para establecer una base de referencia que oriente futuros estudios y estrategias de monitoreo que mitiguen el impacto de las voladuras en zonas urbanas.

Propósito:

Este objetivo busca proporcionar una visión clara de las condiciones y limitaciones encontradas durante el proceso de recolección y análisis de datos sísmicos. La documentación detallada de estos aspectos será fundamental para futuras investigaciones y permitirá establecer una metodología eficaz para el monitoreo de voladuras en zonas de minas a cielo abierto, así como identificar las áreas de mejora para los próximos estudios.

Actividades:

1. Registro de condiciones de campo: Durante la recolección de datos sísmicos, se documentarán las condiciones geográficas, climáticas y técnicas que puedan haber influido en la calidad de los datos obtenidos. Esto incluirá la descripción del terreno, la calidad del equipo utilizado y cualquier factor ambiental que haya podido interferir en el proceso.
2. Análisis de limitaciones: Se identificará y analizará cualquier limitación en cuanto a la precisión de los instrumentos de medición, la capacidad de los sensores para captar señales en terrenos complejos y las dificultades en la interpretación de los datos debido a factores externos. Esto permitirá reconocer áreas de mejora para investigaciones futuras.
3. Elaboración de recomendaciones: A partir de las limitaciones encontradas, se desarrollarán recomendaciones para optimizar el proceso de recolección de datos en futuras investigaciones. Estas recomendaciones incluirán aspectos técnicos, logísticos y metodológicos que podrán servir como guía para otros estudios relacionados con el análisis de señales sísmicas en minería a cielo abierto.

CAPITULO IV-DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS CON VOLADURA

Las voladuras realizadas en minas a cielo abierto representan una fuente de energía transitoria que no solo cumple con el propósito de fragmentar el macizo rocoso, sino que también libera vibraciones que se propagan en el terreno.

Lo anterior explica porque al momento de producirse la detonación, la energía química contenida en el explosivo se transforma principalmente en energía mecánica y térmica. Una parte de esta energía es absorbida al momento de la ruptura de la roca, mientras que la otra parte restante se trasmite en forma de ondas sísmicas. Estas ondas, en las cuales están incluida las ondas P(longitudinales), las ondas S(transversales) y las superficiales de tipo Rayleigh y Love, se desplazan a través del subsuelo dependiendo de las condiciones físicas y mecánicas del medio (Langefors & kihlström, 1963).

4.1. Propagación de las ondas sísmicas

La forma en que se propaga esta energía en forma de ondas sísmicas esta influenciada directamente por la impedancia sísmica, la cual se define como el producto entre la densidad del material y la velocidad de la onda:

$$Z = \rho \cdot V$$

Donde:

- Z = impedancia sísmica ($kg/m^2 \cdot s$)
- ρ = densidad del medio (kg/m^3)
- V = velocidad de propagación de la onda (m/s)

Cuando hay diferencia de impedancia entre capas geológicas se generan fenómenos de reflexión, refracción o incluso de amplificación de la onda. Los anteriores efectos explican porque en determinados puntos del terreno cuando se realiza la toma de datos se perciben vibraciones con mayores intensidades en comparación con otros puntos, aun cuando provienen de una misma voladura (Kramer,1996).

4.2. parámetros de las vibraciones

Cuando se habla del análisis de las vibraciones inducidas por explosivos, la variable de referencia más utilizada es la velocidad pico de partícula (PPV), considerada con el indicador más confiable del daño potencial sobre estructuras o sobre macizos rocosos (Siskind et al., 1980).

$$PPV = K * D^\alpha$$

Donde:

- PPV: Velocidad de partícula (mm/s).
- K: Factor de intercepto o constante de velocidad, dependiente de las condiciones locales.
- α : Exponente de decaimiento, que describe cómo se atenúa la vibración con la distancia.
- D: Coeficiente escalar que combina la distancia al punto de registro y la cantidad de explosivo detonado.

El coeficiente escalar se define como:

$$D = \frac{d}{\sqrt[3]{W}}$$

Siendo:

- d: Distancia entre la carga y el punto de registro (m).
- W: Carga explosiva detonada (kg).

Para este caso de estudio se usó la siguiente metodología para hallar los valor de PPV a continuación, se explica el paso a paso.

Velocidad Pico de Partícula (PPV) a partir de una forma de onda sísmica registrada en formato miniSEED

A diferencia de los monitores de vibración profesionales que realizan este cálculo internamente, los datos de sismógrafos de investigación (como el Raspberry Shake) requieren un procesamiento posterior. El método implica la lectura de los datos digitales, la conversión a unidades físicas de velocidad mediante factores de calibración y la identificación del valor máximo absoluto para cada una de las tres componentes direccionales.

Procedimiento de Cálculo del PPV desde miniSEED

El formato de datos miniSEED (.mseed) es un estándar común en sismología para el almacenamiento eficiente de datos de forma de onda. Sin embargo, los datos se guardan como "cuentas" digitales (números enteros), no como unidades físicas. El cálculo del PPV requiere un proceso de tres etapas: lectura, conversión y análisis.

Lectura del Archivo y Metadatos de Calibración

El primer paso es leer el archivo miniSEED utilizando un software o una biblioteca de programación que pueda interpretar su estructura y los metadatos asociados. Estos metadatos, almacenados en archivos auxiliares (como el formato StationXML), contienen información crucial sobre la sensibilidad del sensor, la ganancia del digitalizador y las características del filtro de la red sísmica.

Conversión a Unidades Físicas

El corazón del cálculo es convertir las cuentas digitales a unidades de velocidad (m/s o mm/s). Esta conversión se realiza aplicando un factor de escala que se deriva de los metadatos de calibración.

$$\text{Velocidad} \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) = \text{cuentas digitales} * \text{sensibilidad del sensor}^{-1} * \text{ganancia} * \text{otros fact.}$$

Este proceso de corrección instrumental y des calibración es crítico para obtener valores físicamente significativos. La sensibilidad del sensor típicamente se expresa en voltios por metro por segundo (V/(m/s)) y es el factor clave para la conversión.

Identificación del Pico en las Tres Componentes

Una vez que la forma de onda ha sido convertida a unidades físicas de velocidad, el PPV se calcula para cada una de las tres componentes direccionales: Vertical (Z), Transversal (T) y Longitudinal (L). Para cada componente, se debe identificar el valor máximo absoluto.

$$\text{PPV}_{\text{componente}} = \max(|\text{Datos}_{\text{componente}}|)$$

El PPV final para el evento se reporta como el valor máximo de los tres PPV de las componentes individuales.

$$\text{PPV}_{\text{total}} = \max(\text{PPV}_Z, \text{PPV}_T, \text{PPV}_L)$$

Sin embargo, la PPV no es el único parámetro de interés. Factores como la frecuencia dominante, la aceleración, el desplazamiento y la duración de la señal también aportan información de gran importancia. Por ejemplo

La frecuencia dominante (Hz)

Determina el número de oscilaciones por segundo y es fundamental en la interacción con estructuras, ya que estas presentan frecuencias de resonancia que pueden verse amplificadas por las vibraciones.

La Duración de la señal (Segundos)

Se refiere al intervalo de tiempo durante el cual la señal vibratoria mantiene amplitudes significativas. Aunque suele ser breve, influye en la percepción humana y en el potencial de daño acumulativo.

4.3. Parámetros operativos de la voladura

Al momento en que se planifica una voladura esta condiciona de manera directa las vibraciones generadas. Debido a esto se crearon unos parámetros que se deben considerar para realizar esta planificación. Entre los parámetros más relevantes se encuentra la carga máxima instantánea (MIC), tipos de detonadores, carga operante por taladro y secuencia y tiempo de retardo. La importancia de estos parámetros son lo que nos garantiza una buena estructura en la voladura.

La definición e importancia de cada uno de estos parámetros se explica a continuación:

Carga operante por taladro

La carga operante en un taladro se refiere a la cantidad de explosivo que se utiliza en cada retardo durante una voladura, especialmente en taladros largos. Es un factor crucial que afecta las vibraciones generadas durante la detonación y puede influir en la estabilidad de la roca circundante y estructuras cercanas.

Los factores que influyen en la carga operante son: tipo de explosivos, diámetro de taladro, secuencia de detonación, profundidad del taladro y las características del terreno.

Este parámetro en la minería busca reducir la carga operante para minimizar el impacto de las voladuras en el entorno.

Carga máxima instantánea (MIC)

La carga máxima instantánea es la cantidad total o suma de explosivo en los taladros que detona de manera simultánea en un mismo intervalo de tiempo durante una voladura. Este es uno de los parámetros más importantes ya que está estrechamente relacionado con la PPV, debido a que cuanto mayor sea la carga máxima, más alta será la PPV.

Secuencia y tiempos de retardo

La secuencia y tiempos de retardo se define como el cronograma de la voladura, donde cada grupo de taladros detona en un instante específico para dirigir la energía hacia la zona deseada.

En la planificación de voladuras este parámetro se encarga de que los explosivos se disparen en grupos pequeños, con retardos de milisegundos, logrando así que las ondas sísmicas se distribuyan en el tiempo y disminuya su impacto acumulativo.

El tipo de detonador

Los detonadores son un elemento fundamental en la iniciación de una voladura, ya que estos son los encargados de transmitir la energía inicial necesaria para provocar la detonación. Su correcta selección garantiza la eficiencia de la fragmentación, la seguridad operativa y el control de los parámetros críticos.

Debido a lo anterior, la evolución tecnológica de los detonadores ha permitido pasar de sistemas rudimentarios con poca precisión a mecanismos de alta confiabilidad, indispensables en operaciones mineras modernas. (Person, Holmberg & Lee, 1994).

En esta investigación se tuvo la posibilidad de presenciar y recolectar datos de voladuras en las cuales se usaron distintos tipos de detonadores como: pirotécnicos y electrónicos. Esto será de gran importancia al momento de realizar la evaluación de los resultados obtenidos.

Debido a que, por ejemplo, Los detonadores electrónicos, permiten retardos muy exactos, optimizando el control de vibraciones.

Estos elementos, no solo condicionan el nivel de vibración, sino también la calidad y la estabilidad global del banco de explotación.

4.4. Efectos sobre el macizo rocoso

El medio geológico por el que viaja las vibraciones condiciona de manera notable la atenuación y la amplificación que estas puedan tener al momento de recolectar los datos. Por ejemplo, rocas de elevada densidad tienden a disipar la energía de manera mas rápida, mientras que estratos fracturados, suelos blandos o materiales con alto contenido de agua pueden amplificar la señal (Richart, Hall & Woods, 1970). Esto implica que, aun con la misma energía de voladura, el impacto percibido varía según la naturaleza del terreno.

4.5. Procedimiento de ejecución de pruebas

Las pruebas con voladuras suelen seguir un procedimiento estructurado que garantiza tanto la seguridad como la obtención de datos confiables:

1. Instalación de equipos de registro: se ubican sismógrafos y geófonos triaxiales en puntos estratégicos, tales como edificaciones cercanas, perímetros de la mina y áreas sensibles. Estos dispositivos permiten registrar PPV, frecuencia y dirección de propagación.
2. Ejecución controlada: bajo protocolos de seguridad, se lleva a cabo la voladura, con un monitoreo constante del entorno.
3. Procesamiento de datos: los registros se analizan y procesan usando PYTHON, el cual nos permite visualizar todos los parámetros de interés como lo es: la PPV, la frecuencia dominante y el comportamiento de la atenuación con la distancia.
4. Por último, los resultados se comparan con los límites establecidos en normativas internacionales como el USBM RI-8507 - 1980 (tabla 1, tabla 2) o la DIN 4150-3 - 2016 (tabla 3, tabla 4).

CAPITULO V – TRABAJO DE CAMPO

5.1 Ubicación zonas de estudio

La investigación se desarrolló en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca, Colombia), reconocido por su carácter industrial y por la coexistencia entre zonas urbanas y canteras a cielo abierto dedicadas a la producción de agregados para la construcción. Se realizaron registros en tres empresas mineras con operaciones activas: Agregados La Roca S.A.S. y Materiales, Perea y Cía S.A.S. y Agregados EMT S.A.S. (Figura 12, 13, 14 y 15).

Las explotaciones de Perea y La Roca se localizan en veredas como Arroyo Hondo y Guabinas, sectores en los que la expansión residencial ha reducido la distancia entre las detonaciones y las edificaciones aledañas. Como vivienda de referencia para el análisis se utilizó la Parcelación Campestre Laguna Seca (Ver Figura 16)



Figura 12- Cantera Agregados LA ROCA S.A.S



Figura 13-Cantera PEREA & CIA S.A.S- Arroyo Hondo



Figura 14-Cantera PEREA & CIA S.A.S- Guabinas



Figura 16-Parcelacion campestre Laguna Seca-Guabinas



Figura 15-Cantera Materiales y agregados EMT S.A.S

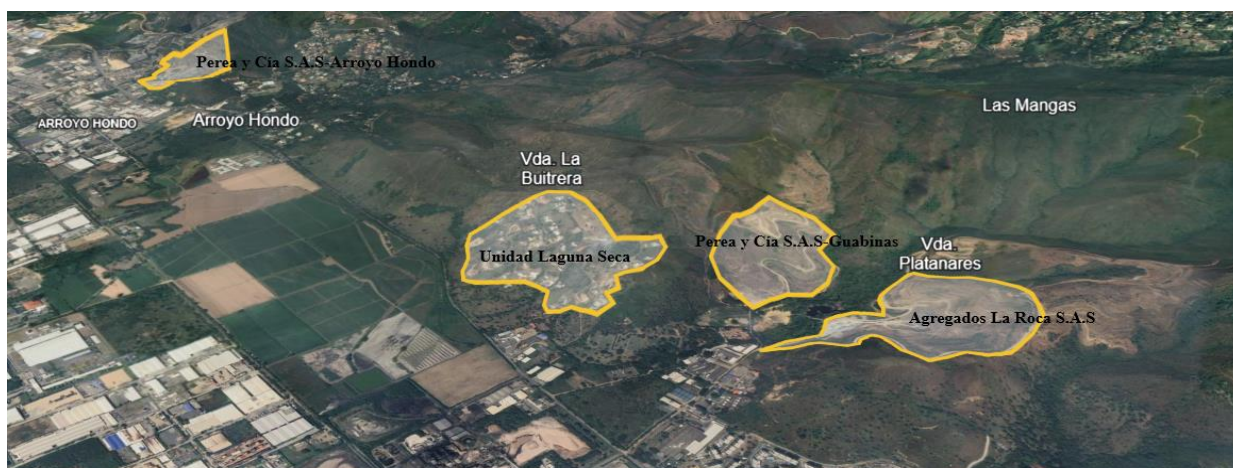


Figura 17-Ubicacion canteras para caso de estudio a parcelación campestre laguna seca.

5.2. Procedimiento para recolección de datos

Se llevó a cabo la adecuación del sismógrafo en una caja hermética, lo cual permitió garantizar su protección frente a factores externos como humedad, polvo y variaciones de temperatura, además de brindar una mejor disposición de los componentes internos. Adicionalmente, se incorporó un sistema de alimentación autónoma compuesto por una batería recargable y un panel

solar, con el propósito de asegurar el suministro continuo de energía durante todo el proceso de registro. De igual manera, se instaló una antena de comunicación para habilitar la conexión a internet y así verificar en tiempo real la señal capturada por el equipo.

Una vez en campo, se realizó la identificación del área destinada para la voladura, con el fin de establecer la ubicación estratégica del sismógrafo. Este se orientó hacia el norte en dirección al punto de detonación y posteriormente se niveló cuidadosamente, asegurando que quedara sobre un terreno firme y estable para minimizar interferencias externas. Completadas las conexiones eléctricas y de comunicación, se efectuó una prueba preliminar de funcionamiento, con el objetivo de confirmar que el dispositivo transmitiera señal de manera adecuada antes de iniciar los registros.

Posteriormente, se determinaron las coordenadas tanto del lugar de instalación del sismógrafo como del punto de voladura, lo que permitió calcular la distancia exacta entre ambos mediante herramientas de georreferenciación satelital. Estos procedimientos se llevaron a cabo en canteras dedicadas a la extracción de materiales de agregados, donde el sismógrafo utilizado correspondió a un Raspberry Shake, dispositivo que integra geófonos de tres componentes, lo que permite registrar y caracterizar la señal en sus direcciones longitudinal, transversal y vertical.

Como complemento a las mediciones, se realizó un registro fotográfico comparativo del sitio antes y después de la instalación, con el fin de dejar evidencia visual del procedimiento de campo y del estado del entorno.

En cada voladura se tomó la muestra, buscando obtener una caracterización representativa de las vibraciones generadas por las voladuras. Para ello, se documentaron aspectos técnicos de cada evento, tales como:

- Tipo de explosivo utilizado.
- Cantidad total de explosivo empleado.
- Distancia desde el sismógrafo hasta el punto de voladura.
- Profundidad y número de barrenos perforados.

Estos parámetros constituyen la base para correlacionar la energía liberada en cada voladura con la respuesta registrada por el sismógrafo, lo que permitirá realizar un análisis comparativo y establecer patrones de comportamiento de las vibraciones en función de las condiciones de operación de cada cantera.

Teniendo en cuenta lo anterior, se efectuaron visitas de campo en distintos puntos de interés, con el propósito de registrar y recolectar muestras sísmicas a través del sismógrafo previamente instalado y calibrado. Estos registros se destinaron posteriormente a la caracterización de las vibraciones generadas por voladuras controladas en canteras localizadas en el municipio de Yumbo, Valle del Cauca.

Las jornadas de monitoreo se llevaron a cabo en las canteras Perea y Cía. S.A.S., Agregados La Roca S.A.S. y Materiales y Agregados EMT S.A.S., escenarios donde se desarrollaron las detonaciones bajo condiciones reales de operación minera. Durante cada visita, se realizaron ajustes de ubicación y nivelación del sismógrafo, asegurando la calidad de los registros y la repetitividad de la metodología.

Cada voladura fue documentada considerando los parámetros técnicos más relevantes, entre los que se destacan el tipo y la cantidad de explosivo utilizado, el número y la profundidad de los barrenos, así como la distancia existente entre el punto de voladura y la ubicación del sismógrafo. Esta información permitió establecer relaciones entre las condiciones de operación de la cantera y la magnitud de las vibraciones registradas.

A continuación, se presenta la secuencia de muestras obtenidas en cada una de las voladuras registradas, con sus respectivas especificaciones técnicas levantadas en campo.

- Voladura realizada en la cantera Perea S.A.S., ubicada en la zona de Arroyo hondo – vía Yumbo, sector caracterizado por un terreno rocoso de alta densidad, el cual influye directamente en la propagación y atenuación de las ondas sísmicas.

La voladura fue ejecutada mediante el método tradicional, sin empleo de sistemas de micro retardo, lo que genera una liberación simultánea de energía y, por ende, una señal sísmica de mayor intensidad y menor dispersión temporal.

Las características operativas de la voladura fueron las siguientes:

- Tipo de explosivo: anfo, pentofex y indugel.
- Cantidad total de explosivo: 1 toneladas
- Profundidad de los barrenos: variable entre 3 y 5 m (35 barrenos)
- Método de iniciación: detonación simultánea no electrónico (sin retardo)
- Distancia entre el sismógrafo y el frente de voladura: 40 m
- Condiciones geotécnicas: terreno rocoso consolidado.



Figura 18- Sismógrafo instalado in situ cantera Pera y Cia SAS. Fuente: Los autores



Figura 19- Antes y después voladura (Fecha registro 20-03-2025) Fuente: Los autores

➤ Voladura Cantera PEREA S.A.S

- Tipo de explosivo: anfo, pentofex y indugel.
- Cantidad total de explosivo: 1 toneladas
- Profundidad de los barrenos: variable entre 3 y 5 metros (40 barrenos)
- Método de iniciación: detonación simultánea no electrónico (sin retardo)
- Distancia entre el sismógrafo y el frente de voladura: aproximadamente 41,3 m
- Condiciones geotécnicas: terreno rocoso consolidado



Figura 20- Sismógrafo instalado in situ cantera Pera y Cia SAS. Fuente: Los autores



Figura 21-Antes y después voladura (fecha registro 13-05-2025). Fuente: Los autores

➤ Voladura Cantera LA ROCA S.A.S

- Tipo de explosivo: anfo fexar, emulind- E.
- Cantidad total de explosivo: 1,5 toneladas
- Profundidad de los barrenos: 7-8 metros (49 barrenos)
- Método de iniciación: detonación simultánea no electrónico (sin retardo)
- Distancia entre el sismógrafo y el frente de voladura: 77,8 m
- Condiciones geotécnicas: terreno rocoso



Figura 22- Sismógrafo instalado in situ cantera LA ROCA. Fuente: Los autores



Figura 23-Antes y después voladura (Fecha registro 24-05-2025). Fuente: Los autores

- Voladura Cantera MATERIALES Y AGREGADOS EMT SAS
 - Tipo de explosivo: anfo, indugel
 - Cantidad total de explosivo: 1 toneladas
 - Profundidad de los barrenos: 6-7 metros (54 barrenos)
 - Método de iniciación: detonación no electrónico con retardos (5 retardos)
 - Distancia entre el sismógrafo y el frente de voladura: 41,5 m
 - Condiciones geotécnicas: terreno rocoso



Figura 24-Sismógrafo instalado in situ cantera MATERIALES Y AGREGADOS EMT SAS. Fuente: Los autores



Figura 25-Antes y después voladura (Fecha registro 29-05-2025).Fuente: Los autores

- Voladura Cantera PEREA Y CIA SAS (Sector guabinas)
 - Tipo de explosivo: anfo, pentofex y indugel.
 - Cantidad total de explosivo: 3 toneladas
 - Profundidad de los barrenos: 9, a 12,5 metros (99 barrenos)
 - Método de iniciación: detonación electrónica con retardos
 - Distancia entre el sismógrafo y el frente de voladura: 66,3 m y 66,17 m
 - Condiciones geotécnicas: terreno rocoso



Figura 26- Sismógrafo instalado in situ cantera Pera y Cia SAS. Fuente: Los autores



Figura 27- Antes y después voladura (Fecha registro 29-07-2025) Fuente: Los autores

- Voladura Cantera PEREA Y CIA SAS (Sector guabinas)
 - Tipo de explosivo: anfo, pentofex y indugel.
 - Cantidad total de explosivo: 4 toneladas
 - Profundidad de los barrenos: 5,5, a 10 metros (187 barrenos)
 - Método de iniciación: detonación electrónica con retardos
 - Distancia entre el sismógrafo y el frente de voladura: 415,4 m y 452,8m
 - Condiciones geotécnicas: terreno rocoso

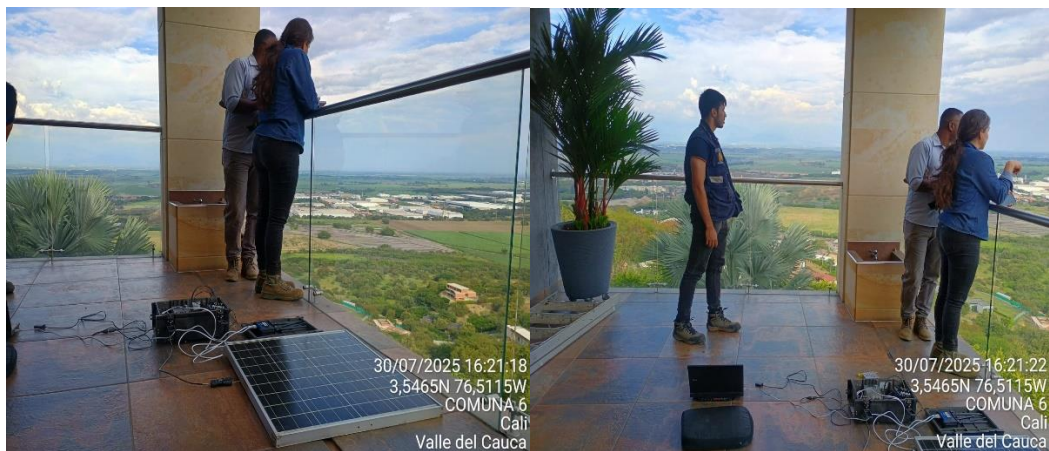


Figura 28-Sismógrafo instalado in situ cantera Pera y Cia SAS. Fuente: Los autores



Figura 29-Antes y después voladura (Fecha registro 30-07-2025) Fuente: Los autores

- Voladura Cantera PEREA Y CIA SAS (Sector guabinas)
 - Tipo de explosivo: anfo, pentofex y indugel.
 - Cantidad total de explosivo: 4 toneladas
 - Profundidad de los barrenos: 5,5, a 10 metros (187 barrenos)
 - Método de iniciación: detonación electrónica con retardos
 - Distancia entre el sismógrafo y el frente de voladura: 31,1 m
 - Condiciones geotécnicas: terreno rocoso



Figura 30-Sismógrafo instalado in situ cantera Pera y Cia SAS. Fuente: Los autores

Para realizar la comparación entre el antes y el después de la medición, se presenta la *Figura 29*, la cual corresponde al mismo registro, pero con la variación en la ubicación del sismógrafo. Este ajuste en la posición del equipo permite evidenciar las diferencias en la respuesta vibratoria dependiendo del punto de instalación, aportando así mayor claridad en la interpretación de los resultados obtenidos.

CAPITULO VI – ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para el desarrollo del estudio se efectuó la recolección de un conjunto de muestras en diferentes canteras, con el propósito de llevar a cabo una caracterización representativa de las voladuras registradas. En la Tabla 6 se presenta un resumen general de los parámetros más relevantes obtenidos en cada evento, los cuales corresponden a la información recolectada directamente en campo. Este compendio de datos constituye la base para la etapa de procesamiento posterior, en la que, mediante la implementación de un código en Python, se realizará el análisis gráfico y comparativo de las señales registradas, facilitando así la interpretación de los comportamientos vibratorios asociados a cada voladura.

Mina	Tipo de explosivo	Cantidad explosivo (kg)	Numero de barrenos	Profundidad barrenos (m)	Método	Distancia sismógrafo a voladura (m)	#Prueba
Perea y Cia SAS	anfo, pentofex y indugel	1000	35	3 a 5	no electrónico sin retardos	40	1
Perea y Cia SAS	anfo, pentofex y indugel	1000	40	3 a 5	no electrónico sin retardos	41,3	2
LA ROCA SAS	anfo fexar, emulind e	1500	49	7 a 8	no electrónico sin retardos	77,8	3
MATERIALES Y AGREGADOS EMT SAS	anfo , indugel	1000	54	6 a 7	no electrónico con retardos	41,5	4
Perea y Cia SAS	anfo, pentofex y indugel	3500	99	9 a 12,5	electrónico con retardos	66,33	5
Perea y Cia SAS	anfo, pentofex y indugel	3500	99	9 a 12,5	electrónico con retardos	66,17	6
Perea y Cia SAS UVP2 CASA	anfo, pentofex y indugel	4550	187	5,5 a 10	electrónico con retardos	415,4	7
Perea y Cia SAS UVP3 CASA	anfo, pentofex y indugel	4550	187	5,5 a 10	electrónico con retardos	452,8	8
Perea y Cia SAS UVP 1 MINA	anfo, pentofex y indugel	4550	187	5,5 a 10	electrónico con retardos	31,1	9

Tabla 6-Registro características de voladura. Fuente: Los autores

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del procesamiento de las pruebas realizadas. Estos corresponden a datos numéricos en diferentes componentes, tales como: desplazamiento, velocidad pico, aceleración pico, frecuencia de cruce por cero, tiempo de adquisición, transformada rápida de Fourier (FFT), distancia y carga operante de cada voladura. Cada registro fue organizado cronológicamente según la fecha de ejecución y desglosado en las tres componentes instrumentales (EHZ, EHE y EHN), lo cual permitió identificar de manera precisa los valores característicos mencionados. Los resultados consolidados se encuentran resumidos en la *Tabla 7*, mientras que en la sección de *Anexos 9* se incluyen las representaciones gráficas correspondientes para cada prueba, de acuerdo con la cantera en la que fueron obtenidas.

CANAL	Desplazamiento (mm)	Velocidad Pico (mm/s)	Aceleración Pico (mm/s ²)	Frecuencia Corte Cero	Tiempo de datos (s)	FFT (Hz)	Distancia (m)	Carga (Kg)	TIPO	# Prueba
AM. R8256 00 EHZ D 2025 079	0,099	6,660	451,347	11,500	1,00	25,743	40,00	1000	VERTICAL	Prueba 1
AM. R8256 00 EHN D 2025 079	1,784	22,305	1055,537	5,500	1,00	0,990	40,00	1000	LONGITUDINAL	
AM. R8256 00 EHE D 2025 079	1,915	18,268	1081,019	2,000	1,00	0,990	40,00	1000	TRANSVERSAL	
AM. RAFDA 00 EHZ D 2025 133	0,153	23,707	1938,842	12,500	0,60	31,148	41,30	1000	VERTICAL	Prueba 2
AM. RAFDA 00 EHN D 2025 133	1,261	26,134	1791,153	5,833	0,60	1,639	41,30	1000	LONGITUDINAL	
AM. RAFDA 00 EHE D 2025 133	1,887	26,456	3030,577	8,333	0,60	1,639	41,30	1000	TRANSVERSAL	
AM. RAFDA 00 EHZ D 2025 144	0,154	16,220	1212,578	5,000	0,70	15,493	77,80	1500	VERTICAL	Prueba 3
AM. RAFDA 00 EHN D 2025 144	1,076	32,091	1719,390	4,286	0,70	2,817	77,80	1500	LONGITUDINAL	
AM. RAFDA 00 EHE D 2025 144	1,384	26,601	1913,234	6,429	0,70	2,817	77,80	1500	TRANSVERSAL	
AM. RAFDA 00 EHZ D 2025 149	0,555	19,302	941,117	11,333	1,50	0,662	41,50	1000	VERTICAL	Prueba 4
AM. RAFDA 00 EHN D 2025 149	6,410	55,649	2559,581	0,667	1,50	0,662	41,50	1000	LONGITUDINAL	
AM. RAFDA 00 EHE D 2025 149	5,585	50,794	1417,792	2,333	1,50	0,662	41,50	1000	TRANSVERSAL	
AM. R8256 00 EHZ D 2025 210	0,653	4,381	341,651	17,625	4,00	0,249	66,33	3500	VERTICAL	Prueba 5
AM. R8256 00 EHN D 2025 210	2,818	14,770	928,915	7,125	4,00	0,499	66,33	3500	LONGITUDINAL	
AM. R8256 00 EHE D 2025 210	13,697	42,923	1221,233	2,500	4,00	0,499	66,33	3500	TRANSVERSAL	
AM. R0BD9 00 EHZ D 2025 210	1,769	6,397	282,974	6,875	4,00	0,249	66,17	3500	VERTICAL	Prueba 6
AM. R0BD9 00 EHN D 2025 210	6,640	23,457	883,168	9,500	4,00	0,499	66,17	3500	LONGITUDINAL	
AM. R0BD9 00 EHE D 2025 210	22,465	57,117	1728,889	2,500	4,00	0,249	66,17	3500	TRANSVERSAL	
AM. R0BD9 00 EHZ D 2025 211	0,012	1,260	109,952	16,313	10,00	20,724	415,40	4500	VERTICAL	Prueba 7
AM. R0BD9 00 EHN D 2025 211	0,016	0,896	58,809	10,250	10,00	10,237	415,40	4500	LONGITUDINAL	
AM. R0BD9 00 EHE D 2025 211	0,010	0,713	58,435	12,125	10,00	20,724	415,40	4500	TRANSVERSAL	
AM. R8256 00 EHZ D 2025 211	0,006	0,460	32,054	8,563	8,00	10,362	452,80	4500	VERTICAL	Prueba 8
AM. R8256 00 EHN D 2025 211	0,010	0,565	31,164	8,000	8,00	10,237	452,80	4500	LONGITUDINAL	
AM. R8256 00 EHE D 2025 211	0,006	0,455	30,164	10,563	8,00	10,237	452,80	4500	TRANSVERSAL	
AM. RAFDA 00 EHZ D 2025 211	5,195	21,045	1019,519	5,313	4,80	0,208	31,10	4500	VERTICAL	Prueba 9
AM. RAFDA 00 EHN D 2025 211	46,602	147,386	2297,212	1,771	4,80	0,416	31,10	4500	LONGITUDINAL	
AM. RAFDA 00 EHE D 2025 211	15,942	61,079	2375,029	6,458	4,80	0,624	31,10	4500	TRANSVERSAL	

Tabla 7- Resultados obtenidos. Fuente: Los autores.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las diferentes pruebas, se realizó un desglose individual de cada registro, en el cual se separaron las componentes de onda longitudinal, transversal y vertical. Esta clasificación permitió efectuar un análisis independiente de cada dirección de propagación, facilitando la identificación de particularidades en el comportamiento de las vibraciones. Dichos resultados complementan la caracterización general presentada anteriormente y proporcionan una base más sólida para la interpretación de los efectos generados por las voladuras en cada cantera evaluada.

ONDAS LONGITUDINALES								
Desplazamiento (mm)	Velocidad Pico (mm/s)	Aceleración Pico (mm/s ²)	Frecuencia Corte Cero	Tiempo de datos (s)	FFT (Hz)	Distancia (m)	Carga (Kg)	#Prueba
1,784	22,305	1055,537	5,500	1,00	0,990	40,00	1000	PRUEBA 1
1,261	26,134	1791,153	5,833	0,60	1,639	41,30	1000	PRUEBA 2
1,076	32,091	1719,390	4,286	0,70	2,817	77,80	1500	PRUEBA 3
6,410	55,649	2559,581	0,667	1,50	0,662	41,50	1000	PRUEBA 4
2,818	14,770	928,915	7,125	4,00	0,499	66,33	3500	PRUEBA 5
6,640	23,457	883,168	9,500	4,00	0,499	66,17	3500	PRUEBA 6
0,016	0,896	58,809	10,250	10,00	10,237	415,40	4500	PRUEBA 7
0,010	0,565	31,164	8,000	8,00	10,237	452,80	4500	PRUEBA 8
46,602	147,386	2297,212	1,771	4,80	0,416	31,10	4500	PRUEBA 9

Tabla 8-Ondas longitudinales. Fuente: Los autores

ONDAS TRANSVERSALES								
Desplazamiento (mm)	Velocidad Pico (mm/s)	Aceleración Pico (mm/s ²)	Frecuencia Corte Cero	Tiempo de datos (s)	FFT (Hz)	Distancia (m)	Carga (Kg)	#Prueba
1,915	18,268	1081,019	2,000	1,00	0,990	40,00	1000	PRUEBA 1
1,887	26,456	3030,577	8,333	0,60	1,639	41,30	1000	PRUEBA 2
1,384	26,601	1913,234	6,429	0,70	2,817	77,80	1500	PRUEBA 3
5,585	50,794	1417,792	2,333	1,50	0,662	41,50	1000	PRUEBA 4
13,697	42,923	1221,233	2,500	4,00	0,499	66,33	3500	PRUEBA 5
22,465	57,117	1728,889	2,500	4,00	0,249	66,17	3500	PRUEBA 6
0,010	0,713	58,435	12,125	10,00	20,724	415,40	4500	PRUEBA 7
0,006	0,455	30,164	10,563	8,00	10,237	452,80	4500	PRUEBA 8
15,942	61,079	2375,029	6,458	4,80	0,624	31,10	4500	PRUEBA 9

Tabla 9-Ondas transversales. Fuente: Los autores

ONDAS VERTICALES								
Desplazamiento (mm)	Velocidad Pico (mm/s)	Aceleración Pico (mm/s ²)	Frecuencia Corte Cero	Tiempo de datos (s)	FFT (Hz)	Distancia (m)	Carga (Kg)	#Prueba
0,099	6,660	451,347	11,500	1,00	25,743	40,00	1000	PRUEBA 1
0,153	23,707	1938,842	12,500	0,60	31,148	41,30	1000	PRUEBA 2
0,154	16,220	1212,578	5,000	0,70	15,493	77,80	1500	PRUEBA 3
0,555	19,302	941,117	11,333	1,50	0,662	41,50	1000	PRUEBA 4
0,653	4,381	341,651	17,625	4,00	0,249	66,33	3500	PRUEBA 5
1,769	6,397	282,974	6,875	4,00	0,249	66,17	3500	PRUEBA 6
0,012	1,260	109,952	16,313	10,00	20,724	415,40	4500	PRUEBA 7
0,006	0,460	32,054	8,563	8,00	10,362	452,80	4500	PRUEBA 8
5,195	21,045	1019,519	5,313	4,80	0,208	31,10	4500	PRUEBA 9

Tabla 10-Ondas verticales. Fuente: Los autores

Con base en los resultados obtenidos se elaboró un gráfico de Velocidad Pico de Partícula (Vpp) en función de la Frecuencia de Cruce por Cero (Zc) para cada una de las componentes registradas (longitudinal, transversal y vertical), como se aprecia en la *figura 25*.

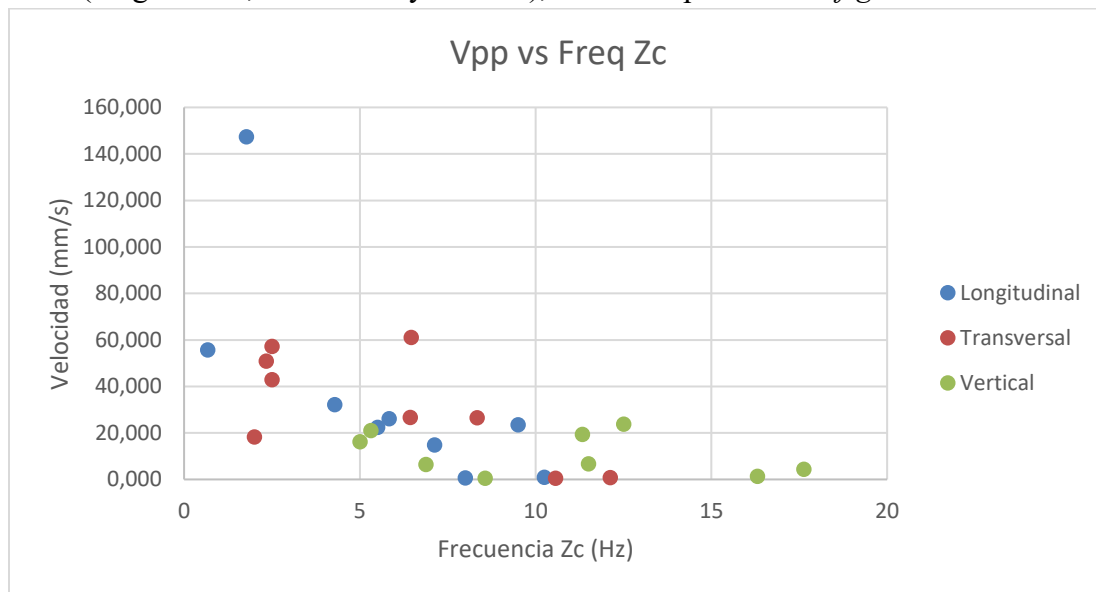


Figura 31-Velocidad pico partícula Vs Frecuencia ZC. Fuente: Los autores

El análisis de la Figura 31 (Velocidad Pico de Partícula vs. Frecuencia de Corte por Cero) en conjunto con los datos tabulados para las nueve diferentes voladuras (Tablas 8, 9 y 10) proporciona una comprensión integral de la respuesta del macizo rocoso y el suelo a las detonaciones. El comportamiento de las vibraciones y el medio por el cual viajan las componentes longitudinales, transversales y verticales, muestran que se ven influenciadas por múltiples factores operativos y geológicos.

Desde el punto de vista de la relación entre la velocidad de onda pico y la frecuencia de corte por cero, se observa un comportamiento de relación inversa. Lo anterior es coherente con la teoría de la propagación de ondas sísmicas, donde la energía de las vibraciones se disipa con la distancia, lo que genera una atenuación de las componentes.

También se puede concluir que valores elevados de velocidad pico de partícula en rangos de bajas frecuencias (inferiores a 5 Hz) son los valores considerados como críticos, ya que, aunque no poseen el mayor valor de velocidad pico de partícula, si posee frecuencias bajas lo que representa un riesgo significativo para las estructuras cercanas, ya que las frecuencias bajas están asociadas con ondas de mayor longitud, las cuales tienen mayor potencial de resonar con las estructuras de gran tamaño y causar daños estructurales.

Con base en el comportamiento de cada tipo de onda, las ondas longitudinales (puntos azules) se encuentran en el cuadrante de alta velocidad de onda pico. Lo que va relacionado en que este tipo de ondas longitudinales (ondas P) son las primeras en propagarse desde el frente de detonación y transportan la mayor parte de la energía inicial de la voladura. Por otro lado, las ondas transversales (Puntos verdes) y las ondas verticales (puntos rojos) tienen una mayor dispersión en el gráfico y están ubicadas en los rangos de velocidad de onda pico que se consideran generalmente bajos. Esta variación se debe principalmente, a lo sensibles que son estas ondas a la heterogeneidad del terreno y a los efectos de rebote y reflexión, lo cual es típico en la forma de propagación de las ondas S (transversales) y Rayleigh.

Considerando los registros obtenidos en campo, las pruebas 7, 8 y 9 se llevaron a cabo en una vivienda cuyos residentes habían manifestado molestias por las vibraciones generadas durante las voladuras en la cantera. Con este propósito, se recopilaron los valores mostrados en la tabla siguiente, los cuales sirven de base para analizar si las vibraciones registradas cumplen con los límites establecidos en la norma DIN 4150-3 para edificaciones de uso residencial.

Cabe señalar que la prueba 9 se efectuó a una distancia considerablemente menor respecto al frente de voladura. Esta condición particular puede justificar el valor más alto de velocidad pico de partícula obtenido en comparación con las pruebas 7 y 8, realizadas en la misma vivienda, pero con mayor separación de la fuente de explosión. A continuación, se tiene la *tabla 11* la cual desglosa los valores a realizar el análisis.

CANAL							Desplazamiento (mm)	Velocidad Pico (mm/s)	Aceleración Pico (mm/s ²)	Frecuencia Corte Cero	Tiempo de datos (s)	FFT (Hz)	Distancia (m)	Carga (Kg)	TIPO	# Prueba
AM.	R0BD9	00	EHZ	D	2025	211	0,012	1,260	109,952	16,313	10,00	20,724	415,40	4500	VERTICAL	Prueba 7
AM.	R0BD9	00	EHN	D	2025	211	0,016	0,896	58,809	10,250	10,00	10,237	415,40	4500	LONGITUDINAL	
AM.	R0BD9	00	EHE	D	2025	211	0,010	0,713	58,435	12,125	10,00	20,724	415,40	4500	TRANSVERSAL	
AM.	R8256	00	EHZ	D	2025	211	0,006	0,460	32,054	8,563	8,00	10,362	452,80	4500	VERTICAL	Prueba 8
AM.	R8256	00	EHN	D	2025	211	0,010	0,565	31,164	8,000	8,00	10,237	452,80	4500	LONGITUDINAL	
AM.	R8256	00	EHE	D	2025	211	0,006	0,455	30,164	10,563	8,00	10,237	452,80	4500	TRANSVERSAL	
AM.	RAFDA	00	EHZ	D	2025	211	5,195	21,045	1019,519	5,313	4,80	0,208	31,10	4500	VERTICAL	Prueba 9
AM.	RAFDA	00	EHN	D	2025	211	46,602	147,386	2297,212	1,771	4,80	0,416	31,10	4500	LONGITUDINAL	
AM.	RAFDA	00	EHE	D	2025	211	15,942	61,079	2375,029	6,458	4,80	0,624	31,10	4500	TRANSVERSAL	

Tabla 11- Registro prueba para caso vivienda unidad laguna seca. Fuente: Los autores

Los resultados obtenidos en la unidad residencial Laguna Seca muestran diferencias significativas en los niveles de velocidad pico de partícula (VPP) según la ubicación de la medición y la cercanía al frente de voladura. En la prueba 7, realizada dentro de la vivienda a una distancia de 415,40 m, los valores de VPP oscilaron entre 0,713 mm/s en el componente transversal y 0,896 mm/s en el longitudinal, alcanzando 1,260 mm/s en el vertical. Estos niveles son muy inferiores a los límites establecidos por la norma DIN 4150-3, que define rangos de 3 a 8 mm/s para viviendas delicadas y de 5 a 15 mm/s para edificaciones residenciales en general, lo cual indica que las vibraciones en este caso no representan un riesgo estructural ni generan afectaciones en la edificación. En la prueba 8, también dentro de la vivienda, pero a una distancia de 452,80 m, los valores disminuyeron ligeramente, alcanzando 0,455 mm/s en el componente transversal, 0,565 mm/s en el longitudinal y 0,460 mm/s en el vertical. Aunque se observa una disminución respecto a la prueba anterior, los niveles siguen estando muy por debajo de los umbrales normativos, confirmando que la propagación de la onda a estas distancias no ocasiona daños a la estructura de la vivienda. En contraste, la prueba 9, realizada a una distancia mucho menor, de 31,10 m respecto al frente de voladura, registró valores de VPP considerablemente superiores: 61,079 mm/s en el componente transversal, 147,386 mm/s en el longitudinal y 21,045 mm/s en el vertical. Estos valores superan ampliamente los límites establecidos incluso para edificaciones robustas de tipo industrial, reflejando la magnitud de la energía generada en la proximidad de la voladura. No obstante, estos resultados no representan las condiciones reales experimentadas en la vivienda, ya que la atenuación de las ondas con la distancia reduce de forma significativa la energía vibratoria transmitida al entorno habitado.

En conjunto, las pruebas 7 y 8 demuestran que, pese a la inconformidad de los residentes, los niveles de vibración medidos en la vivienda se encuentran muy por debajo de los valores críticos establecidos por la norma DIN 4150-3, descartando riesgos estructurales. La percepción de molestia puede estar más asociada a factores sensoriales como el ruido de la detonación y la sensación súbita de movimiento que a una afectación real en la estabilidad de la edificación. Por su parte, la prueba 9 evidencia la magnitud de la vibración cerca de la fuente, pero no es representativa para la vivienda, lo que refuerza la conclusión de que las vibraciones en el área residencial se mantienen dentro de rangos seguros.

Asimismo, en las gráficas se incluyeron los valores de referencia establecidos por la norma DIN 4150-3, lo que permitió verificar que los registros obtenidos en campo se mantienen por debajo de los límites admisibles. Esto respalda las conclusiones derivadas del análisis comparativo de las tres componentes de la vibración.

Dado que el caso de estudio corresponde a una edificación de carácter residencial, se observa que en las pruebas 7 y 8 las velocidades pico registradas se encuentran por debajo de los umbrales normativos, tal como se mencionó previamente. Esta condición confirma que, en dichas mediciones, las voladuras no representan un riesgo para la integridad estructural ni para el confort de los ocupantes de la vivienda.

En la *Figura 32* se presenta la ilustración correspondiente, la cual evidencia de manera visual esta relación entre los valores medidos y los límites de la norma, reforzando lo planteado en el análisis.

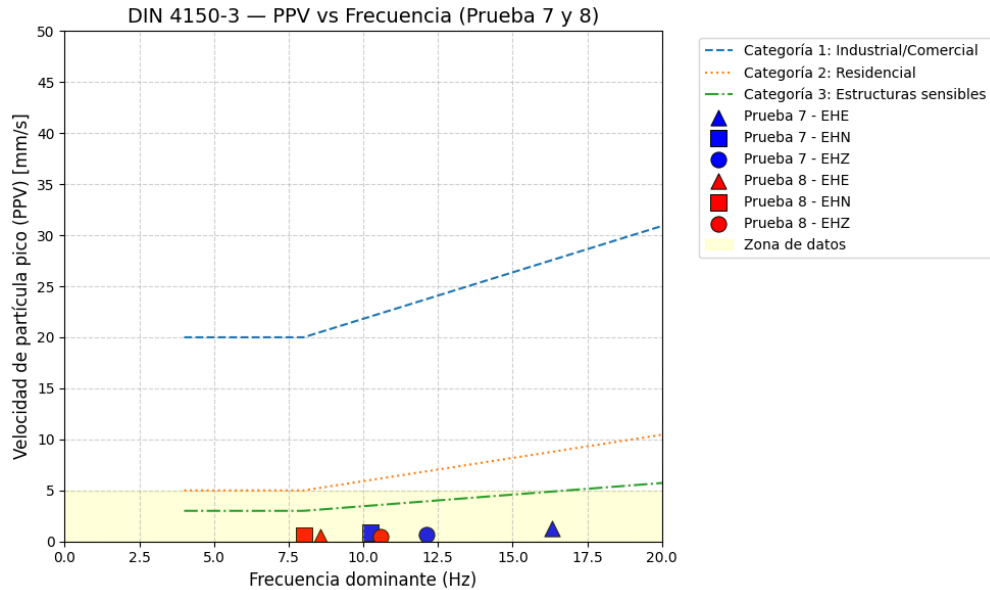


Figura 32-Frecuencia vs VPP caso estudio unidad residencial LAGUNA SECA. Fuente: Los autores

Seguidamente se llevó a cabo el mismo ejercicio considerando el conjunto de voladuras registradas, incluyendo aquellas correspondientes al caso de estudio en la unidad residencial. No obstante, la prueba 9 fue excluida del análisis comparativo general debido a que se realizó a una distancia relativamente corta respecto al frente de voladura, lo cual generó valores de velocidad pico de partícula elevados en rangos de baja frecuencia, condición que era previsible dadas las características del registro.

En la Figura 33 se presentan los resultados integrados para todas las voladuras. Allí se evidencia de forma gráfica que una proporción considerable de los registros supera el límite normativo establecido por la DIN 4150-3 para edificaciones de tipo residencial, que corresponde al caso de estudio. Este comportamiento, sin embargo, no implica necesariamente un riesgo directo para la vivienda analizada, pues dichas mediciones corresponden en su mayoría a pruebas de caracterización realizadas a diferentes distancias y bajo condiciones de carga variables, lo cual explica la dispersión y magnitud de los valores obtenidos.

Es importante señalar que las voladuras de caracterización, al efectuarse con el objetivo de estudiar el comportamiento del terreno frente a diferentes configuraciones de carga y distancias, tienden a reflejar velocidades pico más altas que las registradas en las pruebas directamente relacionadas con la vivienda objeto de análisis (pruebas 7 y 8). Esto confirma que la distancia al frente de voladura y el método de iniciación empleado son factores determinantes en la propagación de la onda vibratoria y en la magnitud de sus efectos sobre las edificaciones cercanas.

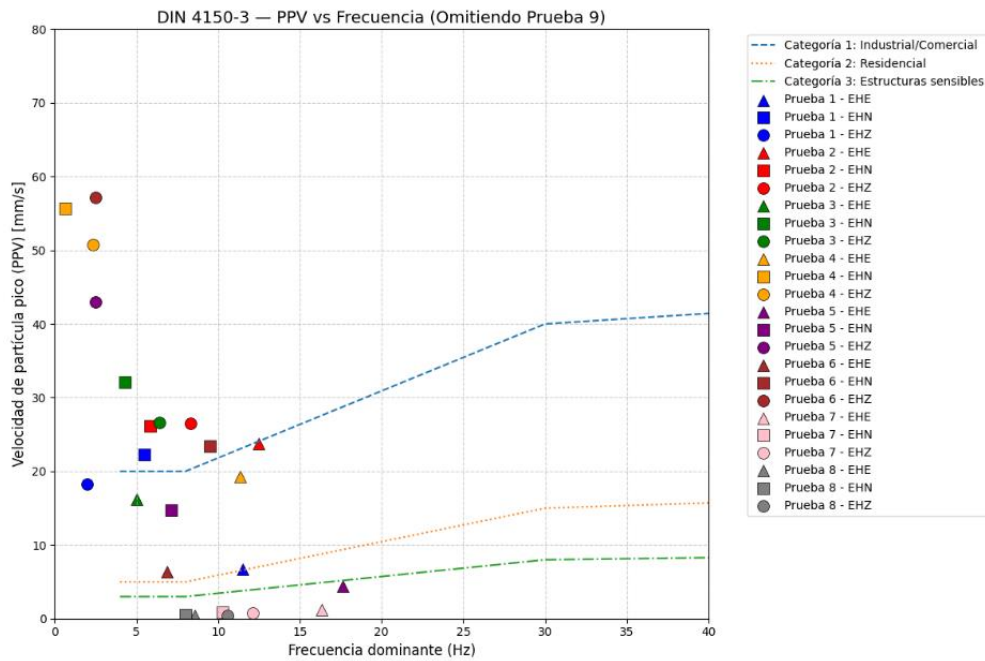


Figura 33-Frecuencia vs VPP caracterización voladuras. Fuente: Los autores

Posteriormente, se elaboró un cuadro comparativo en el que se consideraron los parámetros de velocidad pico de partícula (Vpp) y aceleración pico para cada una de las pruebas realizadas, discriminados en sus tres componentes de registro: vertical, longitudinal y transversal. Este análisis permite contrastar el comportamiento vibratorio en función de la dirección de propagación de las ondas, facilitando la interpretación de las diferencias de respuesta entre cada componente y proporcionando una visión integral del efecto dinámico generado por las voladuras.

CUADRO COMPARATIVO				
Carga operante (kg)	PPV Vertical (mm/s)	PPV Longitudinal (mm/s)	PPV Transversal (mm/s)	# Prueba
1000	6,660	22,305	18,268	1
1000	23,707	26,134	26,456	2
1500	16,220	32,091	26,601	3
1000	19,302	55,649	50,794	4
3500	4,381	14,770	42,923	5
3500	6,397	23,457	57,117	6
4500	1,260	0,896	0,713	7
4500	0,460	0,565	0,455	8
4500	21,045	147,386	61,079	9

Tabla 12-Cuadro comparativo PPV (EHZ, EHN Y EHE). Fuente: Los autores

El análisis comparativo de las componentes longitudinal, transversal y vertical de la velocidad

pico de partícula (VPP) evidencia diferencias claras en el comportamiento de la propagación de ondas sísmicas producto de las voladuras. En general, la componente longitudinal presentó las mayores magnitudes en la mayoría de las pruebas, alcanzando un valor extremo de 147,386 mm/s en la prueba 9, lo que confirma que la transmisión de energía en la dirección de propagación es la más significativa y la de mayor impacto potencial sobre edificaciones residenciales. Este predominio longitudinal también se reflejó en registros intermedios, como en las pruebas 2, 3 y 4, donde superó consistentemente a las otras componentes.

La componente transversal, aunque en menor medida que la longitudinal, también mostró valores relevantes en cercanía al frente de voladura, alcanzando hasta 61,079 mm/s en la prueba 9, además de magnitudes destacables en pruebas como la 5 (42,923 mm/s) y la 6 (57,117 mm/s). Estos niveles, en contextos residenciales, adquieren importancia debido a la vulnerabilidad de elementos no estructurales como muros divisorios, acabados y enchapes, que pueden sufrir fisuraciones ante esfuerzos laterales repetitivos.

Por otro lado, la componente vertical fue la de menor magnitud en la mayoría de los registros, con valores significativamente inferiores a los horizontales. Incluso en pruebas críticas como la 9, alcanzó 21,045 mm/s, muy por debajo de las otras direcciones. No obstante, en las pruebas 7 y 8, realizadas dentro de una unidad residencial ubicada a más de 400 m del frente de voladura, la componente vertical presentó valores ligeramente superiores o comparables a los horizontales (1,260 mm/s frente a 0,896 mm/s y 0,713 mm/s en la prueba 7; y 0,460 mm/s frente a 0,565 mm/s y 0,455 mm/s en la prueba 8). Estos registros, aunque bajos, ponen de manifiesto que la onda vertical, aun con menor energía, puede ser perceptible en las viviendas y generar molestias para los ocupantes, sin llegar a representar un riesgo estructural crítico.

En términos globales, los resultados confirman que las componentes horizontales (longitudinal y transversal) concentran los niveles de energía más altos y, por tanto, representan el mayor potencial de afectación en estructuras residenciales, debido a su asociación con desplazamientos laterales que pueden provocar fisuraciones en muros, elementos no estructurales y acabados. La componente vertical, aunque generalmente menor, debe ser considerada como complemento del análisis, especialmente en escenarios de atenuación a grandes distancias, donde puede adquirir una relevancia relativa mayor en la percepción del evento por parte de los residentes.

En conclusión, las vibraciones registradas en cercanía al frente de voladura (pruebas 1 a 6 y 9) alcanzaron valores que, en varios casos, superan los límites normativos establecidos por la DIN 4150-3 para edificaciones residenciales, mientras que en el interior de la vivienda (pruebas 7 y 8) los registros se mantuvieron claramente por debajo de dichos umbrales. Esto permite establecer que, dentro de las unidades residenciales, el riesgo estructural es bajo, aunque se confirma la predominancia de las vibraciones longitudinales como el factor crítico a considerar en la caracterización del impacto urbano de las voladuras.

CUADRO COMPARATIVO				
Carga operante (kg)	Aceleración pico vertical (mm/s²)	Aceleración pico longitudinal (mm/s²)	Aceleración pico transversal (mm/s²)	# Prueba
1000	451,347	1055,537	1081,019	1
1000	1938,842	1791,153	3030,577	2
1500	1212,578	1719,390	1913,234	3

1000	941,117	2559,581	1417,792	4
3500	341,651	928,915	1221,233	5
3500	282,974	883,168	1728,889	6
4500	109,952	58,809	58,435	7
4500	32,054	31,164	30,164	8
4500	1019,519	2297,212	2375,029	9

Tabla 13-Cuadro comparativo aceleración pico (EHZ, EHN Y EHE). Fuente: Los autores

El análisis de las aceleraciones pico evidencia que, en los registros más cercanos al frente de voladura (pruebas 1 a 6 y la 9), los valores alcanzados son elevados, particularmente en las componentes longitudinal y transversal. Por ejemplo, en la prueba 2 se superaron los 3000 mm/s² en dirección transversal y los 1900 mm/s² en dirección vertical, mientras que en la prueba 9 las aceleraciones horizontales superaron los 2300 mm/s². Estos niveles, aunque no corresponden a mediciones dentro de la vivienda objeto del estudio, sugieren que, de existir edificaciones residenciales en esas distancias, se presentarían problemas significativos en elementos no estructurales (fisuras en muros divisorios, desprendimiento de acabados, daños en cielorrasos) e incluso riesgo de afectaciones en conexiones estructurales por la magnitud de las fuerzas inerciales inducidas.

Sin embargo, al revisar los registros obtenidos dentro de la unidad residencial, se observa una clara atenuación de la señal vibratoria, particularmente en las pruebas 7 y 8, donde las aceleraciones descendieron a valores máximos de 109,952 mm/s² y 32,054 mm/s², respectivamente. Estos niveles, de acuerdo con lo establecido en la literatura y en normas como la DIN 4150, son considerablemente bajos y no generan daños estructurales ni fisuras en viviendas. En el peor de los casos, podrían provocar una ligera percepción de vibración por parte de los residentes, sin llegar a producir efectos físicos en los acabados.

Este contraste permite afirmar que, mientras en los puntos cercanos de medición externa se registraron aceleraciones críticas que en caso de existir viviendas allí habrían resultado perjudiciales, en el escenario real de estudio las unidades residenciales cercanas las vibraciones llegaron con una intensidad muy atenuada, incapaz de causar daños estructurales o funcionales. Esto confirma que la distancia y las condiciones de propagación del terreno juegan un papel determinante en la protección de las viviendas urbanas frente a voladuras en canteras.

Limitaciones y estrategias

Finalmente, durante el desarrollo del trabajo en campo se identificaron diversas limitaciones en la recolección de datos in situ. En primer lugar, se presentaron restricciones por parte de algunas canteras, que mostraron resistencia a permitir la instalación del sismógrafo, debido a la preocupación de que los resultados pudieran generar repercusiones frente a las viviendas cercanas. Esta situación obligó a reducir el número de puntos de muestreo inicialmente planteados.

En la fase operativa, uno de los principales inconvenientes estuvo relacionado con el suministro eléctrico del sismógrafo, ya que en algunos sitios no se contaba con una corriente estable y

suficiente, lo que ocasionó cortes en la señal e impidió la caracterización de ciertos registros. Este problema fue solucionado mediante la implementación de baterías auxiliares y una correcta instalación eléctrica. Posteriormente, para garantizar un flujo de energía constante y confiable, se instalaron paneles solares, lo que permitió superar esta limitación de forma definitiva.

Otro aspecto crítico fue la transmisión en tiempo real de los datos, la cual se vio afectada por la baja cobertura de señal en las zonas de cantera. Este inconveniente se resolvió utilizando un equipo de radio que facilitó la recepción de internet y, con ello, la conexión remota al sistema de monitoreo. Finalmente, el factor climático representó otra dificultad, ya que en varias ocasiones las condiciones atmosféricas adversas obligaron a aplazar las voladuras hasta contar con un tiempo adecuado para su ejecución.

En cuanto a las estrategias de monitoreo para mitigar los impactos de las voladuras, se identificó la importancia de aplicar voladuras con retardos temporales, que disminuyen la superposición de ondas y reducen la magnitud de las vibraciones. Asimismo, cuando sea necesario ejecutar disparos de gran escala, se recomienda emplear agentes de voladura con menor velocidad de detonación, lo que atenúa la energía liberada instantáneamente. Por último, resulta fundamental establecer un sistema de monitoreo permanente en viviendas y edificaciones cercanas, de modo que se garantice un seguimiento continuo y confiable, aportando insumos técnicos para la prevención de impactos negativos.

CAPITULO VII – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

1. La implementación del sismógrafo Raspberry Shake permitió registrar y caracterizar de manera efectiva las vibraciones generadas por las voladuras en diferentes canteras, demostrando que, a pesar de ser un equipo de bajo costo, brinda datos confiables para el análisis de parámetros como desplazamiento, velocidad pico de partícula (PPV), aceleración pico, frecuencia de cruce por cero y transformada rápida de Fourier (FFT).
2. Los resultados obtenidos evidencian que la componente longitudinal registró las mayores velocidades pico de partícula, alcanzando valores críticos como los observados en la Prueba 9 (148,431 mm/s), superando ampliamente los límites establecidos en la norma DIN 4150-3. Esto confirma que, para la evaluación normativa, debe considerarse siempre la componente más desfavorable, sin limitarse únicamente a la onda vertical.
3. Al analizar únicamente la componente vertical, se observó que varias pruebas (2, 3, 4 y 9) superaron los rangos de la norma para viviendas delicadas (3–8 mm/s) y para viviendas y edificios (5–15 mm/s), lo que indica que en condiciones reales existen riesgos de afectación estructural en edificaciones cercanas.
4. Las pruebas realizadas en la vivienda que reportó inconformidad (7, 8 y 9) evidencian que, aunque las pruebas 7 y 8 se encuentran dentro de los rangos normativos, la Prueba 9 excedió claramente los límites, situación asociada a la menor distancia respecto a la voladura. Esto refuerza la importancia de evaluar de manera diferenciada los casos particulares de viviendas con percepción o afectación directa.
5. Durante el trabajo en campo se presentaron limitaciones logísticas y técnicas, entre ellas: restricciones de acceso en algunas canteras, suministro eléctrico inestable para el sismógrafo, deficiencias en la transmisión en vivo de datos y condiciones climáticas adversas. Sin embargo, estas dificultades fueron superadas mediante la implementación de baterías, paneles solares, radios repetidores de señal y una adecuada planeación logística, lo cual permitió completar el registro y garantizar la confiabilidad de los datos.
6. La comparación de los registros con la norma DIN 4150-3 evidencia que las vibraciones generadas por las voladuras, en determinados casos, pueden superar los límites admisibles para edificaciones residenciales, lo que resalta la necesidad de implementar medidas de control en la operación minera, especialmente cuando existen viviendas cercanas.
7. Del análisis de la gráfica velocidad pico de partícula (PPV) vs frecuencia de corte por cero (Z_c), se concluye que los resultados obtenidos nos sirven para poder identificar las voladuras más críticas las cuales son las que produjeron una alta velocidad de onda pico y una baja frecuencia, permitiéndonos conocer las variables (como la distancia, el patrón de perforación o el tipo de explosivos) para evitar vibraciones indeseables y logra una buena optimización del diseño de la voladura.

7.2. Recomendaciones

1. Implementar de manera sistemática voladuras con retardos temporales, ya que esta técnica permite reducir la superposición de ondas sísmicas y, con ello, disminuir la magnitud de la vibración transmitida al entorno.
2. En casos donde sea necesario realizar voladuras de gran escala, se recomienda utilizar agentes de voladura con menor velocidad de detonación, con el fin de controlar la liberación de energía y mitigar el impacto sobre las estructuras vecinas.
3. Establecer un programa de monitoreo permanente en viviendas y edificaciones cercanas, mediante la instalación de sensores en puntos estratégicos, que permitan llevar un seguimiento continuo de los niveles vibratorios y generar registros técnicos verificables para la toma de decisiones.
4. Fortalecer los procesos de comunicación con la comunidad, informando de manera previa sobre la programación de voladuras, parámetros de diseño y medidas de mitigación, lo que contribuye a generar confianza y reducir la percepción negativa de las operaciones mineras.
5. Finalmente, se recomienda continuar con la aplicación de herramientas computacionales (Python, Obspy, FFT) para el procesamiento y análisis de datos sísmicos, ya que constituyen un apoyo fundamental en la interpretación gráfica y comparativa de los registros, facilitando la toma de decisiones basadas en criterios técnicos y normativos.

CAPITULO VIII - BIBIOGRAFIA

Ackerman, M., Van Der Waldd, G., & Botha, D. (2018). Mitigating the socio-economic consequences of mine closure. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118(4)<https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n4a14> .

Aki, K., & Richards, P. G. (1980). Quantitative Seismology, Theory and Methods Volume I and Volume II. In *Book* (Vol. 68, Issue 5).

Arias, J. (n.d.). *Revista Experto Edición 16* .

BENJUMEA CADAVID, J. M. (2003). VIBRACIONES CAUSADAS POR ACTIVIDAD HUMANA:

Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2023). In-Pit Disposal of Mine Tailings for a Sustainable Mine Closure: A Responsible Alternative to Develop Long-Term Green Mining Solutions. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 8)<https://doi.org/10.3390/su15086481> .

Caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil. CALI: Universidad del Valle. Obtenido de <https://www.osso.org.co/docu/tesis/2003/vibracion/vibracion.html> .

Choi, Y. H., & Lee, S. S. (2021). Predictive modelling for blasting-induced vibrations from open-pit excavations. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(16)<https://doi.org/10.3390/app11167487>

.-

CIELO ABIERTO. Escuela de Ingeniería de Mina - UPTC. Obtenido de http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_sogamoso/pregrado/minas/documentos/Caracteristicas_Y_CONTROL_DE_LAS_VIBRACIONES_PRODUCIDAS

Cole, M. J. (2024a). A Mine Closure Risk Rating System for South Africa. *Mining*, 4(1), 58–78
<https://doi.org/10.3390/mining4010005>.

Cole, M. J. (2024b). A Mine Closure Risk Rating System for South Africa. *Mining*, 4(1)<https://doi.org/10.3390/mining4010005> .

Compañía de Minas Caudalosa S.A. Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/317>

Cornejo Chacón, P. A., & Huamán Rivas, P. A. (2020). Estimación de un modelo predictivo de

vibraciones inducidas por voladura en campo medio y campo lejano para el cuidado de estructuras en una mina superficial en proceso de cierre. Pontificia Universidad Católica del Perú
Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/items/103c34d7-2a8b-44bd-8776->

Cornejo, P. A. (2022). ESTIMATION OF A BLASTING INDUCED VIBRATION PREDICTION MODEL OF MID AND FAR FIELDS FOR THE STRUCTURE CARE ON AN OPEN PIT MINE IN CLOSURE PROCESS. *SME Annual Conference and Expo 2022*.

Dowding, C. H. (1992). Suggested method for blast vibration monitoring. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*, 29(2)<https://doi.org/10.1016/0148->

Dowding, C. H. (2020). Blast vibration monitoring and control. CRC Press
<https://doi.org/10.1201/9781003064741> .

Dowding, C. H. (2020). Blast vibration monitoring and control. CRC Press
<https://doi.org/10.1201/9781003064741> .

Doyle, P. (2020). Environmental Geology. In *Encyclopedia of Geology: Volume 1-6, Second Edition* (Vol. 6)<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12455-8e07c68dcd171> .

Engineering, G. (2009). Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,. *Ratio*, 136(1).

EXSA. *Manual Práctico de Voladura EXSA*, [online.fliphtml5.com](https://online.fliphtml5.com/hqjn/rypz/). Disponible en: <https://online.fliphtml5.com/hqjn/rypz/> (05 agosto 2025).

Florez-Gongora, C. H., & Lozano-Lozano, C. F. (2007). ANÁLISIS Y TRATAMIENTO DE SEÑALES DE FUENTES SISMOGÉNICAS DE CAMPO CERCANO A SAN JOSÉ DE CÚCUTA, COLOMBIA. *Respuestas*, 52–70. doi:10.22463/0122820X.569

Gómez Cano, M. (2016). Caracterización de señales sísmicas usando análisis de espectros singulares (SSA) y transformada de tiempo corto de Fourier (STFT) Obtenido de https://hdl.handle.net/11059/6172,https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_12_0_70,https://www.redalyc.org/journal/2235/223566343004/html/.

Hustrulid, W. (2019). *Blasting principles for open pit mining*. Taylor & Francis
<https://www.routledge.com/Blasting-Principles-for-Open-Pit-Mining/Hustrulid/p/book/9789054104604> .

Institute of Makers of Explosives (IME). (2011). *IME Safety Library Publication No. 20*.
Obtenido de <https://www.ime.org/>

Instituto Alexander von Humboldt. (2019). Sistema de evaluación y monitoreo a la efectividad de las compensaciones ambientales en Colombia. *The Nature Conservancy, 2018*.

International, 178(2), 813–825. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04177.x

Interpol. (2022). *ILLEGAL MINING AND ASSOCIATED CRIMES A Law Enforcement Perspective On One Of the Most Lucrative Crimes ILLEGAL MINING AND ASSOCIATED CRIMES 2*.

Jiang, Y., Li, S., Wang, Y., & Liu, X. (2021). Experimental and numerical study of blasting vibration effects on buildings in urban environments. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(1), 45-58 <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.06.008> .

Juárez, F. (2016). La minería ilegal en Colombia: Un conflicto de narrativas. *Agora U.S.B.*,
Kahriman, A. (2004). Analysis of parameters affecting blast-induced vibrations through measuring and evaluating vibration characteristics. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(11), 887-892 <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.06.005>.

Kijko, A. (2018). *Statistical seismicity analysis for understanding seismic hazard*. Springer
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-69377-2> .

Kozłowska-Woszczycka, A., & Pactwa, K. (2022). Social License for Closure—A Participatory Approach to the Management of the Mine Closure Process. *Sustainability (Switzerland)*,
Kristeková, M., Kristek, J., & Moczo, P. (Agosto de 2009). Time-frequency misfit and goodness-of-fit criteria for quantitative comparison of time signals. *Geophysical Journal*

Kristeková, M., Kristek, J., Moczo, P., & Day, S. (2006). Misfit Criteria for Quantitative

Comparison of Seismograms. Bulletin of the Seismological Society of America, 96(5), 1836–1850. doi:10.1785/0120060012

Lopez, Jimeno (2000), *Manual de perforación y voladuras de Rocas*. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/209393479/Manual-de-Perforacion-y-Voladura-de-Rocas-LOPEZ-JIMENO> (10 Agosto 2025).

Lay, T., & Wallace, T. C. (1995). *Modern Global Seismology*. Academic Press.

Lu, C., Liu, J., Ma, G., & Zhang, X. (2019). Propagation characteristics of blast-induced ground vibrations in soft soils: Experimental study and numerical simulation. Tunnelling and

Mendoza, C., Rodríguez, P., & Gómez, J. (2022). Evaluación del impacto de voladuras en la estabilidad de edificaciones en zonas urbanas. Revista Colombiana de Ingeniería Civil, 25(2), 115-130. <https://doi.org/10.1590/S0120-62302022000200009>

Ntema, J., Marais, L., Cloete, J., & Lenka, M. (2023). Mine closure in Matjhabeng in the Free State goldfields, South Africa: Implications for households. *Extractive Industries and Society*, 14 <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101257> .

Numerical simulation on failure effect of mining-induced dynamic loading and its influential factors. *Safety Science*, 113 <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.12.011>.
_POR_ACCION_DE_LAS_VOLADURAS_EN_MINAS_A_CIELO_ABIERTO.do.pdf(14(11)<https://doi.org/10.3390/su14116610>) (16(1)[https://doi.org/10.21500/16578031.2169.9062\(92\)92124-U](https://doi.org/10.21500/16578031.2169.9062(92)92124-U)) .

ObsPy Documentation. (2024). Obtenido de <https://docs.obspy.org/>

Obtenido de https://oa.upm.es/21528/1/PFC_NED_YAMILE_VASQUEZ_SANCHEZ.pdf
Ondas sísmicas (2019) 2.1. *Ondas Sísmicas*. Disponible en: https://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/21_ondas_ssmicas.html (10 Agosto 2025).

Ortiz, A.E. (2016), *ONDAS ACÚSTICAS Y DETERMINACIÓN DE LA ONDA DE SOPLO POR EFECTO DE VOLADURA, EN EL TÚNEL DE ADUCCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHAGLLA. DEPARTAMENTO DE HUÁNUCO*. Disponible en: <https://1library.co/document/zpvn9p4y-monitoreo-vibraciones-acusticas-determinacion-aduccion-hidroelectrica-departamento-huanuco.html> (julio 2025).

Pal Roy, P. (2019). Controlled Blasting in Mines & Quarries- A Paradigm. *Current Trends in Civil & Structural Engineering*, 4(3)<https://doi.org/10.33552/ctcse.2019.04.000589> .

Peralta Herrera, G., & Mojica Villamizar, R. D. (s.f.). CARATERISTICAS Y CONTROL DE LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR ACCION DE LAS VOLADURAS EN MINAS A Pinto-Morales, L. H., & Fuentes-Fuentes, M. (2021). Efecto de las voladuras sobre el comportamiento estructural de viviendas cercanas a sitios de explotación minera en Colombia. *Minería y Geología*, 37(1), 58-73. Obtenido de POR VOLADURAS A CIELO ABIERTO. Pontificia Universidad Católica del Perú. ANÁLISIS SISMICO Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES SÍSMICAS PROCEDENTE DEL CIERRE Shearer, P. M. (2019). Introduction to Seismology. In *Introduction to Seismology* <https://doi.org/10.1017/9781316877111> .

SIAC. (2007). *Sistema de Información Ambiental para Colombia, SIAC*. SIAC.

Tarazona, D. (n.d.). *Minería ilegal en Colombia: un mes de paralizaciones complica las acciones de control del gobierno*.

TECNICO DE LAS MINAS TEOFILLO 1, FERNEY, JUAN GETIAL Y EL PAISA EN EL PARQUE NACIONAL NATURAL LOS FARALLONES DE CALI.

Tyupin, V. N. (2023). Delay intervals for quality fragmentation of jointed rock mass by blasting in open pit mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 12 Underground Space Technology, 84, 91-103 <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.10.002>.

Vásquez Sánchez, N. Y. (2013). PREDICION DE LA LEY DE ATENUACIÓN, FRECUENCIA DOMINANTE Y ESPECTRO DE RESPUESTA EN VIBRACIONES PRODUCIDAS

Wang, L. he, Cao, A. ye, Dou, L. ming, Guo, W. hao, Zhang, Z. yong, Zhi, S., & Zhao, Y. xin.

World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region. WHO Regional Office for Europe <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/publications/2018/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region>

Yale Environment 360. (n.d.). *A Vast South American Wilderness Is Under Siege From Illegal*

Mining.

Zapata Porras, J. M. (2012). Análisis de las vibraciones generadas por voladuras para la adecuada selección de explosivos en explotaciones mineras subterráneas

Zhao, Z., Zhang, R., & Li, H. (2018). Real-time monitoring and analysis of blast vibrations in urban construction. *Construction and Building Materials*, 188, 383-395.<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.145>

CAPITULO IX- ANEXOS

9.1. Anexo A- Caracterización y resultados de voladuras

9.1.1. Voladura Perea y Cia SAS 20-03-2025

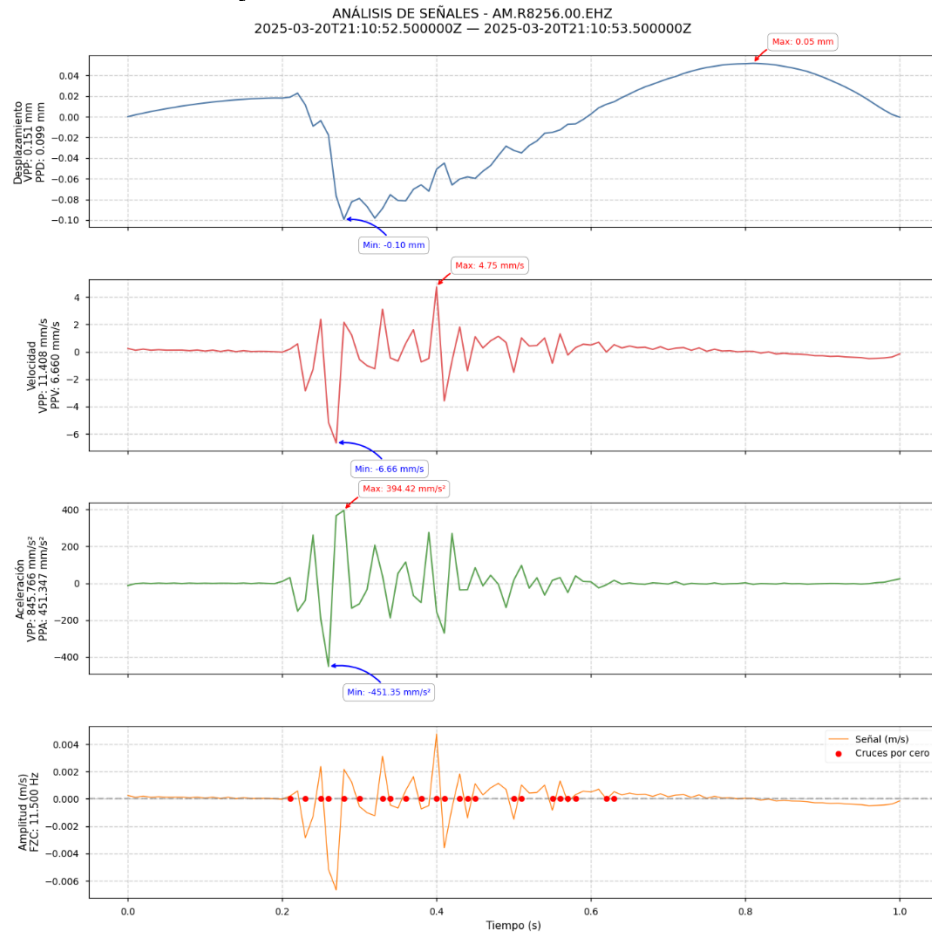


Figura anexo A 1. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

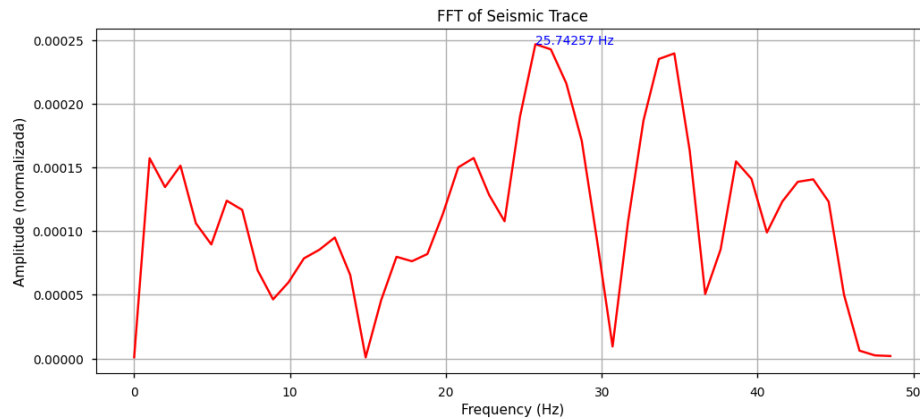


Figura anexo A 2. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

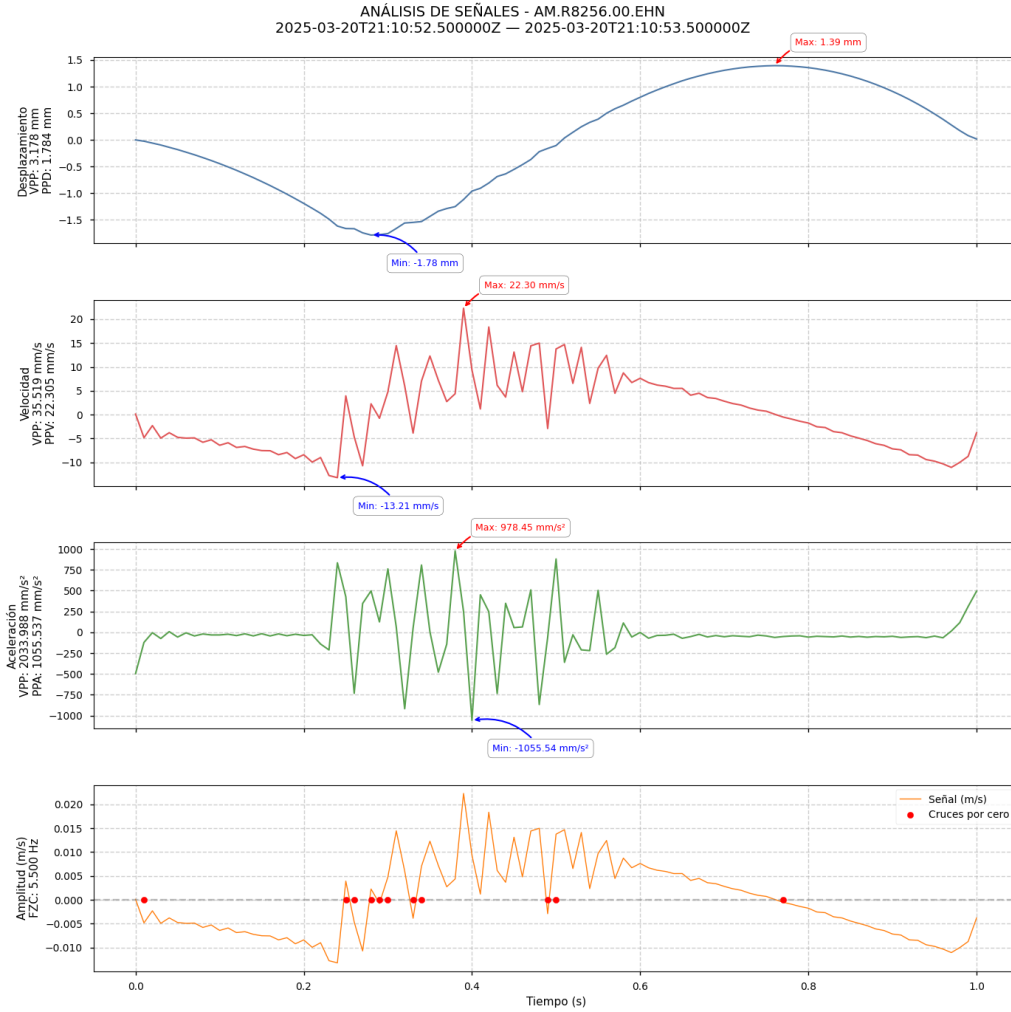


Figura anexo A 3. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

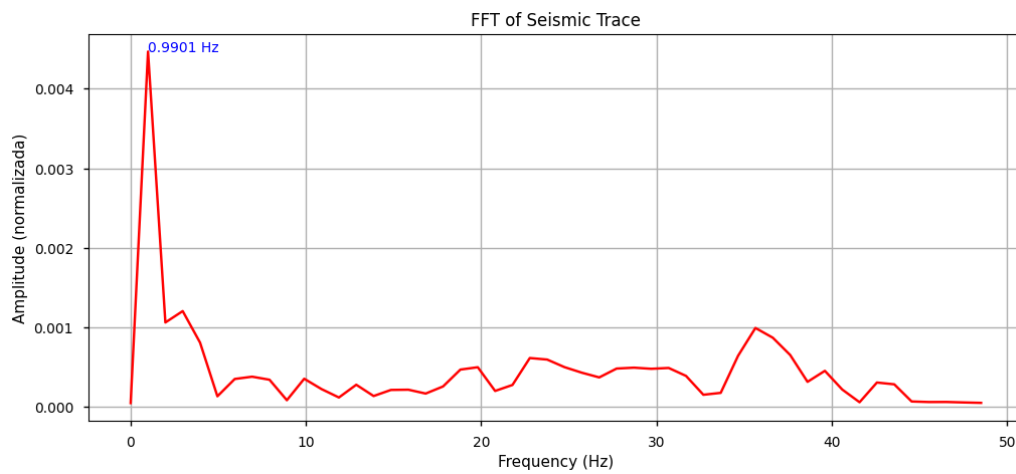


Figura anexo A 4. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

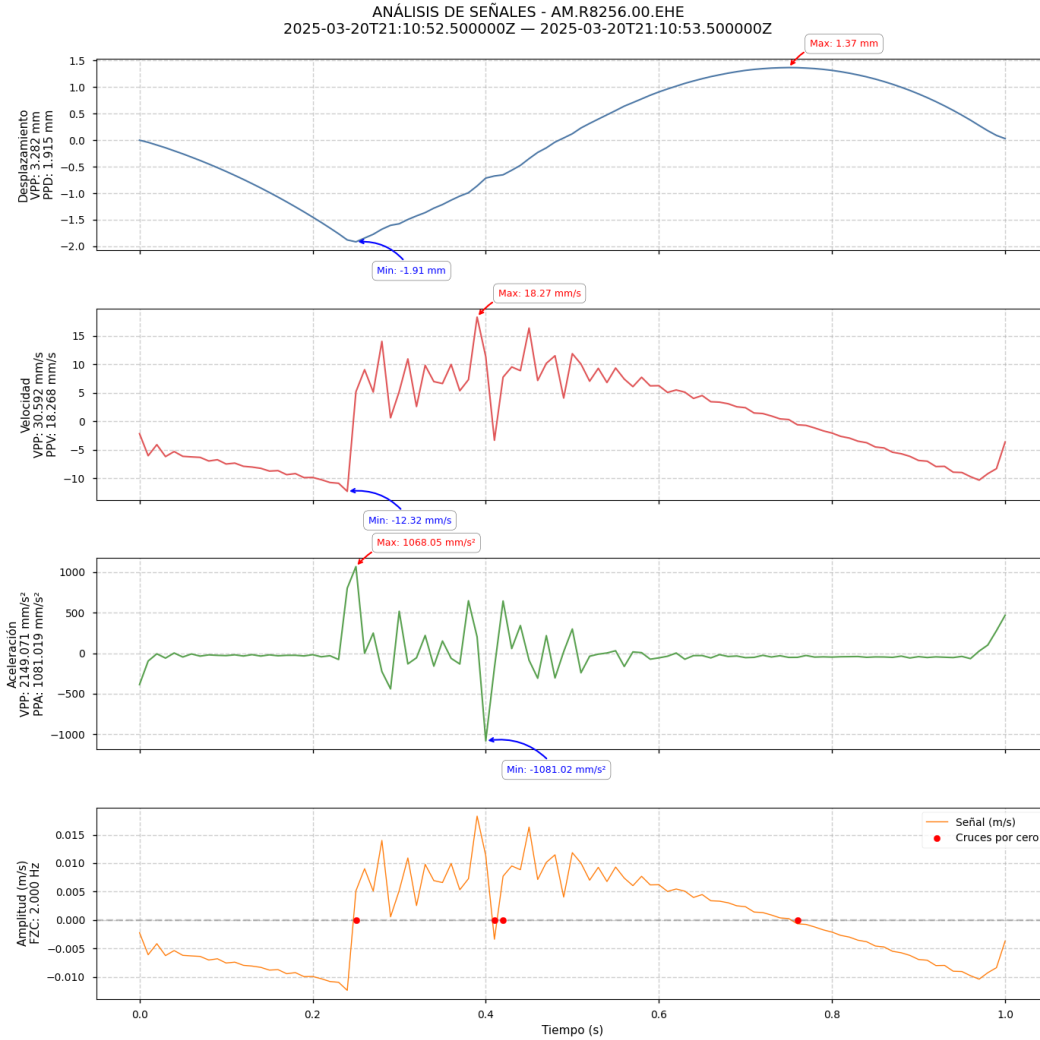


Figura anexo A 5. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

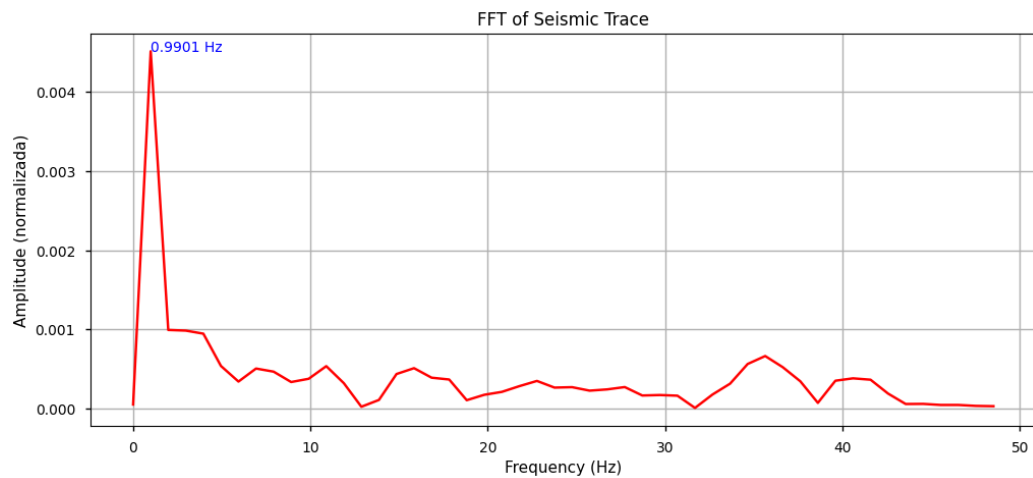


Figura anexo A 6. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

9.1.2. Voladura Perea y Cia SAS 13-05-2025

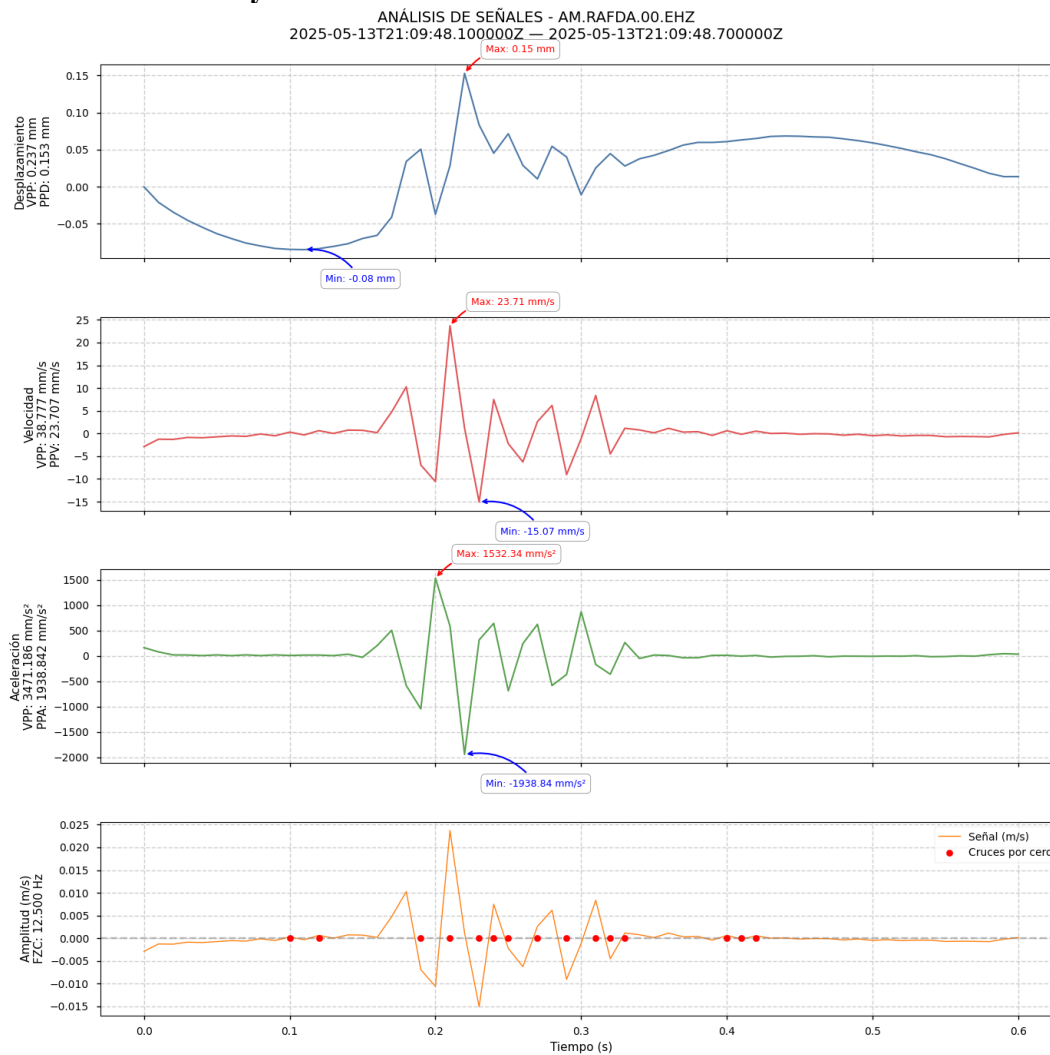


Figura anexo A 7. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

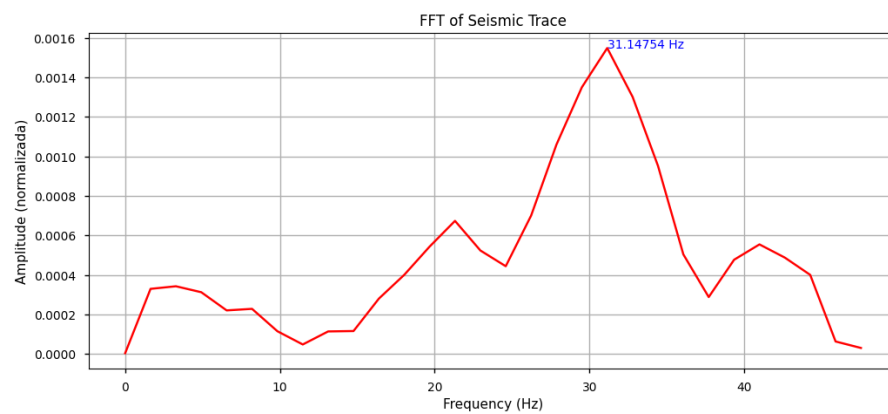


Figura anexo A 8. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

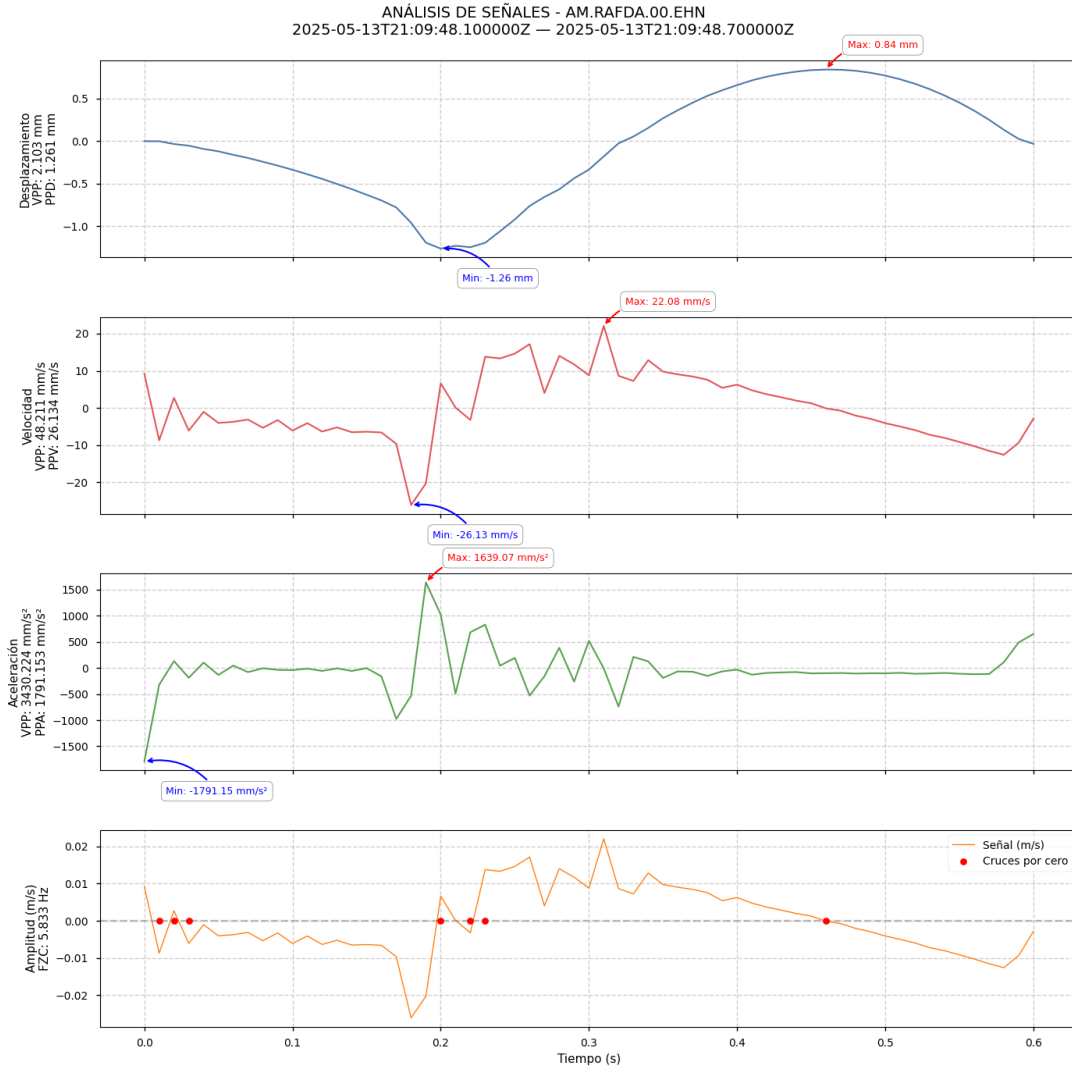


Figura anexo A 9. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

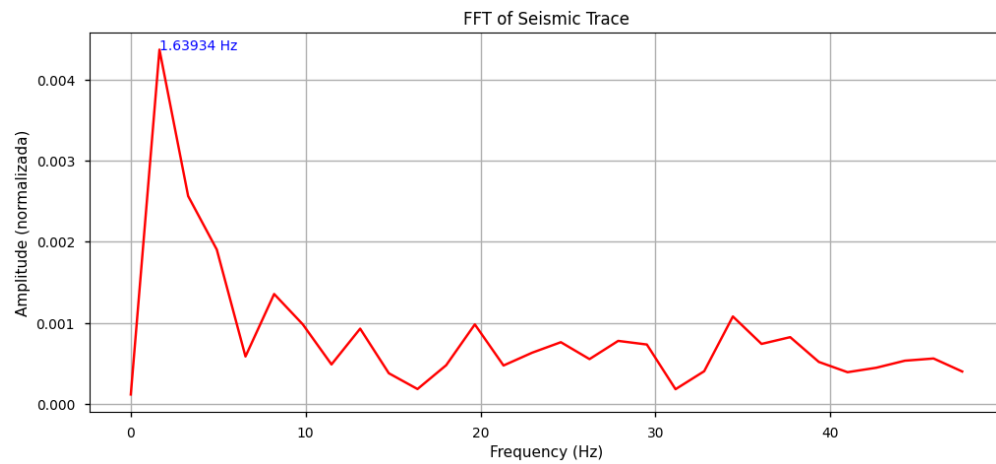


Figura anexo A 10. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

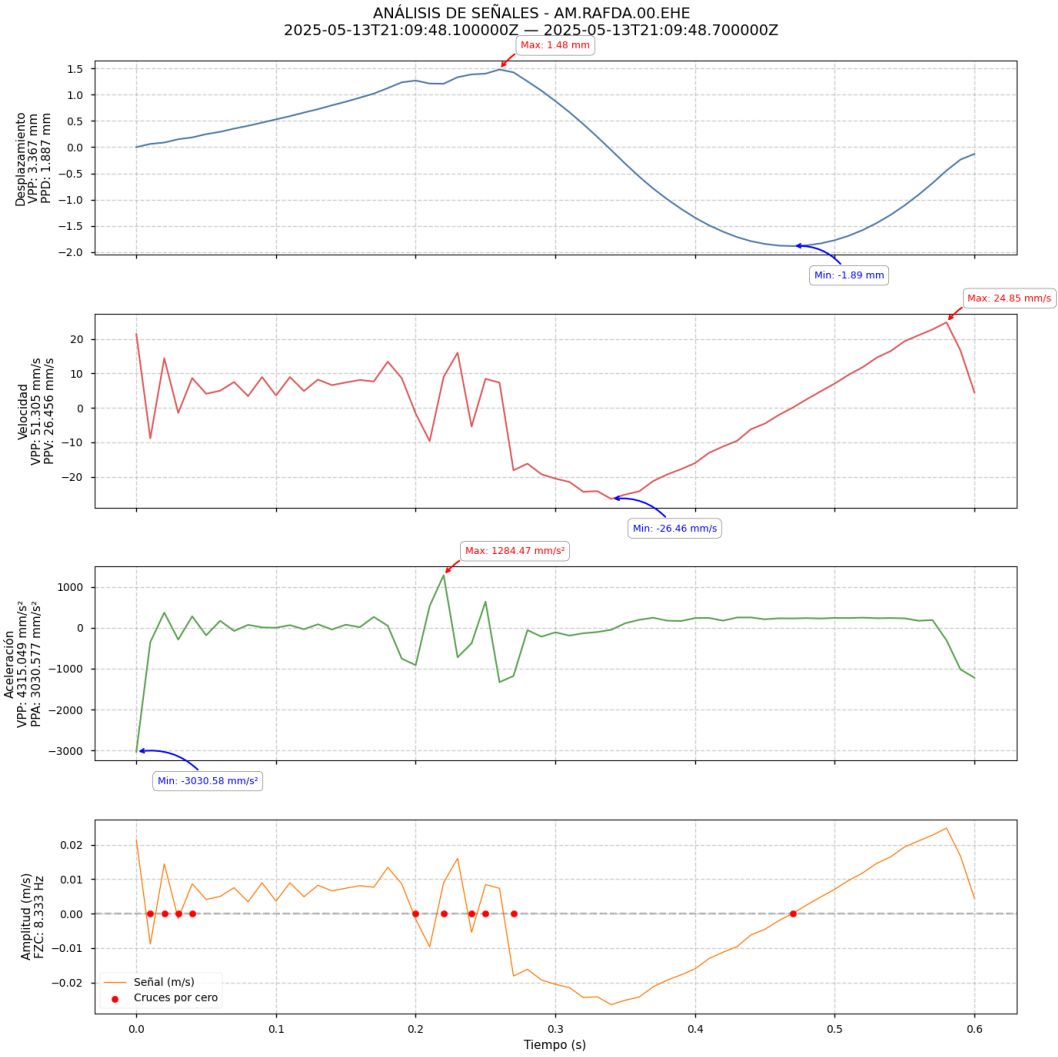


Figura anexo A 11. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

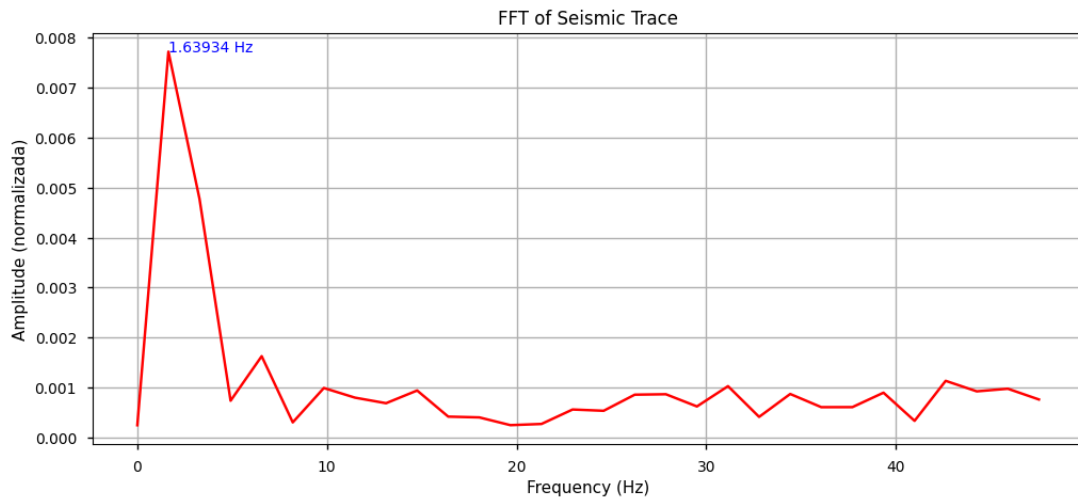


Figura anexo A 12. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

9.1.3. Voladura la roca 24-05-2025

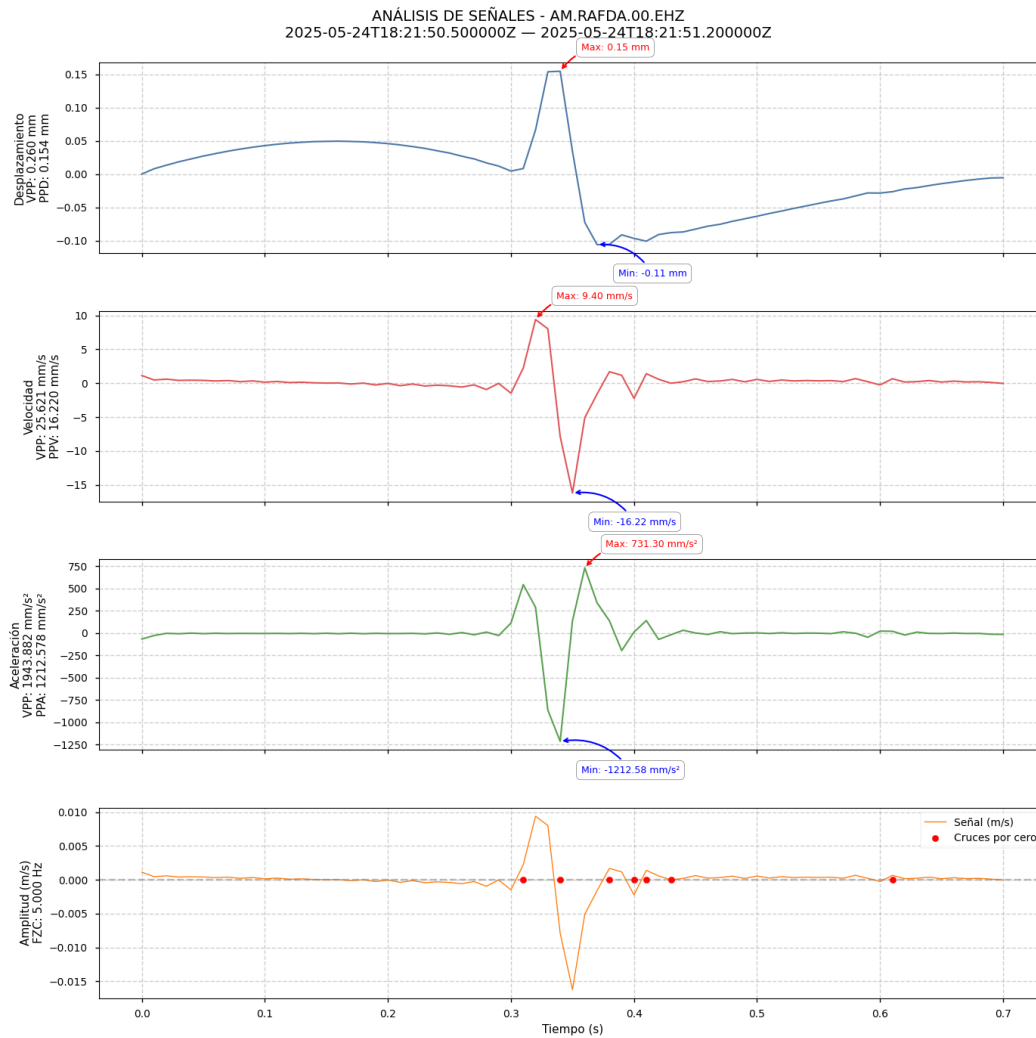


Figura anexo A 13. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

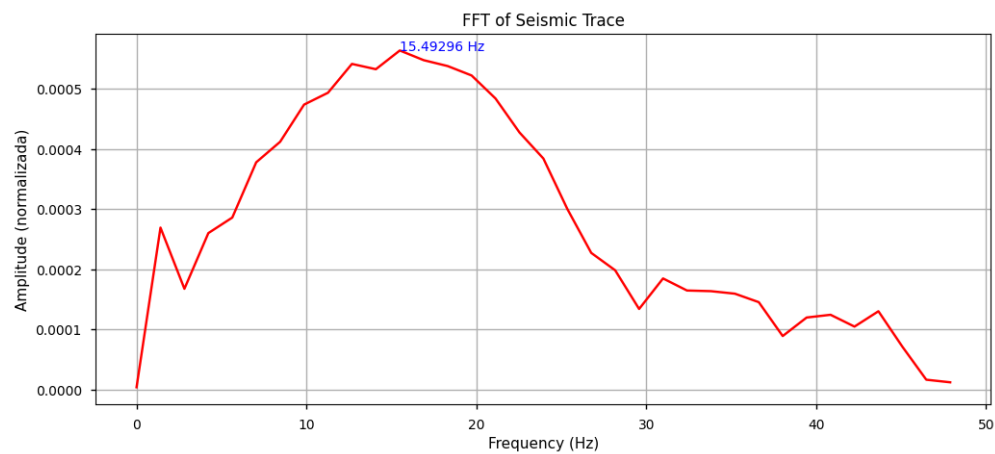


Figura anexo A 14. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

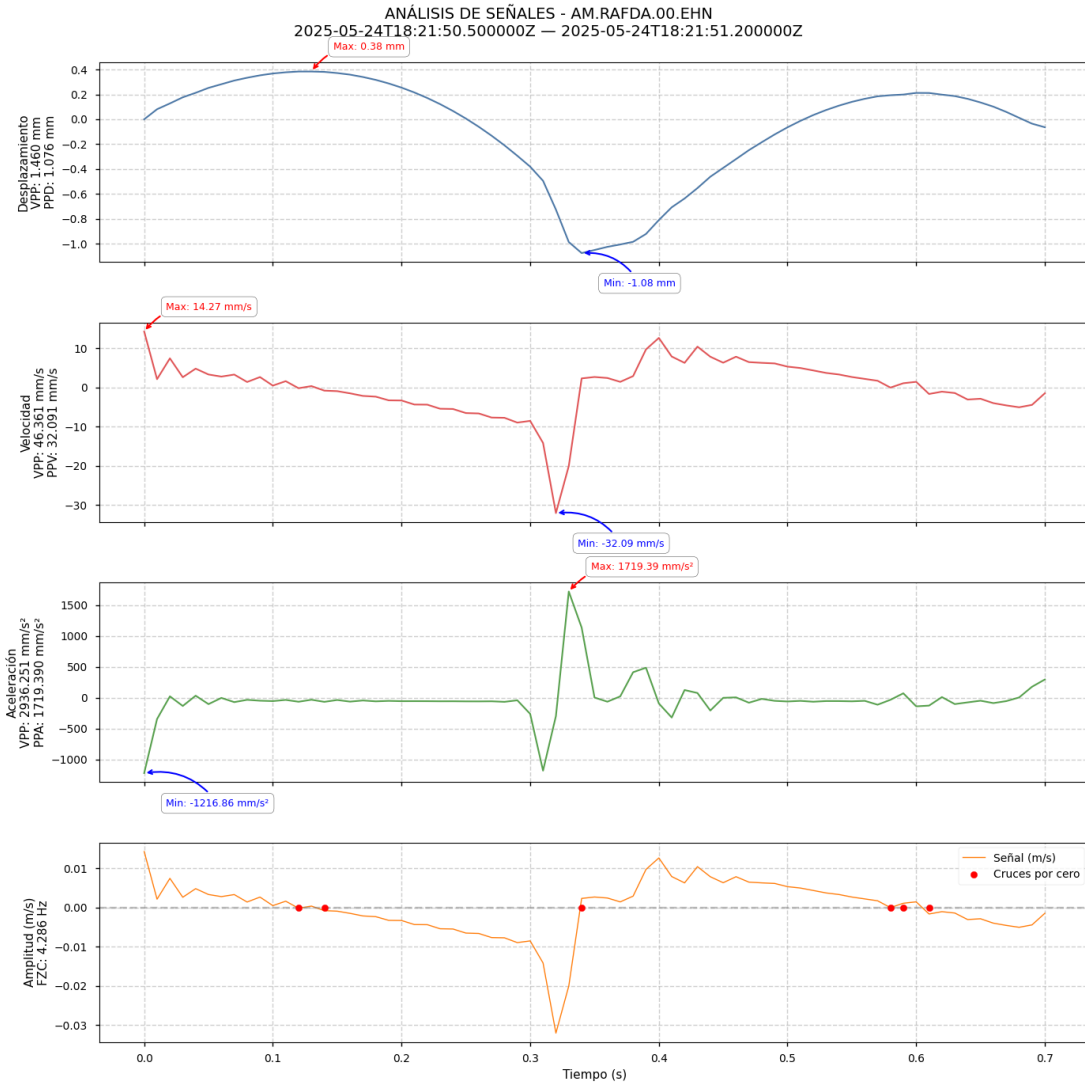


Figura anexo A 15. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

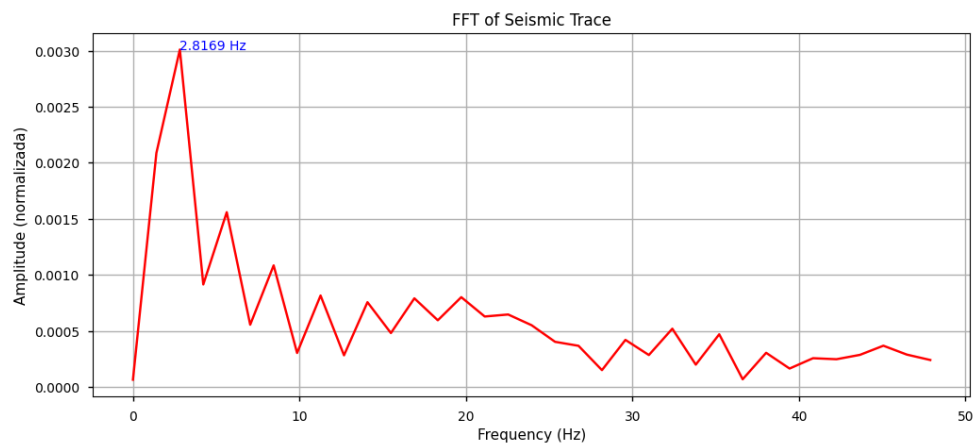


Figura anexo A 16. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

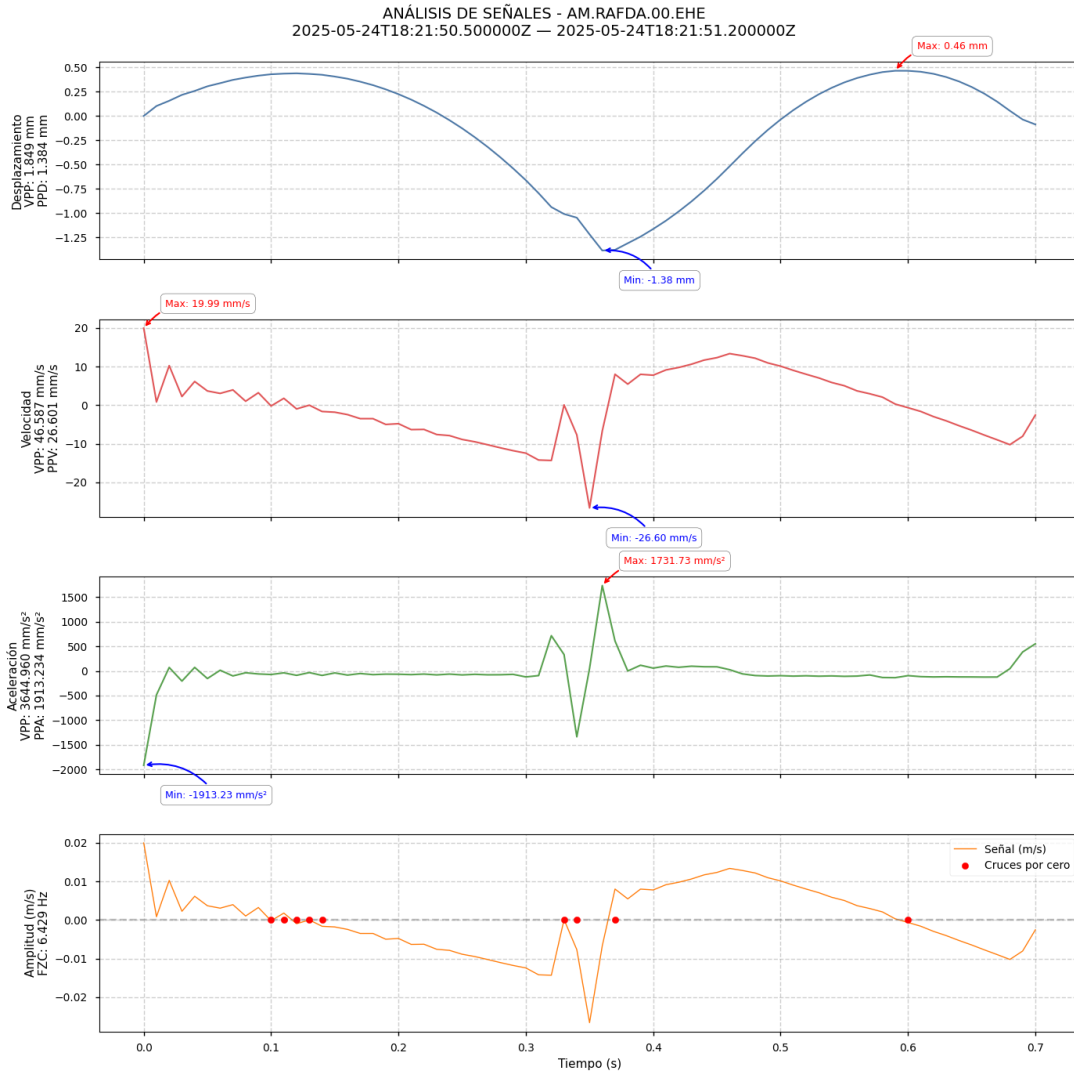


Figura anexo A 17. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

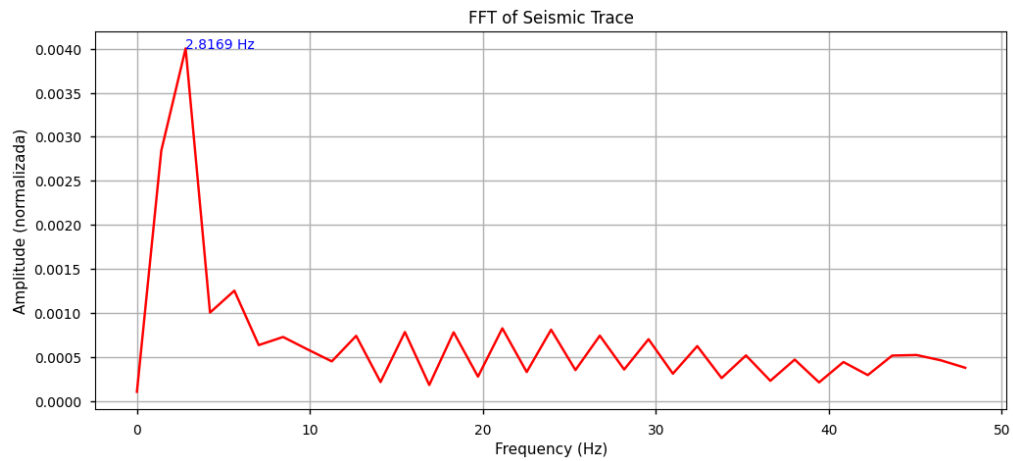


Figura anexo A 18. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

9.1.4. Voladura Cantera MATERIALES Y AGREGADOS EMT SAS 29-05-2025

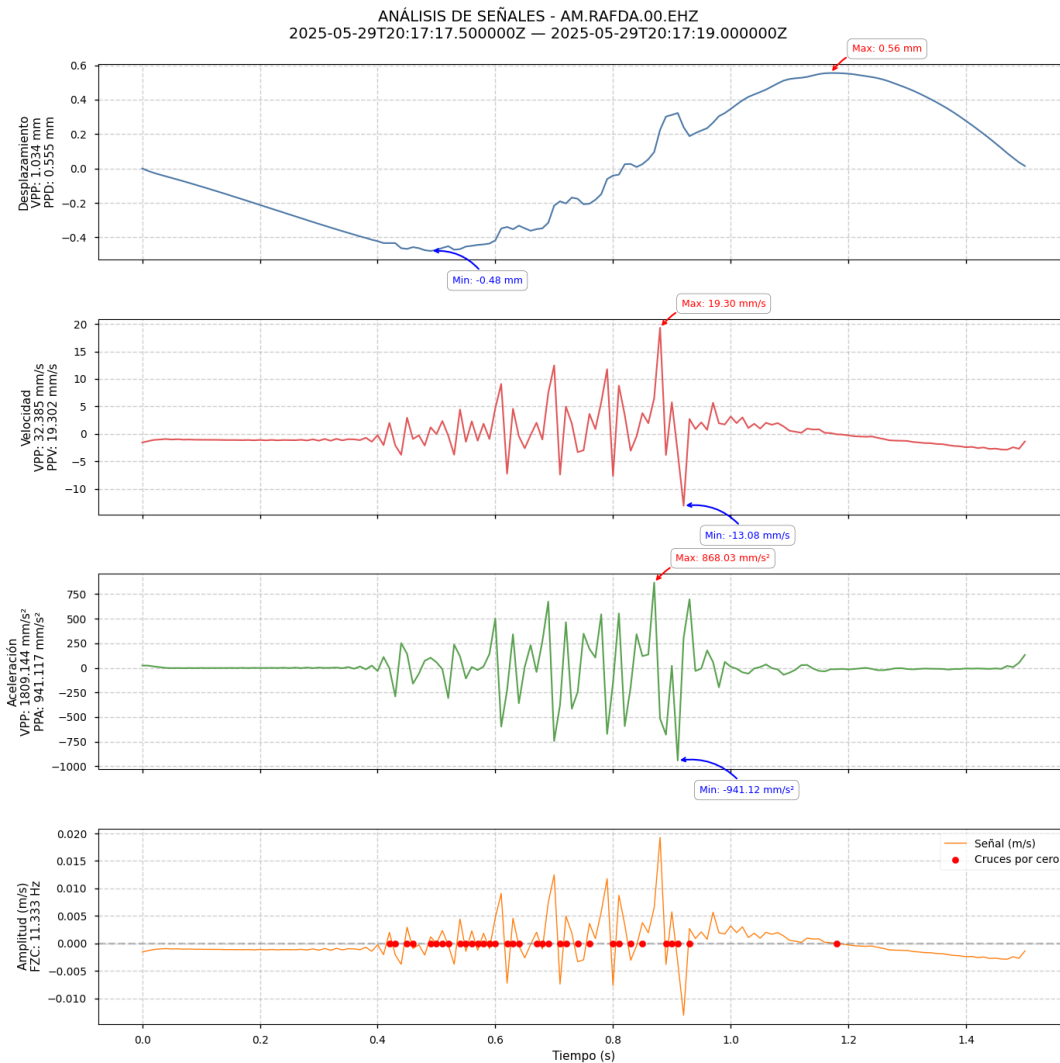


Figura anexo A 19. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

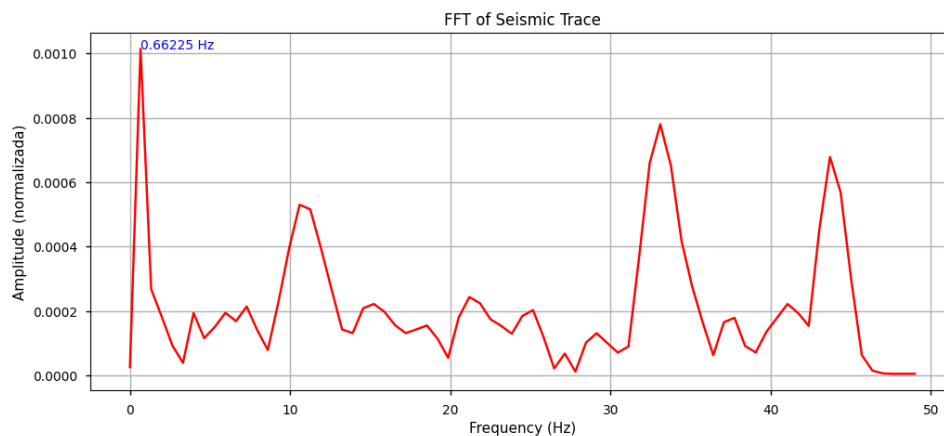


Figura anexo A 20. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

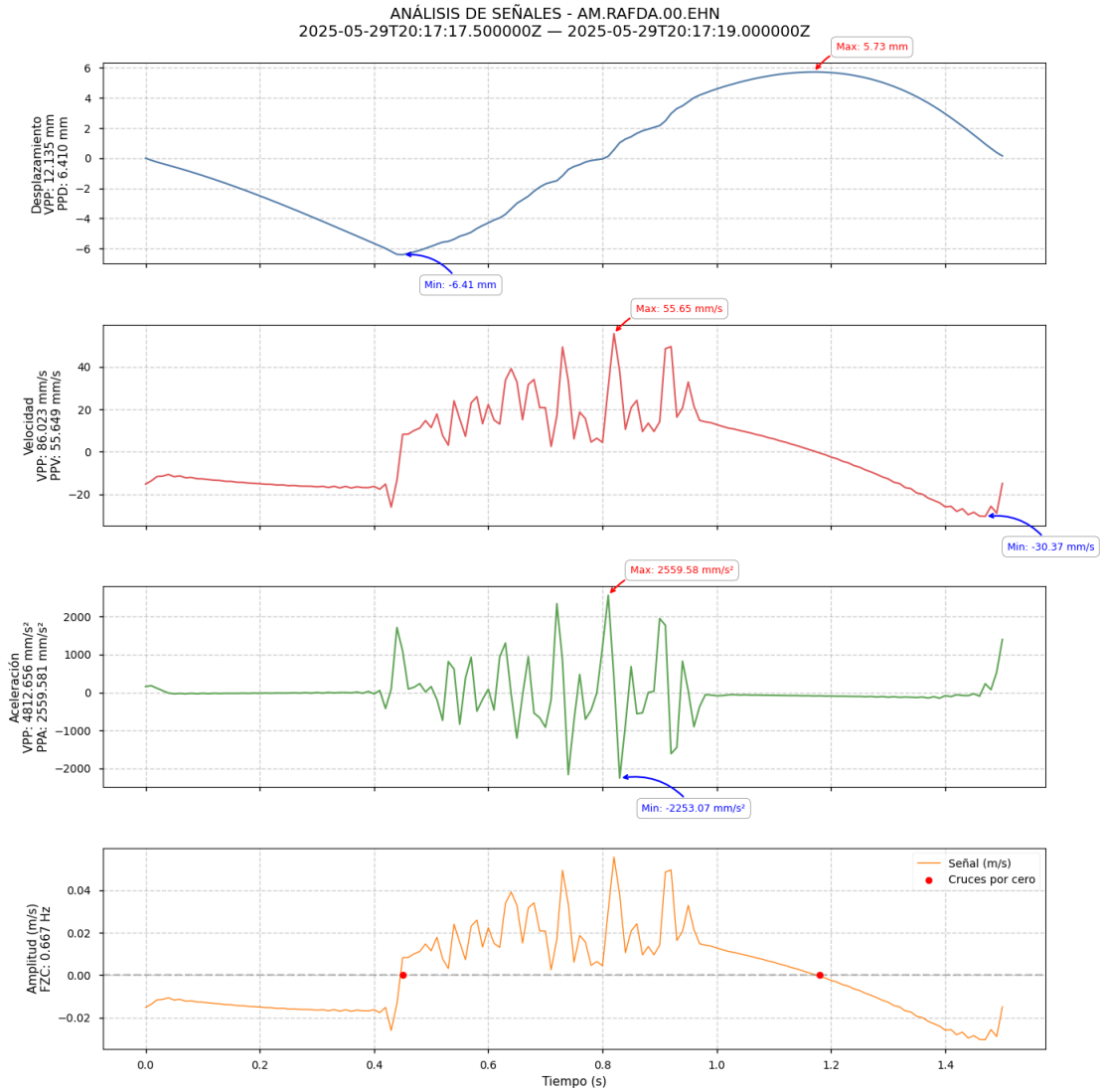


Figura anexo A 21. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

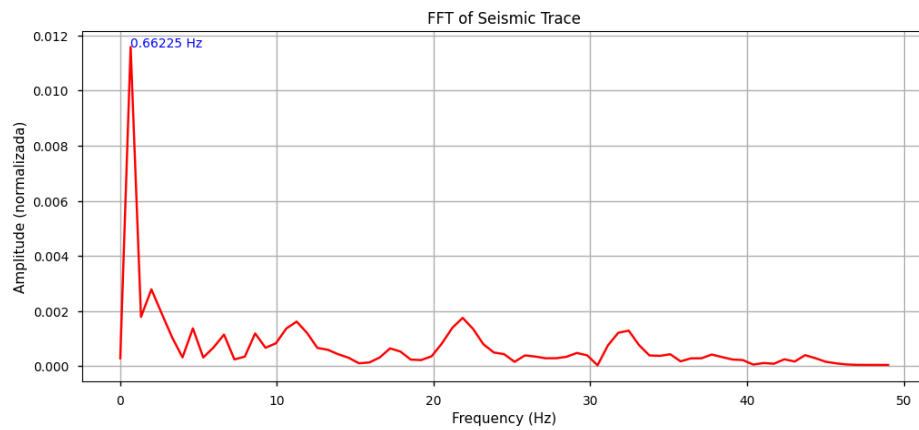


Figura anexo A 22. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

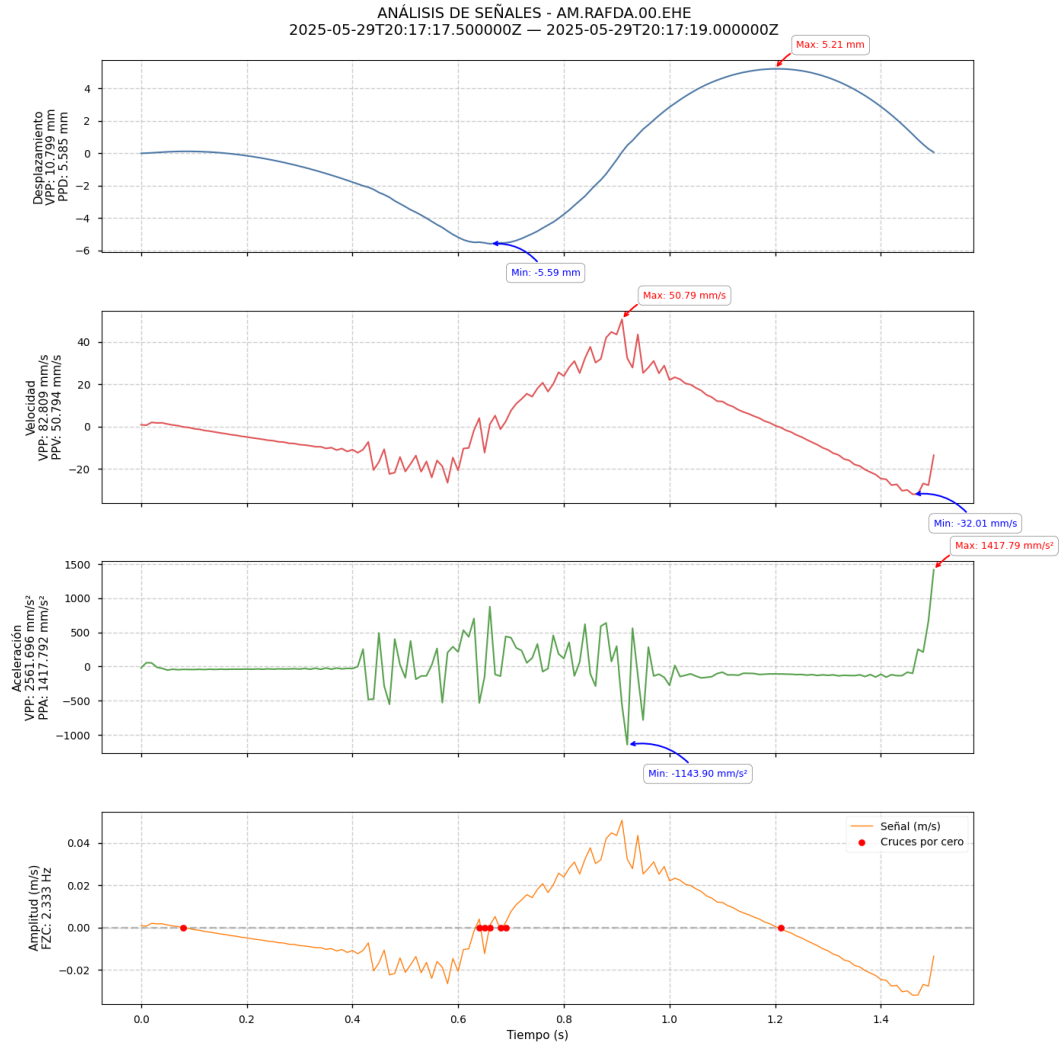


Figura anexo A 23. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

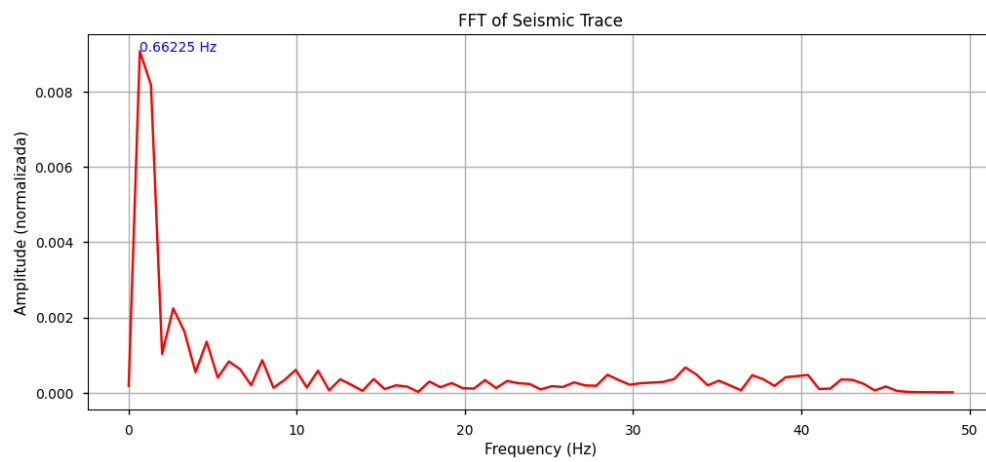


Figura anexo A 24. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

9.1.5. Voladura cantera Perea y Cia SAS 29-0 7-2025

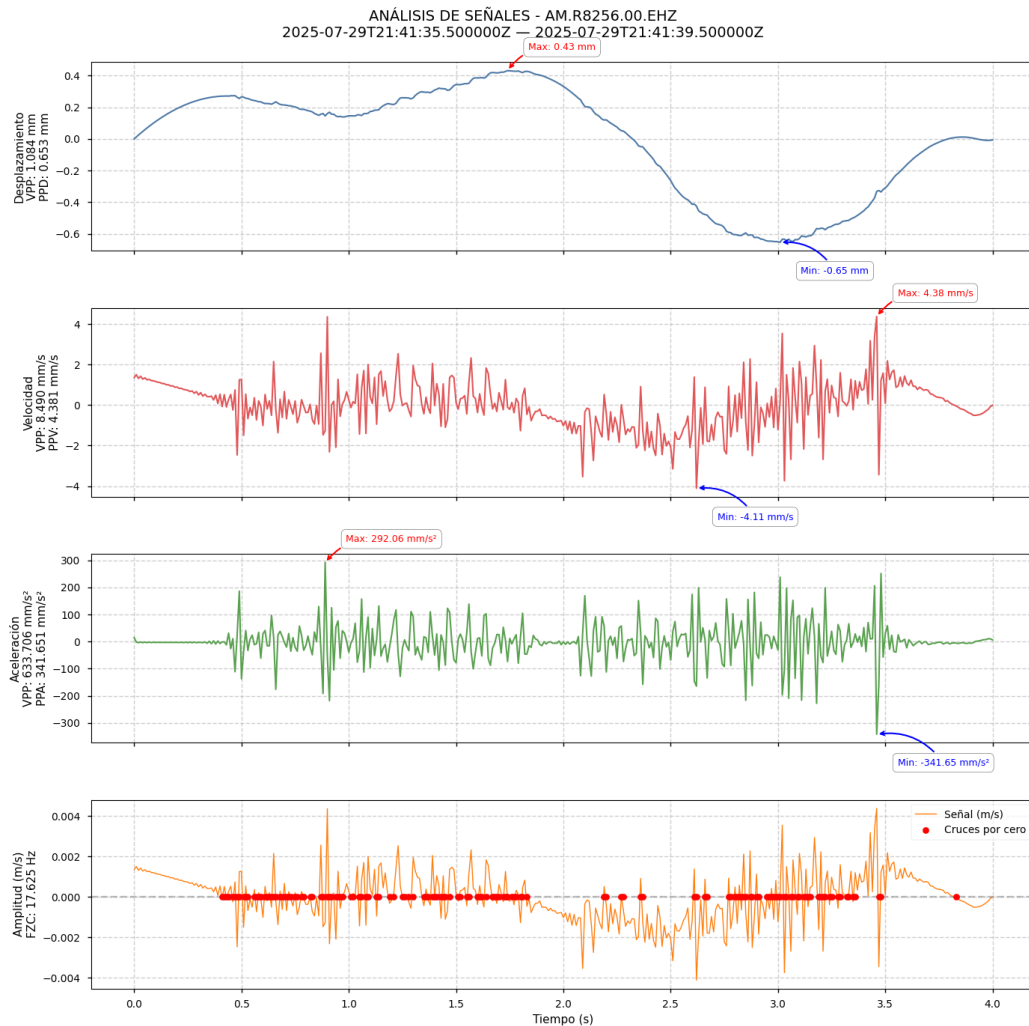


Figura anexo A 25. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

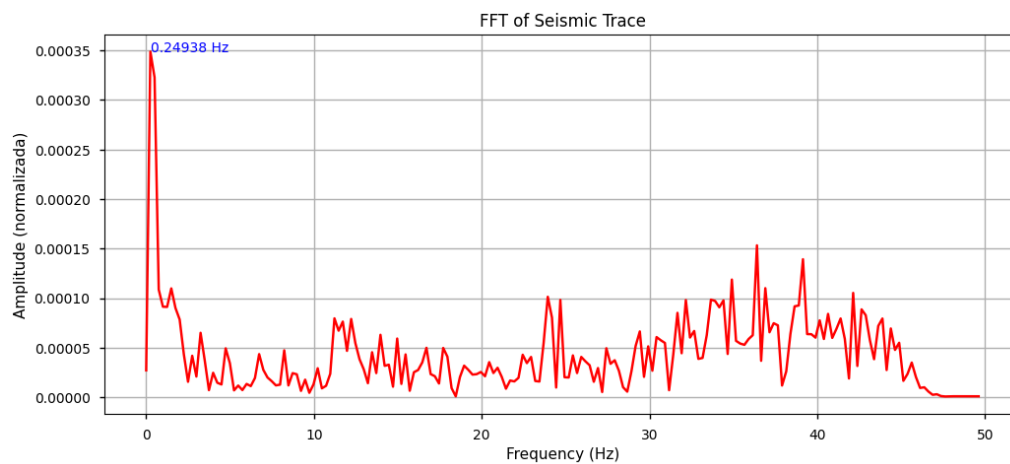


Figura anexo A 26. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

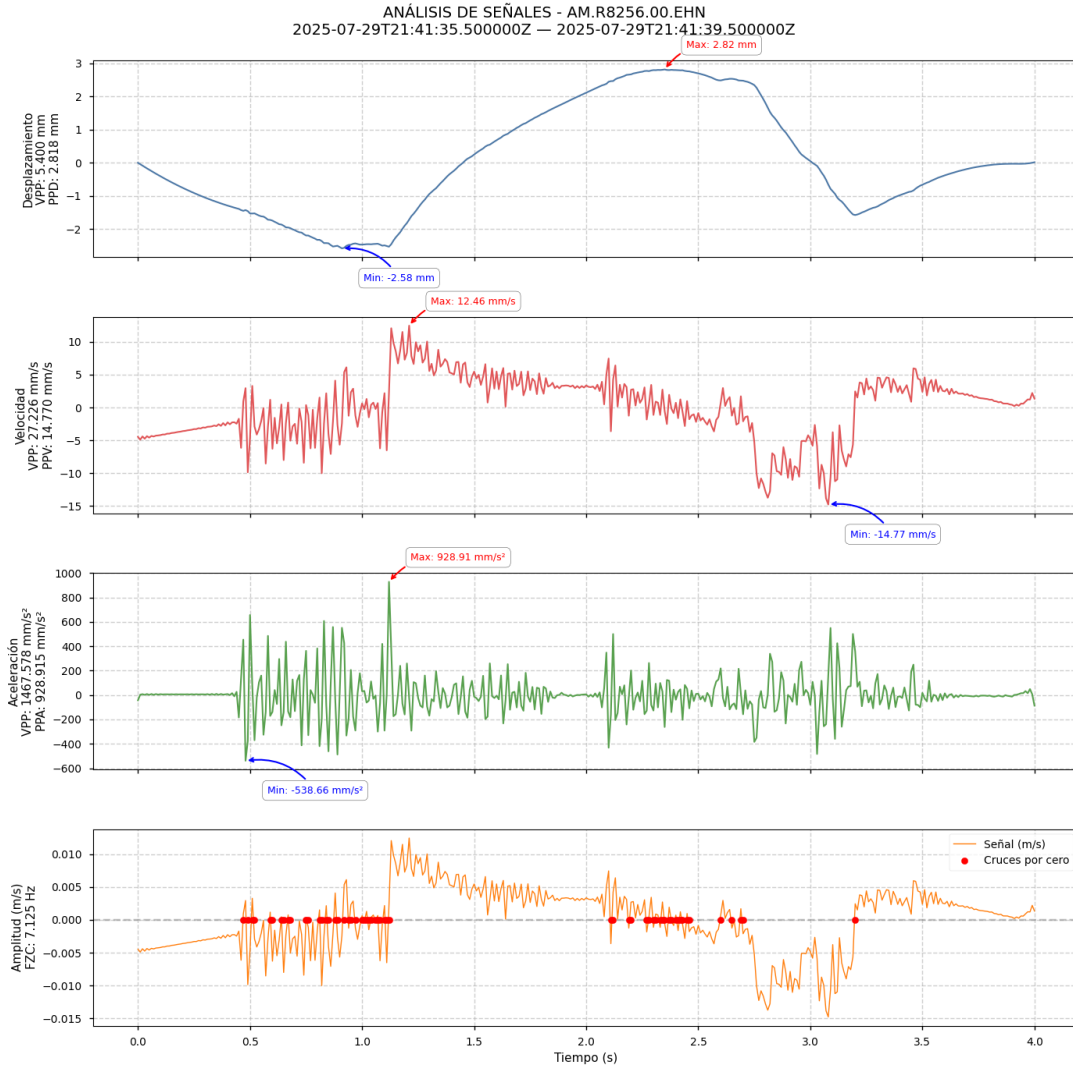


Figura anexo A 27. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

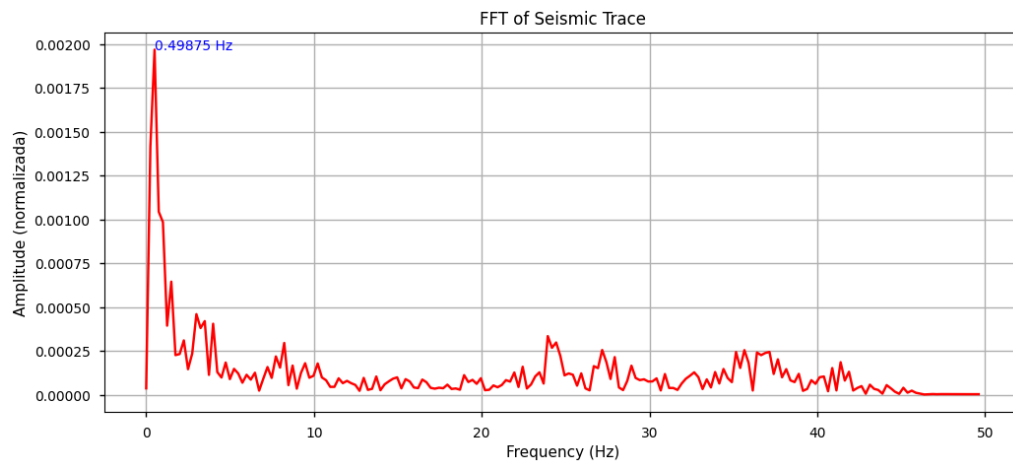


Figura anexo A 28. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

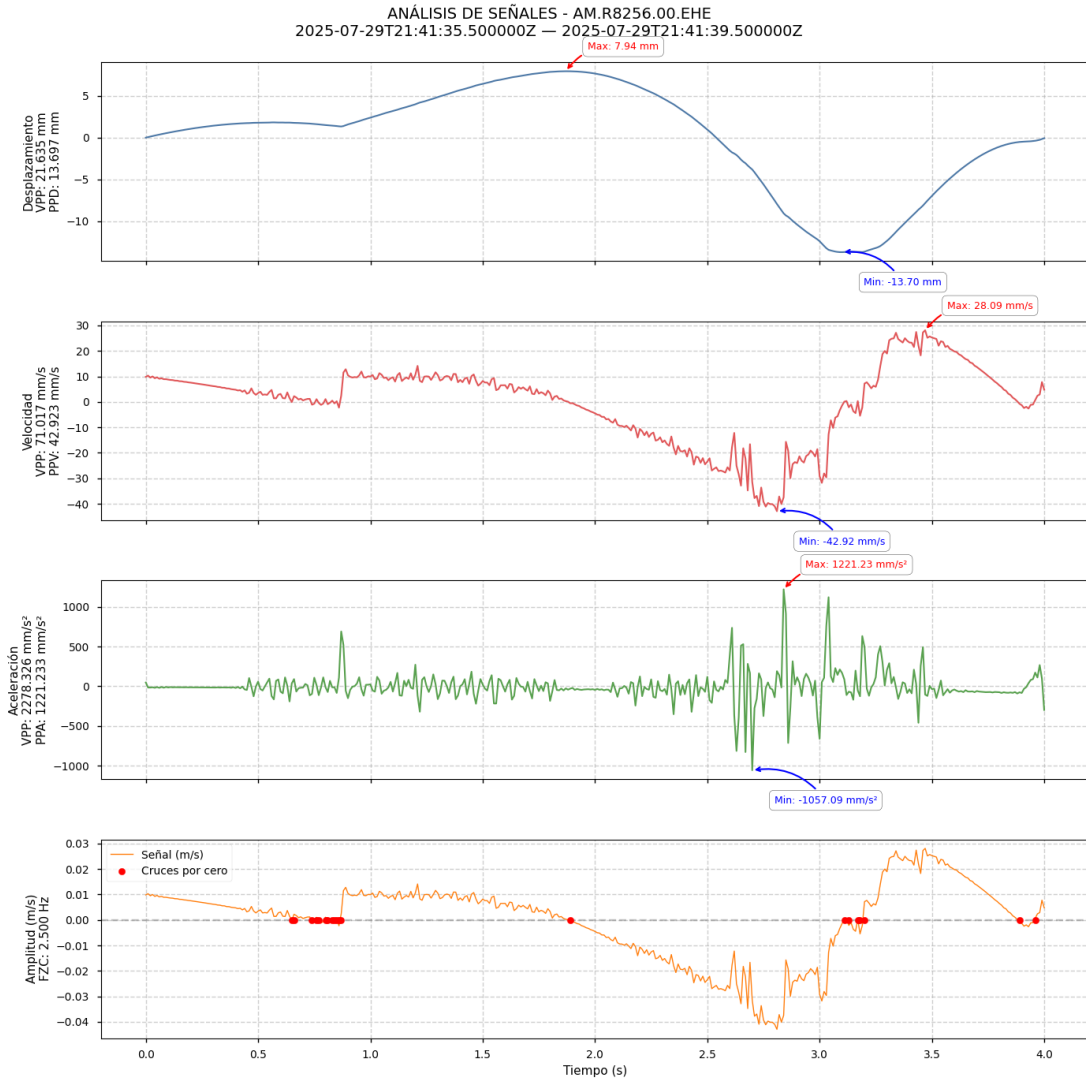


Figura anexo A 29. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

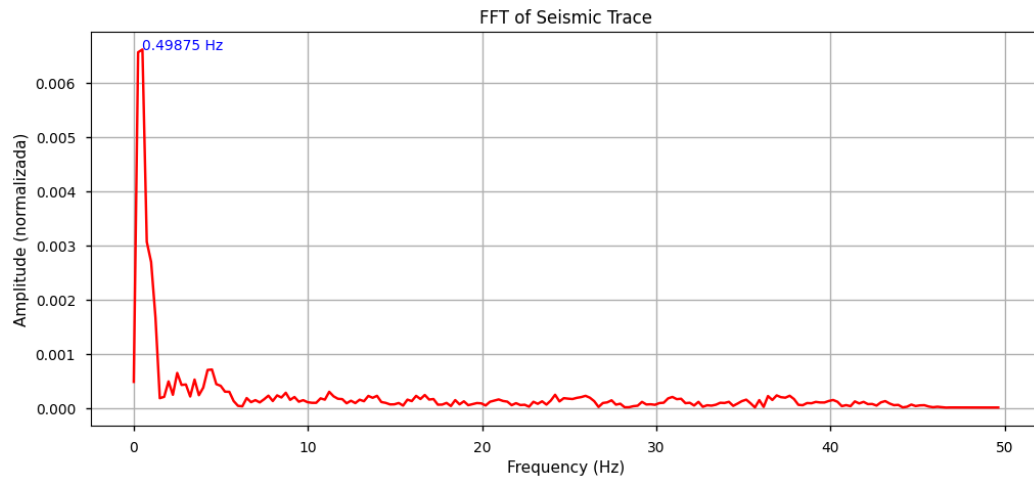


Figura anexo A 30. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

9.1.6. Voladura cantera Perea y Cia SAS 29-07-2025

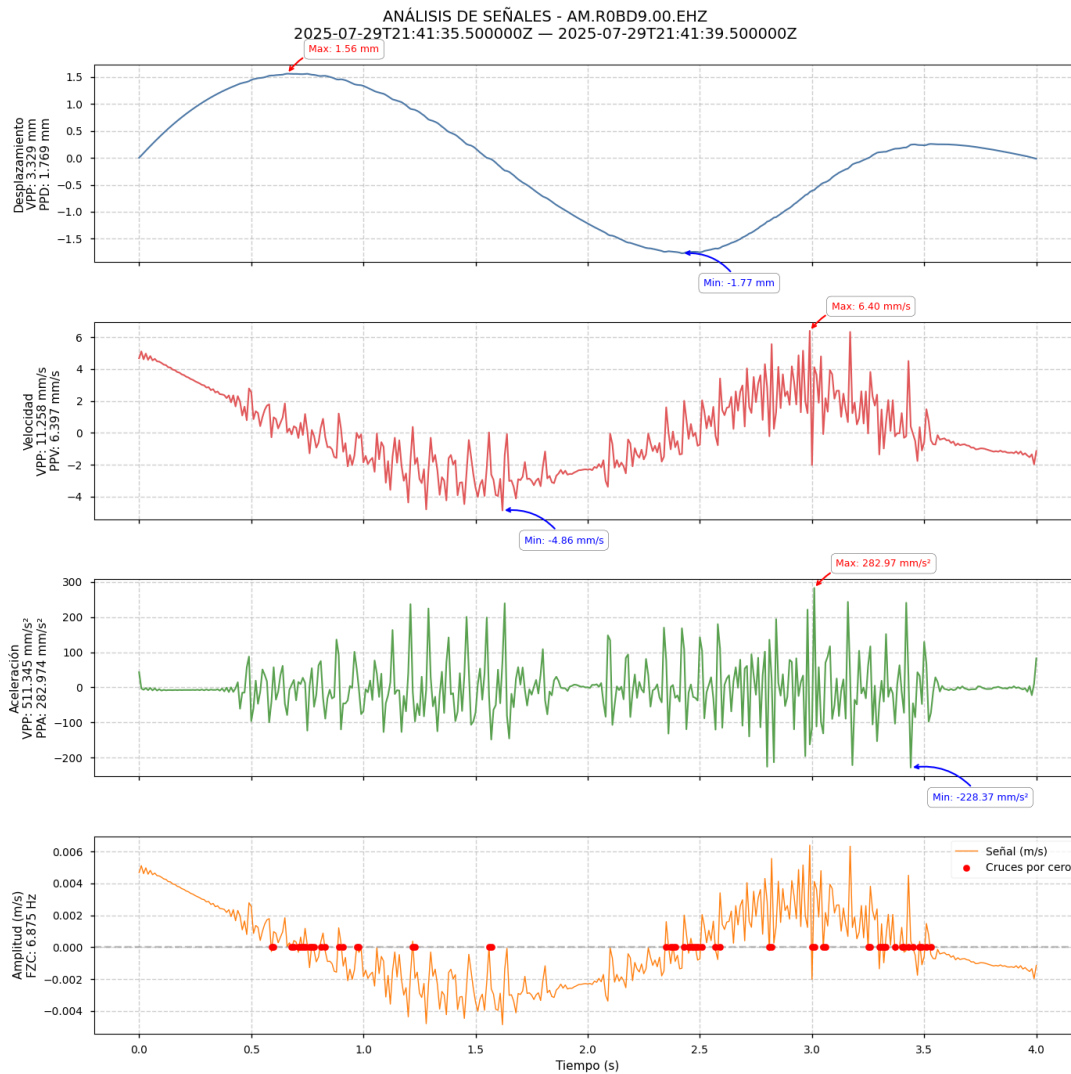


Figura anexo A 31. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

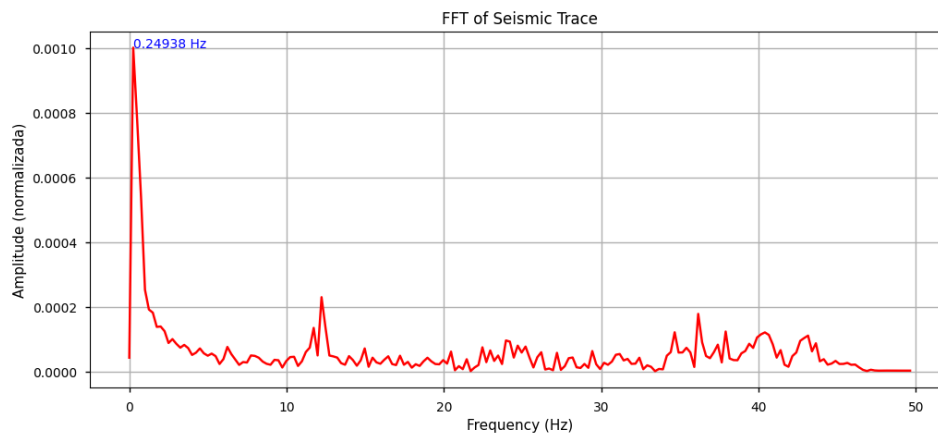


Figura anexo A 32. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

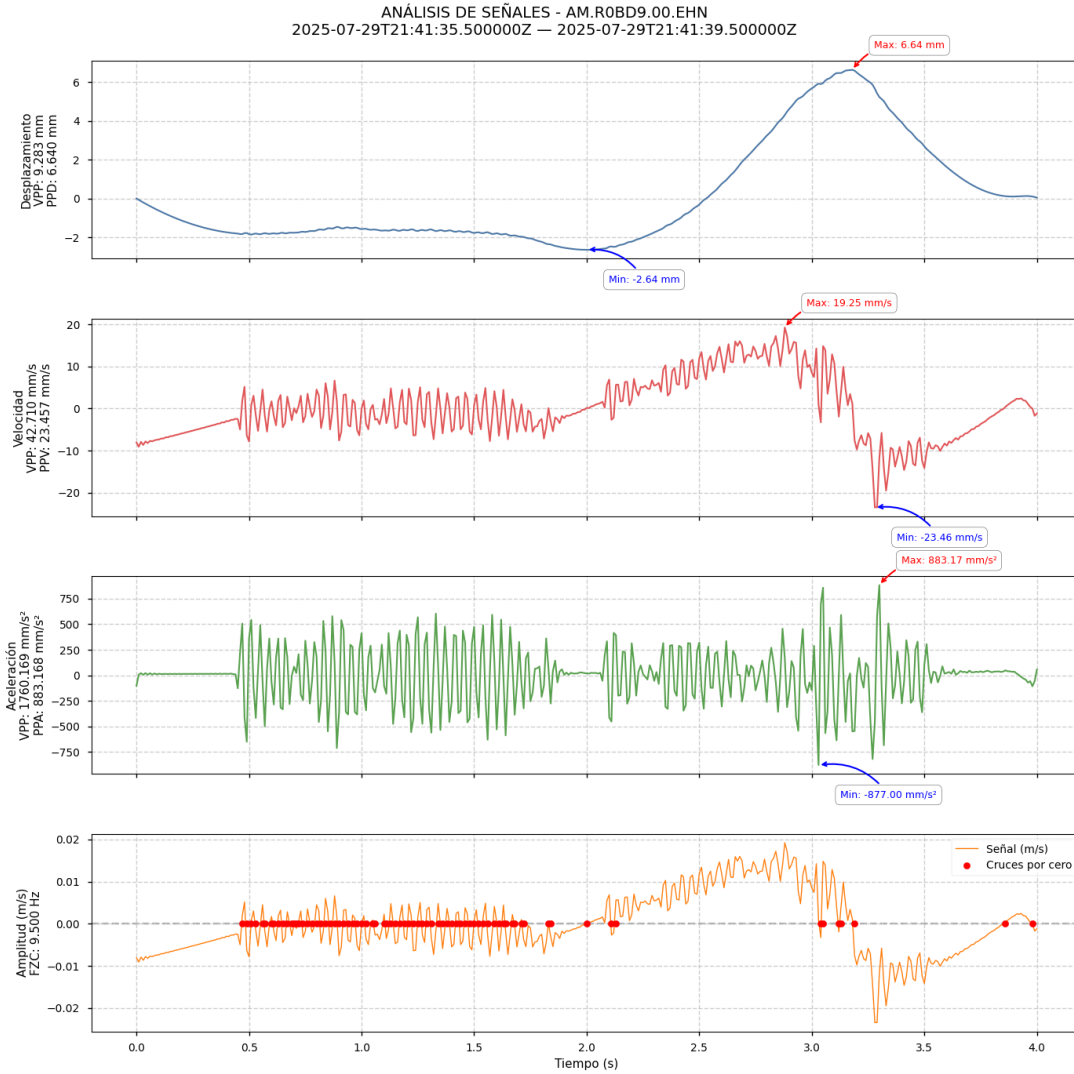


Figura anexo A 33. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

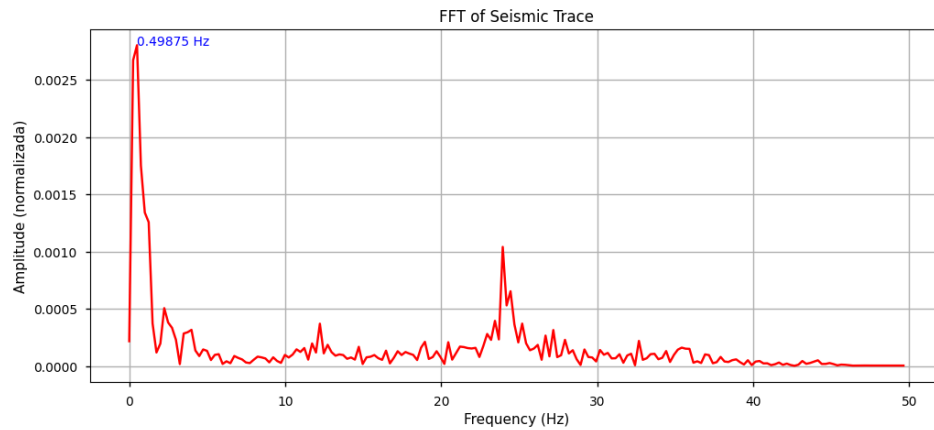


Figura anexo A 34. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

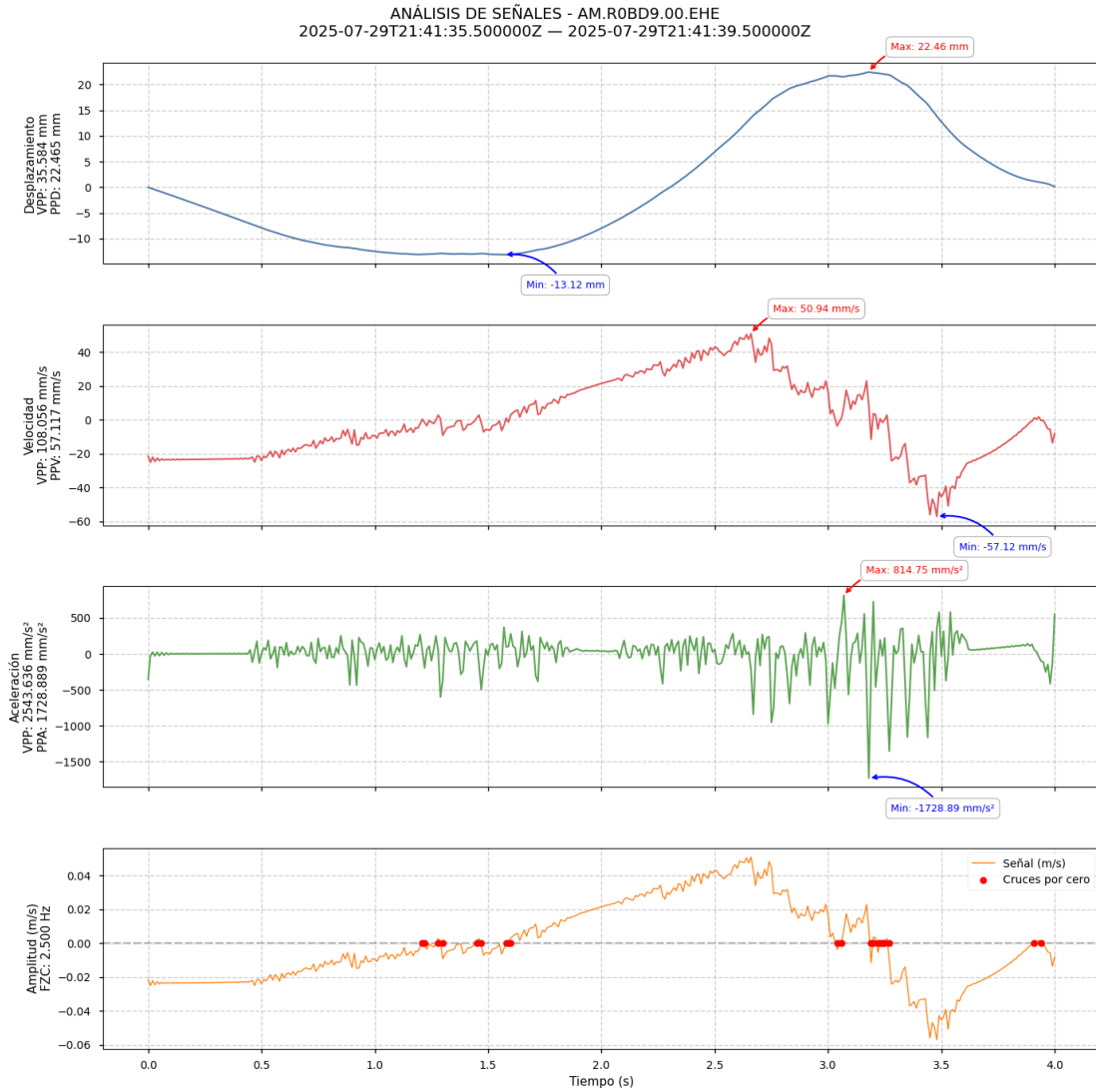


Figura anexo A 35. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

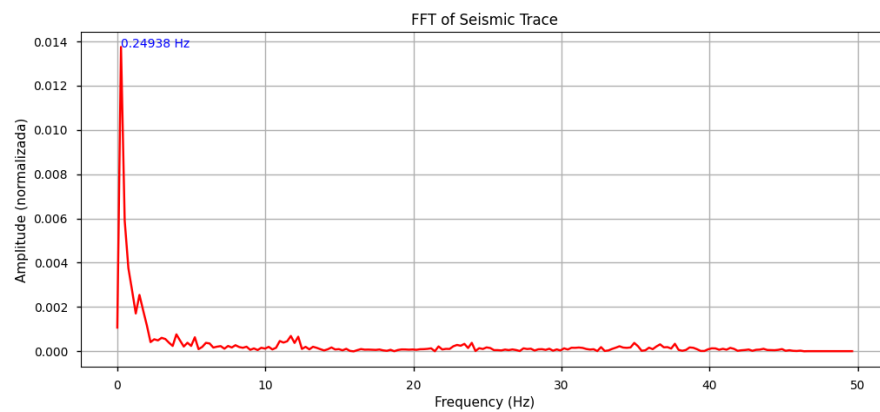


Figura anexo A 36. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

9.1.7. Voladura cantera Perea y Cia SAS 30-07-2025

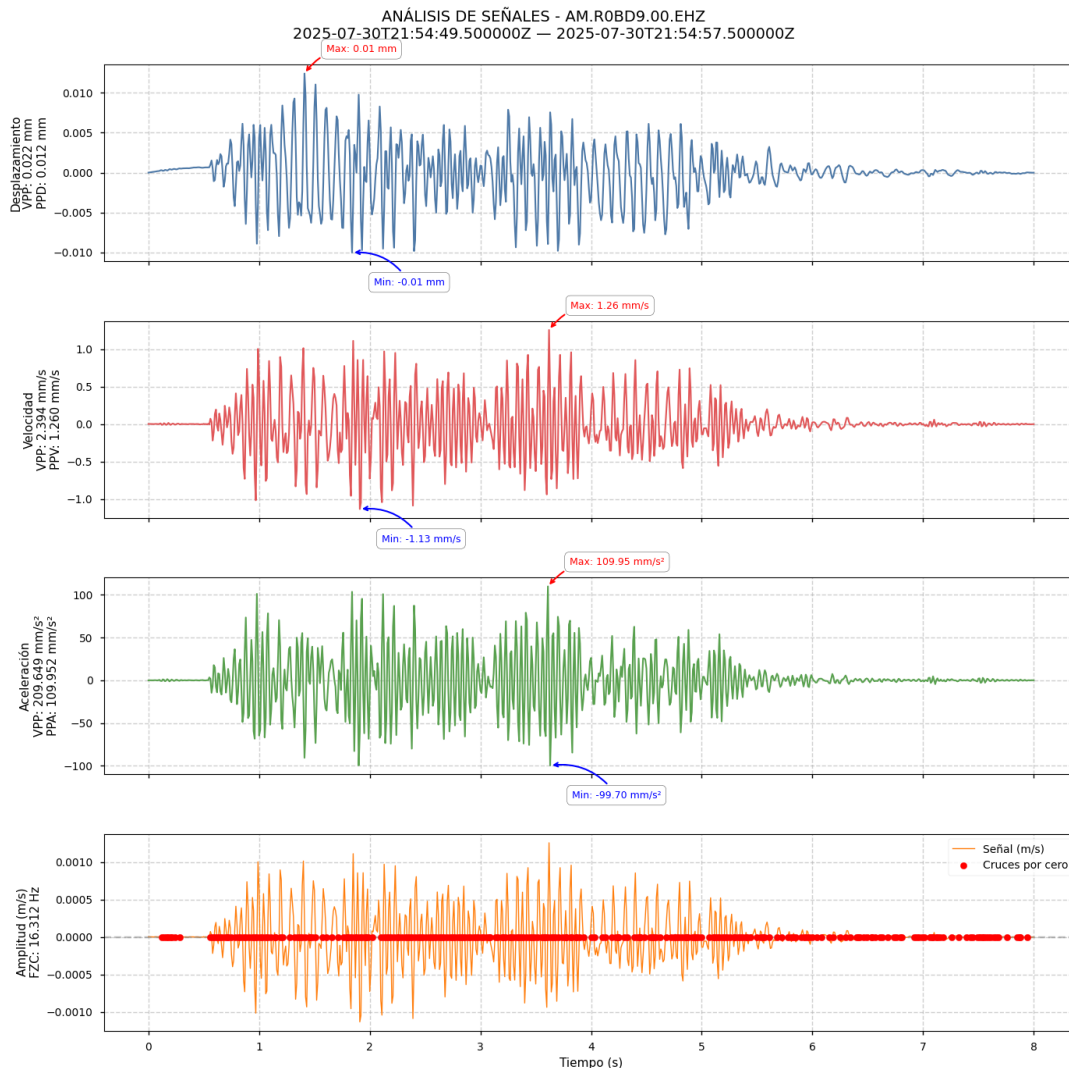


Figura anexo A 37. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

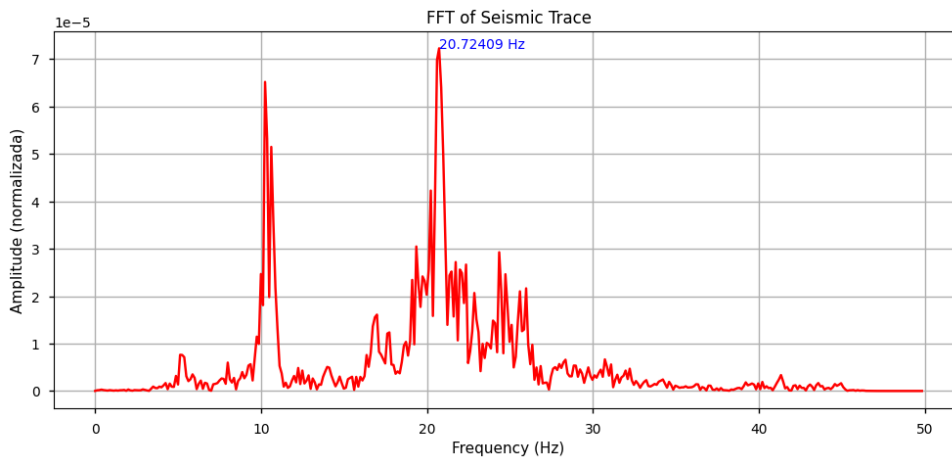


Figura anexo A 38. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

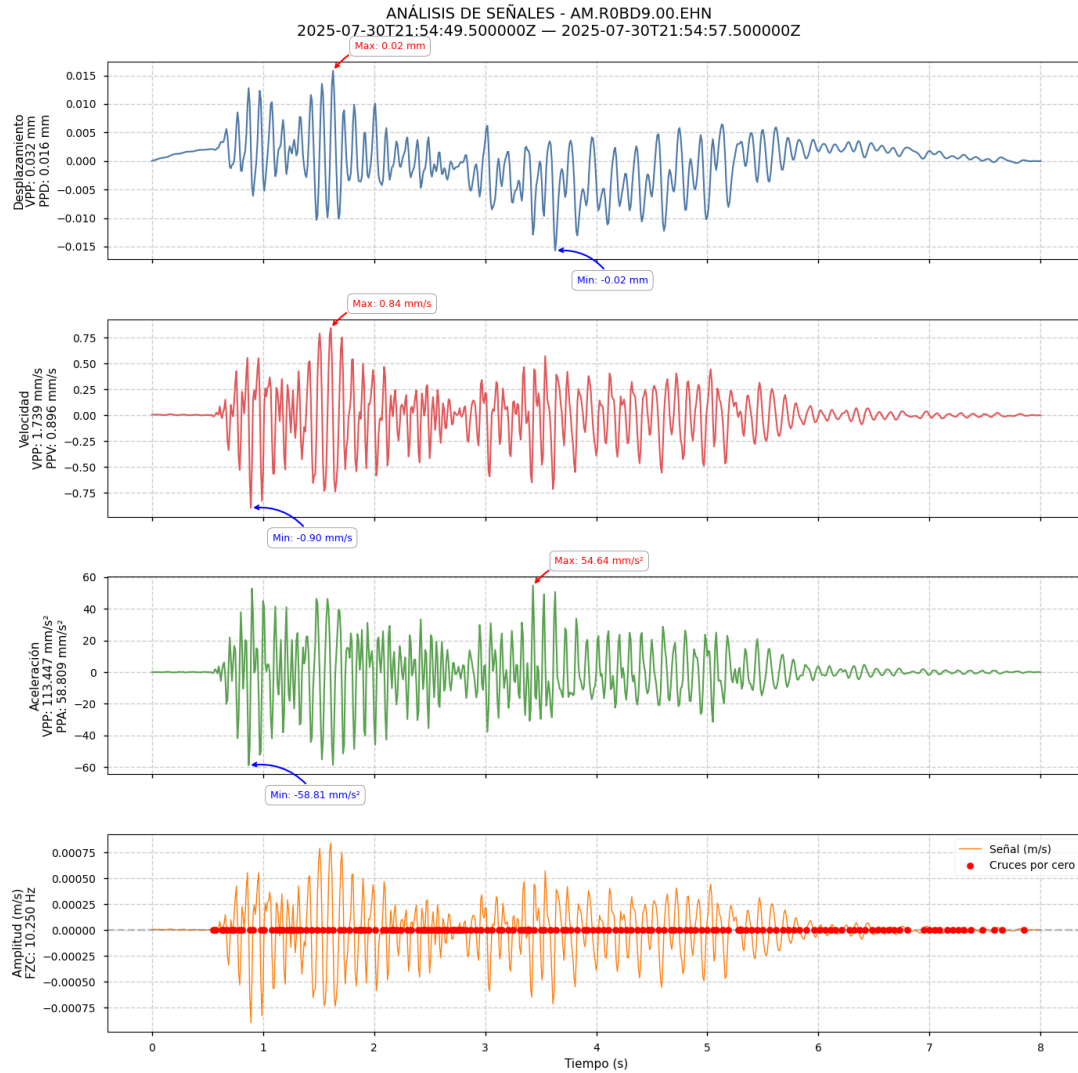


Figura anexo A 39. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

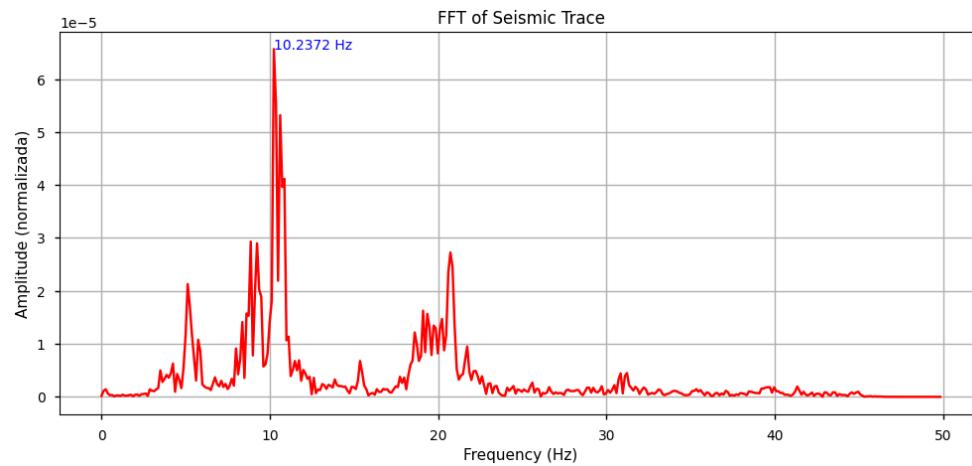


Figura anexo A 40. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

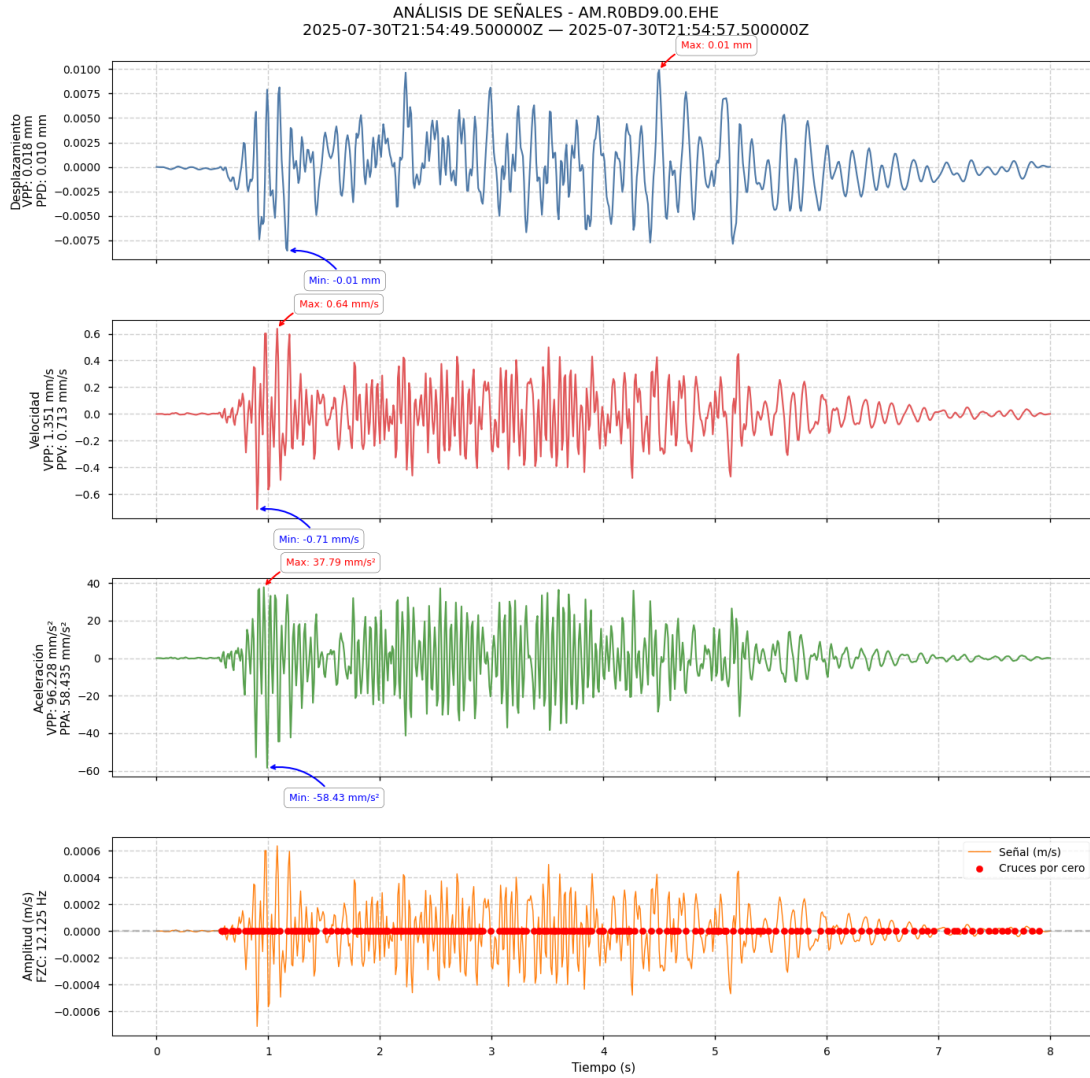


Figura anexo A 41. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

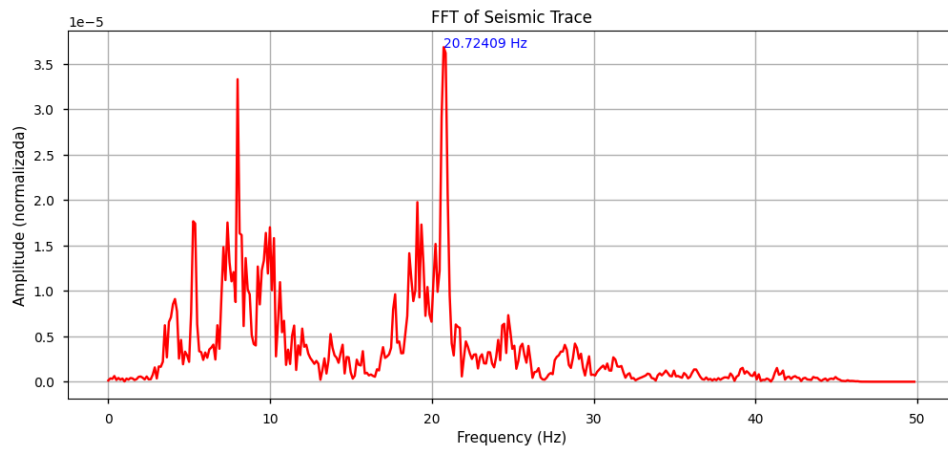


Figura anexo A 42. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

9.1.8. Voladura cantera Perea y Cia SAS 30-07-2025

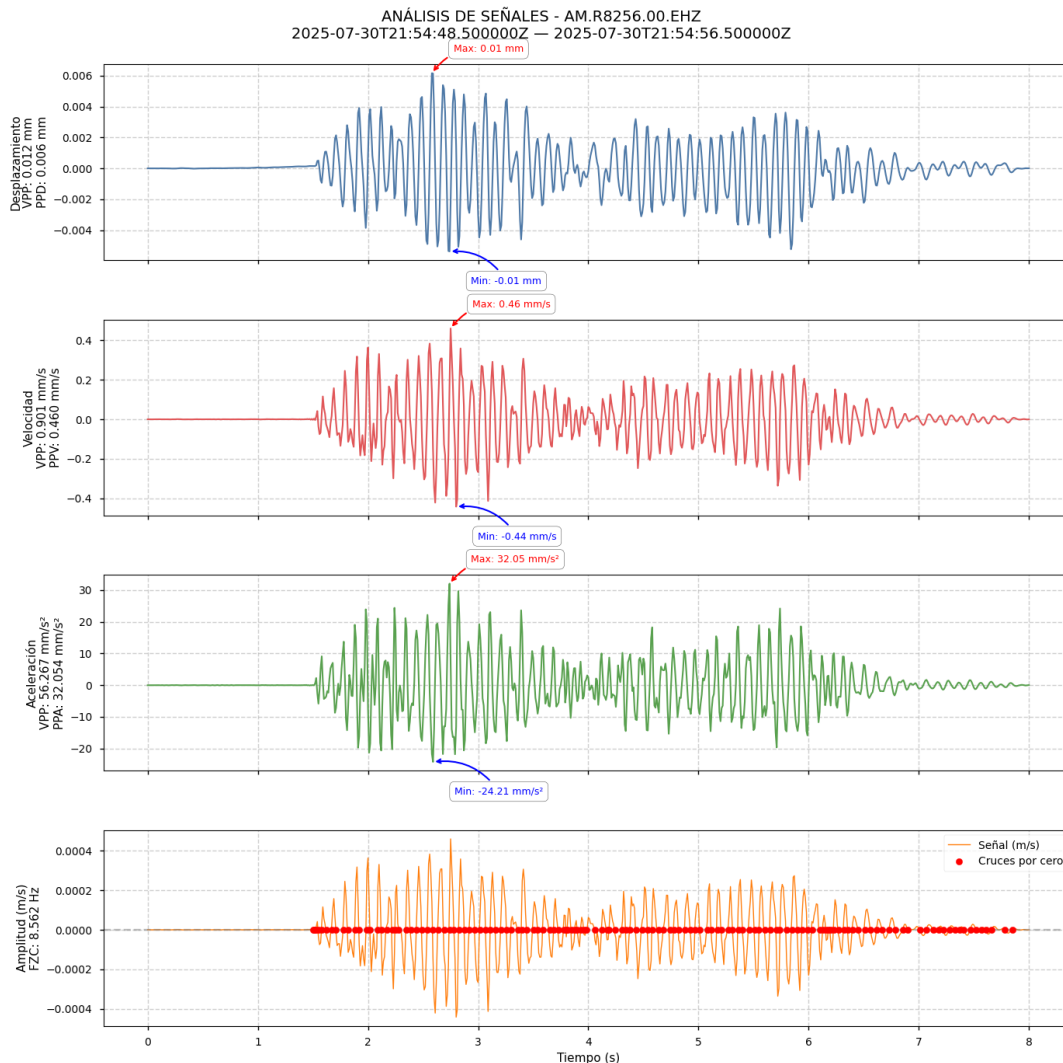


Figura anexo A 43. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

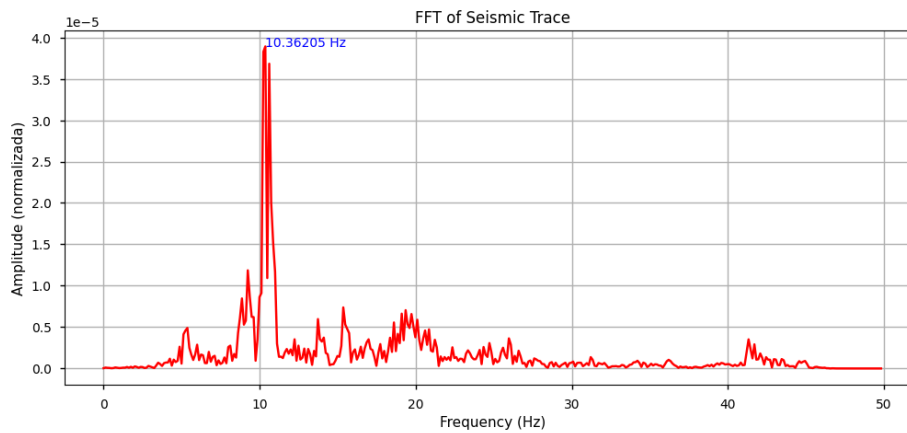


Figura anexo A 44. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

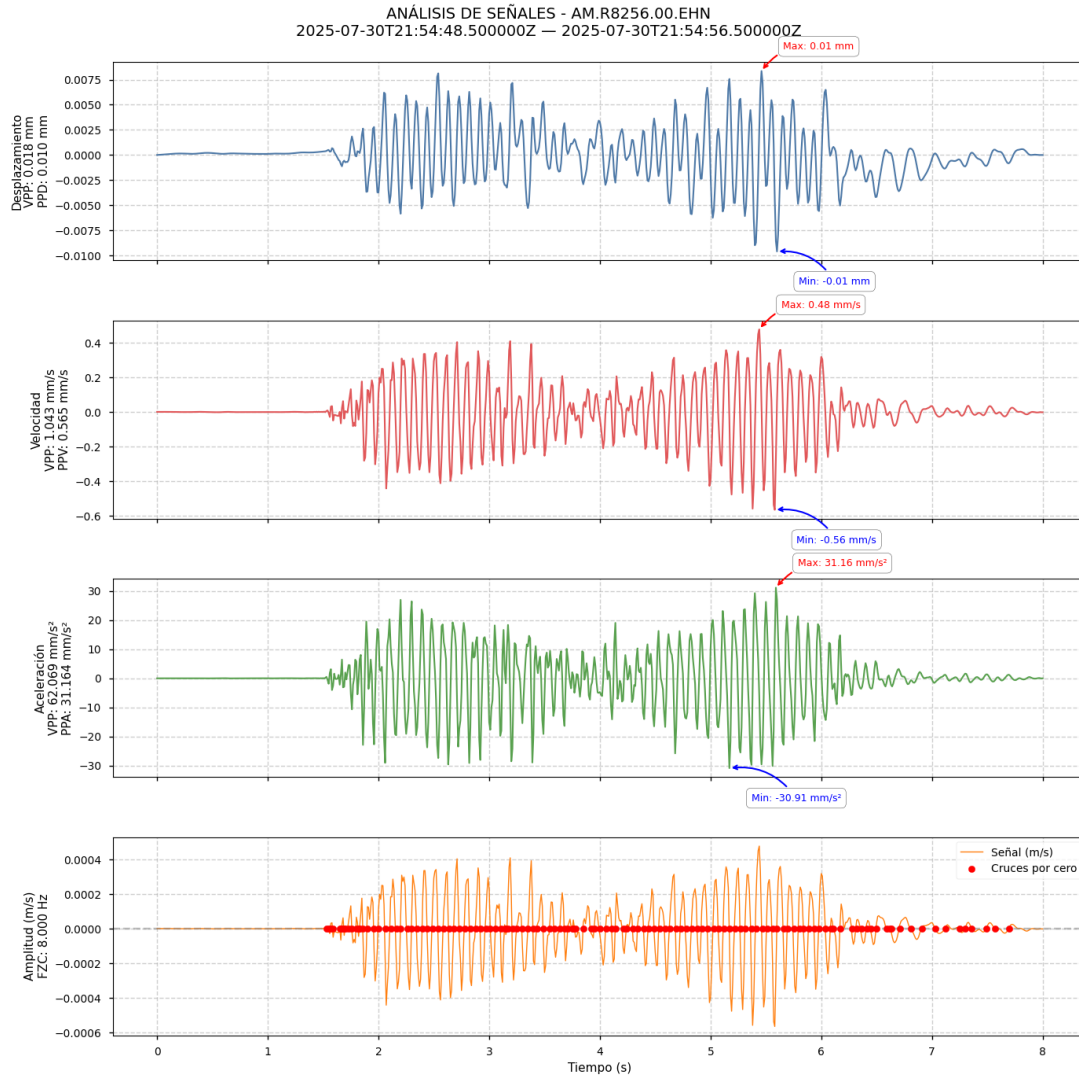


Figura anexo A 45. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

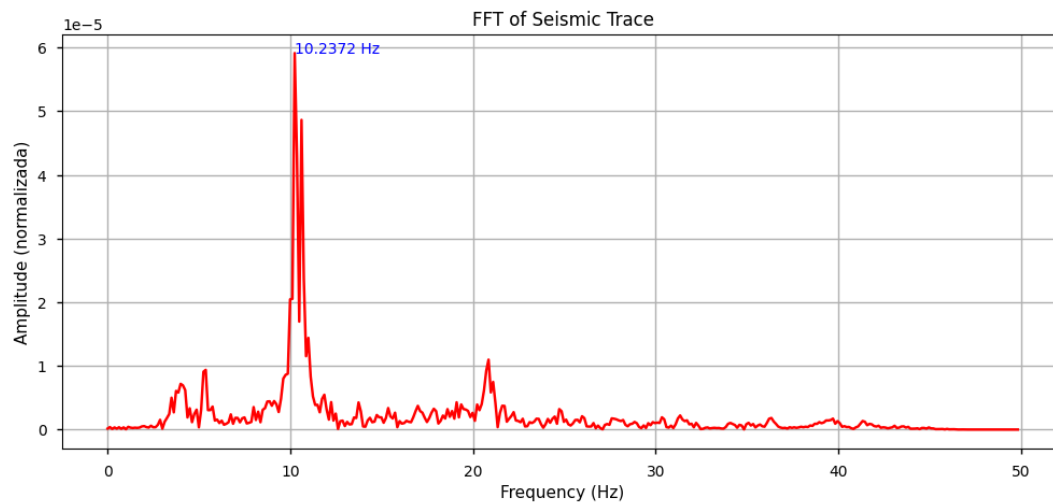


Figura anexo A 46. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

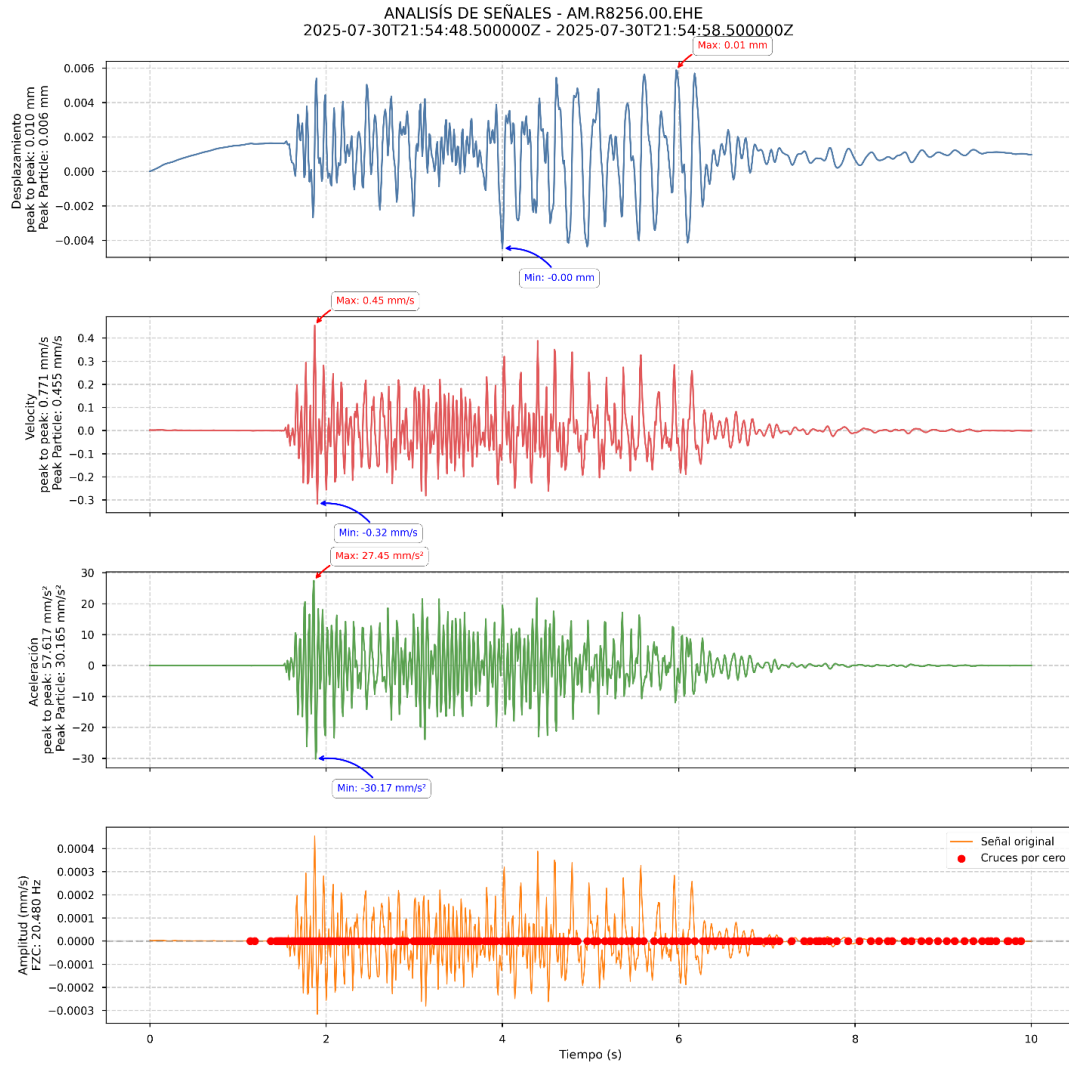


Figura anexo A 47. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

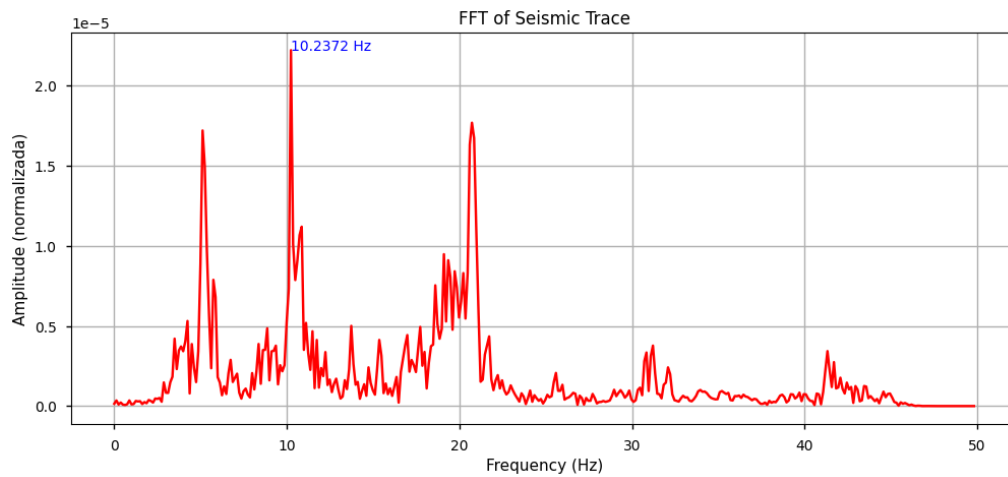


Figura anexo A 48. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

9.1.9. Voladura cantera Perea y Cia SAS 30-07-2025

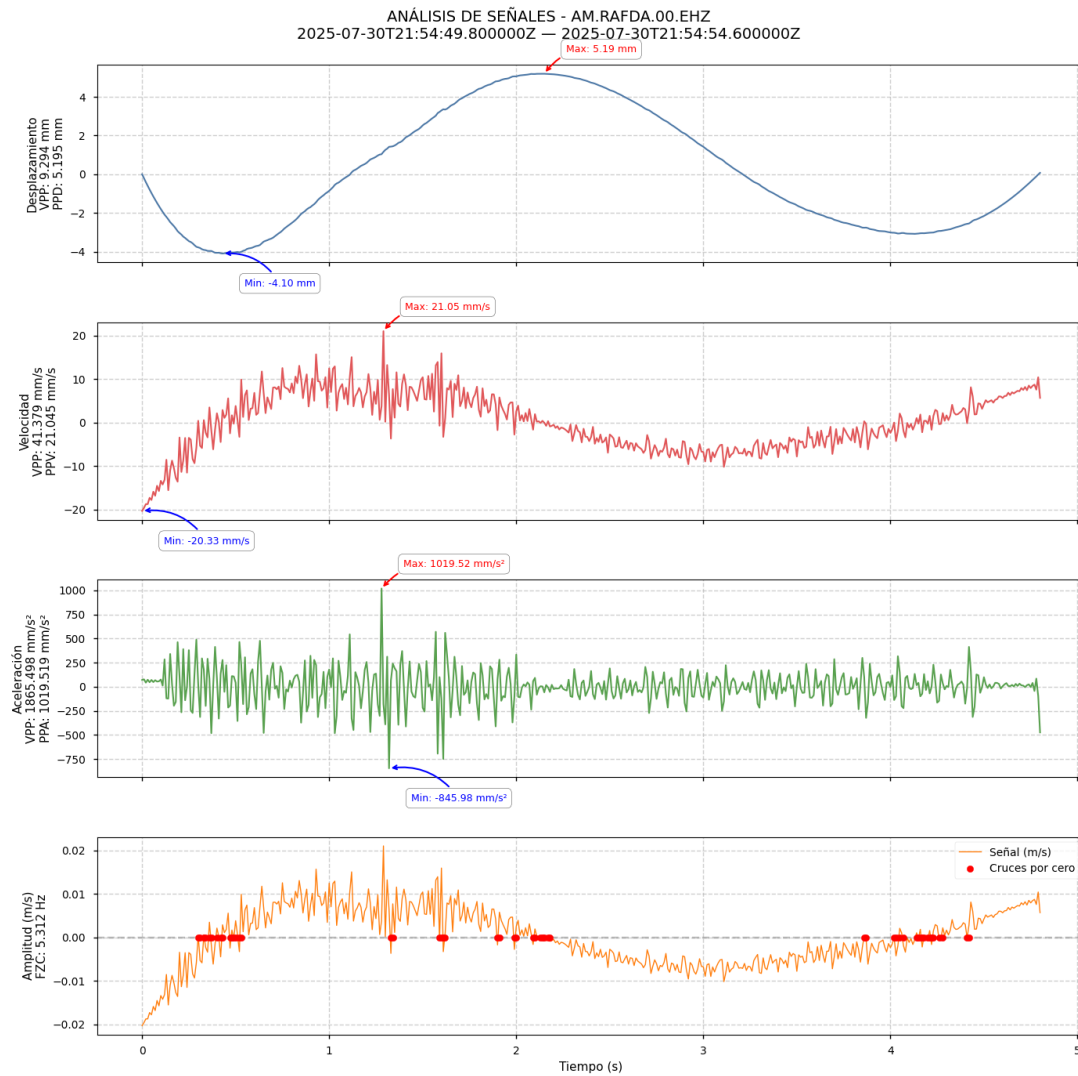


Figura anexo A 49. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

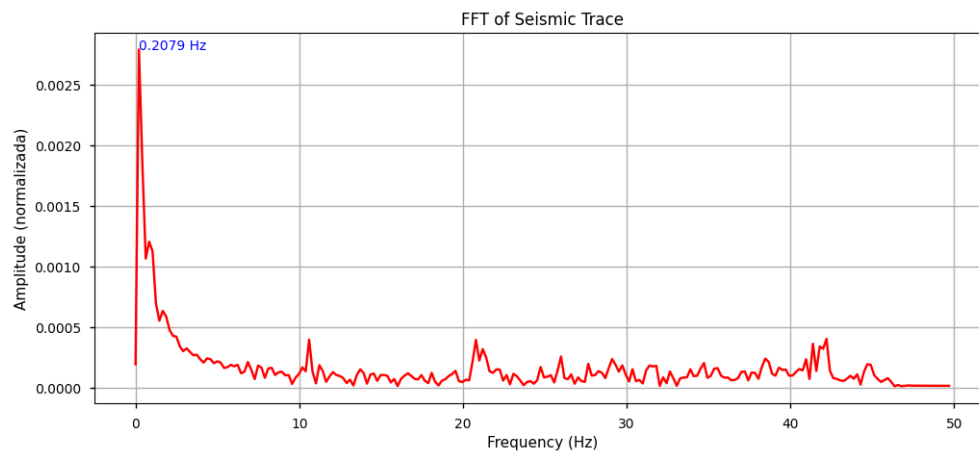


Figura anexo A 50. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

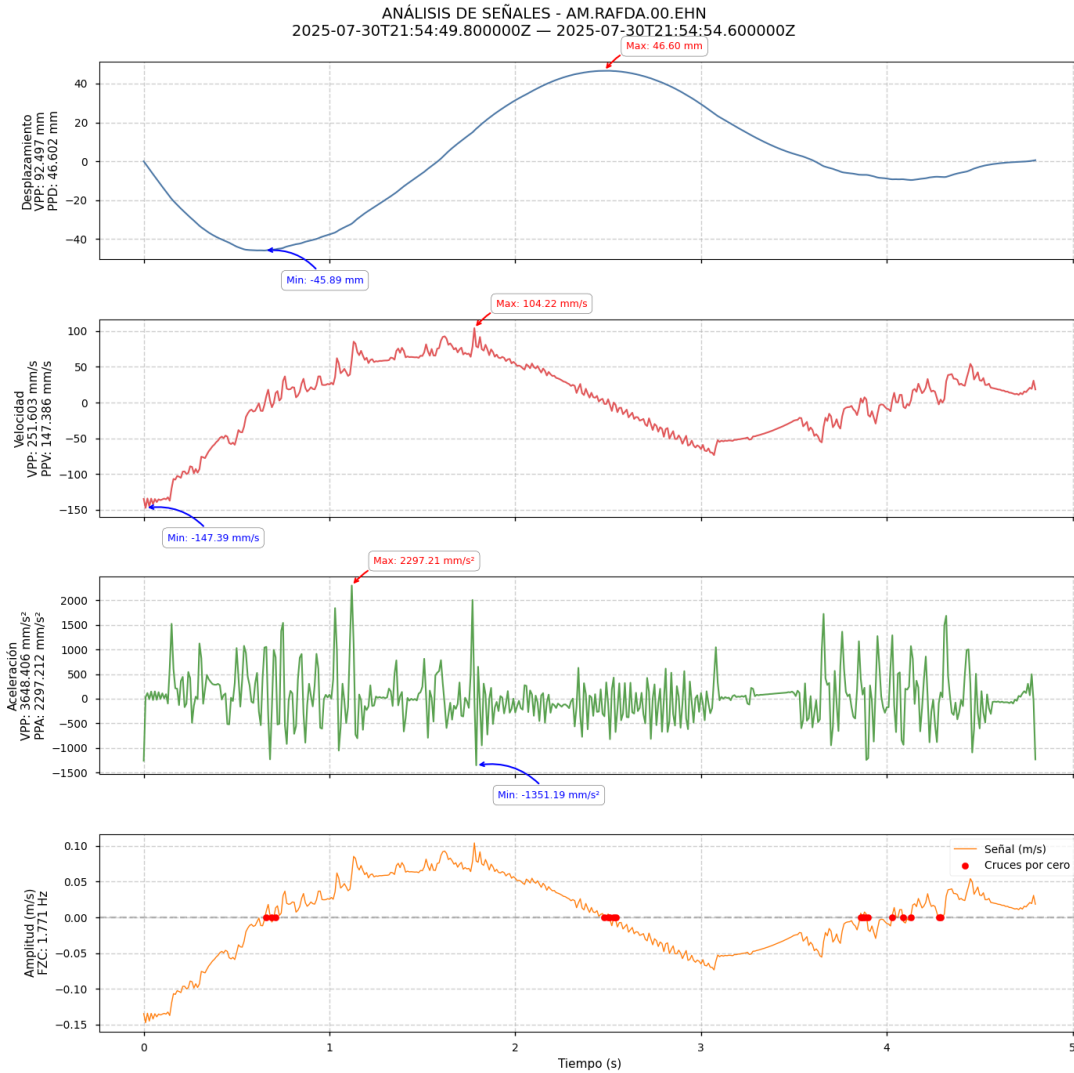


Figura anexo A 51. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

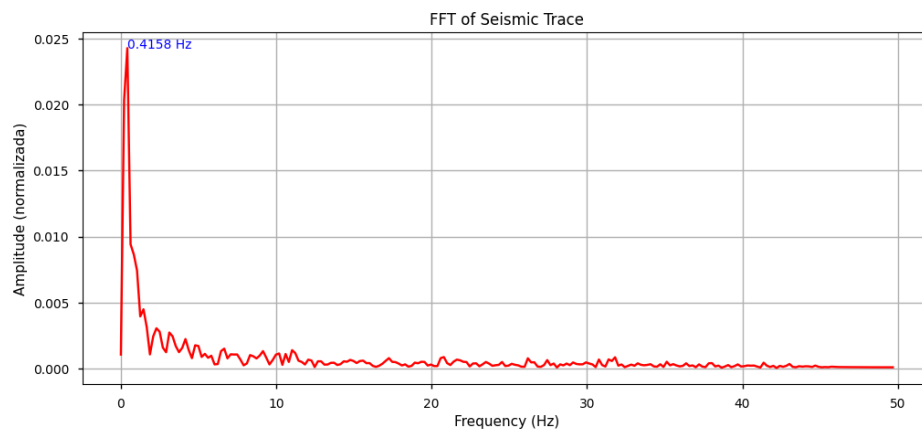


Figura anexo A 52. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

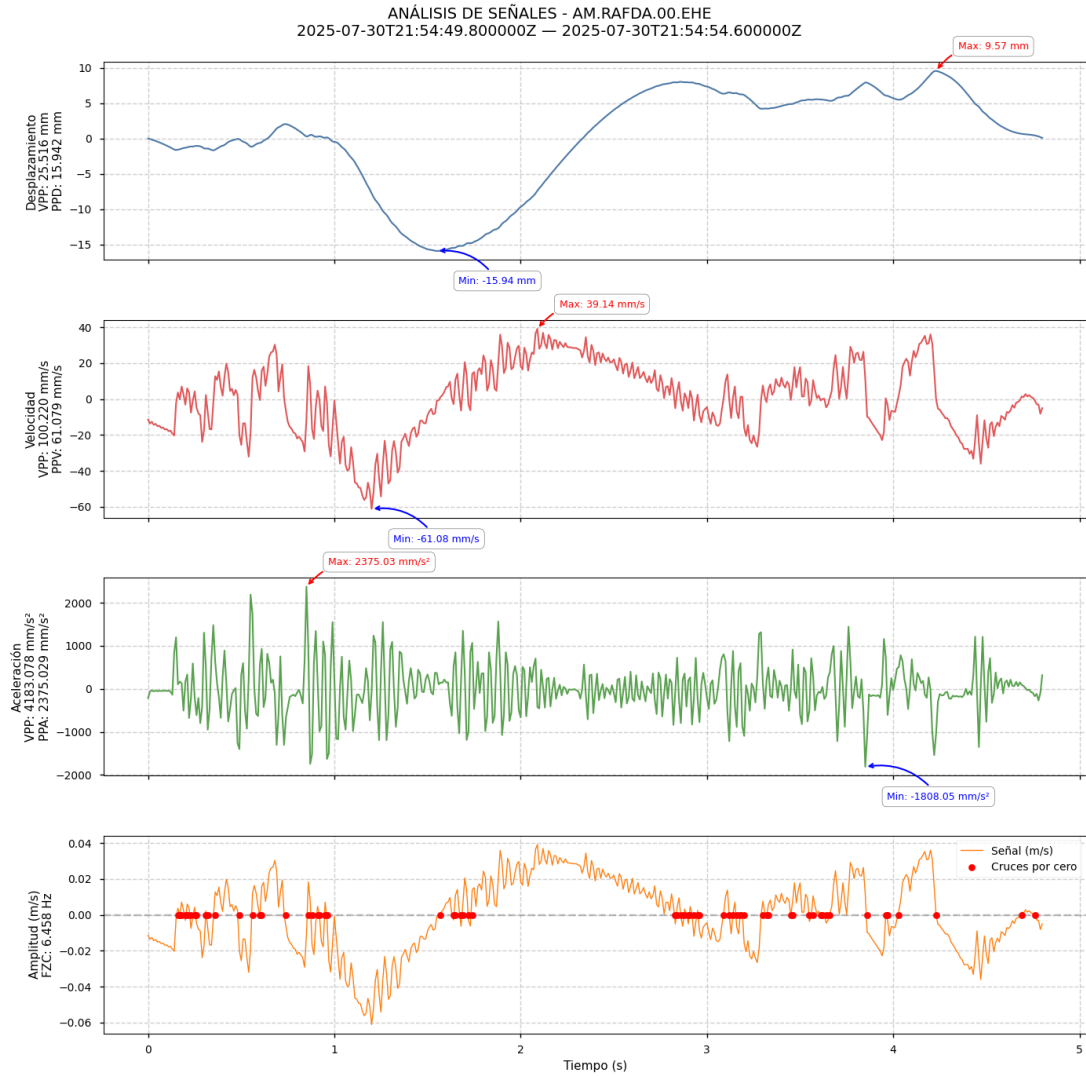


Figura anexo A 53. Parámetros vibratorios de la señal (desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud) Vs tiempo. Fuente: Los autores

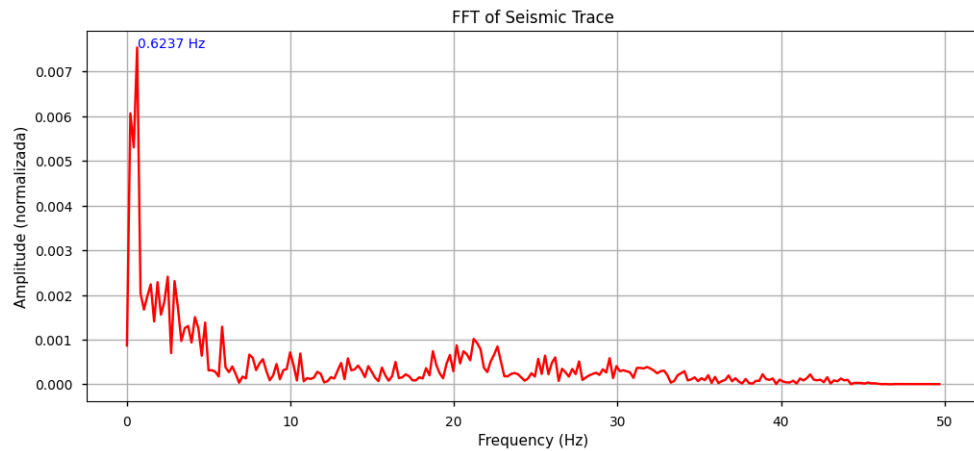


Figura anexo A 54. Espectro de frecuencias de la señal sísmica (FFT). Fuente: Los autores.

9.2. Anexo B- Código de Phyton

9.2.1. Código generar conversión de unidades y parámetros generales

```
# CODIGO PYTHON TESIS JULIO TORO - DANIEL PRADO - EST. INGENIERIA CIVIL, UNIVERSIDAD DEL VALLE
# =====
# Instalar librería si no está disponible
# =====
try:
    import obspy
except ImportError:
    !pip install obspy

# =====
# Librerías necesarias
# =====
from obspy import UTCDateTime, read_inventory, read
import requests
import urllib3
import numpy as np
import warnings
import matplotlib.pyplot as plt
import csv
from obspy.io.mseed.headers import InternalMSEEDWarning

warnings.filterwarnings("ignore", category=InternalMSEEDWarning)
urllib3.disable_warnings(urllib3.exceptions.InsecureRequestWarning)

# -----
# 1. Descargar traza desde URL del OSSO
# -----
url = "https://osso.univalle.edu.co/apps/seiscomp/archive/2025/AM/RAFDA/EHZ.D/AM.RAFDA.00.EHZ.D.2025.149"
local_filename = "AM.RAFDA.00.EHZ.D.2025.149"

response = requests.get(url, verify=False)
with open(local_filename, 'wb') as f:
    f.write(response.content)

# 2. Definir ventana de analisis dinamica
# -----
inicio = UTCDateTime('2025-05-29T20:17:17.500')
duracion_ventana = 1.5 # <- Cambia este valor según tu análisis
fin = inicio + duracion_ventana
print(f"Ventana de análisis: {inicio} a {fin}")

# -----
# 3. Leer traza dentro de la ventana y corregir respuesta instrumental
# -----
trace = read(local_filename, starttime=inicio, endtime=fin)

url_inv = "https://osso.univalle.edu.co/apps/seiscomp/inventory/RAFDA.xml"
inv_file = "RAFDA.xml"
response = requests.get(url_inv, verify=False)
with open(inv_file, 'wb') as f:
    f.write(response.content)

inv = read_inventory(inv_file)

trace.attach_response(inv)
trace.remove_response(output="VEL") # velocidad en m/s
trace.detrend('linear')
trace.detrend('demean')

# Filtrado banda 0.1-45 Hz
tr = trace[0]
fs = tr.stats.sampling_rate
freqmax = min(45.0, 0.5 * fs - 0.5)
tr.filter("bandpass", freqmin=0.1, freqmax=freqmax, corners=4, zerophase=True)
```

```

# Extraer parámetros dinámicos
dt = tr.stats.delta
n = tr.stats.npts
times = np.linspace(0, (n - 1) * dt, n) # tiempo dependiente de ventana

# -----
# 4. Señales derivadas y unidades de ingeniería
# -----
data = tr.data.copy()
data = data - np.mean(data) # eliminar offset
velocity = data * 1e3 # mm/s

tr_disp = tr.copy()
tr_disp.detrend('linear')
tr_disp.detrend('demean')
tr_disp.integrate(method="cumtrapz")
displacement = tr_disp.data * 1e3 # mm

acceleration = np.gradient(data, dt) * 1e3 # mm/s2

# -----
# 5. Estadísticas básicas
# -----
Vpp_ms = (np.max(data) - np.min(data)) * 1e3
peak_amplitude_ms = np.max(np.abs(data))
peak_sample = np.argmax(np.abs(data))
peak_time = inicio + peak_sample * dt
print(f"Tiempo pico absoluto (vel): {peak_time}")
print(f"Amplitud pico absoluta (vel): {peak_amplitude_ms:.3f} mm/s")
print(f"Velocidad Pico a Pico (ventana): {Vpp_ms:.3f} mm/s")

```

9.2.2. Código para generar desplazamiento, velocidad, aceleración y amplitud Vs tiempo

```

# 6. Cruces por cero (ZCR robusto)
# -----
x1 = data[:-1]
x2 = data[1:]
thr = 0.005 * np.max(np.abs(data)) # 0.5% del pico
valid = (np.abs(x1) > thr) | (np.abs(x2) > thr)
sign_changes_robust = (np.sign(x2) != np.sign(x1)) & valid
zcr_robust = np.mean(sign_changes_robust)
fzc_hz_robust = (zcr_robust * fs) / 2

zc_idx = np.where(sign_changes_robust)[0] + 1
zero_crossing_times = times[zc_idx]

print(f"FZC robusto (umbral {thr:.2e} m/s): {fzc_hz_robust:.3f} Hz")

# -----
# 7. Extremos y VPP
# -----
def get_extremes(y):
    i_max = np.argmax(y)
    i_min = np.argmin(y)
    return (i_max, y[i_max]), (i_min, y[i_min])

(displacement_max_t, displacement_max), (displacement_min_t, displacement_min) = get_extremes(displacement)
(velocity_max_t, velocity_max), (velocity_min_t, velocity_min) = get_extremes(velocity)
(acceleration_max_t, acceleration_max), (acceleration_min_t, acceleration_min) = get_extremes(acceleration)

vpp_disp = np.max(displacement) - np.min(displacement)
vpp_vel = np.max(velocity) - np.min(velocity)
vpp_acc = np.max(acceleration) - np.min(acceleration)

PPD = np.max(np.abs(displacement))
PPV = np.max(np.abs(velocity))
PPA = np.max(np.abs(acceleration))

```

```

print("\n--- Resumen ---")
print(f"PPD: {PPD:.3f} mm | VPP disp: {vpp_disp:.3f} mm")
print(f"PPV: {PPV:.3f} mm/s | VPP vel: {vpp_vel:.3f} mm/s")
print(f"PPA: {PPA:.3f} mm/s2 | VPP acc: {vpp_acc:.3f} mm/s2")

# -----
# 8. Gráficas principales
# -----
plt.style.use('seaborn-v0_8-notebook')
colors = {'disp': '#4e79a7', 'vel': '#e15759', 'acc': '#59a14f', 'freq': '#ff7f0e'}

fig1, axes = plt.subplots(4, 1, figsize=(14, 14), sharex=True)

def annotate_extreme(ax, time, value, label, color, ox=10, oy=10):
    ax.annotate(
        label, xy=(time, value), xytext=(ox, oy), textcoords='offset points',
        arrowprops=dict(arrowstyle="->", color=color, lw=1.5, connectionstyle="arc3,rad=0.3"),
        bbox=dict(boxstyle='round,pad=0.5', fc='white', alpha=0.85),
        fontsize=9, color=color
    )

# Desplazamiento
ax = axes[0]
ax.plot(times, displacement, color=colors['disp'], lw=1.5)
annotate_extreme(ax, times[disp_max_t], disp_max, f'Max: {disp_max:.2f} mm', 'red', 20, 20)
annotate_extreme(ax, times[disp_min_t], disp_min, f'Min: {disp_min:.2f} mm', 'blue', 20, -30)
ax.set_ylabel(f'Desplazamiento\nVPP: {vpp_disp:.3f} mm\nPPD: {PPD:.3f} mm')
ax.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)

# Velocidad
ax = axes[1]
ax.plot(times, velocity, color=colors['vel'], lw=1.5)
annotate_extreme(ax, times[vel_max_t], vel_max, f'Max: {vel_max:.2f} mm/s', 'red', 20, 20)
annotate_extreme(ax, times[vel_min_t], vel_min, f'Min: {vel_min:.2f} mm/s', 'blue', 20, -30)
ax.set_ylabel(f'Velocidad\nVPP: {vpp_vel:.3f} mm/s\nPPV: {PPV:.3f} mm/s')
ax.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)

# Aceleración
ax = axes[2]
ax.plot(times, acceleration, color=colors['acc'], lw=1.5)
annotate_extreme(ax, times[acc_max_t], acc_max, f'Max: {acc_max:.2f} mm/s2', 'red', 20, 20)
annotate_extreme(ax, times[acc_min_t], acc_min, f'Min: {acc_min:.2f} mm/s2', 'blue', 20, -30)
ax.set_ylabel(f'Aceleración\nVPP: {vpp_acc:.3f} mm/s2\nPPA: {PPA:.3f} mm/s2')
ax.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)

# Cruces por cero
ax = axes[3]
ax.plot(times, data, color=colors['freq'], lw=1.0, label='Señal (m/s)')
ax.scatter(zero_crossing_times, np.zeros_like(zero_crossing_times),
           color='red', s=36, zorder=5, label='Cruces por cero')
ax.axhline(0, color='gray', linestyle='--', alpha=0.5)
ax.set_ylabel(f'Amplitud (m/s)\nFZC: {fzc_hz_robust:.3f} Hz')
ax.legend()
ax.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
ax.set_xlabel('Tiempo (s)')

fig1.suptitle(f'ANÁLISIS DE SEÑALES - {tr.id}\n{inicio} - {fin}', fontsize=14)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

9.2.4. Código para espectro de frecuencias (FFT)

```
# 9. FFT de la traza
# -----
fft_data = np.fft.fft(tr.data)
frequencies = np.fft.fftfreq(n, dt)

positive_freqs = frequencies[:n // 2]
fft_magnitude = np.abs(fft_data[:n // 2]) / n

plt.figure(figsize=(12, 5))
plt.plot(positive_freqs, fft_magnitude, color='red')
plt.grid(True)

# Frecuencia dominante
max_index = np.argmax(fft_magnitude[1:]) + 1
Amp = fft_magnitude[max_index]
Lon2 = positive_freqs[max_index]

plt.annotate(f'{round(Lon2,5)} Hz',
             xy=(Lon2, Amp),
             xytext=(Lon2, Amp),
             fontsize=10, color="blue")

plt.xlabel('Frequency (Hz)')
plt.ylabel('Amplitude (normalizada)')
plt.title('FFT of Seismic Trace')
plt.show()

print(f"Frecuencia dominante (FFT): {Lon2:.3f} Hz")
```

9.2.5. Código para frecuencia vs VPP - límites DIN 4150

[illegible]


```
# Configuración del gráfico
plt.title("DIN 4150-3 - PPV vs Frecuencia con datos de 9 voladuras (EHZ, EHN, EHE)", fontsize=14)
plt.xlabel("Frecuencia dominante (Hz)", fontsize=12)
plt.ylabel("Velocidad de partícula pico (PPV) [mm/s]", fontsize=12)
plt.xlim(0, 40) # Eje X más detallado
plt.ylim(0, 180) # Eje Y ampliado
plt.yticks(np.arange(0, 190, 20))
plt.xticks(np.arange(0, 45, 5))
plt.grid(True, linestyle="--", alpha=0.6)

# Evitar leyenda repetida
handles, labels = plt.gca().get_legend_handles_labels()
unique = dict(zip(labels, handles))
plt.legend(unique.values(), unique.keys(), loc="upper left", bbox_to_anchor=(1.05, 1.0))

plt.tight_layout()
plt.show()
```

9.3. Anexo C-Galería de fotos



Fotografía 1. Voladura 20/03/25, empresa Perea S.A.S, cantera Arroyo hondo.



Fotografía 2. Zona de la voladura 09/04/25, empresa Agregados La Roca., cantera Guabinas.



Fotografía 3. Preparación del explosivo para la voladura 09/04/25, empresa Agregados La Roca., cantera Guabinas.



Fotografía 4. Instalación del sismógrafo en la voladura 13/05/25, empresa Perea S.A.S., cantera Arroyo hondo.



Fotografía 5. Zona de la voladura 13/05/25, empresa Perea S.A.S, cantera Arroyo hondo.



Fotografía 6. Detonación voladura 13/05/25, empresa Perea S.A.S, cantera Arroyo hondo.



Fotografía 7. Terreno después de la voladura 13/05/25, empresa Perea S.A.S, cantera Arroyo hondo.



Fotografía 8. Detonación de la voladura 29/07/25, empresa Perea S.A.S, cantera Guabinas.



Fotografía 9. Detonador electrónico usado en la voladura 29/07/25, empresa Perea S.A.S, cantera Guabinas.



Fotografía 10- Detonación de la voladura 30/07/25, empresa Perea S.A.S, cantera Guabinas