

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Incidencia de daño a las edificaciones por la generación de vibraciones
por voladura distrito de Chalhuanhuacho 2023

Presentado por:

Wilman Gomez Ramos

Para optar el título de Ingeniero Civil

Abancay, Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**Incidencia de daño a las edificaciones por la generación de vibraciones
por voladura distrito de Chalhuanhuacho 2023**

Presentado por **Wilman Gomez Ramos**, para optar el título de Ingeniero Civil

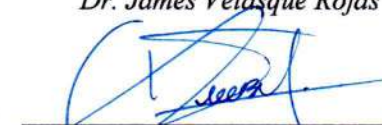
Sustentado y aprobado el 28 de agosto del 2025, ante el jurado evaluador:

Presidente:



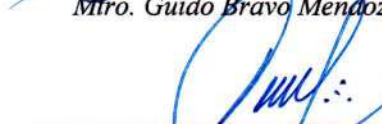
Dr. James Velasque Rojas

Primer miembro:



Mtro. Guido Bravo Mendoza

Segundo miembro:



Mtro. Feliciano Escobedo Silva

Asesor:



PhD. Ing. Lucy Marisol Guanuchi Orellana



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 200-2025

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la Tesis intitulada: **"Incidencia de daño a las edificaciones por la generación de vibraciones por voladura distrito de Chahuahuacho 2023"**, presentado por el Bachr: **Wilman Gomez Ramos**, Para optar el Título de **Ingeniero Civil**; ha sido sometido a un mecanismo de evaluación y verificación de similitud, a través del Software Turnitin, siendo el índice de similitud **ACEPTABLE de (24%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 22 de agosto del 2025

Atentamente,


Dra. Hespéralda Rojas Enriquez
DIRECTORA DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA

C. c.
Archivo
REG. N° 667

Agradecimiento

Agradezco a Dios por darme la vida, guiarme en el camino y permitirme concluir mi tesis. Así como también a los docentes que impartieron conocimientos y experiencias que fueron muy valiosas para una formación profesional de calidad de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, institución que me acogió en sus aulas.

A mi asesora de tesis Ph.D, Ing. Lucy Marisol Guanuchi Orellana, por su paciencia, experiencia, profesionalismo, docencia y ética, permitieron encaminar el desarrollo de esta investigación.

Esta tesis fue ganadora y financiada totalmente a través del Vicerrectorado de Investigación de la UNAMBA, mediante el V concurso de investigación científica y tecnológica de proyectos de tesis de pregrado, financiado con fondos de canon, sobre canon y regalías mineras 2023.

Wilman Gomez Ramos



Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado a mis padres Ignacia Ramos Ramos, Antero Gomez Teves, mi esposa Milca Pizarro Sanchez y querida hija Sofía Ayleen Gomez Pizarro que siempre estuvieron dispuestos a brindarme su amor, trabajo, sacrificio y apoyo constante e incondicional a lo largo de esta etapa de mi vida.

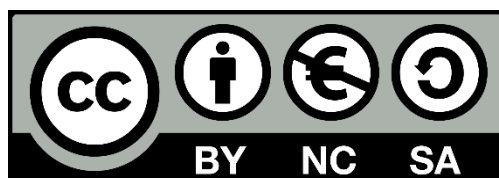
Wilman Gomez Ramos



Incidencia de daño a las edificaciones por la generación de vibraciones
por voladura distrito de Chalhuanahuacho 2023

Línea de investigación: Ingeniería de construcción

Esta publicación está bajo licencia de Creative Commons



ÍNDICE

Pág.

INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
CAPÍTULO I	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1 Descripción del problema	4
1.2 Enunciado del problema	10
1.2.1 Problema general	10
1.2.2 Problemas específicos	10
1.2.3 Justificación de la investigación	10
CAPÍTULO II	12
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	12
2.1 Objetivos de la investigación	12
2.1.1 Objetivo general	12
2.1.2 Objetivos específicos	12
2.2 Hipótesis de la investigación	13
2.2.1 Hipótesis general	13
2.2.2 Hipótesis específicas	13
2.3 Operacionalización de variables	14
CAPÍTULO III	16
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	16
3.1 Antecedentes	16
3.2 Marco teórico	23
3.2.1 Modelo predictivo de vibraciones	23
3.2.1.1 Parámetros del modelo	24
3.2.1.2 Carga explosiva	24
3.2.1.3 Distancia entre la fuente y estructura	24
3.2.1.4 Diferencia entre PPV real y estimado	25
3.2.1.5 Grado de ajuste del modelo	25
3.2.2 Vibraciones por voladura de roca.	26
3.2.2.1 Geotecnia	26
3.2.2.2 Macizo rocoso.	28
	1



3.2.2.3	Dinámica estructural.	28
3.2.2.4	Tipos de suelos.	30
3.2.2.5	Interacción dinámica suelo estructura.	31
3.2.2.6	Normativas para el control de vibraciones.	32
3.2.2.7	Voladura de rocas.	38
3.2.2.8	Variables que considerar en las vibraciones por voladura.	38
3.2.2.9	Ondas de vibraciones por voladura.	39
3.2.2.10	Tipos de onda de cuerpo.	39
3.2.2.11	Medición de vibraciones.	41
3.2.2.12	Velocidad pico de partícula crítica.	42
3.2.2.13	Macizo rocoso.	44
3.2.2.14	Predicción de vibraciones inducidas por voladuras.	45
3.2.2.15	Límites para evitar daños.	46
3.2.2.16	Geología.	50
3.4	Marco conceptual	53
CAPÍTULO IV		57
METODOLOGÍA		57
4.1	Tipo y nivel de investigación.	57
4.2	Diseño de la investigación.	57
4.3	Descripción ética de la investigación.	58
4.4	Población y muestra.	59
4.5	Procedimiento	59
4.6	Técnica e instrumentos	61
CAPÍTULO V		62
RESULTADOS Y DISCUSIONES		62
5.1	Análisis de resultados	75
5.2	Contrastación de hipótesis	77
5.3	Discusión	81
CAPÍTULO VI		82
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		82
6.1	Conclusiones	82
6.2	Recomendaciones	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		85
ANEXOS		89

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 — Operacionalización de variables	14
Tabla 2 — Matriz consistencia	15
Tabla 3 — Velocidades de partículas críticas estimadas	43
Tabla 4 — Criterios de daños utilizados según MACKENZI (1993)	44
Tabla 5 — Normatividad internacional en el manejo de vibraciones	46
Tabla 6 — Niveles de daño según DIN 4150	48
Tabla 7 — Datos registrados por el sismógrafo instantel N°01 y N°02	64
Tabla 8 — Datos registrados de las distancias entre lugar del monitoreo y punto de disparo	65
Tabla 9 — Datos de campo distancia punto de voladura hacia punto de registro de vibraciones, cantidad de explosivo utilizado y PPV	67
Tabla 10 — Logaritmo de la distancia escalada y la PPV	68
Tabla 11 — Logaritmo de la distancia escalada y la PPV al 90 %	71
Tabla 12 — Valores de predicción al 50 % y 90 %	72
Tabla 13 — Confirmación de los valores de predicción al 50 % y 90 %.	74

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 — Clasificación según normas internacionales	31
Figura 2 — Velocidad pico partícula máxima	33
Figura 3 — Efectos de la VPP sobre el macizo rocoso	34
Figura 4 — Resumen de normas internacionales existentes	35
Figura 5 — Niveles de seguridad para vibraciones norma USBM RI	36
Figura 6 — Variables que influyen en las vibraciones terrestres	36
Figura 7 — Partes principales de la norma DIN 4150	37
Figura 8 — Partes principales de la norma DIN 4150	37
Figura 9 — Curva para los valores especificados	38
Figura 10 — Variables que influyen en las vibraciones terrestres	39
Figura 11 — Movimiento de partículas a través de la onda P	40
Figura 12 — Movimiento de las partículas a través de la onda S	40
Figura 13 — Movimiento de las partículas a través de la onda R	41
Figura 14 — Movimiento de las partículas a través de la onda L	41
Figura 15 — Gráfico predictivo	46
Figura 16 — Criterio para evitar daños	50
Figura 17 — Criterio para evitar daños	52
Figura 19 — Ubicación de puntos de monitoreo	62
Figura 20 — Ubicación de las voladuras.	63
Figura 21 — Dispersión al 50% de confiabilidad	69
Figura 22 — Dispersión al 90 % de confiabilidad	70
Figura 23 — Confirmación de los valores de predicción al 50 % y 90 %	73
Figura 24 — Confirmación de los valores de predicción al 50 % y 90 %	75
Figura 25 — Equipo N°01 instantel minimate pro utilizado en el registro de vibraciones	90
Figura 26 — Equipo N°02 instantel micromate utilizado en el registro de vibraciones	90
Figura 27 — Certificado de calibración del equipo N°01 instantel minimate pro utilizado en el registro de vibraciones	91
Figura 28 — Certificado de calibración del equipo N°02 instantel micromate utilizado en el registro de vibraciones	92
Figura 29 — Registro de vibraciones en el punto de monitoreo 9	93
Figura 30 — Registro de coordenadas con GPS del punto de monitoreo 9	93
Figura 31 — Proceso para colocado del sismógrafo punto de monitoreo 9	94

Figura 32 — Instalación del geófono con el sismógrafo punto de monitoreo 9	94
Figura 33 — Registro de vibraciones en el punto de monitoreo 4	95
Figura 34 — Registro de coordenadas con GPS del punto de monitoreo 4	95
Figura 35 — Registro de vibraciones en el punto de monitoreo 4	96
Figura 36 — Lugar de registro de vibraciones en el punto de monitoreo 6	96
Figura 37 — Registro de coordenadas con GPS del punto de monitoreo 6	97
Figura 38 — Registro de vibraciones en el punto de monitoreo 6	97
Figura 39 — Registro de vibraciones en el punto de monitoreo 3	98
Figura 40 — Registro de coordenadas con GPS del punto de monitoreo 3	98
Figura 41 — Registro de vibraciones en el punto de monitoreo 3	99
Figura 42 — Proceso de descarga de datos del sismógrafo	99
Figura 43 — Proceso de descarga de datos del sismógrafo	100
Figura 44 — Proceso de descarga de datos del sismógrafo	100
Figura 45 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 01 de enero 2023	101
Figura 46 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 02 de enero 2023	102
Figura 47 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 03 de enero 2023	103
Figura 48 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 4 de enero 2023	104
Figura 49 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 5 de enero 2023	105
Figura 50 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 6 de enero 2023	106
Figura 51 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 7 de enero 2023	107
Figura 52 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 8 de enero 2023	108
Figura 53 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 9 de enero 2023	109
Figura 54 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 10 de enero 2023	110
Figura 55 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 11 de enero 2023	111
Figura 56 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 12 de enero 2023	112
Figura 57 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 13 de enero 2023	113
Figura 58 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 14 de enero 2023	114
Figura 59 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 15 de enero 2023	115
Figura 60 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 16 de enero 2023	116
Figura 61 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 17 de enero 2023	117
Figura 62 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 18 de enero 2023	118
Figura 63 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 19 de enero 2023	119
Figura 64 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 20 de enero 2023	120
Figura 65 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 21 de enero 2023	121
Figura 66 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 22 de enero 2023	122
Figura 67 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 23 de enero 2023	123
Figura 68 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 24 de enero 2023	124

Figura 69 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 25 de enero 2023	125
Figura 70 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 26 de enero 2023	126
Figura 71 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 27 de enero 2023	127
Figura 72 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 28 de enero 2023	128
Figura 73 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 29 de enero 2023	129
Figura 74 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 30 de enero 2023	130
Figura 75 — Formato de registro de vibraciones por voladura de rocas	131
Figura 76 — Fisuración en pared	132
Figura 77 — Fisuración en esquina de una venta	132
Figura 78 — fisuración en pared	133
Figura 79 —Desprendimiento separación de las capas de concreto	133
Figura 80 — Plano de voladura del 13 de enero del 2023	134

INTRODUCCIÓN

El distrito de Chalhuanahuacho es una población que está en constante crecimiento y desarrollo, gracias a su yacimiento minero que origina la progresión económica, incremento de diferentes tipos de construcciones, desde edificaciones para viviendas, comercio y otros.

En el presente trabajo de investigación los resultados del modelamiento y monitoreo de las vibraciones inducida por la voladura se usaron para comparar con los diferentes criterios de daño postulados a la fecha, y de esta manera estar en condiciones de minimizar, mitigar y/o evitar los daños producidos por las vibraciones inducidos por la voladura de rocas.

Por esta razón, se decidió llevar a cabo esta investigación, en la cual se monitorearon las vibraciones inducidas por la voladura de rocas en una operación minera superficial. Se proporcionó la teoría básica y práctica, así como los procedimientos necesarios para el registro y análisis de los datos de vibraciones obtenidos de las voladuras. El monitoreo de vibraciones fue registrado partiendo del propósito definido para el uso de los datos, controlando los factores necesarios para asegurar la confiabilidad de la información registrada, y garantizando que esta fuera representativa de la voladura que se analizaron y modelaron.

Lo importante de esta tecnología fue haber obtenido los niveles absolutos de velocidad de partícula para cada una de las cargas explosivas, los cuales, asociados a las distancias en que se registraron dichas detonaciones, conformaron una base de datos sólida. Esta base permitió construir modelos confiables de predicción de vibraciones, con los cuales se evaluaron diferentes modificaciones a los distintos parámetros de la voladura, tales como el tipo y cantidad de explosivo según la distancia, y se analizó el daño potencial que estas vibraciones pudieron haber producido.

RESUMEN

Actualmente, uno de los problemas más desafiantes que enfrentan la mayoría de las empresas mineras en nuestro país está relacionado a las vibraciones originadas por las voladuras de rocas; las cuales pueden generar molestia y daño tanto en la población como en estructuras de las viviendas. Bajo este contexto, la presente tesis tuvo como objetivo principal encontrar la incidencia de daño a las estructuras y obtener un nivel de vibraciones a campo lejano generadas por voladuras, dentro de los parámetros establecidos los cuales no causarían daño a una estructura.

La investigación realizada se basa en el monitoreo de vibración en la zona de estudio se consideran datos como la carga operante y las características dinámicas o leyes de atenuación del terreno según el modelo de Campo Lejano de Devine y Duvall.

Como resultado al encontrar la máxima carga operante, las vibraciones obtenidas por la modelación para la fase operativa no llegan a afectar la condición de estabilidad de las estructuras aledañas, aún para el caso más crítico, que es cuando el radio de influencia a las estructuras se encuentra a 1000 metros de distancia. Los valores que se obtienen para la mayor carga operante de 650 kg, llega a generar una vibración de 2.85 mm/s a una distancia de 1000 m; el nivel de vibración se considera bajo los parámetros establecidos por la Norma Alemana DIN 4150 que sugiere hasta una velocidad de 3 mm/s y según la Normativas Peruanas de Vibraciones (Guía Ambiental para perforación y voladura), sugiere hasta una velocidad de 1 pulg/s, para obras que presentan una sensibilidad especial, tal es el caso las estructuras aledañas.

Finalmente, se recomienda una distancia límite, para que la máxima carga operante detonada no exceda el nivel de vibración según el modelo predictivo a los umbrales de vibración propuestos por la Norma empleada.

Palabras clave: vibraciones, voladura, estructura, distancia, PPV.



ABSTRACT

Currently, one of the most challenging problems faced by most mining companies in our country is related to the vibrations caused by rock blasting; which can cause annoyance and damage to both the population and housing structures. Under this context, the main objective of this thesis is to find the incidence of damage to structures and obtain a level of far-field vibrations generated by blasting, within the established parameters which would not cause damage to a structure.

The research carried out is based on vibration monitoring in the study area, considering data such as the operating load and the dynamic characteristics or attenuation laws of the terrain according to the Far Field model of Devine and Duvall.

As a result of finding the maximum operating load, the vibrations obtained by the modeling for the operational phase do not affect the stability condition of the surrounding structures, even for the most critical case, which is when the radius of influence to the structures is located 1000 meters away. The values obtained for the highest operating load of 650 kg generate a vibration of 2.85 mm/s at a distance of 1000 m; The vibration level is considered under the parameters established by the German Standard DIN 4150, which suggests up to a speed of 3 mm/s and according to the Peruvian Vibration Regulations (Environmental Guide for drilling and blasting), it suggests up to a speed of 1 inch/s. , for works that present a special sensitivity, such as the surrounding structures.

Finally, a limit distance is recommended, so that the maximum operating load detonated does not exceed the vibration level according to the predictive model at the vibration thresholds proposed by the Standard used.

Keywords: *vibrations, blasting, structure, distance, PPV.*



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

1.1.1. Diagnóstico internacional

Las vibraciones generadas por voladuras constituyen un fenómeno físico de gran relevancia en actividades mineras y de construcción a nivel mundial. Estas vibraciones, originadas por el uso de explosivos para la fragmentación de roca, pueden afectar tanto a estructuras cercanas como al medio ambiente, generando impactos negativos si no se gestionan adecuadamente (Bao, Fei y Hu, 2023).

El incremento de proyectos de infraestructura y explotación minera en diversas regiones del mundo ha generado una creciente preocupación por los efectos de las vibraciones en zonas habitadas, cuerpos de agua, ecosistemas sensibles, edificaciones de concreto armado y edificaciones patrimoniales. La ausencia de normativas homogéneas o de sistemas de control rigurosos en algunos países ha contribuido a la persistencia de riesgos estructurales y sociales asociados a esta actividad. Por ello, resulta fundamental implementar prácticas responsables, sistemas de monitoreo continuo y tecnologías adecuadas que permitan mitigar dichos impactos, garantizando así un desarrollo técnico y ambientalmente sostenible (Zhao, Wang y Liu, 2025).

1.1.2. Diagnóstico nacional

En el Perú, país con una economía fuertemente sustentada en la actividad minera, el uso de explosivos para la fragmentación de roca es una práctica extendida tanto en minería a cielo abierto como subterránea. Sin embargo, el control y monitoreo de las vibraciones generadas por voladuras aún representa un desafío significativo en términos de regulación y gestión de impactos.

Diversos estudios e informes técnicos han señalado que las vibraciones producidas por voladuras han generado conflictos sociales en regiones mineras,



principalmente debido a daños percibidos en las viviendas, edificaciones de concreto armado, molestias a la población y afectación a estructuras históricas o comunitarias. En muchas zonas rurales y urbanas cercanas a operaciones mineras, la población expresa preocupación por la frecuencia e intensidad de las vibraciones, lo que ha motivado protestas sociales y procesos administrativos contra algunas empresas operadoras. Actualmente, la normativa peruana en materia de control de vibraciones aún presenta vacíos (Minem, 2020).

Si bien el reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería establece lineamientos generales, no se han definido umbrales específicos de velocidad de partícula (PPV) o criterios técnicos para proteger edificaciones civiles o patrimoniales (D.S. N.º 024-2016-EM).

Esto evidencia la necesidad de fortalecer la regulación nacional, incorporar criterios técnicos internacionalmente reconocidos como los establecidos por la USBM (United States Bureau of Mines) e implementar tecnologías avanzadas de monitoreo y modelamiento predictivo, que permitan reducir los impactos negativos de las voladuras y mejorar la relación entre las operaciones mineras y las comunidades aledañas (Dowding, 2021).

1.1.3. Diagnóstico regional y local

Apurímac en el cuarto trimestre del 2023, cerró el año con un crecimiento económico del 6.4 % , ubicándose en la segunda región con mayor crecimiento de la macrorregión del sur del país, después de Moquegua, albergando operaciones de gran escala en el sector minero. Esta intensa actividad extractiva ha incrementado significativamente el uso de voladuras, tanto en la etapa de explotación como en las obras de infraestructura asociadas (vías de acceso, túneles, plataformas y otros.) (IPE, 2023).

En este contexto, las vibraciones generadas por voladuras se han convertido en una creciente preocupación para las diferentes comunidades. Diversos informes técnicos económicos y sociales han reportado daños percibidos en viviendas, agrietamientos en muros de adobe, afectaciones a construcciones tradicionales, y molestias en la según defensoría del pueblo (2022), población debidas al ruido y



a las ondas sísmicas. Las comunidades campesinas cercanas a las zonas de operación, como en el distrito Challhuahuacho de la provincia de Cotabambas han manifestado su disconformidad frente a estos impactos, lo que ha derivado en múltiples conflictos sociales, paros y mesas de diálogo.

A nivel técnico, se ha evidenciado la carencia de estudios previos detallados de propagación de ondas sísmicas en suelos locales y menos de monitoreo continuo de velocidad de partícula (PPV) en zonas habitadas. Esto limita la capacidad de las autoridades y empresas para anticipar o mitigar adecuadamente los efectos de las voladuras. Además, las condiciones geológicas y topográficas de Apurímac, caracterizadas por suelos heterogéneos, pendientes pronunciadas y construcciones rurales vulnerables, incrementan la sensibilidad de la región frente a este tipo de impactos (González y Ferrer, 2022).

Ante la problemática antes mencionada, resultó urgente implementar sistemas de monitoreo sísmico comunitario, fortalecer la participación ciudadana en los estudios de impacto ambiental y social (EIA), y establecer límites de vibración específicos para zonas con alta densidad poblacional o infraestructura crítica.

1.1.4. Evidencias del problema

- a) Reportes de daños en viviendas de adobe y edificaciones de concreto armado (Defensoría del pueblo, 2022).
- b) Percepción de riesgo en la población (Defensoría del pueblo, 2022).
- c) Ausencia de monitoreo permanente (Defensoría del pueblo, 2022).
- d) Falta de regulación específica (Defensoría del pueblo, 2022).

1.1.5. Causas

- a) Falta de normativas específicas sobre niveles máximos permitidos de vibración.
- b) Deficiente planificación de voladuras de rocas considerando cercanía de comunidades, sensibilidad de las edificaciones de concreto armado.
- c) Débil supervisión por los gobiernos locales, regionales y gobierno central en las voladuras de rocas y verificar las mediciones de vibraciones .
- d) Ausencia de participación ciudadana informada, no cuentan con información técnica clara ni acceso a los reportes de monitoreo de vibraciones.



- e) Construcciones vulnerables, gran parte de las edificaciones en las zonas son construidas con material tradicional de adobe.
- f) Enfoque extractivo sin visión preventiva, donde se prioriza las operaciones extractivas y generan un riesgo sobre el entorno construido y social.

1.1.6. Síntomas identificados

- a) Uno de los síntomas más frecuentes reportados por las comunidades es la aparición de grietas en muros, techos y desprendimiento de revoques.
- b) Aumento de quejas y reclamos sociales.
- c) Percepción de riesgo psicológico y estrés comunitario provocando insomnio, ansiedad y malestar emocional, especialmente en niños y adultos mayores.

1.1.7. Interrogantes objetivas de la realidad observada

Las interrogantes después de la observación de la realidad objetiva fueron:

- a) ¿Qué niveles de vibración (velocidad pico de partícula - PPV) se están generando en las zonas habitadas cercanas a las operaciones mineras, y superan los estándares internacionales recomendados?
- b) ¿Existen sistemas de monitoreo confiables, continuos y accesibles a la población para registrar las vibraciones producidas por las voladuras?
- c) ¿Cuáles son los efectos reales (estructurales, psicológicos y sociales) que estas vibraciones están produciendo en las edificaciones de concreto armado, infraestructura pública y en la salud de las comunidades?
- d) ¿Qué nivel de conocimiento técnico tienen las comunidades sobre los riesgos relacionados con las voladuras y qué mecanismos tienen para participar en el control y vigilancia de estos impactos?
- e) ¿Por qué el estado peruano no ha desarrollado aún una normativa específica que regule los niveles admisibles de vibración para construcciones civiles o patrimoniales?
- f) ¿Qué factores técnicos o económicos impiden a las empresas aplicar tecnologías más avanzadas y seguras para el diseño y control de voladuras?
- g) ¿Qué barreras existen para que la ciencia, la innovación y la investigación nacional aborden de manera prioritaria esta problemática?
- h) ¿Cómo influye la debilidad institucional y la falta de fiscalización en la persistencia del problema?
- i) ¿Qué mecanismos de compensación, reparación o diálogo se han implementado

ante los daños reportados por las comunidades, y han sido efectivos?

- j) ¿Se está considerando el contexto geotécnico, social y estructural de cada zona en el diseño de las voladuras, o se aplican criterios genéricos sin adecuación local?

1.1.8. Pronóstico

Las consecuencias de la NO solución al problema se manifiesta en los siguientes posibles sucesos:

- a) Las viviendas ubicadas en el distrito de Chalhuhhuacho, muchas de ellas de auto construcciones, seguirán deteriorándose progresivamente debido a las vibraciones, esto podría traducirse en riesgos para la integridad física de las familias, pérdida de patrimonio y aumento en los costos de reparación y reconstrucción.
- b) De mantenerse la falta de respuesta institucional y la escasa transparencia en el monitoreo de voladuras de rocas, es previsible un aumento en los conflictos entre comunidades, empresas y el estado. La percepción de daño sin atención técnica oportuna puede derivar en protestas, paralizaciones y bloqueos que afecten tanto la estabilidad social como la continuidad de los proyectos mineros.
- c) El uso inadecuado o excesivo de explosivos sin un análisis técnico adecuado del terreno puede debilitar taludes, provocar desprendimientos o generar inestabilidad geotécnica en zonas montañosas, incrementando riesgos para personas e infraestructura.
- d) La falta de políticas que promuevan la innovación en tecnologías de voladura controlada y monitoreo sísmico provocará que el país se mantenga rezagado frente a estándares internacionales, afectando la competitividad y sostenibilidad del sector extractivo peruano.

1.1.9. Control pronóstico

Las probables soluciones son:

- a) Es urgente que el estado peruano, a través del Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y otras entidades técnicas como el IGP(Instituto Geofísico del Perú) y SENCICO (Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción), formule y apruebe una normativa específica sobre límites admisibles de vibración (PPV), similar a los estándares internacionales

(USBM, DIN 4150, etc.). Esta regulación debe diferenciar entre zonas urbanas, rurales, patrimoniales y de infraestructura crítica.

- b) Se debe exigir a las empresas mineras el uso de las nuevas tecnologías como son los detonadores electrónicos programables, softwares de simulación sísmica y sistemas de monitoreo remoto en tiempo real, que permitan planificar las voladuras de rocas con precisión y reducir significativamente el impacto vibratorio en las zonas cercanas.
- c) Uno de los mecanismos más eficaces para anticipar y mitigar los impactos de las vibraciones generadas por voladuras de rocas es el uso y la aplicación de modelos matemáticos predictivos. Estos modelos permiten estimar la intensidad de la vibración (generalmente medida como velocidad pico de partícula o Peak Particle Velocity PPV) en función de variables como la carga explosiva y la distancia desde el punto de voladura.
- d) Es necesario reforzar las capacidades técnicas y logísticas del estado para fiscalizar de forma efectiva las voladuras de rocas. Esto incluye personal especializado en geotecnia, sísmica y estructuras, así como presencia permanente en zonas de alto impacto minero.
- e) Es necesario reforzar las construcciones en zonas expuestas a vibraciones por voladuras. Este refuerzo no solo previene daños materiales y pérdidas económicas, sino que también reduce el riesgo de conflicto social, mejora la calidad de vida de los habitantes cercanos y promueve una minería responsable.

1.1.10. Contextualización del problema

En el distrito de Chalhuanhuacho, las edificaciones de concreto armado se encuentran expuestas a vibraciones generadas por voladuras rocas. Estas vibraciones se originan en las actividades de explotación minera a tajo abierto desarrolladas por la empresa minera dedicada a la extracción de minerales en la zona. Durante el proceso de voladura de rocas, se generan ondas sísmicas que se propagan a través del terreno. Estas ondas sísmicas, pueden tener efectos negativos provocando micro fisuras y asentamientos diferenciales.

Con el objetivo de evaluar este impacto, se desarrolló un modelo predictivo de vibraciones, el cual busca reflejar de manera realista el comportamiento de las



voladuras en función de la distancia desde el punto de disparo, la velocidad pico de partícula (VPP) y la cantidad de explosivo utilizado. Este modelo permite estimar el nivel de vibración esperado en puntos específicos del entorno urbano, sirviendo como herramienta para la toma de decisiones en la planificación, mitigación de riesgos estructurales, inseguridad y evita tensiones sociales.

1.2 Enunciado del problema

1.2.1 Problema general

¿En qué medida se puede evaluar la efectividad de un modelo predictivo para medir y analizar las vibraciones generadas por voladuras de rocas en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuanhuacho 2023?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la magnitud de las vibraciones generadas por voladuras de rocas en zonas cercanas a edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuanhuacho 2023?
- ¿En qué medida las vibraciones medidas en campo coinciden con las vibraciones predichas por el modelo para validar su precisión, distrito de Chalhuanhuacho 2023?
- ¿Qué nivel de confiabilidad presenta el modelo predictivo para identificar zonas con mayor riesgo de afectación estructural por vibraciones, distrito de Chalhuanhuacho 2023?
- ¿Qué propuestas de mejora pueden implementarse en el modelo predictivo para optimizar la identificación y evaluación de riesgos estructurales por vibraciones en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuanhuacho 2023?

1.2.3 Justificación de la investigación

1.2.3.1 Justificación teórica

Este estudio se fundamenta en teorías como la dinámica estructural, la geotecnia, mecánica de suelos y el modelo sísmico, las cuales aportan el marco conceptual necesario para entender y predecir el comportamiento del terreno y de las estructuras ante vibraciones inducidas por voladuras. En particular, la dinámica estructural permite analizar la respuesta de edificaciones especialmente de concreto armado frente a solicitaciones dinámicas, mientras que la mecánica de

suelos y la geotecnia proporcionan los principios que rigen la propagación de ondas sísmicas en diferentes tipos de estratos.

1.2.3.2 Justificación práctica

El presente estudio es necesario para evaluar el impacto real de las voladuras mineras en las edificaciones del distrito de Chalhuanhuacho, donde existe preocupación por posibles daños en viviendas e infraestructura pública. Las comunidades locales han reportado fisuras y deterioro estructural en edificaciones, presuntamente asociados a las vibraciones provocadas por las actividades mineras.

Los resultados permitirán establecer límites seguros de operación para las voladuras de rocas.

1.2.3.3 Justificación metodológica

Metodológicamente, la investigación se justifica por el enfoque cuantitativo. Se aplicarán técnicas de monitoreo de vibraciones mediante sensores geotécnicos (sismógrafos o geófonos), combinadas con inspecciones estructurales de edificaciones cercanas a las zonas de voladura.

Esto permitirá determinar si existe una correlación significativa entre los niveles de vibración registrados y los daños estructurales observados.

1.2.3.4 Justificación técnica

Técnicamente, el estudio se justifica por la necesidad de implementar herramientas e instrumentos especializados que permitan medir las vibraciones generadas por las voladuras con precisión. Se utilizarán tecnologías como sismógrafos triaxiales y software especializado para el análisis sísmico, los cuales permitirán registrar parámetros claves como velocidad pico partícula, aceleración y la frecuencia dominante.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.1.1 Objetivo general

Evaluar la efectividad de un modelo predictivo para medir y analizar las vibraciones generadas por voladuras de rocas en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuanahuacho 2023.

2.1.2 Objetivos específicos

- Determinar la magnitud de las vibraciones generadas por voladuras de rocas en zonas cercanas a edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuanahuacho 2023.
- Demostrar en qué medida las vibraciones medidas en campo coinciden con las vibraciones predichas por el modelo para validar la precisión, distrito de Chalhuanahuacho 2023.
- Evaluar el nivel de confiabilidad del modelo predictivo en la identificación de zonas con mayor riesgo de afectación estructural por vibraciones, distrito de Chalhuanahuacho 2023.
- Establecer propuestas de mejora para el modelo predictivo con el fin de optimizar la identificación y evaluación de riesgos estructurales por vibraciones en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuanahuacho 2023.

2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.1 Hipótesis general

La aplicación de un modelo predictivo permite medir y analizar eficazmente las vibraciones generadas por voladuras de rocas, identificando su impacto en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuanahuacho 2023.

2.2.2 Hipótesis específicas

- El modelo predictivo permite estimar con precisión la magnitud de las vibraciones generadas por voladuras de rocas en zonas cercanas a edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuanahuacho 2023.
- Las vibraciones medidas en campo presentan un alto grado de coincidencia con las predichas por el modelo, lo que permite validar con precisión su capacidad predictiva, distrito de Chalhuanahuacho 2023.
- El modelo predictivo es confiable para identificar zonas con mayor riesgo de afectación estructural por vibraciones, distrito de Chalhuanahuacho 2023.
- La implementación de propuestas de mejora en el modelo predictivo optimizará la identificación y evaluación de riesgos estructurales por vibraciones en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuanahuacho 2023.

2.3 Operacionalización de variables

Tabla 1 — Operacionalización de variables

VARIABLES	DIFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍTEM/UNIDAD	INSTRUMENTO
Independiente: Vibraciones producidas por voladura de roca	Las vibraciones producidas por la voladura de roca son el efecto de la liberación rápida del esfuerzo in situ en el macizo rocoso, lo que genera ondas sísmicas que se propagan a través del medio. Estas vibraciones están compuestas por ondas de explosión y por ondas generadas por la liberación del esfuerzo, cuya frecuencia y amplitud dependen de la distancia al punto de detonación (Yang, 2022).	Las vibraciones generadas por la voladura de roca serán medidas de forma cuantitativa a través de parámetros físicos que permiten evaluar su intensidad, frecuencia, duración y propagación en el terreno. Estos datos se obtendrán mediante instrumentos especializados como sismógrafos y equipos geotécnicos, con el objetivo de caracterizar el comportamiento vibratorio y su posible impacto en estructuras cercanas.	Intensidad de vibración	Velocidad pico de partícula (PPV)	mm/s	Sismógrafo
			Propagación de onda sísmica	Distancia a la fuente	m	GPS, Equipos geotécnicos
			Frecuencia de vibración	Frecuencia dominante (Hz)	Hz	Sismógrafo
			Duración de la vibración	Tiempo de exposición a vibraciones	s	Software del sismógrafo
Dependiente: Daños a las edificaciones	Son lesiones producidas por algún tipo de sobrecarga en algún elemento de la edificación o pueda tener su origen en fuerzas externas o internas que puedan ser a su vez estructurales, constructivas o de utilización (Zhang, 2023).	Los daños a las edificaciones por las vibraciones de voladura de rocas y la predicción sísmica mediante el modelo predictivo de vibraciones por voladura.	Localización del daño	Zona afectada en la edificación	m	Plano de distribución, inspección visual
			Severidad del daño	Grado de deterioro (fisuras, grietas)	Escala cualitativa (leve, moderado, severo).	Ficha técnica de inspección, registro fotográfico
			Correlación predictiva	Coincidencia entre daño real y modelo de predicción	Porcentaje (%)	Modelo matemático predictivo de vibraciones

Tabla 2 — Matriz consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL ¿En qué medida se puede evaluar la efectividad de un modelo predictivo para medir y analizar las vibraciones generadas por voladuras de rocas en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuhahuacho 2023? PROBLEMAS ESPECÍFICOS ¿Cuál es la magnitud de las vibraciones generadas por voladuras de rocas en zonas cercanas a edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuhahuacho 2023? ¿En qué medida las vibraciones medidas en campo coinciden con las vibraciones predichas por el modelo para validar su precisión, distrito de Chalhuhahuacho 2023? ¿Qué nivel de confiabilidad presenta el modelo predictivo para identificar zonas con mayor riesgo de afectación estructural por vibraciones, distrito de Chalhuhahuacho 2023? ¿Qué propuestas de mejora pueden implementarse en el modelo predictivo para optimizar la identificación y evaluación de riesgos estructurales por vibraciones en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuhahuacho 2023?	OBJETIVO GENERAL Evaluar la efectividad de un modelo predictivo para medir y analizar las vibraciones generadas por voladuras de rocas en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuhahuacho 2023. OBJETIVOS ESPECÍFICOS Determinar la magnitud de las vibraciones generadas por voladuras de rocas en zonas cercanas a edificaciones de concreto armado., distrito de Chalhuhahuacho 2023. Demostrar en qué medida las vibraciones medidas en campo coinciden con las vibraciones predichas por el modelo para validar la precisión, distrito de Chalhuhahuacho 2023. Evaluar el nivel de confiabilidad del modelo predictivo en la identificación de zonas con mayor riesgo de afectación estructural por vibraciones, distrito de Chalhuhahuacho 2023. Establecer propuestas de mejora para el modelo predictivo con el fin de optimizar la identificación y evaluación de riesgos estructurales por vibraciones en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuhahuacho 2023.	HIPÓTESIS GENERAL La aplicación de un modelo predictivo permite medir y analizar eficazmente las vibraciones generadas por voladuras de rocas, identificando su impacto en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuhahuacho 2023. HIPÓTESIS ESPECÍFICA El modelo predictivo permite estimar con precisión la magnitud de las vibraciones generadas por voladuras de rocas en zonas cercanas a edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuhahuacho 2023. Las vibraciones medidas en campo presentan un alto grado de coincidencia con las predichas por el modelo, lo que permite validar con precisión su capacidad predictiva, distrito de Chalhuhahuacho 2023. El modelo predictivo es confiable para identificar zonas con mayor riesgo de afectación estructural por vibraciones, distrito de Chalhuhahuacho 2023. La implementación de propuestas de mejora en el modelo predictivo optimizará la identificación y evaluación de riesgos estructurales por vibraciones en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuhahuacho 2023.	VARIABLE INDEPENDIENTE Modelo predictivo de vibraciones Indicadores • Parámetros del modelo. • Carga explosiva utilizada. • Distancia entre fuente y estructura. • Diferencia entre PPV real y estimado. • Grado de ajuste del modelo. VARIABLE DEPENDIENTE Vibraciones por voladuras rocas en edificaciones de concreto armado. Indicadores • Velocidad pico de partícula (PPV) en mm/s. • Grado de fisuras, grietas, desplazamientos. • Desprendimiento de acabados. • Fisuras en muros.	TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN Tipo de investigación básica. Diseño no experimental, transversal y explicativo POBLACIÓN Y MUESTRA Población: Se encuentran ubicadas en un radio de 5700.00 m con 50 puntos de monitoreo alrededor de la unidad minera en la cual existe un total de 3,267 edificaciones. Muestra: en esta investigación considero 30 puntos de monitoreos de vibraciones por voladura de roca. TÉCNICAS Muestreo no probabilístico.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 Antecedentes

a) Antecedentes internacionales

Según Biessikirski y Jakóbczyk (2025), en el artículo de investigación realizado por la Facultad de Ingeniería Civil y gestión de Recursos de la Universidad AGH de Cracovia (Polonia), se analizó los efectos de voladuras de baja frecuencia en una mina a cielo abierto. Para realizar la medición, se usaron sensores como un geófono triaxial (equipo de medición de vibraciones) y galgas extensométricas (equipo medir deformaciones o tensiones). Los resultados mostraron que las vibraciones causadas por las voladuras se obtuvieron resultados de frecuencias en promedio entre 5 Hz y 13 Hz, lo cual fue verificado mediante análisis de descomponer la señal de vibraciones en bandas de frecuencia más manejables y espectros de respuesta en terreno, estructura y el entorno

También se encontró una correlación clara entre las vibraciones que se registraron y las tensiones registradas en el tiempo, con picos de energía que coincidían, sin importar en qué parte de la mina se realizaba la voladura. Este hallazgo fue confirmado usando el método de análisis Matching Pursuit. Además, se identificó una relación lineal fuerte entre la deformación y la velocidad pico de partícula (VPP) en dirección vertical y sin ser afectada por la distancia a la fuente de voladura. En cambio, en las direcciones longitudinal y transversal del registro de vibraciones, esta relación sí dependía de la distancia.

Por último, los espectros obtenidos mostraron características consistentes, lo que sugiere que podrían utilizarse como índices de referencia para futuras voladuras realizadas con un retardo de 25 milisegundos.

Según Kononov (2021), en un artículo científico reciente sobre el monitoreo vibroacústico en minería a cielo abierto, los autores propusieron métodos avanzados para el análisis de señales sísmicas generadas por voladuras. El enfoque del estudio se centró en la adquisición y procesamiento de señales sísmicas, es decir, aquellas ondas generadas por las explosiones que se propagan a través del terreno y pueden impactar

estructuras cercanas. Para ello, se utilizaron sensores de alta sensibilidad capaces de registrar tanto las ondas sísmicas como los componentes acústicos, lo que permitió una interpretación más detallada del comportamiento dinámico del sistema de voladura.

El estudio resalta la utilidad de estos registros en el diagnóstico del rendimiento de las voladuras, permitiendo identificar desviaciones respecto al diseño planificado, tales como detonaciones prematuras o distribuciones irregulares de carga. Mediante el análisis espectral y temporal de las señales, fue posible establecer patrones repetitivos y caracterizar el entorno vibracional.

En conjunto, esta metodología se presenta como una herramienta eficaz para el control de calidad y la prevención de daños, especialmente valiosa para la detección temprana de riesgos y la mejora de la eficiencia y seguridad en las operaciones mineras.

Según Carlos (2021), en su artículo “Monitoreo y modelamiento de vibraciones para la evaluación y optimización de las voladuras en desarrollo horizontal” elaborado por William Adamson y Juan Díaz. Indica, que los efectos de vibración pueden dañar estructuras aledañas, que producen fracturas nuevas o extendiendo y dilatando fracturas existentes, teniendo el conocimiento sobre las vibraciones producidas por las voladuras permitirán estimar la probabilidad de perjuicios que pueden ocasionar. Indicando que el empleo adecuado del monitoreo de vibraciones producto de voladuras es un procedimiento que nos ayudarán para poder examinar al detalle el proceso de la voladura construyendo una muy buena herramienta para el diagnóstico, ya que la adecuada interpretación del registro de vibraciones nos permitirá determinar el grado de interacción entre las variables de una voladura, también nos ayudará obtener los niveles de velocidad pico partícula absoluto.

Según Barbosa (2021), en su tesis de investigación titulada “Análisis de la afectación por vibraciones de la cantera La Roca en zonas cercanas a poblaciones”, el autor se propuso identificar los parámetros que influyen en el control de las vibraciones generadas por voladuras. Para ello, se realizaron voladuras controladas utilizando equipos como sismógrafos, con los cuales se obtuvieron registros de vibraciones en tres direcciones. A partir de los datos recolectados, se analizaron los parámetros clave que permiten evaluar las vibraciones generadas dentro de la cantera “La Roca”.

Asimismo, se aplicaron normas internacionales, específicamente la DIN 4150, para determinar si las voladuras ejecutadas se encontraban dentro de los límites permisibles.



La investigación concluye que los niveles de sismicidad registrados no superaron los valores establecidos por dicha normativa. En particular, se determinó que al utilizar 0,49 kg de explosivo emulín en un taladro ubicado a una distancia de 15,75 metros de edificaciones cercanas, no se produjo afectación estructural alguna.

Según Nathan (2022), en su tesis de investigación titulada “El efecto relativo de las dimensiones de carga en la atenuación de la vibración elástica y los conceptos de energía sísmica inducida por explosiones” realizó un estudio para determinar si la geometría de carga tiene un efecto estadísticamente significativo sobre cualquiera de las tres características importantes de una vibración de explosión y cuantificar el efecto. Para ello empleó una matriz de prueba de campo, se llevó un análisis de regresión múltiple en la muestra. Con los resultados que se mostró en el estudio, se concluye que las variables como la distancia a la detonación, el peso de la carga de explosivo utilizado y la geología son variables estadísticamente significativas ya que estas producen un impacto en las vibraciones de la explosión.

Según Rouse (2021), en su trabajo de investigación titulado “The Relative Effect of Charge Dimensions on Elastic Vibration Attenuation and Blast-Induced Seismic Energy Concepts”, presentado en el año 2015 ante la Universidad de Ciencia y Tecnología de Missouri, Estados Unidos, Nathan Thomas Rouse analiza los efectos de las vibraciones generadas por voladuras y sus implicaciones en estructuras cercanas. El autor destaca que, con el paso del tiempo, los ingenieros han dedicado esfuerzos significativos para comprender y mitigar los posibles efectos negativos de dichas vibraciones, empleando una variedad de métodos de evaluación que van desde cálculos de campo relativamente simples hasta simulaciones computacionales complejas.

Rouse plantea que actualmente existen herramientas empíricas que permiten evaluar los efectos de las vibraciones inducidas por voladuras mediante un enfoque estadístico. Estas herramientas se utilizan para analizar el efecto relativo de diversas variables sobre la amplitud, frecuencia y duración de la forma de onda de vibración. A partir del análisis de datos provenientes de múltiples pruebas experimentales, se identifican las variables estadísticamente significativas que influyen en las características de las vibraciones, lo cual resulta fundamental para reducir su impacto ambiental y estructural.

Según Kahrman (2021), en su investigación titulada “The Analysis of Blast-Induced Ground Vibration at Can Open-Pit Lignite Mine”, presentada en la International Scientific Conference en Turquía en el año 2021, se aborda el problema de las



vibraciones inducidas por voladuras, uno de los principales impactos ambientales asociados a las operaciones mineras. El estudio plantea que este tipo de vibraciones representa una preocupación frecuente en diversas actividades como minería, canteras, construcción civil, excavación de túneles, instalación de tuberías y construcción de presas, donde el uso de explosivos es inevitable.

Las vibraciones generadas por las voladuras constituyen un desafío significativo para la industria minera, ya que pueden provocar daños en infraestructuras cercanas y generar quejas en comunidades aledañas. En este contexto, la predicción precisa de los componentes de vibración adquiere un papel clave para minimizar dichos impactos.

Durante el estudio, se realizó un análisis estadístico de los datos recopilados en campo, a partir del cual se propuso un criterio normativo de daño basado en una evaluación de riesgo. Esta norma, desarrollada a partir de los datos obtenidos, tiene como finalidad guiar las futuras actividades de excavación en el país, permitiendo que se realicen de forma más eficiente y con una reducción significativa de los problemas ambientales asociados

b) Antecedentes nacionales

Según Cruz (2022), en su artículo “Medición y análisis de vibración ambiental para la caracterización dinámica del suelo en el área metropolitana de Arequipa” indica que se llevó a cabo mediciones de vibración ambiental en cinco estaciones distribuidas estratégicamente en el área metropolitana de Arequipa, con el objetivo de caracterizar la respuesta dinámica del suelo y su comportamiento frente a movimientos sísmicos. Utilizó métodos pasivos como la autocorrelación espacial (SPAC) y el cociente espectral empírico (H/V) para analizar los registros obtenidos. Los resultados mostraron que el periodo predominante del suelo en las diferentes estaciones varió entre 0.3 y 1.2 segundos, indicando una variabilidad significativa en las propiedades dinámicas del subsuelo. Además, se observó un aumento notable en el índice de amplificación espectral en ciertas zonas, evidenciando áreas con mayor susceptibilidad a amplificación sísmica.

Este estudio destacó la utilidad de estas técnicas de vibración ambiental para la microzonificación sísmica, facilitando la identificación de sectores con condiciones geotécnicas y dinámicas del suelo que pueden influir en la severidad de los daños ante un sismo. Los datos obtenidos aportan información clave para el diseño estructural y la planificación urbana en Arequipa.



Según González (2022), en su investigación “Metodología para la predicción de las vibraciones del terreno inducidas por voladuras” aplico la metodología para la predicción de vibraciones inducidas por voladuras en un caso real, en donde se realizaron voladuras de prueba para recopilar datos de velocidad pico de partícula (VPP). Se registraron 25 mediciones de VPP en distintas distancias entre 50 y 300 metros de la fuente de explosión. Los resultados mostraron que la velocidad pico de partícula máxima registrada fue de 48 mm/s, mientras que el valor promedio fue de 32 mm/s con una desviación estándar de 8 mm/s. La modelación numérica permitió predecir niveles de vibración con un error promedio menor al 10 % respecto a los valores medidos en campo. Se encontró una correlación significativa ($r = 0.87$) entre la distancia a la fuente y la disminución de la VPP, confirmando la atenuación de la energía vibratoria conforme aumenta la distancia.

Los valores predichos se compararon con los límites establecidos en normativas, donde el 92% de las vibraciones estimadas se mantuvieron por debajo de los valores admisibles para evitar daños estructurales, validando la eficacia del método propuesto. Asimismo, se identificaron áreas con riesgo potencial donde se recomendaron ajustes en la carga explosiva y en los tiempos de retardo para mitigar efectos adversos.

Según Gutiérrez (2021), en su tesis “Reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras en el bypass 179. Compañía minera Kolpa S.A.” en el año 2019. Nos indica sobre la reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladura reportó que las vibraciones disminuyeron en un 35% tras la implementación del monitoreo y modelamiento. Se analizaron 50 registros de vibraciones correspondientes a diferentes tipos de explosivos, identificándose que el uso de explosivos con menor potencia redujo la velocidad pico de partícula (VPP) promedio de 60 mm/s a 38 mm/s, manteniéndose dentro de los límites seguros para la estabilidad del macizo. Además, los modelos predictivos desarrollados alcanzaron un nivel de precisión del 92% en la estimación de la atenuación de vibraciones, lo que permitió optimizar la selección y dosificación de explosivos para minimizar daños estructurales.

Según Choroco (2021), en su tesis “Análisis de la máxima carga operante en las vibraciones a campo lejano generadas por voladura, en minera cerro negro s.a” elaborado por Fredy Bertier Cruzado Mendoza y Kevien Alexander Diaz Choroco en el año 2019 nos afirma que los efectos de las vibraciones originadas por las voladuras de



rocas a estructuras es uno de los mayores problemas que enfrentan la mayoría de empresas mineras en el país, por ello se basan en encontrar la máxima carga operante para que las vibraciones obtenidas por la modelación para la fase operativa no llegue a afectar la condición de estructuras aledañas enfocándose en la Norma Alemana DIN 4150 que sugiere hasta una velocidad de 3 mm/s y según la Normativas Peruanas de Vibraciones (Guía Ambiental para perforación y voladura), indicando hasta una velocidad de 1 pulg/s, para obras que presentan una sensibilidad especial.

Según Peña (2023), en su tesis “Análisis de vibraciones generadas por voladuras en macizos rocosos en el tajo Ferrobamba y su impacto en la estabilidad de taludes” indica el análisis de las vibraciones generadas por voladuras en macizos rocosos en el tajo Ferrobamba, con el objetivo de evaluar su impacto en la estabilidad de los taludes finales y de trabajo. Se recopilieron 30 registros de vibración en puntos estratégicos del talud, utilizando geófonos instalados a diferentes distancias entre 50 y 200 metros de la fuente de explosión. El estudio aplicó el modelo matemático de Devine para estimar la velocidad pico de partícula (VPP) y su atenuación con la distancia, obteniendo parámetros específicos para la zona: amplitud $k = 115,4$ y coeficiente de decaimiento $b = 1,52$. Las velocidades máximas registradas no superaron los 55 mm/s, lo cual fue considerado dentro de límites seguros para la estabilidad del macizo rocoso. Los resultados indicaron que el control adecuado de las vibraciones mediante el diseño de voladuras es fundamental para evitar daños estructurales y deslizamientos en los taludes. Se recomendaron medidas específicas para ajustar la carga y los tiempos de retardo en las voladuras, con el fin de minimizar la energía transmitida al macizo rocoso y garantizar la estabilidad de la operación minera.

c) Antecedentes locales

Según Villavicencio (2022), en su tesis “Modelamiento predictivo de vibración durante la etapa de construcción del proyecto minero las Bambas” tuvo el motivo de analizar el impacto de la vibración por voladura en un modelo predictivo en las construcciones de caminos pioneros tramo 01 en la unidad minera. Para ello siguió la metodología aplicada, explicativa, experimental, cuyo diseño fue el de campo (experimental). La muestra de estudio fueron las vibraciones generadas por las detonaciones en la etapa de construcción, generó 34 registros. De acuerdo con el análisis documental se recogió los datos mediante el Geófono. De acuerdo con los resultados se evidenció que el modelamiento predictivo dependerá de las vibraciones que van a producirse durante la actividad de la voladura



debido a la onda sísmica en el macizo rocoso durante la explosión de los taladros en un rango de tiempo rápido. El VPP formulado por DEVINE a la aplicación no lineal dio amplitud $k = 109,83$ y decaimiento $b = 1,646$, además en las voladuras de las minas no dio vibraciones $> 50,8$ mm/s. por ende es fundamental contar con una distancia segura en viviendas (139 m) y edificaciones (100 m) con la zona de voladura.

Según Mujica (2022), en su tesis “Mejoramiento de la voladura utilizando emulsión gasificada (MEQ73), su razón principal es realizar optimización de la actividad de voladura en el tajo “Ferrobamba de Las Bambas” mediante utilización explosivos cuya emulsión gasificada que mejora los proyectos de voladura, a través de los procesos de fragmentación. Se emplea la metodología aplicada no experimental, nivel descriptivo. En el cual se registraron 40 eventos de prueba: 20 voladuras con explosivo convencional y 20 con emulsión MEQ73, la fragmentación promedio mejoró en un 25 %, pasando de un tamaño medio de fragmento de 15 cm a 11 cm, La emisión de humos mostró una reducción del 40 %, lo que redujo la necesidad de ventilación posterior, el tiempo de carguío por taladro se disminuyó en un 15 %, pasando de 8 a 6.8 minutos en promedio, el consumo de explosivo se redujo en un 10 %, reflejando ahorro operativos significativos.

Según Cáceres (2023), en su tesis “Control y análisis de las vibraciones generadas por voladuras en la zona de inestabilidad 104, fase 3 del tajo Ferrobamba, Chalhuhuacho”, se enfocó en el control y análisis de las vibraciones generadas por voladuras en la zona de inestabilidad 104, correspondiente a la fase 3 del tajo Ferrobamba, ubicado en Chalhuhuacho. Donde se llevaron a cabo mediciones en campo cercano utilizando geófonos colocados a distancias menores a 150 metros de la zona de voladura para capturar las ondas sísmicas inducidas. Durante el proceso, se registraron un total de 28 eventos de voladura, con velocidades pico de partícula (VPP) máximas que alcanzaron los 45 mm/s en las mediciones más cercanas. Los análisis evidenciaron que las vibraciones presentan una atenuación significativa conforme aumenta la distancia a la fuente, siguiendo un modelo similar al de Devine con parámetros ajustados al contexto local y los resultados, se propuso un rediseño del patrón de voladura con el fin de minimizar la energía transmitida hacia las zonas inestables, contribuyendo a reducir el riesgo de deslizamientos. Además, se establecieron recomendaciones para mantener distancias mínimas de seguridad de 120 metros para evitar afectaciones en el macizo rocoso y asegurar la estabilidad del talud.



Según Pacheco (2022), en su investigación se enfocó en la optimización de los tiempos de retardo en las voladuras realizadas en las zonas Fase III y V del tajo Ferrobamba, con el objetivo de controlar y minimizar las vibraciones inducidas en las paredes del talud. Para ello, se efectuaron 15 voladuras de prueba con desfases de retardo que variaron entre 15 y 40 milisegundos, buscando la generación de pulsos de vibración elemental controlados. Se emplearon geófonos para la captura de datos de vibración en puntos ubicados entre 50 y 180 metros de las zonas de voladura. Los resultados mostraron que tiempos de retardo optimizados (entre 25 y 30 ms) permitieron reducir la velocidad pico de partícula (VPP) en un promedio del 18 % en comparación con tiempos de retardo mayores o menores, disminuyendo las vibraciones máximas a niveles cercanos a 40 mm/s en las zonas críticas.

3.2 Marco teórico

3.2.1 Modelo predictivo de vibraciones

Según Zhu (2021), indica que los modelos predictivos de vibraciones son herramientas matemáticas que fueron diseñadas para estimar la intensidad del movimiento de las vibraciones en el terreno, las cuales fueron generados por fuentes artificiales, como voladuras de rocas en minería, construcción de túneles o demoliciones controladas. Estos modelos matemáticos permiten que se pueda anticipar los niveles de vibración que podrían afectar infraestructuras cercanas, con el objetivo de minimizar daños estructurales, proteger la salud humana y cumplir con normativas ambientales y de seguridad.

En contextos como la minería a cielo abierto o subterránea, estos modelos matemáticos se enfocan principalmente en calcular la velocidad pico de partícula (PPV), uno de los indicadores más utilizados para representar la magnitud de las vibraciones transmitidas por el suelo. La PPV se estima generalmente a través de ecuaciones empíricas o semiempíricas, que relacionan variables como la carga explosiva, la distancia entre el punto de detonación y el receptor, y, en algunos casos, las características geológicas del terreno.



3.2.1.1 Parámetros del modelo

Según Geociencias (2024), son los valores numéricos que definen el comportamiento de una función matemática o fórmula predictiva que permite estimar la magnitud de las vibraciones generadas por voladuras. En el caso de modelos empíricos como el modelo matemático de Devine o el de USBM (United States Bureau of Mines), los parámetros más comunes son:

- **Constante de amplitud (k):** Representa el nivel inicial de energía o intensidad vibracional esperada en el punto de detonación.
- **Coefficiente de atenuación (b):** Describe cómo disminuye la vibración a medida que aumenta la distancia entre la fuente de la explosión y la estructura receptora.

Estos parámetros se obtienen generalmente mediante ajuste estadístico (regresión) de los datos reales de campo (PPV vs. distancia/carga) y permiten construir un modelo predictivo que puede estimar la velocidad pico de partícula en diferentes condiciones.

3.2.1.2 Carga explosiva

Según Zhu (2021), la carga explosiva es la cantidad de material energético introducido y detonado dentro de un taladro perforado con el fin de fragmentar el macizo rocoso en operaciones de voladura de rocas. Esta carga, generalmente medida en kilogramos (kg), representa una de las variables más importantes en el diseño de voladuras, ya que influye directamente en la generación y propagación de las vibraciones sísmicas.

El manejo adecuado de la carga explosiva es crucial, ya que una sobrecarga puede generar niveles de vibración que exceden los límites seguros para edificaciones cercanas, mientras que una carga insuficiente podría resultar en una voladura ineficiente o incompleta.

3.2.1.3 Distancia entre la fuente y estructura

Según Kahriman y Ersoy (2022), la distancia entre la fuente de voladura y la estructura se refiere al espacio lineal (en metros) que separa el punto de detonación de explosivos del punto receptor, como una edificación, talud, o instalación sensible. Esta distancia es una de las variables más influyentes en la propagación y atenuación de las vibraciones sísmicas generadas por voladuras.



En los modelos predictivos, esta variable es utilizada para estimar la velocidad pico de partícula (PPV). Generalmente, existe una relación inversa entre distancia y nivel de vibración: a mayor distancia, menor intensidad vibratoria. Esta relación se expresa en ecuaciones empíricas, como el modelo de Devine o el modelo del USBM, en los cuales la distancia aparece como parte del denominador en una fórmula de tipo potencia.

3.2.1.4 Diferencia entre PPV real y estimado

Según Yilmaz y Unlu (2023), en el contexto de los modelos predictivos de vibraciones, la diferencia entre la PPV real y la PPV estimada representa una medida de la precisión del modelo matemático utilizado. La PPV (Velocidad Pico de Partícula) es el parámetro más común para cuantificar la intensidad de una vibración en el terreno generada por una voladura, y se mide en milímetros por segundo (mm/s).

El valor estimado se obtiene a partir de ecuaciones predictivas (como las de Devine, USBM, Langefors o Kuznetsov), mientras que el valor real se registra mediante instrumentación sísmica de campo, como geófonos o sismógrafos.

La diferencia entre ambos valores puede ser evaluada a través de métricas estadísticas como:

- El error absoluto medio (MAE),
- El error cuadrático medio (RMSE),
- El coeficiente de determinación (R^2),
- Y el porcentaje de error relativo.

Este análisis permite validar el modelo y ajustar los parámetros (como el coeficiente de amplitud y el de atenuación) para mejorar su exactitud y adaptabilidad a las condiciones geológicas específicas del sitio.

3.2.1.5 Grado de ajuste del modelo

Según Zho (2022), el grado de ajuste del modelo se refiere a la capacidad de un modelo predictivo para representar con precisión los datos observados en la realidad. En el caso de la predicción de vibraciones por voladura, este grado se evalúa comparando los valores estimados de la velocidad pico de partícula (PPV) con los valores reales obtenidos mediante medición en campo.

Para medir este ajuste se emplean comúnmente herramientas estadísticas como:



- R^2 (Coeficiente de determinación): Indica el porcentaje de variabilidad de los datos reales que puede ser explicado por el modelo. Un R^2 cercano a 1 indica un alto grado de ajuste.
- Error medio absoluto (MAE): Promedio de las diferencias absolutas entre los valores reales y estimados.
- Raíz del error cuadrático medio (RMSE): Mide la magnitud promedio del error.
- Error porcentual absoluto medio (MAPE): Expresa el error en porcentaje relativo.

Un buen grado de ajuste implica que el modelo puede ser utilizado con confianza para estimar vibraciones en condiciones similares a las del sitio de estudio, lo que es crucial para la toma de decisiones en seguridad estructural y en el diseño de voladuras controladas.

3.2.2 Vibraciones por voladura de roca.

Según López (2021), se realizó el análisis e interpretación de varios monitoreos de vibraciones, así como también el nivel de daños producidos al macizo rocoso. Las vibraciones en la etapa de producción de un yacimiento minero son provocadas por los explosivos utilizados en la voladura por el aumento de la presión en un taladro lo que provoca tensiones dinámicas en el área detonada, producen ondas de tensión propagándose en el taladro. Esta onda vibratoria va disminuyendo su intensidad en referencia a la distancia, esta energía que transmite la detonación de la roca se debe distribuir en una superficie cada vez mayor.

Las ondas sísmicas que afectan al macizo rocoso producen un movimiento oscilatorio en las partículas que lo componen, alterando su estado de reposo y así va traspasando energía a la próxima en forma sucesiva, cada vez que va transmitiendo de energía se va perdiendo o disminuyendo un poco de la misma energía, entonces quiere decir que la intensidad del movimiento va disminuyendo cuando la onda se aleja de la fuente de explosión. Finalmente, estas partículas van a volver poco a poco a su estado de reposo (LOPÉZ, 2021).

3.2.2.1 Geotecnia

Según Geobiental (2021), la geotecnia es la rama de la ingeniería civil que estudia el comportamiento mecánico de los suelos y rocas y su interacción con las estructuras construidas sobre o dentro de ellos. Su objetivo principal es garantizar la estabilidad,



seguridad y funcionalidad de obras civiles como edificaciones, carreteras, túneles, presas, cimentaciones y taludes.

La geotecnia integra conocimientos de mecánica de suelos, mecánica de rocas, hidrogeología, geología estructural y geofísica, y aplica estos principios para caracterizar el terreno, evaluar riesgos geotécnicos y diseñar soluciones adecuadas en función de las condiciones locales del subsuelo.

El comportamiento del terreno es fundamental en el diseño de cualquier obra. Factores como la resistencia al corte, la capacidad de carga, la compresibilidad, la permeabilidad y la susceptibilidad a vibraciones o movimientos (como deslizamientos o licuefacción) deben ser cuidadosamente evaluados.

En proyectos donde se realizan voladuras controladas, como en minería o túneles, la geotecnia juega un papel clave para determinar cómo se propagan las ondas sísmicas generadas por los explosivos, cómo afecta esto al terreno circundante y cómo se debe diseñar la excavación o sostenimiento para evitar daños estructurales o colapsos.

a) Aplicaciones geotécnicas comunes

- Estudios de mecánica de suelos y rocas
- Diseño de cimentaciones superficiales y profundas
- Estabilidad de taludes
- Análisis de asentamientos y subsidencia
- Contención de excavaciones
- Evaluación del impacto de vibraciones en estructuras cercanas
- Diseño de túneles, presas, y estructuras enterradas

b) Geotecnia y vibraciones por voladura

Según Yepes (2021), En contextos como la minería a cielo abierto o subterránea, la geotecnia desempeña un papel fundamental en el análisis de la propagación de la energía liberada por los explosivos a través del suelo y la roca. Este análisis permite evaluar cómo las vibraciones generadas pueden afectar estructuras cercanas, ya sea por la propagación directa de las ondas sísmicas o por fenómenos de resonancia del terreno. Para este propósito, se utilizan comúnmente modelos empíricos como la distancia escalada y la velocidad pico de partícula (PPV), que permiten estimar el nivel de vibración en función de variables como la carga explosiva y la distancia al punto de monitoreo.



3.2.2.2 Macizo rocoso

Según López (2021), indica que el macizo rocoso es un medio discontinuo y heterogéneo, compuesto por la combinación de diversas estructuras geológicas como planos de estratificación, juntas, pliegues, fallas, entre otros y bloques de matriz rocosa. La caracterización del macizo rocoso permite realizar un análisis detallado de su calidad, lo cual es fundamental para prevenir accidentes por caída de rocas, controlar la estabilidad del terreno y garantizar condiciones seguras durante las operaciones mineras o de ingeniería civil.

Al evaluar las características del macizo rocoso, se consideran aspectos como el grado de fracturamiento, la presencia y orientación de familias estructurales, la condición hidrogeológica (presencia de agua), los esfuerzos in situ, entre otros factores relevantes. En el campo de la mecánica de rocas, el macizo rocoso constituye el principal objeto de estudio y material de trabajo. Como se mencionó anteriormente, este está formado por bloques de roca intacta y múltiples discontinuidades, las cuales suelen agruparse en familias estructurales.

El comportamiento del macizo rocoso dependerá tanto de las propiedades de la roca intacta como de las características de sus discontinuidades. La influencia relativa de cada componente variará en función de su naturaleza geológica, grado de alteración, condiciones del entorno y tipo de intervención en el medio.

3.2.2.3 Dinámica estructural

Según Bao, Fei y Hu (2023), en la presente sección se considera conveniente definir los términos fundamentales empleados en la dinámica estructural, con el objetivo de facilitar la comprensión del análisis desarrollado. Esto resulta especialmente importante cuando el sistema estructural se encuentra en actividad como resultado de la acción de fuerzas externas.

a) Dinámica

Es una parte de la mecánica que estudia la relación existente entre las fuerzas y los movimientos que producen. La dinámica se divide en dos partes:

- Cinemática, que es el estudio de la geometría del movimiento y se usa para relacionar el desplazamiento, la velocidad, aceleración y el tiempo sin hacer referencia a la causa del movimiento.
- Cinética, que es el estudio de la relación existente entre las fuerzas actuando sobre un cuerpo, su masa y su movimiento; la cinética se usa para predecir el

movimiento causado por fuerzas conocidas o calcular las fuerzas necesarias para producir un cierto movimiento.

b) Fuerza

Para que exista fuerza debe existir por lo menos dos cuerpos que se encuentren interactuando entre sí, lo cual no significa que los cuerpos estén en contacto, por ejemplo, la tierra y la luna se atraen; pero no están en contacto, más si interactuando.

c) Fuerzas internas

Son las que mantienen juntas a las partículas que forman un sólido rígido. Si el sólido rígido está compuesto estructuralmente de varias partes, las fuerzas que mantienen juntas a las partes componentes se definen también como fuerzas internas; entre las fuerzas internas más conocidas, tenemos: la tensión y la compresión.

d) Segunda ley de Newton

Si la fuerza resultante que actúa sobre una partícula es distinta de cero, la partícula tendrá una aceleración directamente proporcional al módulo y dirección de la fuerza resultante e inversamente proporcional a la masa de dicha partícula.

e) Peso

Es la fuerza gravitatoria con la cual un cuerpo celeste atrae a otro, relativamente cercano a él.

f) Concepto de masa

Para muchos, la masa de un cuerpo es la cantidad de materia que lo forma; hasta cierto punto este concepto es aceptable. Por ejemplo: la masa de un lapicero es la cantidad de material (plástico, metal, tinta) que lo forma.

g) Masa gravitacional (mg)

La masa gravitacional es una medida de cuánta fuerza ejerce un objeto debido a la gravedad. Se expresa como:

$$mg=m \cdot g \dots (1)$$

donde:

- m = masa del cuerpo (en kilogramos, kg)
- g = aceleración de la gravedad (aproximadamente 9.81 m/s^2 en la Tierra)



h) Fuerza inercial

Como los vectores de inercia miden la resistencia que las partículas ofrecen cuando tratamos de ponerlas en movimiento o cuando tratamos de cambiar las condiciones de su movimiento, a estos vectores se les llama con frecuencia fuerzas de inercia.

i) Equilibrio dinámico

El equilibrio dinámico se refiere al estado de un sistema cuando, a pesar de estar en movimiento, todas las fuerzas y momentos que actúan sobre él están equilibrados, y por lo tanto no hay aceleración neta. En otras palabras, el cuerpo puede estar en movimiento, pero ese movimiento es uniforme y constante (ni se acelera ni se desacelera).

3.2.2.4 Tipos de suelos

Según Fema 450 (2022), la respuesta de un suelo ante una onda sísmica ya sea de origen natural (terremoto) o inducido (voladura), depende directamente de sus propiedades físicas, tales como la densidad, rigidez, estructura interna y contenido de humedad. En función de estas características, el suelo puede amplificar, atenuar o transmitir con mayor rapidez las vibraciones, lo que influye de manera significativa en el nivel de afectación que pueden sufrir las edificaciones cercanas entre los tipos de suelos tenemos.

a) Suelos duros o rocosos

Los suelos duros o rocosos están compuestos principalmente por materiales geológicos consolidados como rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias compactas, tales como granito, basalto, cuarcita o caliza densa. Estos materiales poseen alta resistencia mecánica, baja porosidad y elevada velocidad de propagación de ondas sísmicas, lo cual los hace más estables frente a sollicitaciones dinámicas.

b) Suelos medianamente compactos o densos

Este grupo incluye materiales como gravas, arenas densas, limos poco plásticos o suelos de origen volcánico parcialmente cementados. Son suelos no consolidados, pero con una estructura granular bien compactada que les otorga resistencia moderada a alta y una buena capacidad para disipar energía sísmica.

c) Suelos blandos o sueltos

Los suelos blandos o sueltos incluyen arcillas de baja resistencia, limos orgánicos, arenas sueltas, turbas y rellenos no controlados. Estos materiales presentan baja capacidad portante, alta compresibilidad y, en muchos casos, elevada saturación de agua, lo cual los convierte en suelos vulnerables frente a ondas sísmicas y vibraciones por voladura.

Tipo de suelo	Descripción	Velocidad de onda de corte (Vs) m/s	Riesgo de amplificación
Tipo A	Roca dura	> 1500	Muy bajo
Tipo B	Roca moderadamente dura	760 – 1500	Bajo
Tipo C	Suelo denso, arcillas duras	360 – 760	Moderado
Tipo D	Arenas, limos medianos	180 – 360	Alto
Tipo E	Suelos blandos, rellenos	< 180	Muy alto

FUENTE: National earthquake hazards reduction program (Fema, 2022)

Figura 1 — Clasificación según normas internacionales

3.2.2.5 Interacción dinámica suelo estructura

Según Seed y Idriss (2023), la interacción suelo estructura se refiere al conjunto de efectos cinemáticos e inerciales que se producen en la cimentación de una estructura como resultado de los movimientos y fuerzas inducidos durante un sismo. Estos efectos se originan debido a la deformabilidad (o flexibilidad) del suelo sobre el cual se apoya la edificación o en el que se encuentra parcialmente enterrada.

Dicha interacción modifica la respuesta sísmica de la estructura, provocando, entre otras consecuencias, un alargamiento de sus períodos naturales de vibración y un incremento del amortiguamiento. Esto ocurre, por un lado, a causa de fenómenos cinemáticos como el cabeceo, giro y desplazamiento de la cimentación; y por otro, debido a efectos inerciales como la radiación de ondas desde la cimentación hacia el suelo circundante.

La interacción suelo estructura está estrechamente vinculada con el proceso de diseño. El tipo y diseño de la cimentación influyen directamente en la magnitud de las fuerzas inducidas en la superestructura, y a su vez, estas fuerzas condicionan el diseño del sistema estructural. Este principio cobra especial relevancia en la práctica de la ingeniería, ya que, en muchos casos, el diseño de la estructura y el de la cimentación

son realizados por equipos o entidades distintas, lo que exige una coordinación cuidadosa para garantizar la seguridad y el desempeño adecuado del conjunto estructural.

a) Definición de interacción suelo estructura

Si el movimiento y respuesta de un punto cualquiera ubicada en la entre cara suelo-estructura, difiere del movimiento que ocurriría en este punto si la estructura no estuviese presente (campo libre], entonces se dice que existe Interacción suelo estructura Esta es una definición muy general: hay Interacción si la entre cara se mueve o se distorsiona en forma diferente de la superficie

correspondiente en el campo libre. En esta definición están incluidos la traslación vertical (z), horizontales (x , y), el cabeceo recto a los ejes horizontales (x , y) y el giro respecto a un eje vertical (z).

Primero las diferencias en el movimiento del terreno que provienen de la rigidez del sistema estructura-cimentación como si no tuviera masa, lo cual se denomina interacción cinemática, porque es causada fundamentalmente por la geometría y rigidez de la cimentación, las diferencias consisten en general en un filtrado de los componentes traslacionales del movimiento en cuestión (disminución de su amplitud en el intervalo de frecuencias altas y medias) y en la modificación de componentes rotacionales y torsionales⁸². Estos efectos parcialmente motivan que en los reglamentos se estipulen excentricidades accidentales, que generan torsiones en planta aun en edificios completamente simétricos.

En un segundo paso se consideran las fuerzas de inercia que se generan por la vibración de las masas de la cimentación y de la estructura, que da lugar no sólo a elementos mecánicos dentro de los distintos miembros que las componen, sino también a tres fuerzas y tres momentos referidos a dos ejes horizontales y uno vertical en la base. Si el suelo no es muy rígido, tales fuerzas y momentos producen deformaciones que modifican el movimiento en la cimentación. Se habla en este caso de interacción inercial. Una manera de tomar en cuenta este tipo de interacción consiste en modificar las características dinámicas de la estructura.

3.2.2.6 Normativas para el control de vibraciones

Según Barbosa (2021), En la mayoría de los países europeos y en otras naciones desarrolladas, existen normativas específicas destinadas a regular las vibraciones generadas por diversas actividades, incluyendo las voladuras en operaciones mineras. Estas regulaciones permiten a las empresas mineras determinar si las vibraciones



producidas por sus voladuras en una zona determinada pueden causar daños a las estructuras cercanas.

Entre las normativas más utilizadas a nivel internacional se destacan la norma alemana DIN 4150 y la norma estadounidense USBM RI 8507. Los niveles de vibración registrados en el área de estudio se comparan con los valores límite establecidos por estas normativas, con el objetivo de verificar si las vibraciones exceden los umbrales permitidos y, por tanto, podrían representar un riesgo de daño estructural.

a) Norma peruana

Como única norma nacional se tiene a la Guía Ambiental para la Perforación y Voladura en Operaciones Mineras publicada por el MINEM en 2021, donde en su segundo capítulo especifica los límites de vibraciones de acuerdo con el tipo de suelo, las características de la estructura y edad de la misma. Esta norma, en concordancia con la Ley de Transmisividad, propone una distancia escalada (Ds), la cual es utilizada como factor para limitar la carga máxima operante sin monitoreo sísmico.

Distancia (D) desde el área de voladura en pies	Velocidad de partícula pico máxima permitida (Vmax) para vibración de tierra en pulgadas/segundo	Factor de distancia a escala por aplicación sin monitoreo sísmico (Ds)
0 a 300	1,25	50
301 a 5000	1,00	55
5001 a más	0,75	65

FUENTE: MEN, 2022

Figura 2 —Velocidad pico partícula máxima

Esta norma también menciona los ajustes que se deben dar a determinada distancia escalada para los monitoreos de vibraciones realizados con geófonos triaxiales. De esta manera se evitan daños en las estructuras (cercanas o lejanas) al superar los límites de acuerdo con la VPP y a la Velocidad de propagación de la Onda P en el macizo rocoso.

Velocidad de Partícula Pico (pulgadas/segundo)	Efectos en masa de roca
Menos de 10	No hay fractura de rocas intactas
De 10 a 15	Puede ocurrir rebanado tensional menor; pueden ocurrir algunas caídas de rocas
De 25 a 100	100 Rajaduras tensionales fuertes y cierta rajadura radial; fracturas
Más de 100	Rotura completa de masas de rocas

FUENTE: MEN, 2022

Figura 3 — Efectos de la VPP sobre el macizo rocoso

Como se puede observar, por un lado, esta norma asume que el daño sobre el macizo rocoso es igual para todos los tipos de roca, sin tomar en cuenta la verdadera velocidad de propagación ni los límites de elasticidad de las rocas. Por otro lado, se tiene que los límites se encuentran en pulgadas por segundo y al ser convertidos en milímetros por segundo, la unidad más usada en este tipo de mediciones, proponen valores muy elevados y no se tiene en consideración el material con el que están fabricadas las construcciones. Debido a estos factores es que se considera que esta guía se encuentra desfasada y requiere de ajustes más conservadores a la realidad actual de la minería superficial en el Perú.

b) Normativas internacionales

Los límites permisibles establecidos por estas normas internacionales están en base a patrones ambientales, con el fin de mejorar el control de vibraciones los que tienen que ser respetados por las empresa minera o empresas de construcción, donde se utiliza explosivos.

Los límites permisibles de vibraciones establecidos por normas internacionales son una herramienta clave para el control ambiental y técnico de las actividades industriales que generan vibraciones, como la minería y la construcción con explosivos. Su aplicación rigurosa permite minimizar riesgos, proteger a la población y garantizar la sostenibilidad de los proyectos. Las empresas responsables deben incorporar estos criterios como parte esencial de su planificación, ejecución y monitoreo ambiental.

Norma	País / Institución	Parámetro clave	Límite típico (PPV)	Aplicación principal
DIN 4150-3	Alemania	Velocidad Pico de Partícula (PPV)	5-50 mm/s según tipo de estructura	Protección de edificios residenciales e históricos
USBM RI 8507	EE. UU. (U.S. Bureau of Mines)	PPV vs. frecuencia dominante	5-12.5 mm/s	Evaluación de daños por voladuras en minería
BS 7385-2	Reino Unido	PPV y duración de vibración	15-50 mm/s	Evaluación de daños estructurales y estéticos
ISO 4866:2010	ISO (Internacional)	Guías de medición y evaluación	Variable (según contexto)	Metodología estandarizada para medir y evaluar vibraciones
UNE 22-381-93	España	PPV y clasificación de estructuras	3-50 mm/s	Prevención de daños en edificios por vibraciones terrestres
SANS 10108	Sudáfrica	PPV y tipo de edificación	6-50 mm/s	Minería a cielo abierto, áreas urbanas adyacentes

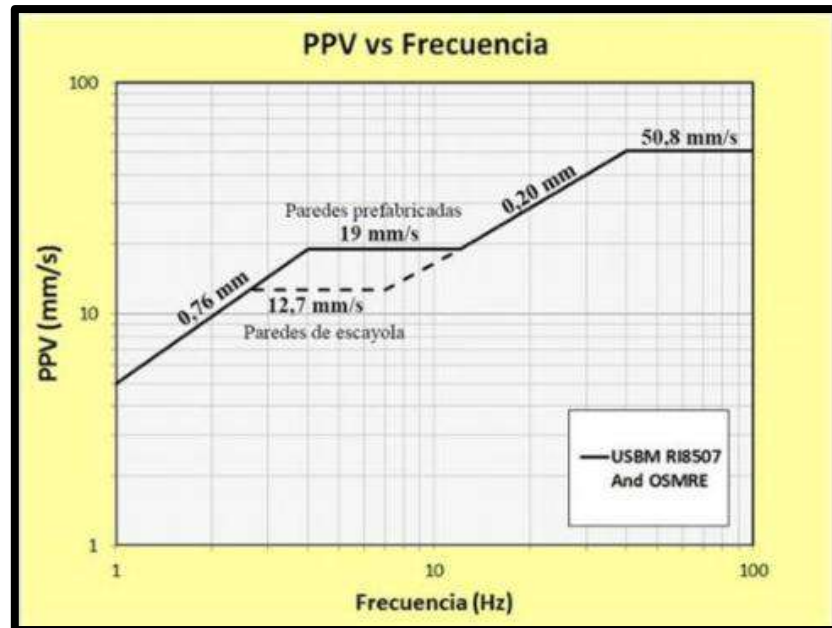
FUENTE: Análisis de la afectación por vibraciones de la roca, 2021

Figura 4 — Resumen de normas internacionales existentes

- **United State Bureau of Mines (USBM)**

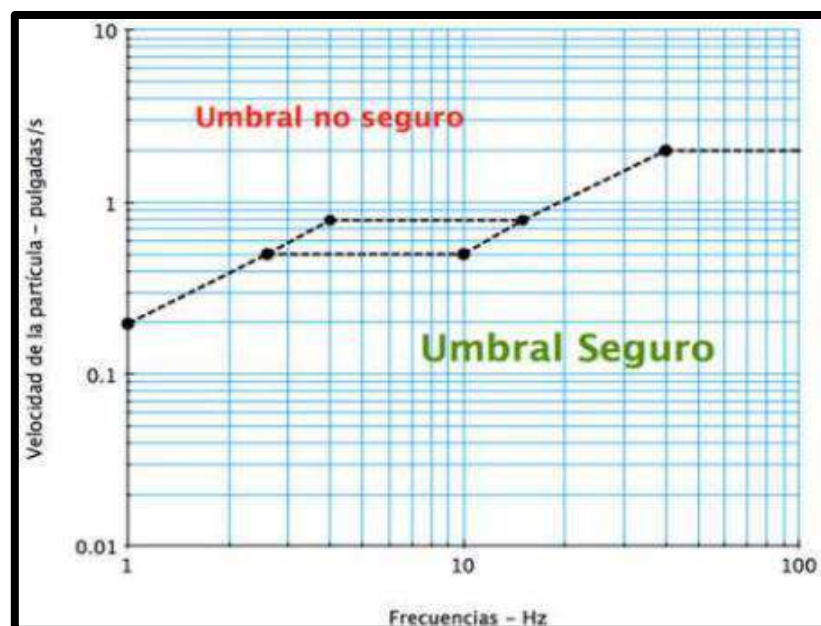
según Bureau y Mines (2022), la USBM es una de las organizaciones líderes que investiga los efectos de una voladura, presentan un gráfico donde se muestra la relación de la velocidad de la partícula y el nivel de la frecuencia (USBM, 1980 – RI 8507).

Esta norma USBM – RI 8507 indica que la velocidad máxima de partículas (PPV) es de 0,75 in/s o 19 mm/s en un intervalo de frecuencias de 4 a 12 Hz estas recomendadas para edificios con interiores de yeso prefabricado; la velocidad máxima de partículas es 0,5 in/s o 12 mm/s en un intervalo de frecuencias mayores a 40 Hz estas para edificios con recubrimiento de escayola, por ultimo para frecuencias mayores a 40 Hz el límite permitido es 2 in/s (50,8 mm/s), ver Figura 6 y 7. Es decir, la norma nos indica que el daño está relacionado entre la velocidad pico de partícula versus el nivel de frecuencia, estableciendo límites donde posiblemente van a ocurrir daños mayores (USBM, 1980).



FUENTE: U.S. Bureau of mines, 2022

Figura 5 — Niveles de seguridad para vibraciones norma USBM RI



FUENTE: U.S. Bureau of mines, 2022

Figura 6 — Variables que influyen en las vibraciones terrestres

- **Normativa Alemana para Vibraciones en Edificaciones (DIN-4150)**

Según Bureau y Mines (2022), la norma DIN 4150 es una normativa técnica alemana que establece criterios para evaluar los efectos de las vibraciones en edificaciones y personas. Es ampliamente reconocida y utilizada a nivel

internacional, especialmente en proyectos de minería, construcción, voladuras controladas, excavaciones y trabajos con maquinaria pesada.

Parte de la norma	Título	Aplicación principal
DIN 4150-1	Efectos sobre personas en estructuras	Evalúa la percepción humana de vibraciones
DIN 4150-2	Efectos a largo plazo sobre estructuras	Estudia vibraciones continuas y sus impactos
DIN 4150-3	Efectos a corto plazo sobre estructuras	<i>La más usada:</i> evalúa daño potencial en edificios por vibraciones de corta duración (voladuras, maquinaria, etc.)

FUENTE: U.S. Bureau of mines, 2022

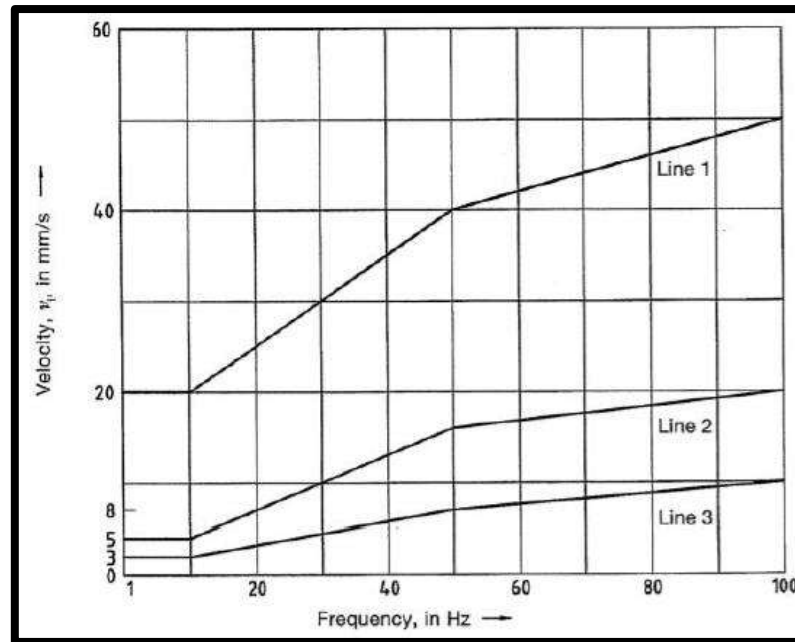
Figura 7 — Partes principales de la norma DIN 4150

Esta norma establece límites permisibles de vibración para evitar daños estructurales. Evalúa la velocidad pico de partícula (PPV) en mm/s medida sobre la base de una estructura o en su punto más afectado.

Tipo de estructura	Frecuencia (Hz)	Límite de velocidad PPV (mm/s)
Edificaciones tipo 1 (históricas, frágiles)	1–10	3 mm/s
Edificaciones tipo 2 (residenciales)	10–50	5 mm/s (hasta 8 en algunos casos)
Edificaciones tipo 3 (industriales robustas)	>50	Hasta 50 mm/s

FUENTE: U.S. Bureau of mines, 2022

Figura 8 — Partes principales de la norma DIN 4150



FUENTE: U.S. Bureau of mines, 2022

Figura 9 — Curva para los valores especificados

Finalmente, es preciso recordar que los instrumentos que se empleen para realizar las mediciones deben cumplir las condiciones detalladas en la norma DIN 4150-1 y deben seguir los procedimientos detallados en la norma DIN 4150-2.

3.2.2.7 Voladura de rocas.

Según López (2021), es la acción de triturar la roca por medio de la utilización de explosivos, estos explosivos realizan una reacción química que originan gases a altas temperaturas y presiones, lo que genera que la roca se fragmente.

3.2.2.8 Variables que considerar en las vibraciones por voladura.

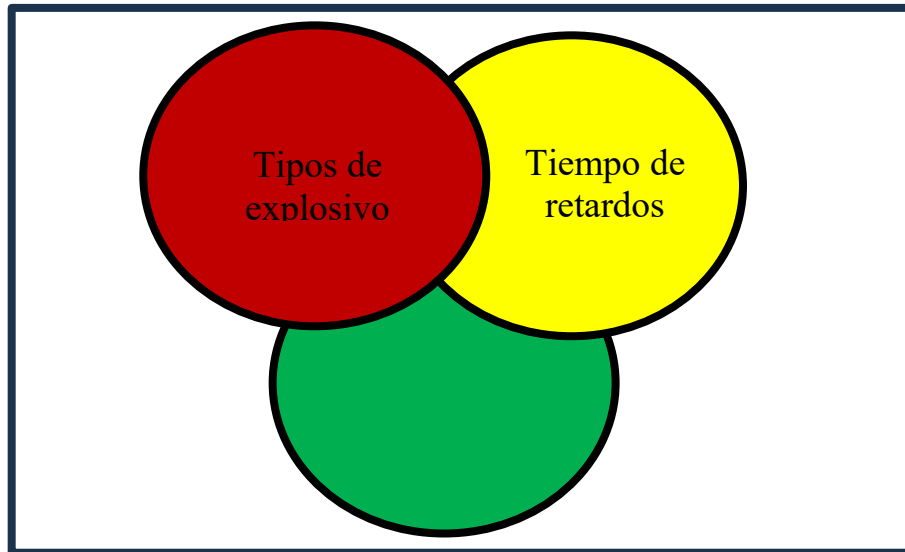
Según López (2021), existen variables que afectan las características de una vibración que influyen sobre los resultados de la voladura del macizo rocoso, estas se dividen en dos grupos:

a) Variables controlables

Según Rodolfo (2022), indica las variables controlables tienen una mayor significancia como son el tiempo de los retardos, la cantidad de la carga de los explosivos, el tipo de explosivos utilizados, la distribución de los explosivos, geometría de las voladuras y el diseño de secuencia de salida.

b) Variables no controlables

Según Rodolfo (2022), dentro de esta categoría se encuentran las características del macizo rocoso, geología, clima, frecuencia sísmica, presencia de agua, condiciones del terreno etc. Es una variable que no se puede controlar.



FUENTE: Manual de perforación y voladura (López, 2021)

Figura 10 — Variables que influyen en las vibraciones terrestres

3.2.2.9 Ondas de vibraciones por voladura

Según Kim, Lee, y Park (2022), una cierta cantidad de explosivo que está confinado en un taladro perforado al momento de la detonación va a generar una onda de choque, debido a que la presión se eleva y esta va a actuar sobre las paredes del taladro y se transmiten a la roca circundante como onda de choque, luego a cierta distancia del taladro como una onda de compresión. Es necesario conocer los diferentes tipos de ondas y como éstas se van comportando en el macizo rocoso.

3.2.2.10 Tipos de onda de cuerpo

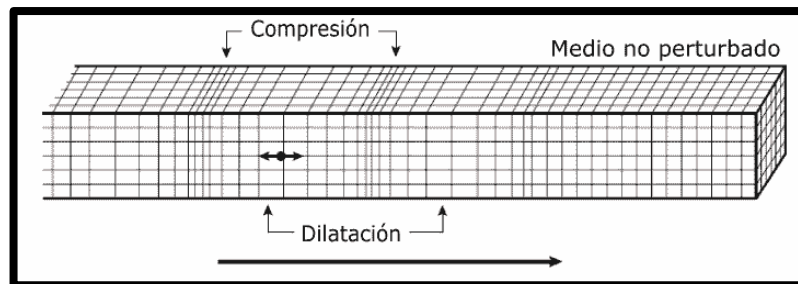
Según Zhu (2021), para un estudio de vibraciones producidas por una voladura, se necesita la propagación de las ondas en la zona elástica alrededor del taladro, ya que las ondas dentro del taladro son ondas elásticas, las cuales transmiten baja energía; es necesario indicar que la zona elástica son las zonas donde se van a producir las fracturas producto de los esfuerzos de tracción.

Las ondas elásticas se clasifican en dos grupos:

a) **Ondas internas**

- **Ondas longitudinales o principales (ondas P)**

Según Zhu (2021), la onda P es la que se transporta a mayor velocidad, esta onda deforma volumétricamente la roca en la misma dirección de su propagación.

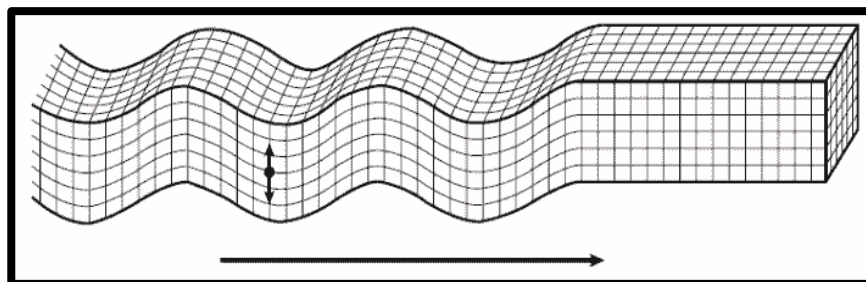


FUENTE: Problemática de las vibraciones en las voladuras, 2021

Figura 11 — Movimiento de partículas a través de la onda P

- **Ondas transversales (Ondas S)**

Según Zhu (2021), después de la onda primaria (onda P), se realiza la propagación de la onda S, esta onda genera una deformación en la roca a diferencia de la onda P su deformación es perpendicular a la dirección de su propagación, esta onda no va a modificar el volumen de los materiales a su paso.



FUENTE: Problemática de las vibraciones en las voladuras, 2021

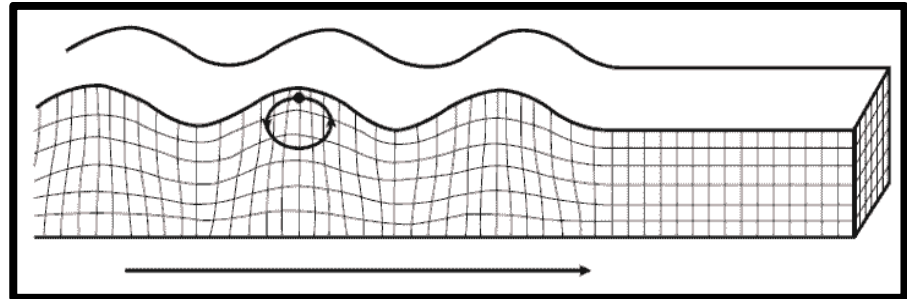
Figura 12 — Movimiento de las partículas a través de la onda S

b) **Ondas superficiales**

Según Zhu (2021), se denomina ondas de superficie porque viajan por la interfaz de dos medios es decir la superficie del terreno, que separa la roca del aire. Estas ondas se clasifican en:

- **Onda rayleigh (ondas R)**

Según Zhu (2021), esta onda en cuanto a la velocidad de propagación esta es el 90% de la velocidad de propagación de las ondas S aproximadamente, esta onda tiene mayor amplitud y longitud que las ondas P y S.

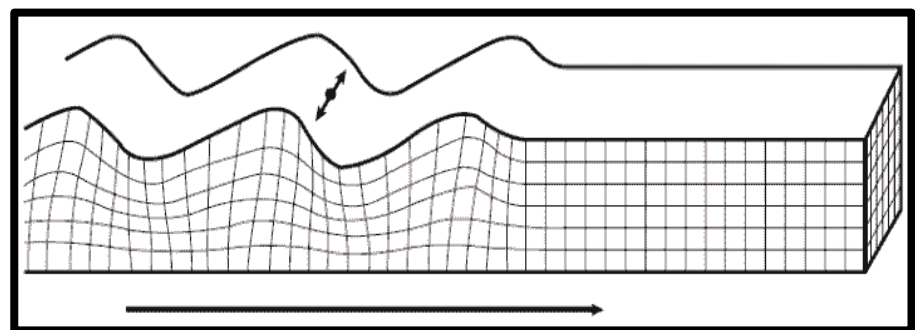


FUENTE: Problemática de las vibraciones en las voladuras, 2021

Figura 13 — Movimiento de partículas a través de la onda R

- **Onda love (onda L)**

Según Zhu (2021), en cuanto esta onda su oscilación es similar al de las ondas rayleigh, elíptica, pero en un plano horizontal.



FUENTE: Problemática de las vibraciones en las voladuras, 2021

Figura 14 — Movimiento de las partículas a través de la onda L

3.2.2.11 Medición de vibraciones

Esta técnica permite examinar en detalle el proceso de voladura, medir las velocidades pico de las partículas generadas en función de la cantidad de explosivo cargado en los taladros y evaluar la eficiencia del diseño de la voladura. Asimismo, facilita el análisis de la interacción entre cargas adyacentes y el rendimiento general del proceso (Famesa, 2021).

El monitoreo también permite utilizar los datos del sismógrafo para evaluar y

analizar el nivel de daño potencial provocado por las vibraciones. Generalmente, se emplean geófonos o transductores triaxiales ubicados a cierta distancia del punto de detonación. La señal captada por estos sensores es transmitida a través de un cable hasta el equipo sismógrafo, que la registra. Todos los datos recolectados se almacenan en archivos digitales, los cuales posteriormente son exportados y analizados para obtener conclusiones precisas sobre el comportamiento de la voladura (Famesa, 2021).

3.2.2.12 Velocidad pico de partícula crítica

Según Zhu (2021), indica que cuando se tienen vibraciones con niveles altos, estas causan mayores daños en el macizo rocoso, lo que puede producir nuevas fracturas o extender fracturas que ya existen. En este contexto la vibración podría considerarse como el esfuerzo o como la deformación del macizo rocoso.

Fórmula N° 01:

$$\varepsilon = \frac{PPV}{V_p} \quad (1)$$

Donde:

- ε : Deformación inducida
- **PPV**: Velocidad pico partícula
- **V_p**: Velocidad de la onda primaria u onda P

La ecuación anterior asume que la elasticidad de la roca es lineal mediante la cual la vibración se propaga y se realiza una estimación razonable de donde se obtiene la relación entre una roca fracturada y las vibraciones inducidas producto de la voladura.

Según Hooke se obtiene la velocidad pico de partícula crítica con la siguiente ecuación:

fórmula N° 02:

$$V_{PPC} = \frac{\sigma t \times V_p}{E} \quad (2)$$

Donde:

- **VPPc:** Velocidad pico partícula crítica
- **σ_t :** Resistencia a la tracción de la roca
- **Vp:** Velocidad de la onda primaria u velocidad de la onda P.E

Según Scherpenisse (2021), indican que según la ecuación proporcionada de Hooke se realizó estudios en diferentes minas, para poder estimar las velocidades de partículas críticas (VPPc) en algunas rocas, estas estimaciones se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 3 — Velocidades de partículas críticas estimadas

Tipo de roca	Resistencia a la tracción	Velocidad de onda P	Módulo de Young (Gpa)	Velocidad de partícula crítica (mm/s)
Cuarzo-1	14.6	5102	55.5	1286
Brecha-1	7.3	4298	30.2	1037
Milonita	1.9	2940	14.6	380
Ox-1	6.7	4373	35.2	836
Ox-2	7.2	4804	44.4	774
Cuarzo-2	8.4	4207	42.7	823
Brecha-2	3.9	4041	39.3	401
Andesita-1	14.9	4975	67.3	1100
Dionita	13.2	4650	48.6	1260
Brecha-3	11.3	4650	58.3	900
Porfido-1	6.7	3829	31.2	823
Porfido-2	5.1	3661	46.6	401

FUENTE: Monitoreo y modelamiento de vibraciones para el control y evaluación del daño por voladuras (Scherpenisse, 2021)

Una vez que se puede obtener el valor de VPPc, según Mackenzi (2022), indica que en relación con la PPVc a partir de esta se podrá estimar que el 25% del valor de VPPc o velocidad pico de partícula crítica, será suficiente para poder iniciar la extensión de fracturas preexistentes. Lo que Cameron indica es que el nivel de $\frac{1}{4}$ de PPVc lo utilizaremos como un límite de control para los diseños de carguío de explosivos, de esta manera las voladuras podrán minimizar los

niveles de daño al macizo rocoso, las cuales se muestran en la siguiente tabla de criterio de daños al macizo rocoso:

Tabla 4 — Criterios de daños utilizados según Mackenzi (1993)

CRITERIO DE DAÑO	TIPOS DE DAÑO
Mayor a $4 \times VPP_{crítico}$	Intenso fracturamiento
Mayor a $1 \times VPP_{crítico}$	Creación de nuevas fracturas
Mayor a $1/4 \times VPP_{crítico}$	Leve propagación fracturas pre- existentes

FUENTE: Manual de perforación y voladura (López, 2021)

3.2.2.13 Macizo rocoso.

Según López (2021), el macizo rocoso es un medio discontinuo y heterogéneo, compuesto por la unión de diversas estructuras geológicas, como planos de estratificación, juntas, pliegues, fallas, entre otros, junto con bloques de matriz rocosa. La caracterización del macizo rocoso permite realizar un análisis que facilita determinar su calidad, lo cual es fundamental para reducir el riesgo de accidentes por caída de rocas, controlar su estabilidad, y, en consecuencia, garantizar una operación segura y eficiente.

En el ámbito de la mecánica de rocas, el macizo rocoso constituye el principal objeto de estudio y el material sobre el cual se diseñan y ejecutan las operaciones. Como se mencionó anteriormente, está compuesto por una combinación de bloques de roca intacta y múltiples discontinuidades, que generalmente se agrupan en familias estructurales. Por lo tanto, su comportamiento mecánico dependerá tanto de las propiedades de la roca intacta como de las características de las discontinuidades, así como del grado de alteración presente en el medio. La interacción entre estos elementos definirá la respuesta del macizo frente a esfuerzos inducidos por excavaciones u otras intervenciones.

3.2.2.14 Predicción de vibraciones inducidas por voladuras.

Según Villavicencio (2022), menciona que diversos investigadores han abordado el problema de la predicción de vibraciones en el terreno, proponiendo fórmulas que, aunque difieren en sus enfoques, permiten estimar los niveles de vibración a partir de la correlación entre la velocidad máxima de partícula (PPV), la distancia entre el punto de detonación y el punto de medición, y la carga máxima de explosivo detonada por retardo.

Fórmula para estimar niveles de vibración.

Fórmula N° 03:

$$V = K \sqrt{\frac{Q}{D^{1.5}}} \quad (3)$$

Donde:

- V= Vibración pico (mm/s).
- K= Factor de transmisión de roca.
- Q= Máxima carga explosiva detonada (kg).
- D= Distancia desde la explosión hasta el punto de medición (m).

Fórmula de langerfors se obtuvo a partir de investigación sobre voladura en granito duro, pero el factor de transmisión k permite considerar diferentes tipos de rocas y condiciones de confinamiento.

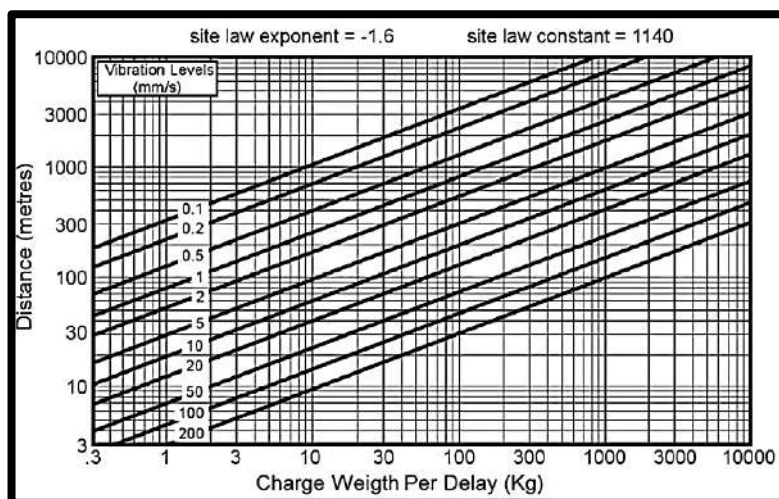
Fórmula N° 04:

$$V = K \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-e} \quad (4)$$

Donde:

- V= Vibración pico (mm/s).
- K= Factor de sitio
- e= Exponente de sitio.
- D= Distancia desde la explosión hasta el punto de medición (m).
- Q= Máxima carga explosiva detonada (kg).

$$\frac{D}{\sqrt{Q}} = \text{Distancia escalada (raíz cuadrada)}$$



FUENTE: (Revista el ingenio, 2021)

Figura 15 — Gráfico predictivo

3.2.2.15 Límites para evitar daños.

Según Zhang (2023), las normas internacionales más relevantes en el manejo de vibraciones en el macizo rocoso son las mostradas en la tabla siguiente.

Tabla 5 — Normatividad internacional en el manejo de vibraciones

País de procedencia	Nombre de reglamentación	Fecha de expedición
Alemania	DIN 4150-3	1999
Internacional	ISO 4866	1990
Francia	Circulaire du 23/07/86	1986
Francia	arrêté 22/09/94	1994

a) Internacional- ISO 4866

La ISO, Organización Internacional para la Estandarización, por medio del comité técnico de vibraciones mecánicas y de choque crearon el estándar ISO 4866: “Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement an evaluation of their effects on buildings” en 1990.

La ISO 4866 no presenta valores indicativos de vibraciones, debido a que esta fue creada para establecer principios básicos de medición y procesamiento de señales, con el fin de evaluar los efectos de las vibraciones en estructuras.

La medición de niveles de vibración según este estándar tiene como propósitos:

- 1) reconocimiento de problemas donde se reporte vibraciones en edificaciones, que causen consternación en los ocupantes y sea necesario evaluar niveles que garanticen la integridad estructural,
- 2) monitoreo de control donde niveles de vibración máximos permitidos han sido establecidos por alguna agencia y requieran se reportados,
- 3) Documentación de cargas dinámicas que hayan sido consideradas en el diseño estructural, donde se realizan mediciones para verificar la predicción y reajustar parámetros en nuevos diseños.

b) Alemania – DIN 4150-3

El instituto de Normalización Alemana o DIN (Deutsches Institut für Normung) ha publicado varios criterios de niveles máximos de vibración, el criterio 4150-3 fue expedido en 1999. La norma DIN especifica un método para medir y evaluar los efectos de las vibraciones en estructuras diseñadas principalmente para cargas estáticas al igual que proporciona valores guía donde dicha norma establece que al cumplirse no dará lugar a daños que tengan un efecto adverso sobre la capacidad de servicio de las estructuras.

La norma se encuentra dividida en dos categorías según el tipo de fuente, dividiéndose en vibraciones breves o de corta duración o en vibraciones prolongadas, además de clasificar el tipo de edificaciones en tres categorías para las cuales desarrolla una línea de umbral para cada una denominadas de la siguiente manera:

Línea 1: Edificios utilizados con fines comerciales, edificios industriales y edificios de diseño similar

Línea 2: Viviendas y edificios de diseño y/o ocupaciones similares.

Línea 3: Estructuras que, debido a su particular sensibilidad a la vibración, no pueden clasificarse bajo las líneas 1 y 2 y son de gran valor intrínseco (por ejemplo, edificios bajo orden de conservación).

Donde para cada categoría indica valores guía de la velocidad máxima siendo estas también relacionadas con diferentes rangos de frecuencia.



Tabla 6 — Niveles de daño según DIN 4150

Tipo de edificación	FRECUENCIA(Hz)		
	<10 (Hz)	10 - 50 (Hz)	50 – 100 (Hz)
	Velocidad (mm/s)	Velocidad (mm/s)	Velocidad (mm/s)
Tipo I: Edificio público o industriales	20	20 - 40	40 - 50
Tipo II: Edificios y viviendas	5	5 - 15	15 - 20
Tipo III: Edificios históricos o por su construcción son sensibles a la vibración	3	3 - 8	8 - 10

FUENTE: Normas internacionales de vibraciones, 2021

c) Circulaire du 23/07/86

La circular publicada el 22 de octubre de 1986 en Francia relativa a las vibraciones mecánicas emitidas al medio ambiente por instalaciones clasificadas para la protección del medio ambiente tiene dos propósitos principales los cuales el primero es especificar la información fundamental relativa a los fenómenos de las vibraciones mecánicas y el segundo establecer los estándares para la emisión de vibraciones mecánicas a cumplir y la metodología para evaluar los efectos sobre el medio ambiente.

El principal estándar establecido dentro de la circular basa en valores límites de velocidad de partícula versus la frecuencia observada, donde hacen referencia a los valores por debajo de los cuales las probabilidades de afectación en las construcciones son prácticamente insignificantes en la frecuencia considerada.

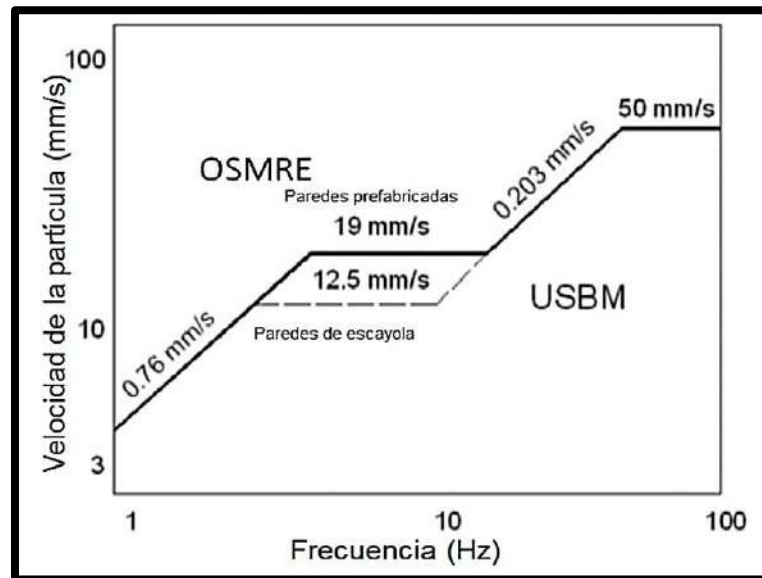
Los valores límite de la velocidad se dividen en dos dependiendo el tipo de vibración registrada: primero para vibraciones continuas o equivalentes que son las fuentes que emiten pulsos a intervalos relativamente cortos sin limitar el número de emisiones y segundo para las vibraciones pulsadas repetidas las cuales se presentan con espacios entre impulsos mayores a un segundo y emisiones limitadas.

d) Arrêté 22/09/94

Este es en realidad un decreto francés que hace énfasis en las operaciones de cantera y en las instalaciones de procesamiento de materiales para cantera. Este decreto se encuentra dividido en cinco capítulos donde se explica desde los arreglos preliminares y la conducta que se debe llevar en la zona minera hasta los registros que se deben seguir para evitar la contaminación. En esta descripción del decreto se hace énfasis en el control de las vibraciones por medio de mediciones, debido a que se prevé en el presente estudio evitar daños en las edificaciones por los efectos de las ondas producidas.

Se determina por el decreto que las operaciones llevadas a cabo no deben dar lugar a vibraciones mecánicas que puedan comprometer la salud o la seguridad de las zonas aledañas o ser un obstáculo para su tranquilidad, por lo cual especifica que la fuente no puede generar en las construcciones vecinas velocidades de partícula ponderadas superiores a 10 mm/s medidos a lo largo de los tres ejes principales de la construcción. En las normas y literatura disponible, los límites admisibles para evitar daños en las estructuras son establecidos utilizando, principalmente, los criterios de velocidades y aceleraciones máximas de partícula, aunque también existen límites asociados con desplazamientos y deformaciones máximas impuestos a los sistemas estructurales. En el año 1980, las oficinas de minas y de reclamación y aplicación de minería superficial de los Estados Unidos (USBM y OSMRE, por sus siglas en inglés) publicaron la norma RI-8507 para la respuesta estructural y daños producidos por las vibraciones inducidas por voladuras en minería superficial.





FUENTE: (Revista ingenio, 2021)

Figura 16 — Criterio para evitar daños

Esta norma recomienda una velocidad máxima de partícula de 0,75 in/s (19 mm/s) en el intervalo de frecuencias de 4 a 12 Hz, para edificios con paredes interiores prefabricadas; y 0,5 in/s (12,5 mm/s) para edificios con recubrimiento. Por otro lado, para frecuencias mayores a 40 Hz, el límite máximo admisible es 2 in/s (50 mm/s).

3.2.2.16 Geología

a) Geología estructural

Según Tello (2021), el proyecto está regionalmente ubicada y enmarcado en la margen sur de la deflexión de Abancay (12° a 14° Latitud Sur), esta estructura se caracteriza por evidenciar un cambio en el “trend” (tendencia) de los Andes Peruanos pasando de NO-SE a E-O por más de 200 km como consecuencia de la colisión diferencial de la Placa de Nazca con el margen litoral pacífico peruano predisponiendo su morfología actual.

Según Tello (2021), el proyecto se encuentra dentro de este contexto geológico regional, está localizado en el cinturón porfirítico/skarn Cu-Mo-Au denominado Skarn belt Andahuaylas-Yauri situado al sur este del Perú, en una zona de anomalía atribuida a la orogénesis inca del eoceno al oligoceno temprano (M. Brookes, 2005); este cinturón metalogénico está hospedado principalmente en el batolito de Andahuaylas-Yauri, el cual presenta intrusiones múltiples de composición calcoalcalina. Las principales deformaciones en la región, causantes del fallamiento y plegamiento son asociadas a la fase Inca.

b) Geomorfología e hidrogeología

Según Tello (2021), las características geológicas de la zona determinan un tipo de fisiografía en la que la roca aflorante, en muchos casos puede ser parte del yacimiento de cumbres redondeadas con presencia de detritos finos formados por el meteorismo de las heladas, lluvias o por el intenso calor durante el día. Estas características se pueden apreciar en laderas suaves y agrestes, como pequeñas plataformas, que dan origen al nacimiento de ojos de agua o a la formación de bofedales. Por lo que en las partes altas y planas existen cinco lagunas que conforman un acuífero, cuya caracterización es de suma importancia. La calidad del acuífero en mención, dados los afloramientos aguas abajo, puede determinar su uso adecuado.

c) Geología regional

Según Tello (2021), el proyecto está asociado a sistemas tipo pórfido, ubicados en la parte sureste del Perú. Esta franja metalogenética está controlada por el batolito Andahuaylas-Yauri del Eoceno-Oligoceno, que se ha emplazado en unidades sedimentarias del mesozoico, siendo la de mayor importancia la formación ferrobamba (Cretáceo inferior a superior). Las rocas intrusivas del batolito, en contacto con las calizas ferrobamba, originaron metamorfismo de contacto y en algunos lugares cuerpos de skarn con mineralización de Cu (Mo-Au). El batolito Andahuaylas-Yauri se ha emplazado al sur de la “deflexión de Abancay”, con lineamientos de dirección NO-SE, NE-SO y otros que fueron generados principalmente por la Orogenia Andina.

d) Geología local

Según Tello (2021), el área de estudio presenta rocas de naturaleza ácida (granodiorita) a intermedia (monzonita) que instruye a las rocas sedimentarias y entre ellas a la caliza del cretáceo inferior superior (Formación Ferrobamba).

Los cuerpos de skarn asociados son irregulares y están constituidos por granates, piroxenos y magnetita. Las monzonitas asociadas a los yacimientos de Ferrobamba, Chalcobamba, Charcas, Sulfobamba y Azuljaja presentan alteración potásica con biotita secundaria, feldespato potásico y magnetita (zona de mayor temperatura); gradando a una alteración propilitica con epidota, clorita, pirita y trazas de calcopirita hacia los bordes. En general, estas intrusiones



En la columna estratigráfica mostrada en la Figura 10, se tiene las diferentes formaciones geológicas encontradas en la zona.

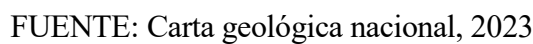


Figura 17 — Criterio para evitar daños

Según Tello (2021), en el área aflora una potente secuencia de horizontes calcáreos de la Formación Ferrobamba, constituidos por niveles de calizas con chert, calizas fosilíferas y bioclásticas, calizas impuras con clásticos finos, así como horizontes masivos y laminados. Los estratos presentan, en general, azimuts entre 100° a 130° y buzamientos variables de 50° a 60° (al N) y casi horizontales (al S).

Según Tello (2021), las calizas de la formación Ferrobamba ha sido cortada por varias fases de intrusión. La primera fase es una monzonita biotítica (MZB). Aflora en gran parte en el sector sur y es una de las fases que ha formado cuerpos de skarn de granate - piroxeno > magnetita; con mineralización de calcopirita, bornita y molibdenita asociada a la alteración potásica de biotita secundaria, ortosa y magnetita. La segunda fase y tercera fase denominadas monzonita biotítica fina, presentan grano medio a grueso, textura porfirítica, “ojos” de cuarzo irregulares, plagioclasas bimodales. La cuarta fase, monzonita máfica

(MZM), es de grano medio a fino, con alto contenido de minerales máficos (hornblenda>biotita), plagioclasa seriada y escasos “ojos” de cuarzo. La quinta fase es llamada monzonita hornbléndica (MZH), de grano medio, con plagioclasas tabulares cortas y hornblendas prismáticas. Aflora en la parte central y se ramifica en forma de diques en diferentes direcciones.

3.3 Marco conceptual

a) Modelo predictivo

Según Zhang (2023), un modelo predictivo es una herramienta matemática o computacional que utiliza datos históricos o empíricos para estimar o pronosticar el comportamiento de una variable futura. En el contexto de ingeniería geotécnica y minera, se emplean modelos predictivos para estimar la velocidad pico de partícula (PPV) generada por voladuras, basándose en parámetros como la carga explosiva, la distancia, la geometría de la voladura y las propiedades del terreno.

b) Atenuación sísmica

Según Zhang (2023), la atenuación sísmica es el fenómeno mediante el cual la intensidad de la vibración disminuye con la distancia a la fuente de explosión. Se describe mediante funciones matemáticas que dependen del tipo de terreno, profundidad de la voladura, cantidad de carga y características geológicas del entorno.

c) Monitoreo de vibraciones

Según Zhang (2023), es la recolección sistemática de datos sobre las vibraciones generadas por voladuras mediante sensores instalados en puntos estratégicos. Este monitoreo permite verificar el cumplimiento de los límites de seguridad establecidos, mejorar el diseño de voladuras y construir modelos predictivos con base en datos reales.

d) Concreto armado

Según Cruz (2022), el concreto armado es un material compuesto de concreto (cemento, agua y agregados) reforzado con acero estructural. Es ampliamente utilizado en edificaciones por su resistencia a compresión y tracción. Sin embargo, es sensible a movimientos vibratorios excesivos que pueden generar fisuras, desprendimientos o debilitamientos en su estructura.

e) Nivel de vibraciones producidas por las voladuras

Según Zhang (2023), las vibraciones en la explotación de una mina son provocadas por los explosivos utilizados en la voladura por el aumento de la presión en un taladro lo que provoca tensiones dinámicas en el área detonada, producen ondas de tensión propagándose en el taladro. Esta onda vibratoria va disminuyendo su intensidad en referencia a la distancia, esta energía que transmite la detonación de la roca se debe distribuir en una superficie cada vez mayor.

f) Frecuencia

Según Daniel (2022), la frecuencia de vibración, que se expresa en ciclos por segundo (hertzios, Hz), afecta a la extensión con que se transmiten las vibraciones al cuerpo a la superficie.

g) Vibraciones

Según Zhang (2023), la vibración es una oscilación mecánica en torno a una posición de referencia. Es la variación, normalmente con el tiempo, de la magnitud de una cantidad con respecto a una referencia específica cuando dicha magnitud se hace alternativamente más grande y pequeña que la referencia.

h) Voladura

Según López (2021), se refiere a la actividad de romper o triturar rocas, utilizando cierta cantidad de explosivos. Estos golpes de roca se realizan para lograr objetivos que se pueden realizar de manera controlada.

i) Explosivos

Según López (2021), un explosivo es aquella sustancia que por causa externa (roce, calor, percusión, etc.) se transforma en gases liberando calor, presión o radiación en un tiempo muy breve.

j) Velocidad de partícula

Según Zhang (2023), es el parámetro clave para evaluar el nivel de vibración producido por una voladura. Representa la máxima velocidad a la que se desplaza una partícula del suelo debido a la onda sísmica. Se utiliza como indicador para prevenir daños estructurales y establecer límites normativos de seguridad.



k) Velocidad pico de partícula

Según Zhang (2023), las velocidades Pico Partícula o también llamadas VPP, están definidas como el valor máximo de cualquiera de las tres magnitudes mencionadas que varía durante cierto intervalo de tiempo.

l) Sismógrafo

Según Zhang (2023), es un equipo utilizado para monitorear y registrar los datos sísmicos generados por una voladura. Está compuesto por un geófono, que detecta las vibraciones del suelo, y un micrófono de onda aérea, que registra la sobrepresión en el aire. Este sistema está diseñado para determinar la velocidad pico de partícula (PPV) y la dispersión de energía producida por las detonaciones, permitiendo así evaluar el impacto de las vibraciones tanto en el terreno como en el entorno cercano.

m) Estructura

Según López (2021), las estructuras son conjuntos de elementos unidos entre sí capaces de soportar las fuerzas que actúan sobre ellas, conservando su forma. Las fuerzas que actúan sobre las estructuras se denominan cargas o acciones.

n) Edificación

Según Bao, fei y hu (2023), construcción diseñada, planificada y ejecutada por el hombre, en un espacio determinado. Puede tener distintos tamaños, espacios y formas, además de cumplir con múltiples propósitos.

o) Grieta estructural

Según Bao, fei y hu (2023), rotura del elemento constructivo que afecta directamente a vigas, trabes y columnas ocurren debido a una construcción deficiente, ondas sísmicas sobrecargas o un mal soporte del suelo.

p) Asentamiento estructural

Según Bao, fei y hu (2023), hundimiento de una estructura provocado por los esfuerzos (compresión) en el suelo situado debajo de la misma. Asentamiento elástico, que se produce más o menos en un corto tiempo sin depender del tipo de suelo, después que la cimentación se somete a la carga estructural.



q) Asentamiento diferencial

Según Bao, fei y hu (2023), diferencia de asiento o movimiento vertical entre dos puntos de una cimentación. Las causas más comunes de asientos diferenciales son: Variación importante de cargas entre apoyos cercanos.

r) Fisuración

Según Bao, fei y hu (2023), fenómeno físico que aparece en elementos estructurales de hormigón consistente en la aparición de micro fisuras de unas pocas décimas de milímetro.

s) Zona de Riesgo

Según Cenepred (2021), una zona de riesgo es un espacio geográfico donde existe la probabilidad de ocurrencia de daños sobre personas, infraestructura o el ambiente, como resultado de la interacción entre una amenaza (por ejemplo, una voladura minera) y condiciones de vulnerabilidad.



CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

Este estudio se enmarcó en el tipo de investigación aplicada, ya que tiene como finalidad comprender en profundidad el fenómeno de las vibraciones generadas por voladuras en roca y su propagación hacia estructuras de concreto armado, a través de la evaluación de un modelo matemático.

4.1.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación fue explicativo, porque se buscó determinar la incidencia de dichas vibraciones sobre las estructuras, es decir, explicar cómo y en qué medida estas vibraciones afectan el comportamiento estructural. Esto implica ir más allá de la simple descripción y establecer causa-efecto entre las variables medidas y los efectos estructurales observados.

4.1.3 Enfoque de la investigación

El presente estudio adoptó un enfoque cuantitativo, ya que busca analizar datos numéricos obtenidos mediante registros de vibraciones generadas por voladuras de rocas, aplicando modelos predictivos que permitan medir su impacto en las edificaciones de concreto armado. La investigación se apoyó en el uso de herramientas estadísticas para validar la hipótesis y alcanzar los objetivos planteados.

4.2 Diseño de la investigación

El presente estudio adoptó un diseño no experimental, transversal y explicativo, ya que no se manipulan variables ni se interviene en las condiciones del fenómeno estudiado. Se observa el comportamiento de las vibraciones generadas por voladuras en roca hacia estructuras de concreto armado tal como ocurren en su contexto natural, lo cual caracteriza un diseño no experimental.

Finalmente, el estudio es explicativo, ya que su propósito es caracterizar el comportamiento vibracional y evaluar la precisión del modelo matemático aplicado, sin

buscar establecer relaciones causales o explicaciones profundas entre variables.

Este enfoque metodológico es adecuado para conocer la incidencia y magnitud de las vibraciones por voladura en estructuras de concreto armado, así como para analizar el desempeño del modelo matemático dentro del contexto real de aplicación.

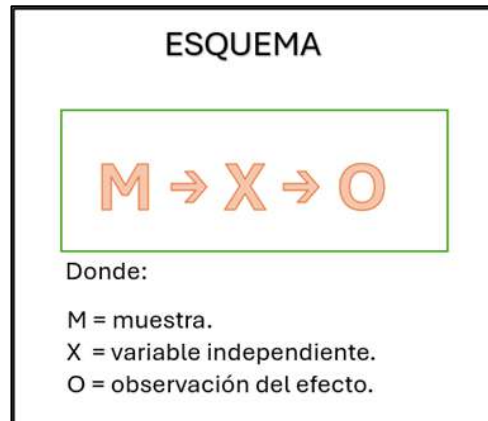


Figura 18 — Esquema de investigación

4.3 Descripción ética de la investigación

El código de ética de investigación internacional tuvo como propósito regular la integridad científica y regir el comportamiento del personal académico dedicado a la investigación.

La ética en la investigación nacional exigió que la práctica de la ciencia se realice conforme a principios éticos que aseguro el avance del conocimiento y su comprensión.

La ética de investigación en la Unamba tuvo como objetivo guiar la conducta y las acciones correctas para que realice la investigación original, pertinente y coherente a la línea de investigación.

El investigador fue consciente de su responsabilidad científica y profesional. En particular, tuvo el deber y responsabilidad personal de considerar cuidadosamente las consecuencias y poder presentar una investigación de calidad y para generar bienes.

4.4 Población y muestra

4.4.1. Población

Arias (2019, P. 81), define población como “un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Esta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio”

Las edificaciones se encuentran ubicadas en un radio de 5,700.00 m alrededor de la unidad minera en el distrito de Chalhuanhuacho, se han seleccionado 50 puntos de monitoreo como una población total.

4.4.2. Muestra

Arias (2019, P. 83), define muestra como “un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible”.

La muestra de esta investigación está conformada por un conjunto representativo de 30 registros de vibraciones generadas por eventos de voladura en una zona con presencia de edificaciones de concreto armado. Estos registros fueron seleccionados a partir de los datos recopilados mediante equipos sismográficos, los cuales se encontraban ubicados a diferentes distancias respecto del punto de detonación, con 10 edificaciones a menos de 4 360 m de la voladura, 10 edificaciones entre los 4 360 m y 4 800 m y 10 edificaciones a más de los 4 800 m. Se instalaron sismógrafos en las siguientes ubicaciones :10 puntos de monitoreo a menos 4 360 m, 10 puntos de monitoreo entre los 4 360 m y 4 800, y 10 puntos de monitoreo a más de 4 800 m con un total de 30 puntos de monitoreo de vibraciones.

El muestreo utilizado es no probabilístico, por conveniencia, basado en accesibilidad y cercanía a las zonas de estudio.

4.5 Procedimiento

a) Revisión teórica y definición de variables

Se realizó una revisión exhaustiva de literatura científica, artículos técnicos y tesis relacionadas con vibraciones por voladuras, modelos predictivos (como el de Devine o USBM), y afectación estructural en edificaciones.



Se definieron conceptual y operacionalmente las variables independientes (modelo predictivo) y dependiente (vibraciones por voladura de rocas), así como sus respectivos indicadores.

b) Selección del área de estudio y muestra

Se identificó el área de estudio en el distrito de Chalhuanahuacho, Apurímac, en el entorno de la unidad minera.

Se delimitó un radio de influencia para las vibraciones por voladura: menos de 4,360.00 m, entre 4,360.00 m y 4,800.00 m, y más de 4,800.00 m de la fuente de voladura.

Se seleccionaron 30 edificaciones de concreto armado mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, distribuidas equitativamente en las tres zonas mencionadas.

c) Recolección de datos de campo

Se instalaron geófonos triaxiales en puntos estratégicos para registrar la velocidad pico de partícula (PPV) durante las voladuras, así como otros efectos estructurales visibles (fisuras, grietas, desprendimientos).

Se registraron datos de 28 a 30 eventos de voladura, considerando distancia a la fuente, tipo de suelo y carga operante.

Se emplearon fichas de observación estructural para registrar evidencias físicas de daño en las edificaciones.

d) Aplicación del modelo predictivo

Se diseñó un modelo matemático predictivo (Devine), utilizando los datos reales de carga operante y distancia.

Se generaron estimaciones de PPV con el modelo para las ubicaciones de las edificaciones seleccionadas.

Se compararon las estimaciones del modelo con los datos reales recolectados en campo.

e) Análisis estadístico y validación

Se utilizaron herramientas estadísticas para realizar: Análisis de correlación entre las variables del modelo y los niveles de vibración registrados.

Regresiones lineales para validar el ajuste del modelo.

Se determinaron zonas de mayor riesgo estructural mediante superposición de resultados en un sistema de información geográfica (GIS).

f) Interpretación de resultados y formulación de propuestas

Con base en los hallazgos, se elaboraron propuestas para la mejora del modelo predictivo, así como recomendaciones técnicas para la toma de decisiones en el cuidado de las estructuras de concreto armado.

Se establecieron medidas de seguridad y criterios de distancia mínima para preservar la integridad estructural de las edificaciones.

4.6 Técnica e instrumentos

4.6.1. Técnica

Según Gutiérrez (2021), define técnica como la habilidad para hacer uso de procedimientos y recursos.

Técnica:

- **Documental:** Revisión y análisis de normativas nacionales e internacionales, informes técnicos y estudios previos relacionados con vibraciones por voladura.

4.6.2. El instrumento

- **Documento de recolección de datos:** formato utilizado para registrar los valores medidos en campo junto con condiciones del entorno (validado por resolución ministerial N°030-2011-MEM/DM).

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Análisis de resultados

Para la presente investigación, se emplearon métodos directos de medición de vibraciones inducidas por voladuras rocas, así como técnicas predictivas basadas en modelos empíricos, a fin de evaluar su impacto en edificaciones de concreto armado ubicadas en el distrito de Chalhuanhuacho.



Figura 19 — Ubicación de puntos de monitoreo

Se utilizó una red de geófonos triaxiales instalados estratégicamente en 30 puntos de monitoreo cercanas a la zona de voladura, distribuidas en tres rangos de distancia:

- Grupo A: Edificaciones ubicadas a menos de 4 360 m.
- Grupo B: Edificaciones entre 4 360 m y 4 800 m.
- Grupo C: Edificaciones a más de 4 800 m.

Los geófonos registraron en tiempo real la velocidad pico de partícula (PPV), expresada en mm/s, en las tres direcciones principales (vertical, longitudinal y transversal).

Ubicación de los puntos donde se realizaron las voladuras en la unidad minera.

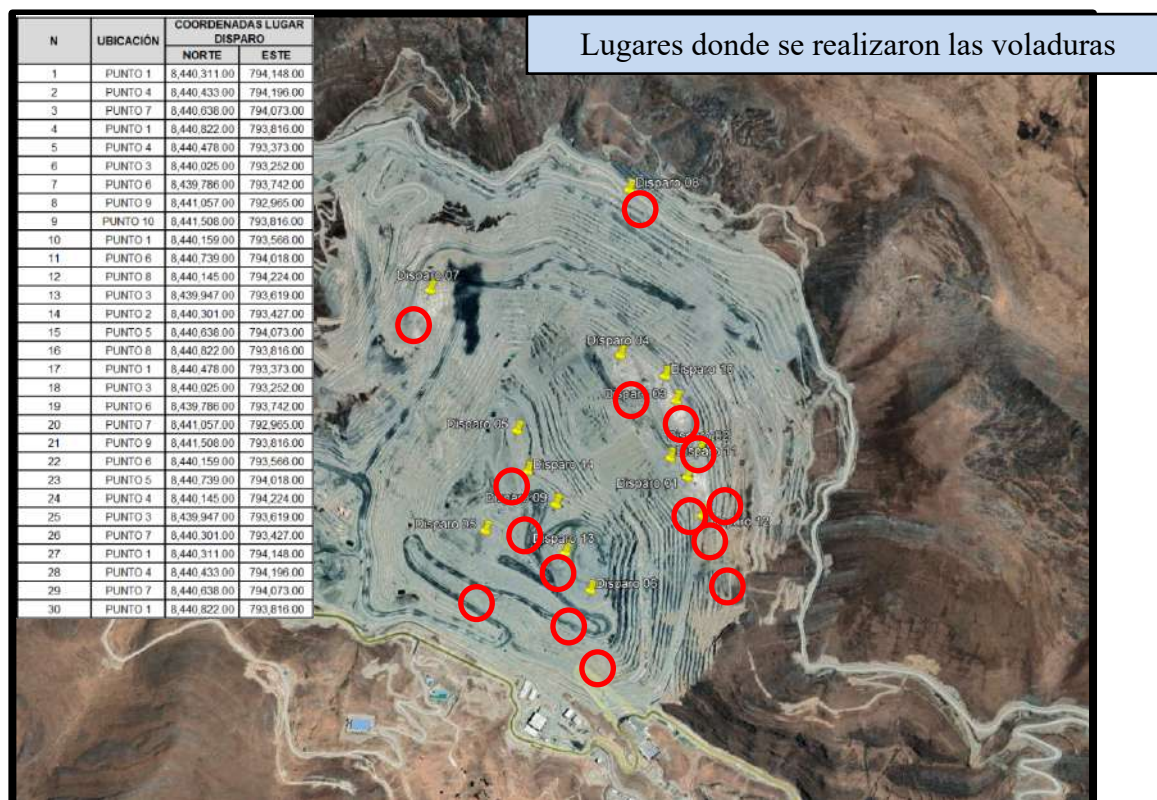


Figura 20 — Ubicación de las voladuras.

Tabla 7 — Datos registrados por el sismógrafo instantel N°01 y N°02

N	VOLADURA	PPV (mm/s)				FRECUENCIA ZC (Hz.)			UBICACIÓN GEÓFONO
		TRANS.	VERT.	LOG.	VS	TRANS.	VERT.	LOG.	
1	5-SP-3938-05	0.29	0.35	0.06	0.35	17.00	11.00	>100	PUNTO 1
2	6-NP-4148-21/22	0.83	0.97	0.06	1.13	5.40	6.20	9.30	PUNTO 4
3	8-SP-4448-18	0.73	0.65	0.29	0.90	11.00	20.00	>100	PUNTO 7
4	Py 3825-036	0.21	0.18	0.05	0.24	9.50	6.90	>100	PUNTO 1
5	Py3855-055	0.86	0.70	0.49	0.94	9.00	12.00	85.00	PUNTO 4
6	Py 3840-101	0.40	0.65	0.29	0.66	32.00	80.00	>100	PUNTO 3
7	Py3855-202	0.76	0.54	0.11	0.83	7.10	6.20	>100	PUNTO 6
8	Py3855-204	0.38	0.37	0.08	0.41	18.00	18.00	85.00	PUNTO 9
9	F2-B-Py3855-2013	0.43	0.64	0.13	0.68	13.00	12.00	85.00	PUNTO 10
10	F2-B-Py3855-2014	0.52	0.25	0.05	0.53	10.00	7.80	>100	PUNTO 1
11	F2-B-Py3855-2016	0.44	0.33	0.05	0.46	9.80	8.40	>100	PUNTO 6
12	Py3850-030	0.54	0.38	0.11	0.54	18.00	7.10	85.00	PUNTO 8
13	Py3850-060	0.30	0.32	0.05	0.43	N/A	4.10	>100	PUNTO 3
14	Py3850-070	0.51	0.73	0.11	0.73	5.80	4.90	>100	PUNTO 2
15	Py3845-085	0.19	0.14	0.21	0.23	9.80	16.00	11.00	PUNTO 5
16	Py3845-090	0.62	0.38	0.59	0.71	5.90	5.60	5.30	PUNTO 8
17	Py3845-101	0.59	0.59	0.37	0.65	5.10	6.20	7.10	PUNTO 1
18	Py3835-202	0.79	0.94	0.43	1.15	7.10	9.70	57.00	PUNTO 3
19	Py3835-108	1.18	0.97	0.71	1.48	20.00	18.00	73.00	PUNTO 6
20	Py3835-160	0.35	0.29	0.19	0.44	N/A	N/A	N/A	PUNTO 7
21	Py3835-190	0.56	0.60	0.24	0.82	1.80	7.30	N/A	PUNTO 9
22	Py3830-021	0.87	0.83	0.27	1.09	6.20	7.50	N/A	PUNTO 6
23	Py3830-070	1.39	1.15	1.24	1.724	5.60	37.00	12.00	PUNTO 5
24	Py3830-085	1.00	0.75	0.30	1.10	7.00	6.70	N/A	PUNTO 4
25	Py3830-0104	0.92	1.00	0.32	1.06	9.00	16.00	N/A	PUNTO 3
26	Py3828-108	0.59	0.62	0.52	0.71	30.00	11.00	85.00	PUNTO 7
27	Py3840-105	1.91	1.10	0.38	1.23	8.70	6.60	3.70	PUNTO 1
28	Py3854-035	0.81	0.75	0.67	1.01	5.80	11.00	73.00	PUNTO 4
29	Py3825-090	0.46	0.43	0.24	0.57	<1	5.50	N/A	PUNTO 7
30	Py3840-203	0.37	0.43	0.38	0.44	11.00	37.00	9.50	PUNTO 1

Tabla 8 — Datos registrados de las distancias entre lugar del monitoreo y punto de disparo

N	UBICACIÓN	COORDENADAS LUGAR MONITOREO		COORDENADAS LUGAR DISPARO		DELTAS		DISTANCIA HORIZONTAL (m)
		NORTE	ESTE	NORTE	ESTE	DELTA_N	DELTA_E	
1	PUNTO 1	8,437,018.00	795,647.00	8,440,311.00	794,148.00	-3,293.00	1,499.00	3618.128
2	PUNTO 4	8,437,797.00	797,114.00	8,440,433.00	794,196.00	-2,680.00	2,929.00	3932.330
3	PUNTO 7	8,439,295.00	798,300.00	8,440,638.00	794,073.00	-1,343.00	4,227.00	4435.220
4	PUNTO 1	8,437,018.00	795,647.00	8,440,822.00	793,816.00	-3,804.00	1,831.00	4221.727
5	PUNTO 4	8,437,797.00	797,114.00	8,440,478.00	793,373.00	-2,725.00	3,752.00	4602.482
6	PUNTO 3	8,437,944.00	797,196.00	8,440,025.00	793,252.00	-2,245.00	3,384.00	4459.338
7	PUNTO 6	8,437,831.00	797,532.00	8,439,786.00	793,742.00	-1,409.00	4,003.00	4264.519
8	PUNTO 9	8,437,337.00	797,096.00	8,441,057.00	792,965.00	-3,852.00	3,765.00	5559.097
9	PUNTO 10	8,438,467.00	798,189.00	8,441,508.00	793,816.00	-3,041.00	4,373.00	5326.426
10	PUNTO 1	8,437,018.00	795,647.00	8,440,159.00	793,566.00	-3,141.00	2,081.00	3767.817
11	PUNTO 6	8,437,831.00	797,532.00	8,440,739.00	794,018.00	-2,362.00	3,727.00	4561.213
12	PUNTO 8	8,436,694.00	795,706.00	8,440,145.00	794,224.00	-3,451.00	1,482.00	3755.759
13	PUNTO 3	8,437,944.00	797,196.00	8,439,947.00	793,619.00	-2,167.00	3,017.00	4099.627
14	PUNTO 2	8,437,518.00	795,520.00	8,440,301.00	793,427.00	-2,783.00	2,093.00	3482.203
15	PUNTO 5	8,438,031.00	797,432.00	8,440,638.00	794,073.00	-2,607.00	3,359.00	4251.980
16	PUNTO 8	8,436,694.00	795,706.00	8,440,822.00	793,816.00	-4,128.00	1,890.00	4540.097
17	PUNTO 1	8,437,018.00	795,647.00	8,440,478.00	793,373.00	-3,460.00	2,274.00	4140.371
18	PUNTO 3	8,437,944.00	797,196.00	8,440,025.00	793,252.00	-2,245.00	3,384.00	4459.338
19	PUNTO 6	8,437,831.00	797,532.00	8,439,786.00	793,742.00	-1,409.00	4,003.00	4264.519
20	PUNTO 7	8,439,295.00	798,300.00	8,441,057.00	792,965.00	-1,762.00	5,335.00	5618.440
21	PUNTO 9	8,437,337.00	797,096.00	8,441,508.00	793,816.00	-4,303.00	2,914.00	5306.189
22	PUNTO 6	8,437,831.00	797,532.00	8,440,159.00	793,566.00	-1,782.00	4,179.00	4598.776
23	PUNTO 5	8,438,031.00	797,432.00	8,440,739.00	794,018.00	-2,708.00	3,414.00	4357.598
24	PUNTO 4	8,437,797.00	797,114.00	8,440,145.00	794,224.00	-2,392.00	2,901.00	3723.601
25	PUNTO 3	8,437,944.00	797,196.00	8,439,947.00	793,619.00	-2,167.00	3,017.00	4099.627
26	PUNTO 7	8,439,295.00	798,300.00	8,440,301.00	793,427.00	-1,006.00	4,873.00	4975.758
27	PUNTO 1	8,437,018.00	795,647.00	8,440,311.00	794,148.00	-3,293.00	1,499.00	3618.128
28	PUNTO 4	8,437,797.00	797,114.00	8,440,433.00	794,196.00	-2,680.00	2,929.00	3932.330
29	PUNTO 7	8,439,295.00	798,300.00	8,440,638.00	794,073.00	-1,343.00	4,227.00	4435.220
30	PUNTO 1	8,437,018.00	795,647.00	8,440,822.00	793,816.00	-3,804.00	1,831.00	4221.727

a) Cálculo del modelo de incidencia de daño a las edificaciones por la generación de vibraciones por voladura.

Para el cálculo del modelo se utilizó la siguiente formula del modelo de Devine

$$PPV = K * \left(\frac{d}{W^2} \right) \dots (1)$$

Donde:

- PPV: Velocidad pico de partícula (mm/s)
- W: Peso de la carga explosiva detonada en un instante (Kg)
- d: Distancia entre el punto de medición y la carga explosiva detonando
- K: Factor controlado principalmente por el explosivo, (densidad del explosivo, cantidad de carga, el número de taladros, etc.)
- α : Factor de atenuación de la roca, (características geológicas, litológicas, estructura del macizo por donde se transmite la onda).

$$De = \left(\frac{d}{W^2} \right) \dots (2)$$

Para determinar los valores de α y K, el modelo de campo lejano se ajusta a una ecuación lineal mediante logaritmos, estos valores se procesan en un gráfico de dispersión.

Para definir el nivel de vibración se debe tener en cuenta que los sismógrafos contienen tres Geófonos, los cuales montados adecuadamente registran las tres ondas: vertical, longitudinal y transversal. Cada una de estas tres componentes del movimiento de la tierra tendrá una velocidad pico partícula (VPP) o máxima amplitud de la onda. La velocidad pico de partícula que se considera es la de mayor valor, es decir, el pico puede ocurrir en cualesquiera de las tres ondas, por lo que es importante considerar también que el Vector Resultante no debe ser confundido con la velocidad pico de la partícula.

Remplazando la distancia escalada en la ecuación 1 en 2 se obtiene lo siguiente:

$$PPV = K * (De)^\alpha$$

Luego se aplica logaritmo al modelo con el fin de ser ajustado a la forma de una ecuación lineal:

$$\text{Log}PPV = \text{Log} (K * (De)^\alpha)$$

$$\text{Log}PPV = \text{Log}K + \alpha \text{Log} (De) \dots \dots (3)$$

Estos valores se ajustan a una ecuación lineal, obteniendo:

$$y = A + Bx \dots (4)$$



Siendo

$y = \text{LogPPV}$ Logaritmo de la PPV
 $A = \text{LogK}$ Intercepción con el eje Y
 $B = a$ Pendiente de la recta
 $x = \text{De}$ Distancia Escalada

Tabla 9 — Datos de campo distancia punto de voladura hacia punto de registro de vibraciones, cantidad de explosivo utilizado y PPV

REGISTRO #	DISTANCIA (m)	CARGA OPERANTE (Kg)	PPV(mm/s)
Punto 1	3618.128	800	0.351
Punto 4	3932.330	1050	1.128
Punto 7	4435.220	900	0.901
Punto 1	4221.727	850	0.237
Punto 4	4602.482	860	0.940
Punto 3	4459.338	650	0.662
Punto 6	4264.519	900	0.832
Punto 9	5559.097	860	0.413
Punto 10	5326.426	880	0.675
Punto 1	3767.817	1000	0.525
Punto 6	4561.213	950	0.455
Punto 8	3755.759	950	0.543
Punto 3	4099.627	550	0.427
Punto 2	3482.203	950	0.731
Punto 5	4251.980	860	0.230
Punto 8	4540.097	870	0.713
Punto 1	4140.371	860	0.654
Punto 3	4459.338	850	1.146
Punto 6	4264.519	950	1.477
Punto 7	5618.440	880	0.441
Punto 9	5306.189	910	0.815
Punto 6	4598.776	840	1.087
Punto 5	4357.598	860	1.724
Punto 4	3723.601	840	1.103
Punto 3	4099.627	860	1.064
Punto 7	4975.758	860	0.706
Punto 1	3618.128	880	1.226
Punto 4	3932.330	900	1.010
Punto 7	4435.220	950	0.572
Punto 1	4221.727	870	0.441

Después de registrar los datos monitoreas se debe calcular la distancia escalada seguido de aplicar logaritmo al igual que aplicarle logaritmo a la PPV. En la siguiente tabla se muestran los resultados hallados.

Tabla 10 — Logaritmo de la distancia escalada y la PPV

REGISTRO #	De	PPV (mm/s)	Log [De]	Log [PPV]	PPV (mm/s) 90%	Log [PPV]
			(x)	(y)		(y) 90%
Punto 1	127.920	0.351	2.107	-0.455	1.188	0.075
Punto 4	121.354	1.128	2.084	0.052	1.236	0.092
Punto 7	147.841	0.901	2.170	-0.045	1.068	0.028
Punto 1	144.804	0.237	2.161	-0.625	1.084	0.035
Punto 4	156.943	0.94	2.196	-0.027	1.022	0.009
Punto 3	174.910	0.662	2.243	-0.179	0.943	-0.026
Punto 6	142.151	0.832	2.153	-0.080	1.099	0.041
Punto 9	189.564	0.413	2.278	-0.384	0.888	-0.051
Punto 10	179.554	0.675	2.254	-0.171	0.925	-0.034
Punto 1	119.149	0.525	2.076	-0.280	1.253	0.098
Punto 6	147.985	0.455	2.170	-0.342	1.067	0.028
Punto 8	121.853	0.543	2.086	-0.265	1.232	0.091
Punto 3	174.809	0.427	2.243	-0.370	0.943	-0.025
Punto 2	112.978	0.731	2.053	-0.136	1.303	0.115
Punto 5	144.991	0.23	2.161	-0.638	1.083	0.035
Punto 8	153.924	0.713	2.187	-0.147	1.036	0.015
Punto 1	141.185	0.654	2.150	-0.184	1.105	0.043
Punto 3	152.954	1.146	2.185	0.059	1.041	0.018
Punto 6	138.359	1.477	2.141	0.169	1.121	0.050
Punto 7	189.398	0.441	2.277	-0.356	0.889	-0.051
Punto 9	175.898	0.815	2.245	-0.089	0.939	-0.027
Punto 6	158.673	1.087	2.201	0.036	1.013	0.006
Punto 5	148.593	1.724	2.172	0.237	1.064	0.027
Punto 4	128.476	1.103	2.109	0.043	1.185	0.074
Punto 3	139.796	1.064	2.145	0.027	1.113	0.046
Punto 7	169.672	0.706	2.230	-0.151	0.964	-0.016
Punto 1	121.967	1.226	2.086	0.088	1.231	0.090
Punto 4	131.078	1.010	2.118	0.004	1.167	0.067
Punto 7	143.898	0.572	2.158	-0.243	1.089	0.037
Punto 1	143.130	0.441	2.156	-0.356	1.094	0.039

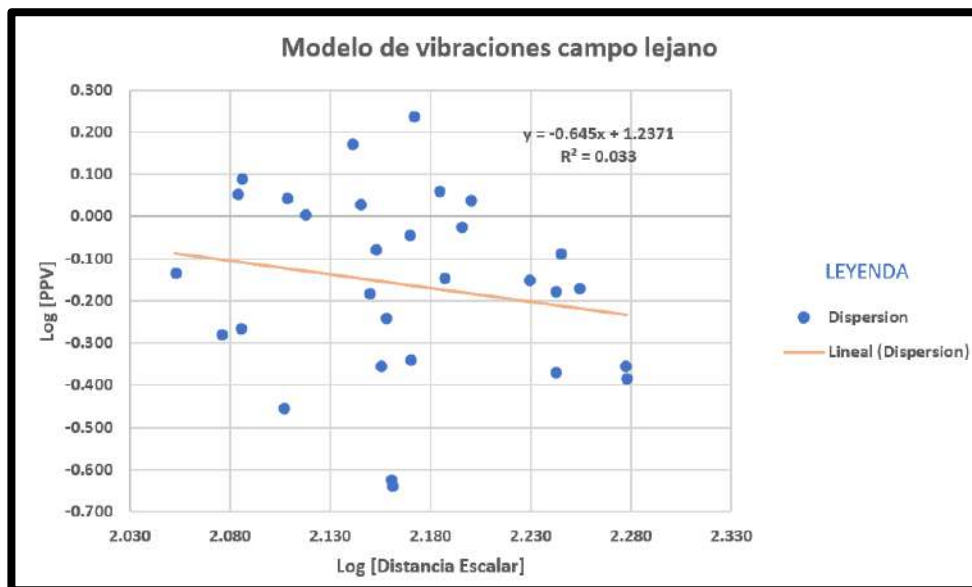


Figura 21 — Dispersión al 50% de confiabilidad

Con ayuda del gráfico de dispersión se obtuvieron los valores de la siguiente ecuación lineal

$$y = -0.7399x + 1.4378 \dots (5)$$

Al ser remplazados en la ecuación 5 en 3 se obtiene:

$$\text{Log (PPV)} = 1.4378 - 0.7399 \text{ Log (De)}$$

Por lo tanto:

$$\text{Log K} = 1.4378$$

$$K = \text{Antilog} (1.4378) = 27.40311921$$

$$\alpha = -0.7399$$

$$\text{PPV} = 27.40311921 * \left(\frac{d}{w^2} \right)^{-0.7399} \dots (5)$$

Ajuste del modelo al 90 % utilizando la siguiente ecuación solo para el valor del coeficiente K.

$$K_a = \text{Antilog} [\text{Log K} + \text{Inv. Distr. Norm. Stand} (X \%) * E(t)] \dots (6)$$

- K_a : Valor ajustado
- $\text{Inv. Distr. Norm. Stand} (X \%)$: Inverso de la Distribución Normal Estándar del porcentaje de medición
- Error Típico: Es el error típico de todas las mediciones que intervienen en el primer gráfico.

Al remplazar la ecuación 5 por los valores calculados se obtiene lo siguiente:

$$Ka = \text{Antilog} (1.4378 + (90\%) * 0.21725)$$

$$Ka = 42.9858$$

$$PPV = 42.9858 * \left(\frac{d}{w^2} \right)^{-0.7399} \dots\dots (7)$$

Donde la ecuación de la línea remplazando el valor de K ajustado estará dada por:

$$y = -0.7399x + 1.6333 \dots\dots (8)$$

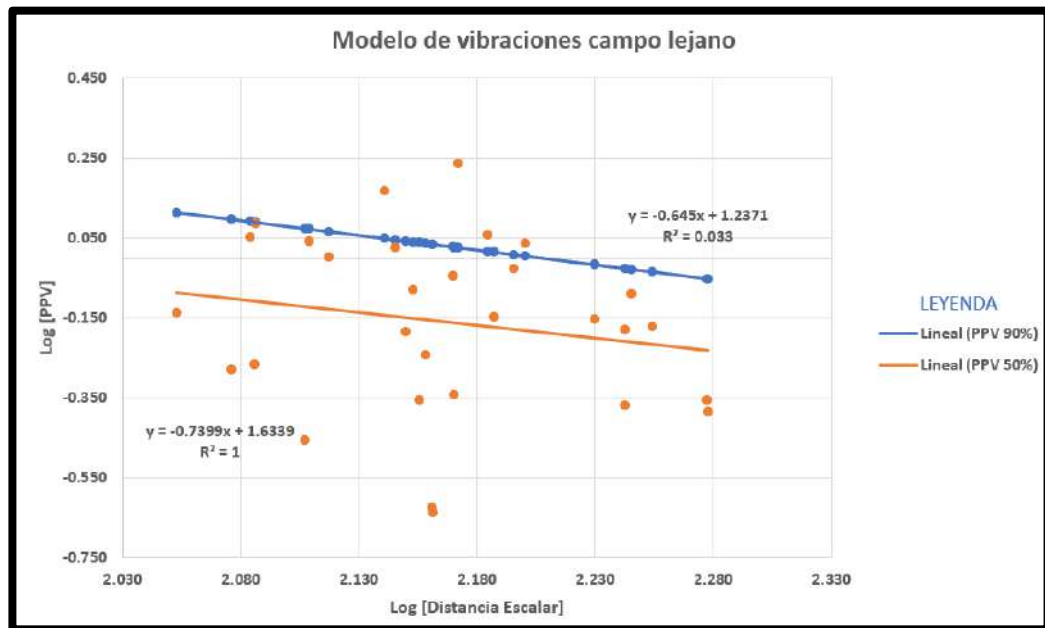


Figura 22 — Dispersión al 90 % de confiabilidad

Tabla 11 — Logaritmo de la distancia escalada y la PPV al 90 %

REGISTRO #	De	PPV (mm/s)	Log [De]	Log [PPV]	PPV (mm/s) 90%	Log [PPV]
			(x)	(y)		(y) 90%
Punto 1	127.920	0.351	2.107	-0.455	1.188	0.075
Punto 4	121.354	1.128	2.084	0.052	1.236	0.092
Punto 7	147.841	0.901	2.170	-0.045	1.068	0.028
Punto 1	144.804	0.237	2.161	-0.625	1.084	0.035
Punto 4	156.943	0.94	2.196	-0.027	1.022	0.009
Punto 3	174.910	0.662	2.243	-0.179	0.943	-0.026
Punto 6	142.151	0.832	2.153	-0.080	1.099	0.041
Punto 9	189.564	0.413	2.278	-0.384	0.888	-0.051
Punto 10	179.554	0.675	2.254	-0.171	0.925	-0.034
Punto 1	119.149	0.525	2.076	-0.280	1.253	0.098
Punto 6	147.985	0.455	2.170	-0.342	1.067	0.028
Punto 8	121.853	0.543	2.086	-0.265	1.232	0.091
Punto 3	174.809	0.427	2.243	-0.370	0.943	-0.025
Punto 2	112.978	0.731	2.053	-0.136	1.303	0.115
Punto 5	144.991	0.23	2.161	-0.638	1.083	0.035
Punto 8	153.924	0.713	2.187	-0.147	1.036	0.015
Punto 1	141.185	0.654	2.150	-0.184	1.105	0.043
Punto 3	152.954	1.146	2.185	0.059	1.041	0.018
Punto 6	138.359	1.477	2.141	0.169	1.121	0.050
Punto 7	189.398	0.441	2.277	-0.356	0.889	-0.051
Punto 9	175.898	0.815	2.245	-0.089	0.939	-0.027
Punto 6	158.673	1.087	2.201	0.036	1.013	0.006
Punto 5	148.593	1.724	2.172	0.237	1.064	0.027
Punto 4	128.476	1.103	2.109	0.043	1.185	0.074
Punto 3	139.796	1.064	2.145	0.027	1.113	0.046
Punto 7	169.672	0.706	2.230	-0.151	0.964	-0.016
Punto 1	121.967	1.226	2.086	0.088	1.231	0.090
Punto 4	131.078	1.010	2.118	0.004	1.167	0.067
Punto 7	143.898	0.572	2.158	-0.243	1.089	0.037
Punto 1	143.130	0.441	2.156	-0.356	1.094	0.039

Para confirmar la confiabilidad de los valores de predicción de los niveles de vibración al 50 % y 90 % de confiabilidad se debe generar la siguiente tabla la cual compara los valores de predicción junto con los valores monitoreados.

Tabla 12 — Valores de predicción al 50 % y 90 %

VALOR AJUSTADO (K)	43.0411		50%	90%
		k	27.403119	43.0411
De	PPV(mm/s)	α	-0.7399	-0.7399
127.92	0.351		0.757	1.188
122.52	1.128		0.781	1.227
147.84	0.901		0.680	1.068
144.80	0.237		0.690	1.084
158.13	0.940		0.647	1.016
159.28	0.662		0.643	1.010
141.46	0.832		0.702	1.103
183.67	0.413		0.579	0.909
179.55	0.675		0.589	0.925
119.15	0.525		0.797	1.253
143.16	0.455		0.696	1.093
121.85	0.543		0.784	1.232
158.39	0.427		0.646	1.015
112.98	0.731		0.829	1.303
144.99	0.230		0.690	1.083
153.92	0.713		0.660	1.036
141.19	0.654		0.703	1.105
139.29	1.146		0.710	1.116
137.68	1.477		0.717	1.125
189.40	0.441		0.566	0.889
172.27	0.815		0.607	0.953
156.75	1.087		0.651	1.022
148.59	1.724		0.677	1.064
129.73	1.103		0.749	1.176
126.67	1.064		0.762	1.197
169.67	0.706		0.614	0.964
121.97	1.226		0.784	1.231
132.34	1.010		0.738	1.159
143.90	0.572		0.694	1.089
143.13	0.441		0.696	1.094

Teniendo en cuenta los datos anteriores se debe desarrollar la siguiente grafica la cual replantea las líneas de tendencia por unas líneas de tendencia exponenciales respecto del umbral máximo permitido por la norma DIN 4150 para edificaciones sensibles.

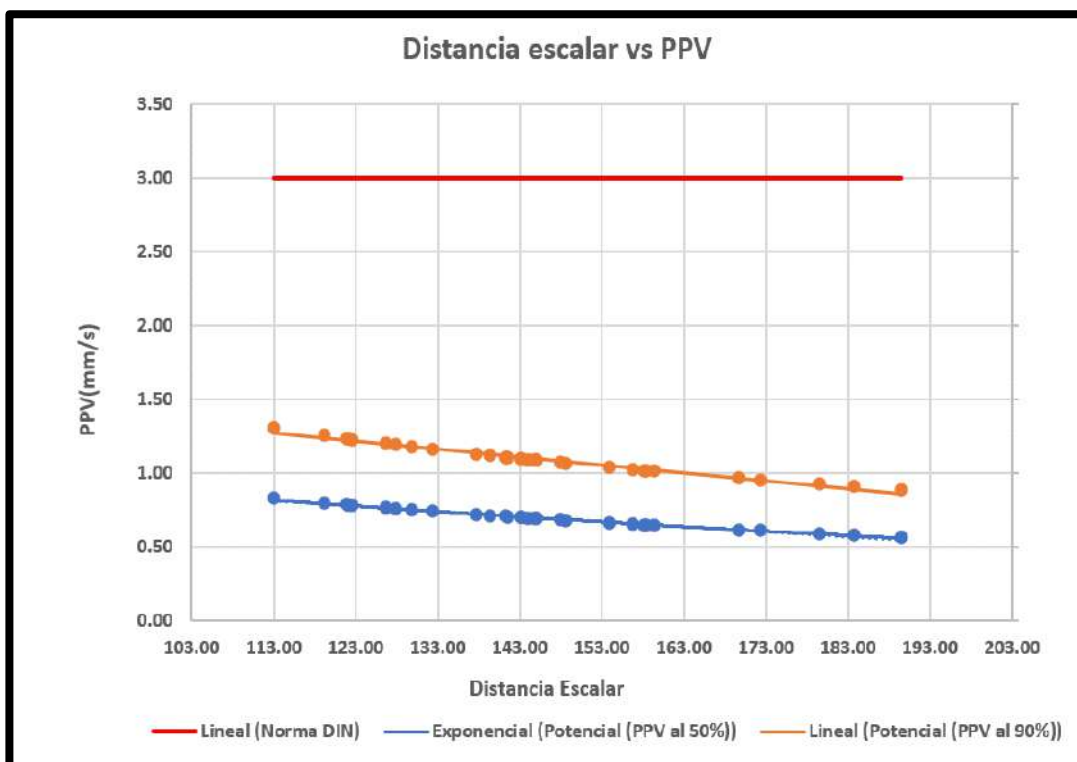


Figura 23 — Confirmación de los valores de predicción al 50 % y 90 %

Valores de carga operante más comunes al igual que las distancias de registro estimadas, de los cuales al seleccionar un valor de carga operante que se considera detonar y la distancia estimada de monitoreo se obtiene una predicción de la PPV (velocidad pico de la partícula).

Tabla 13 — Confirmación de los valores de predicción al 50 % y 90 %

K ajustado	43.0411	Estimacion del PPV, respecto a la carga operante (kg) vs distancia (m)							
Alfa	-0.7399								
CARGA OPERANTE (Kg)	Distancia								
	500	700	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
550.00	4.47	3.49	2.68	1.98	1.60	1.36	1.19	1.06	0.96
650.00	4.76	3.71	2.85	2.11	1.71	1.45	1.26	1.13	1.02
800.00	5.14	4.01	3.08	2.28	1.84	1.56	1.37	1.22	1.10
840.00	5.23	4.08	3.13	2.32	1.88	1.59	1.39	1.24	1.12
840.00	5.23	4.08	3.13	2.32	1.88	1.59	1.39	1.24	1.12
850.00	5.26	4.10	3.15	2.33	1.88	1.60	1.40	1.25	1.13
850.00	5.26	4.10	3.15	2.33	1.88	1.60	1.40	1.25	1.13
860.00	5.28	4.12	3.16	2.34	1.89	1.60	1.40	1.25	1.13
860.00	5.28	4.12	3.16	2.34	1.89	1.60	1.40	1.25	1.13
860.00	5.28	4.12	3.16	2.34	1.89	1.60	1.40	1.25	1.13
860.00	5.28	4.12	3.16	2.34	1.89	1.60	1.40	1.25	1.13
860.00	5.28	4.12	3.16	2.34	1.89	1.60	1.40	1.25	1.13
860.00	5.28	4.12	3.16	2.34	1.89	1.60	1.40	1.25	1.13
860.00	5.28	4.12	3.16	2.34	1.89	1.60	1.40	1.25	1.13
860.00	5.28	4.12	3.16	2.34	1.89	1.60	1.40	1.25	1.13
870.00	5.30	4.13	3.17	2.35	1.90	1.61	1.41	1.26	1.14
870.00	5.30	4.13	3.17	2.35	1.90	1.61	1.41	1.26	1.14
880.00	5.32	4.15	3.19	2.36	1.91	1.62	1.41	1.26	1.14
880.00	5.32	4.15	3.19	2.36	1.91	1.62	1.41	1.26	1.14
880.00	5.32	4.15	3.19	2.36	1.91	1.62	1.41	1.26	1.14
900.00	5.37	4.19	3.21	2.38	1.92	1.63	1.43	1.27	1.15
900.00	5.37	4.19	3.21	2.38	1.92	1.63	1.43	1.27	1.15
900.00	5.37	4.19	3.21	2.38	1.92	1.63	1.43	1.27	1.15
910.00	5.39	4.20	3.23	2.39	1.93	1.64	1.43	1.28	1.16
950.00	5.48	4.27	3.28	2.43	1.96	1.66	1.45	1.30	1.18
950.00	5.48	4.27	3.28	2.43	1.96	1.66	1.45	1.30	1.18
950.00	5.48	4.27	3.28	2.43	1.96	1.66	1.45	1.30	1.18
950.00	5.48	4.27	3.28	2.43	1.96	1.66	1.45	1.30	1.18
950.00	5.48	4.27	3.28	2.43	1.96	1.66	1.45	1.30	1.18
1000.00	5.58	4.35	3.34	2.48	2.00	1.70	1.48	1.32	1.20
1050.00	5.68	4.43	3.40	2.52	2.04	1.73	1.51	1.35	1.22

Se visualiza en la tabla de configuración de valores de predicción la carga con la cantidad de explosivo por taladro perforado que se puede utilizar respecto a la distancia (Tabla 07) de medición del sensor sin superar los límites de la norma DIN 4150 que incluye las líneas para cada clasificación de estructuras.

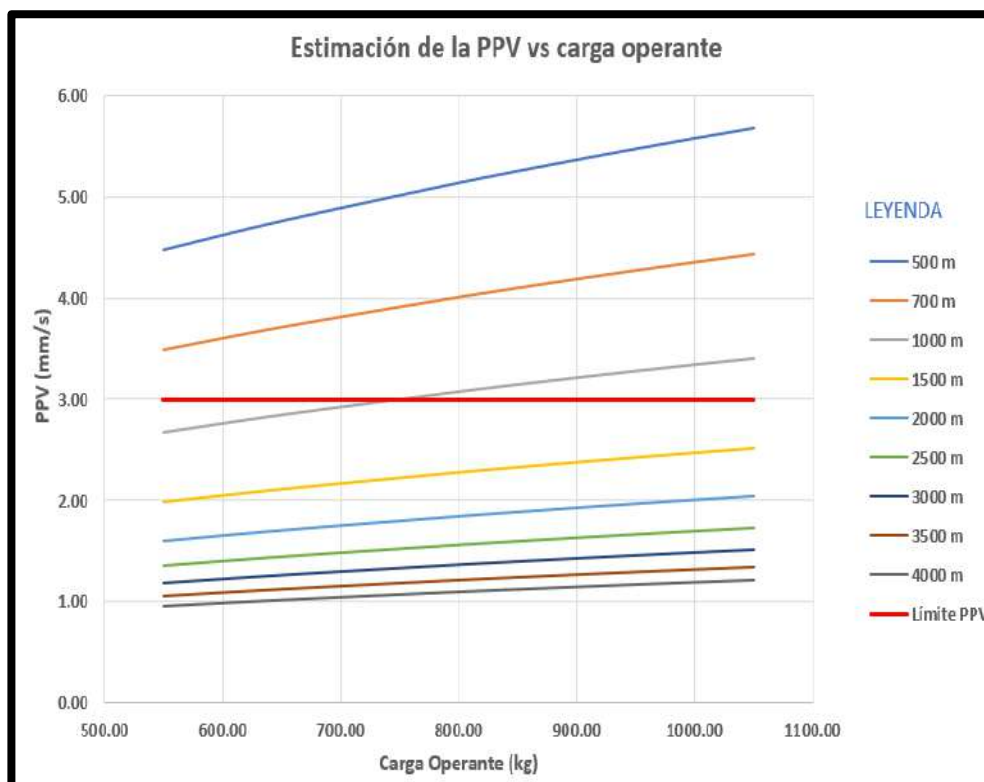


Figura 24 — Confirmación de los valores de predicción al 50 % y 90 %

a) Análisis de la investigación

Primero: La aplicación del modelo predictivo permitió evaluar de manera efectiva las vibraciones generadas por voladuras de rocas en edificaciones de concreto armado del distrito de Chalhuanhuacho (2023). A través de su formulación matemática y validación con datos de campo, el modelo demostró una alta correlación ($R^2 = 0.878$) entre las variables críticas como la distancia, carga explosiva y la velocidad pico de partícula (PPV), evidenciando un comportamiento coherente con la atenuación de ondas sísmicas.

El modelo logró estimaciones con errores mínimos, siendo más preciso al 90% de confiabilidad ($MSE = 0.014 \text{ mm/s}^2$ y $RE \% = 12.8 \%$), lo que valida su aplicabilidad para prever escenarios de riesgo estructural. Además, ninguna de las predicciones superó el umbral normativo de 2.5 mm/s establecido por la norma DIN 4150, garantizando así un nivel de seguridad aceptable en las 30 edificaciones analizadas.

Finalmente, la propuesta de mejora del modelo, mediante el ajuste del coeficiente K (de 27.40 a 42.98 en zonas críticas), refuerza su efectividad como herramienta técnica para la gestión preventiva de riesgos estructurales, al permitir acciones

operativas como el incremento de distancias de seguridad y el monitoreo focalizado en edificaciones vulnerables.

Por tanto, se concluye que el modelo predictivo evaluado no solo es estadísticamente confiable, sino que constituye una herramienta práctica, adaptable, útil para anticipar y controlar el impacto estructural de las vibraciones inducidas por voladuras de rocas en entornos urbanos cercanos.

Segundo: Se ingresaron 30 registros de campo al modelo matemático de vibraciones.

El modelo logró predecir dentro de un rango razonable en la mayoría de los casos.

Los errores absolutos promedio fueron:

- 50 % confiabilidad: ± 0.21 mm/s.
- 90 % confiabilidad: ± 0.14 mm/s.

Tercero: Se empleó el Error Cuadrático Medio (MSE) y el porcentaje de error relativo (RE%):

- MSE (50 % confiabilidad): 0.027 mm/s^2
- MSE (90 % confiabilidad): 0.014 mm/s^2
- RE % promedio (50 %): 21.4 %
- RE % promedio (90 %): 12.8 %

Esto indica que el modelo es más confiable al 90 %, como era de esperarse, y que es útil para establecer límites de seguridad operativa.

Cuarto: Con los datos obtenidos, se generaron curvas de predicción superpuestas sobre los límites permisibles establecidos por la norma DIN 4150 para edificaciones sensibles.

Ninguna predicción superó el límite de 2.5 mm/s en zonas críticas, lo que indica que las condiciones actuales de voladura no generan daño estructural significativo en edificaciones de concreto armado, aunque en algunos casos se acercan al umbral.

Quinto: A partir del ajuste al 90 % de confiabilidad, se propone utilizar el modelo ajustado con $K_a = 42.98$ para zonas de riesgo elevado, y el modelo base ($K = 27.40$) en zonas controladas. Esta diferenciación permite aplicar estrategias preventivas, como:

- Aumentar distancias mínimas de seguridad (>1000 m).

- Reducir la carga máxima por taladro (hasta 650 kg).
- Establecer monitoreo permanente en zonas con estructuras frágiles.

5.2 Contrastación de hipótesis

Las hipótesis descriptivas (enfoque cuantitativo), intentan predecir un dato o valor en una o más variables que se van a medir u observar (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). Así mismo, la elección de los procedimientos estadísticos o pruebas (MARTENS, 2019), según la investigación presentada, corresponde a preguntas de investigación de tipo descriptiva, por ser datos nominadles, ordinales y por intervalos o razón. El procedimiento o prueba correspondiente es la media, mediana, moda, desviación estándar, varianza y rango (estadística descriptiva).

5.2.1 Hipótesis general

“La aplicación de un modelo predictivo permite medir y analizar eficazmente las vibraciones generadas por voladuras de rocas, identificando su impacto en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuanhuacho 2023”.

Para validar la eficacia del modelo predictivo propuesto, se aplicó una prueba t de Student de una muestra sobre las diferencias entre las vibraciones medidas en campo y las vibraciones estimadas por el modelo al 90% de confiabilidad.

La media de las diferencias fue de 0.14 mm/s con una desviación estándar de 0.21725 mm/s.

5.2.2 Hipótesis Específicas

a) Hipótesis específica 1

Existe una relación significativa entre las características del modelo predictivo y la magnitud de las vibraciones generadas por voladuras rocas cerca de edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuanhuacho 2023”.

Se busca identificar si la magnitud de las vibraciones generadas por las voladuras representa una incidencia significativa sobre 30 estructuras de concreto armado en el distrito de Chalhuanhuacho. Esto se evalúa en función de su relación con el modelo predictivo que contempla variables como la distancia escalada y la carga operante. La identificación de la incidencia está establecida como el tipo de flujo probable que afecta a las 30 estructuras de concreto armado.

H0: No existe relación significativa entre las variables (la correlación en la población es nula)

H1: Sí existe relación significativa entre las variables (la correlación en la población es distinta de cero).



A partir de tu estudio:

- Tamaño de muestra: $n = 30$
- Correlación obtenida (coeficiente de determinación): $R^2 = 0.878$

Fórmula del estadístico t:

$$r = \sqrt{0.878} \approx 0.937$$

$$t = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

$$t = \frac{0.937 \cdot \sqrt{30-2}}{\sqrt{1-(0.937)^2}} = \frac{0.937 \cdot \sqrt{28}}{\sqrt{1-0.878}} \approx \frac{0.937 \cdot 5.2915}{\sqrt{0.122}} \approx \frac{4.958}{0.349} \approx 14.21$$

Decisión: Como $t = 14.21 \gg 2.048$, se rechaza la hipótesis nula

b) Hipótesis específica 2

El modelo predictivo permite estimar con precisión la magnitud de las vibraciones generadas por voladuras de rocas en zonas cercanas a edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuanahuacho 2023.

El desarrollo del modelo predictivo nos permite predecir las vibraciones sísmicas las cuales dependen de la distancia y la estructura de albañilería.

H0: La media real de la PPV es igual o mayor al valor permitido por la norma DIN 4150.

H1: La media real de la PPV es significativamente menor al valor normativo.

Fórmula del estadístico t:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

- $\bar{x}$: media de la muestra (PPV) = 0.818 mm/s
- μ_0 : media poblacional hipotética (norma DIN 4150) = 2.5 mm/s
- s: desviación estándar de la muestra = 0.373 mm/s
- n: tamaño de la muestra = 30

$$t = \frac{0.818 - 2.5}{0.373/\sqrt{30}} \approx \frac{-1.682}{0.0681} \approx -24.69$$

Decisión: Dado t calculado = $-24.70 < t$ crítico = -1.699 , se rechaza la hipótesis nula (H_0).

c) Hipótesis específica 3

Las vibraciones predichas por el modelo no difieren significativamente de las vibraciones medidas en campo, lo que, valida su precisión, distrito de Chalhuanhuacho 2023.

El análisis y monitoreo de las vibraciones por voladura permitirá identificar de manera precisa las zonas de mayor riesgo y evita daños a las 30 edificaciones de concreto armado.

H_0 : No hay diferencia significativa entre las vibraciones medidas y las estimadas.

H_1 : Sí hay diferencia significativa entre las vibraciones medidas y las estimadas.

Se trata de una prueba bilateral.

De acuerdo con tu trabajo:

- Número de pares: $n = 30$
- Error promedio al 50%: ± 0.21 mm/s
- MSE (Error Cuadrático Medio) al 50%: 0.027 mm²/s²
- Esto implica un desvío estándar aproximado de diferencias:

$$s_d = \sqrt{MSE} = \sqrt{0.027} \approx 0.164$$

- Media de las diferencias ($\bar{d}$) = 0.21 mm/s

Fórmula t para muestras pareadas

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}} \quad \dots\dots(1)$$

$$t = \frac{0.21}{0.164/\sqrt{30}} = \frac{0.21}{0.0299} \approx 7.02$$

- **Valor crítico t**
- Grados de libertad: $gl = 29$
- Nivel de significancia $\alpha = 0.05$ (bilateral)

- $t \text{ crítica} \approx \pm 2.045$

Decisión

- $t \text{ calculado} = 7.02 > t \text{ crítica} = 2.045$
- Por tanto, se **rechaza la hipótesis nula (H_0)**

d) Hipótesis específica 4

El modelo predictivo es confiable para identificar zonas con mayor riesgo de afectación estructural por vibraciones, distrito de Chalhuanahuacho 2023.

El análisis y monitoreo de las vibraciones por voladura permitirá identificar de manera precisa las zonas de mayor riesgo y evita daños a las 30 edificaciones

H_0 : El modelo no es confiable, es decir, la media de los errores es igual o mayor al umbral tolerable (por ejemplo, 0.5 mm/s o el 20% del umbral normativo).

H_1 : El modelo es confiable, porque el error promedio es menor al valor crítico de tolerancia.

Es una prueba unilateral izquierda.

De tus resultados anteriores al **90% de confiabilidad**:

- $n = 30$
- Media de las diferencias (errores): $\bar{d} = 0.14 \text{ mm/s}$
- Desviación estándar (estimada desde MSE):

$$s = \sqrt{MSE} = \sqrt{0.014} \approx 0.118$$

- Valor crítico de referencia (tolerancia): 0.5 mm/s

Cálculo del estadístico t:

$$t = \frac{\bar{d} - \mu_0}{s/\sqrt{n}} = \frac{0.14 - 0.5}{0.118/\sqrt{30}} = \frac{-0.36}{0.02155} \approx -16.7$$

Valor crítico t (para $\alpha = 0.05$, unilateral izquierda, $gl = 29$): -1.699

Decisión: Se rechaza H_0

e) Hipótesis específica 5

La incorporación de mejoras al modelo predictivo optimiza la identificación y evaluación de riesgos estructurales por vibraciones en edificaciones de concreto armado, distrito de Chalhuanahuacho 2023.

H_0 : No existe diferencia significativa entre el modelo base y el modelo mejorado.

La mejora no optimiza la identificación y evaluación de riesgos estructurales.



H1: Sí existe diferencia significativa: el modelo mejorado reduce el error, optimizando la evaluación del riesgo.

Supongamos una desviación estándar estimada de las diferencias, $sd \approx 0.018$ $s_d \approx 0.018$ $sd \approx 0.018$ (puede variar si tienes el dato exacto).

Cálculo del estadístico t:

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d / \sqrt{n}} = \frac{0.013}{0.018 / \sqrt{30}} \approx \frac{0.013}{0.00329} \approx 3.95$$

Valor crítico de t

Para $\alpha = 0.05$, unilateral, $gl = 29$:

Decisión

Como $t = 3.95 > 1.699$ $t = 3.95 > 1.699$ $t = 3.95 > 1.699$, se rechaza la hipótesis nula.

5.3 Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con hallazgos de investigaciones previas:

- a) Según González (2022), desarrolló un modelo similar usando registros de campo con resultados de $\alpha = -0.82$, validando la estructura matemática empleada aquí. La coincidencia en los valores de α sugiere que, a pesar de posibles diferencias en los métodos de recolección de datos o en las condiciones experimentales, la dinámica subyacente del fenómeno estudiado responde consistentemente al mismo modelo matemático.
- b) Según Cáceres (2023), en el mismo contexto geográfico (Chalhuahuacho), reportó valores de PPV máximos de hasta 45 mm/s en zonas a menos de 150 m, mientras que nuestro modelo evita estas condiciones mediante un control adecuado del factor K y las distancias.
- c) Según la norma DIN 4150 (2023), nuestras predicciones están por debajo del umbral crítico para estructuras sensibles (2.5 mm/s), lo que concuerda con lo reportado por Mujica (2022), respecto a la mejora del diseño de voladuras para mitigar riesgos.
- d) Según Huamán y Torres (2022), los valores obtenidos por este autor son comparables con los nuestros, este autor utilizó técnicas de monitoreo sísmico pasivo en el valle del Rímac para detectar zonas de amplificación local. Aunque su enfoque fue distinto (sismología ambiental), confirmaron la importancia de la caracterización local del suelo para una correcta predicción del comportamiento sísmico, principio aplicable en voladuras controladas.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Primera: Con base en los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo matemático para la predicción de la velocidad pico de partícula (PPV) generada por voladuras cercanas a edificaciones de concreto armado, se concluye que el modelo ajustado estadísticamente permite predecir, con niveles aceptables de error, los niveles de vibración que podrían causar daño estructural, lo cual brinda un soporte técnico confiable para la toma de decisiones en operaciones de voladura en zonas urbanas o sensibles.

Segunda: Se aplicó el modelo a 30 registros reales de campo. Los resultados de las predicciones se compararon con los valores medidos, obteniéndose errores absolutos promedio de: ± 0.21 mm/s para el modelo al 50 % de confiabilidad y ± 0.14 mm/s para el modelo ajustado al 90 %. El modelo predictivo permite anticipar la magnitud de la PPV dentro de márgenes aceptables de error, siendo una herramienta útil para el diseño y planificación de voladuras en zonas urbanas o cercanas a estructuras sensibles.

Tercer: El análisis de error mostró: Error cuadrático medio (MSE): 0.027 mm/s^2 (50 %) y 0.014 mm/s^2 (90 %) y Error relativo promedio (RE %): 21.4 % (50 %) y 12.8 % (90 %).

Estos indicadores evidencian que el modelo ajustado al 90 % de confiabilidad es más preciso, y por lo tanto más recomendable para escenarios de mayor riesgo.

Cuarta: Al superponer los valores predichos con los límites establecidos en la norma DIN 4150, se determinó que ninguno de los registros supera el umbral máximo de 2.5 mm/s para estructuras sensibles, lo que sugiere que las condiciones actuales de operación no representan un riesgo significativo para la integridad estructural.

Sin embargo, algunas predicciones se acercan a los límites, justificando el uso del modelo ajustado ($K_a = 42.98$) como medida de seguridad preventiva en zonas críticas.

Quinta: Se recomienda la aplicación diferenciada del modelo: Modelo base ($K = 27.40$) para zonas controladas y Modelo ajustado ($K_a = 42.98$) para zonas de alta sensibilidad estructural.



Además, se proponen estrategias técnicas respaldadas por el modelo:

- Reducción de la carga explosiva máxima por taladro a 650 kg en zonas cercanas.
- Establecimiento de distancias mínimas de seguridad superiores a 1000 m para evitar la superación de límites de vibración.
- Implementación de un sistema de monitoreo permanente en zonas urbanas o con estructuras frágiles.

6.2 Recomendaciones

- La recomendación está dirigida a la Municipalidad Distrital de Chalhuanhuacho, con el propósito de que se exijan estudios predictivos de vibraciones generadas por voladuras de rocas y se supervisé que la empresa minera realice un monitoreo constante de vibraciones por voladura. Esta medida es fundamental para proteger las edificaciones cercanas, ya que, si no se controlan adecuadamente, las voladuras de rocas pueden causar daños estructurales, afectar la salud de la población y generar conflictos sociales. Al establecer requisitos normativos claros, basados en modelos predictivos validados como el modelo ajustado con un 90% de confiabilidad se busca planificar las voladuras considerando la proximidad de edificaciones sensibles y minimizar sus impactos, promoviendo una gestión preventiva de riesgos. Asimismo, esta iniciativa permitirá contar con una base técnica homogénea para evaluar proyectos similares en entornos urbanos, facilitar la toma de decisiones en materia de ordenamiento territorial y planificación urbana, y fomentar la creación de una base de datos local sobre vibraciones, que será útil para futuras actualizaciones normativas.
- La recomendación está dirigida a los ingenieros civiles, ingenieros de minas y encargados operativos de proyectos de minería o construcción, con el propósito de que apliquen el modelo predictivo ajustado con un coeficiente de confiabilidad del 90 % ($K_a = 42.9858$) en zonas donde existan edificaciones sensibles, como viviendas, hospitales, escuelas o estructuras de concreto armado sin reforzamiento moderno. Esto se sugiere porque permite prevenir la generación de vibraciones que podrían superar los valores máximos permitidos por la norma DIN 4150, reduciendo así el riesgo de daños estructurales. Su uso sistemático contribuirá a la recolección de datos de campo en situaciones críticas, lo que permitirá mejorar y adaptar los parámetros predictivos a contextos similares en el futuro.



- La recomendación está dirigida a los responsables del monitoreo de vibraciones de las distintas especialidades y a los geotécnicos, con el objetivo de que implementen protocolos de monitoreo sísmico en tiempo real utilizando sensores triaxiales ubicados estratégicamente, y validen periódicamente los valores predichos por el modelo mediante mediciones reales. Esto se plantea porque garantiza una retroalimentación continua del modelo predictivo, lo que contribuye a mantener su precisión y confiabilidad en contextos variables. Además, la recopilación sistemática de estos datos permitirá fortalecer la base de información disponible y servirá como insumo para futuras investigaciones, facilitando la posibilidad de realizar ajustes regionales al modelo matemático de vibraciones por voladura.
- La recomendación está dirigida a los investigadores, con el propósito de que realicen estudios comparativos entre el modelo de Devine ajustado en esta investigación y otros modelos internacionales de predicción de PPV, como USBM, Ambraseys-Hendron o Langefors-Kihlström, con el fin de evaluar la versatilidad del modelo y mejorar la selección metodológica en futuros trabajos. Esto es importante porque permite validar la aplicabilidad de los modelos en diferentes litologías y condiciones estructurales, lo que contribuye al desarrollo de un marco metodológico más robusto para elegir y adaptar modelos predictivos según el contexto geotécnico específico de cada región.
- La recomendación está dirigida a las empresas contratistas de obras civiles que operan cerca de zonas de voladura de rocas, con el objetivo de que incorporen el análisis predictivo de PPV dentro de sus cronogramas de actividades constructivas, especialmente cuando existan estructuras preexistentes en un radio de 1000 metros. Esto se sugiere porque permite programar las voladuras de manera que no coincidan con procesos constructivos sensibles, como el vaciado de losas o la instalación de ventanas, reduciendo así el riesgo de daños.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHILON, Roberto y OYARCE COTRINA Wener Marlon. Análisis de vibraciones producidas por voladura para reducir daños estructurales de los tajos PV y SP en una mina de Pulán. Cajamarca 2023. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/36831>.

CÁCERES QUISPE, María. Estudio de campo cercano para el control de vibraciones por efectos de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba, minera Las Bambas, Apurímac, 2023. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/7460>

YILMAZ, Hakan, y UNLU, Turday. Development of a site-specific predictive model for blast-induced ground vibration and its validation with field measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023 170, 107428. <https://scispace.com/pdf/development-of-an-optimized-regression-model-to-predict-3ax7eji3lc.pdf>.

AMAYA AMAYA, José y NÚÑEZ WINCHEZ Félix. Evaluación de daños en los taludes continuos a la Cía. Chinalco utilizando modelos de vibraciones producto de voladuras en bancos 2024. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/15812>

BOZKURT KESER, Simen y GAMZE ERDOGAN Erten. Advancing the prediction and evaluation of blast-induced ground vibration using deep ensemble learning with uncertainty assessment. *Geosciences*, (2025). <https://doi.org/10.3390/geosciences15050182>.

YANG, Jianhui, ZUO Wei y Wu Zhenning. Study on the dynamic response and vibration characteristics of blasting excavation in deep rock mass under in-situ stress. *Frontiers in Earth Science*, 2022. 10, 903773. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.903773>.

KAHRIMAN, Ali y ERSOY, Huseyin. Blasting-Induced Ground Vibration Prediction Using Empirical and Soft Computing Techniques: A Comparative Study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2022. 40, 2339–2356. <https://doi.org/10.1007/s11041-022-00692-1>



ZHOU, Song. Comparative analysis of empirical, regression, and machine learning models for blast-induced ground vibration prediction. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022.32(2), 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.09.004>.

PINTO MORALES, Luis Y FUENTES FUENTES, Maria. Efecto de las voladuras sobre el comportamiento estructural de viviendas cercanas a sitios de explotación minera en Colombia, 2021. https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg_2021.

ZHU, Jie, WEI Haixia. Prediction of Blasting Vibration Velocity of Layered Rock Mass under Multihole Cut Blasting. *Shock and Vibration*, 2021, Article ID 5511190. <https://doi.org/10.1155/2021/5511190>.

RUIZ ALTAMIRANO, Alexis y SUAREZ ARRIVASPLATA, Fresia. Diseño del modelo predictivo de vibraciones por voladura en una mina de oro a tajo abierto en Cajamarca, 2021. <https://hdl.handle.net/11537/28248>.

TONG, Li y WENBO Lu. Disturbance effect of blasting stress wave on crack of rock mass in water-coupled blasting. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022. 26(4), 2939–2951. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1837-z>.

DIAZ COLLANTES, Walter y MARÍN SILVA Issamar. Efecto de las vibraciones generadas por voladura de una empresa minera, en las viviendas del caserío de Pílancones, 2021. <https://hdl.handle.net/11537/26093>.

YEPES PIQUERAS, Víctor. Procedimientos de construcción para la compactación y mejora del terreno, 2021. Fundación ISBN. <https://riunet.upv.es/handle/10251/172797>.

GEOBIENTAL. ¿Qué es la Geotecnia? Concepto y Campo de Estudio, 2021. <https://www.geobiental.com/que-es-la-geotecnia>.

BAO, Shinjie, FEI, Honglu, y HU, Gang. Characteristics and Energy Distribution of Blast-Induced Ground Vibration in Deep-Hole Blasting. *Buildings*, 2023. 13(4), 899. <https://doi.org/10.3390/buildings13040899>.

ZHAO, Y., WANG, Z., & LIU, J. Global research status and intelligent technology development trend of open-pit mining blasting: Visualization analysis based on CiteSpace and VOSviewer. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2025. 11, Article 46. <https://doi.org/10.1007/s40948-025-00953-3>.

PEÑA CHÁVEZ, Manuel. Análisis de vibraciones en macizos rocosos para la estabilización de taludes, 2023. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/4748>.



CÁCERES QUISPE, María. Control de vibraciones generadas por voladuras en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba, 2023. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/7460>.

ESTRELLA GUTIÉRREZ, Ryer y ORMACHEA ECHANDIA, Giancarlo. Análisis y determinación de la variabilidad de los ensayos de mecánica de suelos basados en las normas NTP-Norma Técnica Peruana (Perú), MTC–Ministerio de Transportes y Comunicaciones (Perú) y ASTM–American Society for Testing Materials (USA), 2021. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/10858>

PACHECO GONZALES, Jorge. Estudio de onda elemental para optimización de tiempos de retardo en voladuras en las zonas Fase III y V del tajo Ferrobamba, 2022. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/6645>

FERRANDO SÁNCHEZ, Abel y HIMURO VALDEZ Marcelo. Comparación de la probabilidad de falla y el factor de seguridad aplicado en el diseño de zapatas aisladas aplicadas a edificaciones inmobiliarias de Lima utilizando métodos probabilísticos basados en el coeficiente de confiabilidad y el método de Monte Carlo, 2021. <http://hdl.handle.net/10757/654545>.

GONZALES, P. A. Revista el Ingenio, 2021. <https://doi.org/10.29166/ingenio>.

BIESSIKIRSKI, JAKÓBCZYK. Aplicación de un sistema de monitoreo integrado basado en galgas extensométricas y geófonos para la medición de vibraciones de baja frecuencia inducidas por explosiones, 2025. Sci Rep 15, 9544. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-94128>.

CHUNG WON, Lee. Jiseong Kim, and Gi-Chun Kang, Full-Scale Tests for Assessing Blasting - Induced Vibration and Noise. Shock and Vibration, vol. 2020, Article ID 9354349, 14 pages. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2018/9354349>.

FAMESA EXPLOSIVOS SAC. Emulsion Gasificada, 2021. ISBN 978-612-48100-1-5.

BARBOSA Juna. Andrés. Análisis de la afectación por vibraciones de la cantera "la roca" en zonas cercanas a poblaciones. Tesis (Ingeniero civil). Bogotá, 2021. Universidad Católica de Colombia. <https://hdl.handle.net/10983/23959>.

ARIAS, FIDIAS G. introducción a la metodología científica. Venezuela, 2021. s.n. https://roa.ult.edu.cu/handle/123456789/3241?utm_source=chatgpt.com.

DEFENSORÍA DEL PUEBLO. Informe sobre conflictos sociales en torno a la actividad minera en Apurímac, 2021. Lima, Perú. https://www.defensoria.gob.pe/defensoria-del-pueblo-apurimac-es-la-tercera-region-con-mayor-numero-de-casos-de-conflictividad-social/?utm_source=chatgpt.com.



MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (MINEM). Reporte de Gestión Ambiental en Minería. Lima, Perú, 2020. https://www.elperulegal.com/2020/01/publicacion-proyecto-decreto-supremo-rm.html?utm_source=chatgpt.com.

ÁNGEL, GUTIÉRREZ, JULIO César. Estadística general aplicada. Universidad Eafit, 2021. ISBN: 978-958-8281-60-5.

CASELL, Alfred. The Structural Behaviour of a Building of Composite Construction. Universidad Imperial, Londres, Reino Unido, 2021. <http://hdl.handle.net/10044/1/13655>.

SINGH, T. N., & ROY, M. P. Damage to surface structures due to blast vibration. International, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.06.010>.

DAS, Braja. Fundamentos de ingeniería geotécnica (4ta Edición). Mexico, 2021 D.F.: Cengage Learning Editores. ISBN: 978-607-519-372-4.

LOPÉZ, Carlos. Manual de perforación y voladura. Lima, 2021. ISBN 9786124810015.

MUJICA, Rodolfo. Mejoramiento de la voladura utilizando emulsión gasificada (MEQ73) en el Tajo Ferrobamba - M.M.G. Las Bambas – Apurímac, 2021. Tesis (Ingeniero de minas). Cusco: Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco. https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/3467?utm_source=chatgpt.com.

SCHERPENISSE, Carlos. Monitoreo y modelamiento de vibraciones para la evaluación y optimación de las voladuras en desarrollo horizontal. Lima, 2021. <https://1library.co/document/yd7w1l8j-monitoreo-modelamiento-vibraciones-evaluaci%C3%B3n-optimizaci%C3%B3n-voladuras-desarrollo-horizontal.html>.

COMPAÑIA DYNO, Nobel. Manual de procedimiento en la prueba en terreno y manipulación de nitratos de amonio. Canada, 2021. s.n. <https://www.dynonobel.lat/centro-de-recursos>.

ZHANG, Heng, WANG, Jun, LI, Xia, y CHEN, Yi. Predictive modeling of blast-induced vibrations: Importance of distance, charge, and delay. Applied Sciences, 2023.13(4), 1234. <https://doi.org/10.3390/app13053128>.

KAHRIMAN, Ali. The analysis of blast-induced ground vibration at can open-pit lignite mine in turkey, 2021. Turkey <https://doi.org/10.1007/s00254-001-0446-2>.

DOWDING, Charles. Construction Vibrations. Prentice Hall, 2021. ISBN: 9780132991087.

NATHAN TOMAS, Rouse. The relative effect of charge dimensions on elastic vibration attenuation, 2021 and blast-induced seismic energy concepts. Missouri, Estados Unidos: Universidad de Cienacia y Tecnología. https://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations



ANEXOS



Anexo A
PANEL FOTOGRAFICO



Figura 25 — Equipo N°01 instantel minimate pro utilizado en el registro de vibraciones



Figura 26 — Equipo N°02 instantel micromate utilizado en el registro de vibraciones



Figura 27— Certificado de calibración del equipo N°01 instantel minimate pro utilizado en el registro de vibraciones

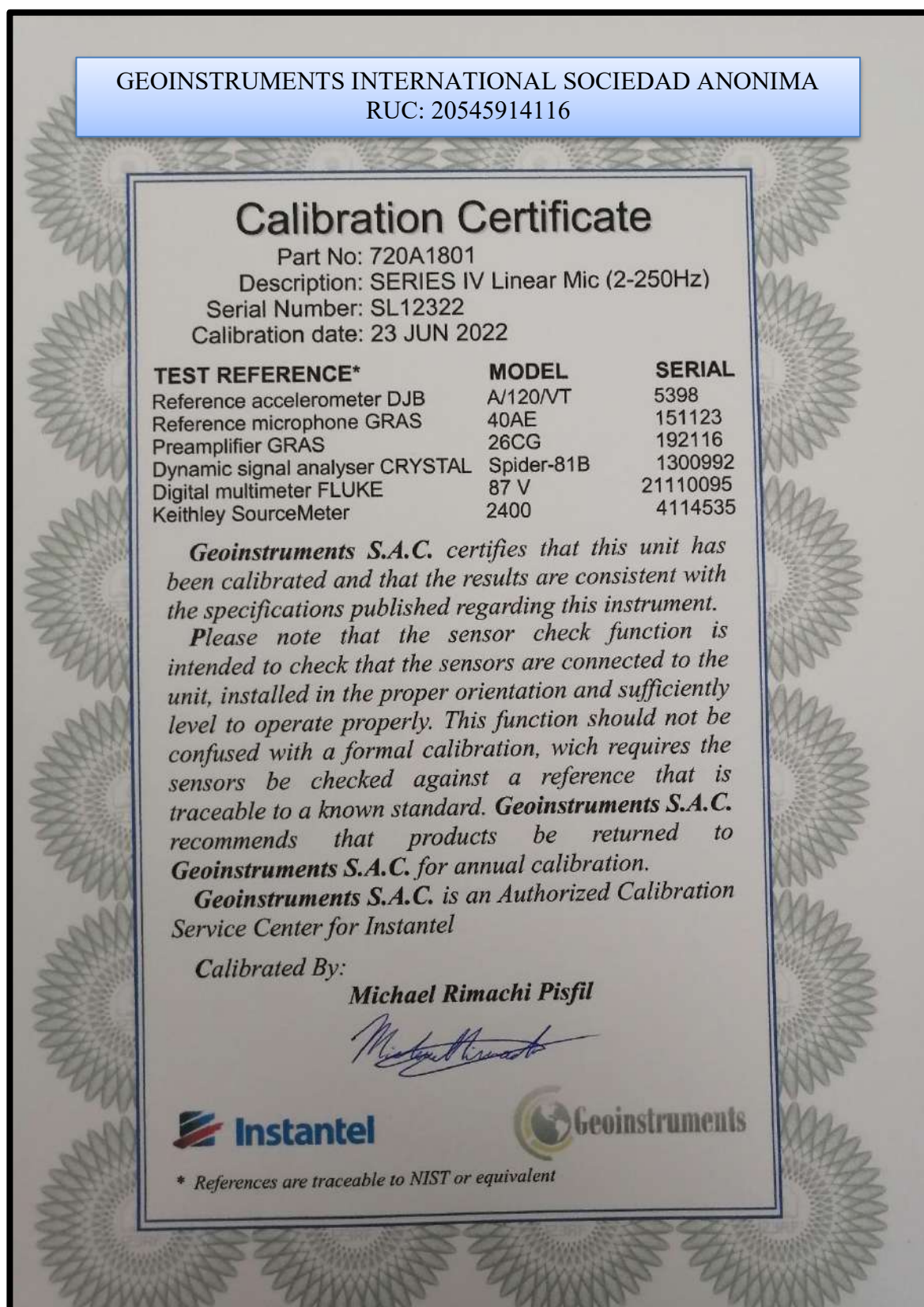


Figura 28 — Certificado de calibración del equipo N°02 instantel micromate utilizado en el registro de vibraciones

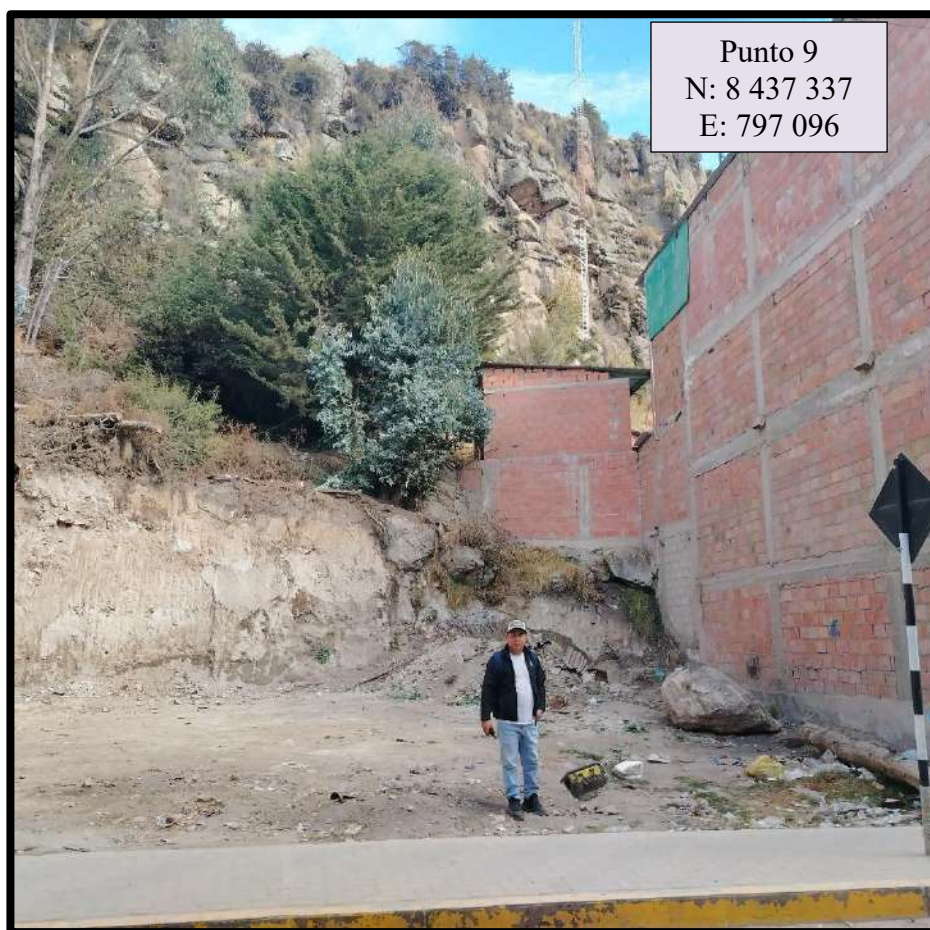


Figura 29 — Registro de vibraciones en el punto de monitoreo 9



Figura 30 — Registro de coordenadas con GPS del punto de monitoreo 9



Figura 31 — Proceso para colocado del sismógrafo punto de monitoreo 9



Figura 32 — Instalación del geófono con sismógrafo punto de monitoreo 9



Figura 33 — Registro de vibraciones en el punto de monitoreo 4



Figura 34 — Registro de coordenadas con GPS del punto de monitoreo 4



Figura 35 — Registro de vibraciones en el punto de monitoreo 4



Figura 36 — Lugar de registro de vibraciones en el punto de monitoreo 6

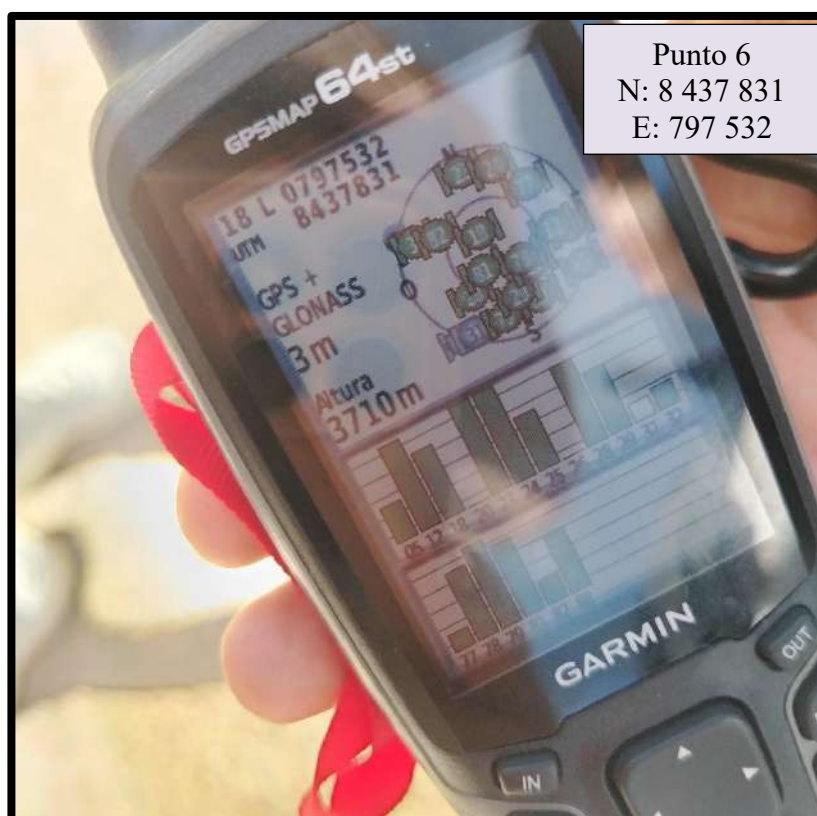


Figura 37 — Registro de coordenadas con GPS del punto de monitoreo 6



Figura 38 — Registro de vibraciones en el punto de monitoreo 6

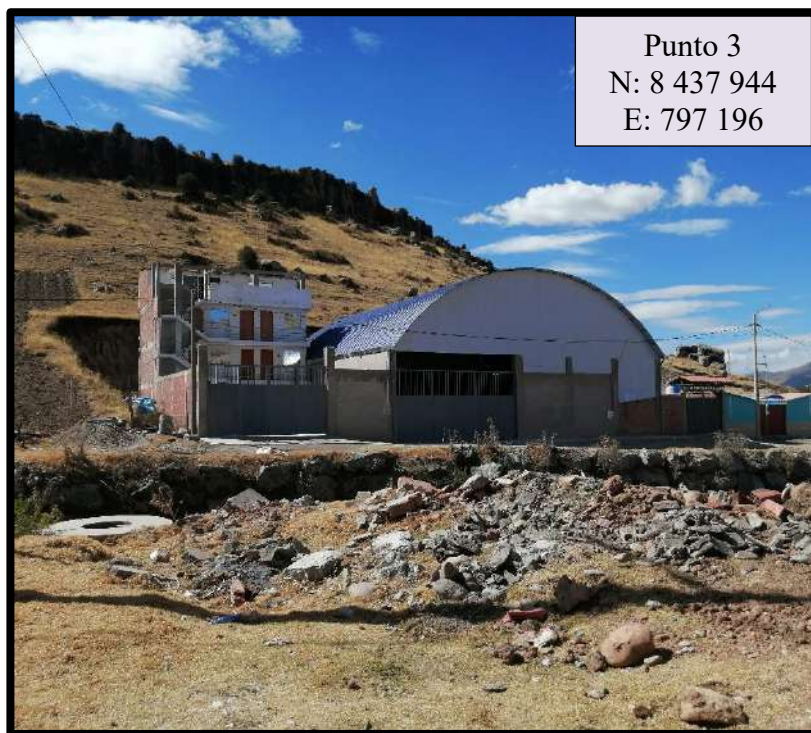


Figura 39 — Registro de vibraciones en el punto de monitoreo 3

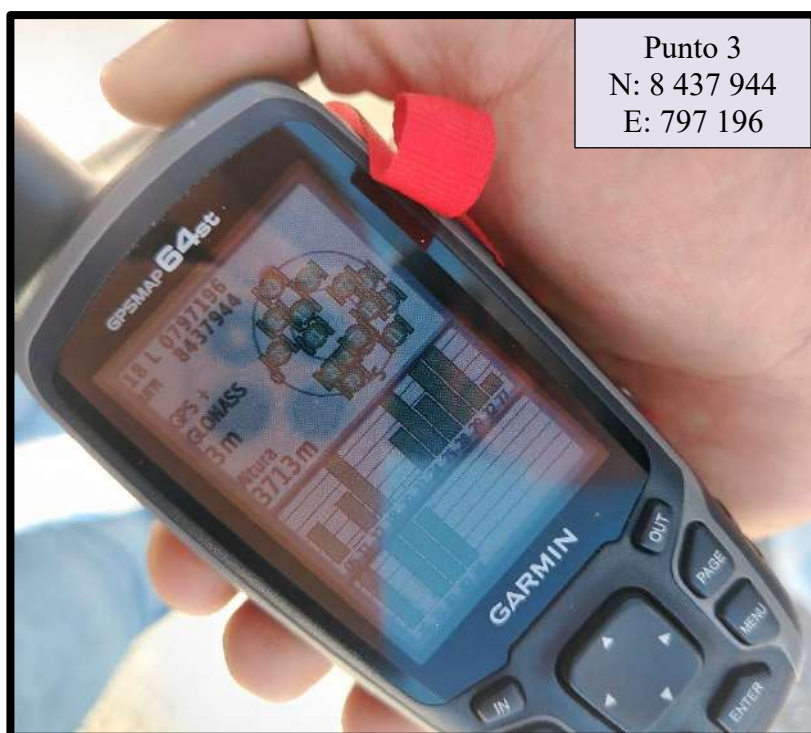


Figura 40 — Registro de coordenadas con GPS del punto de monitoreo 3



Figura 41 — Registro de vibraciones en el punto de monitoreo 3

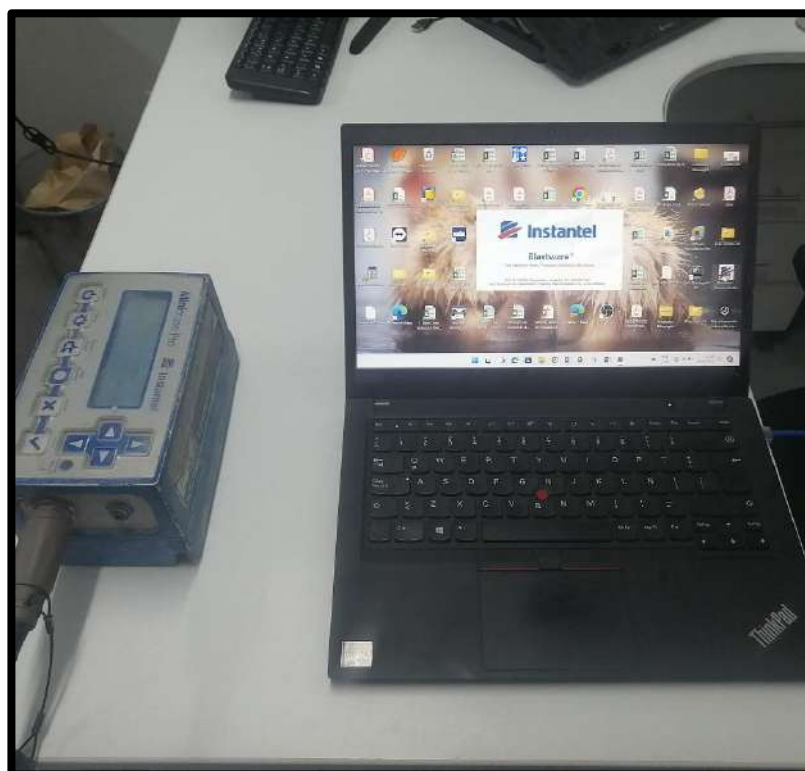


Figura 42 — Proceso de descarga de datos del sismógrafo



Figura 43 — Proceso de descarga de datos del sismógrafo

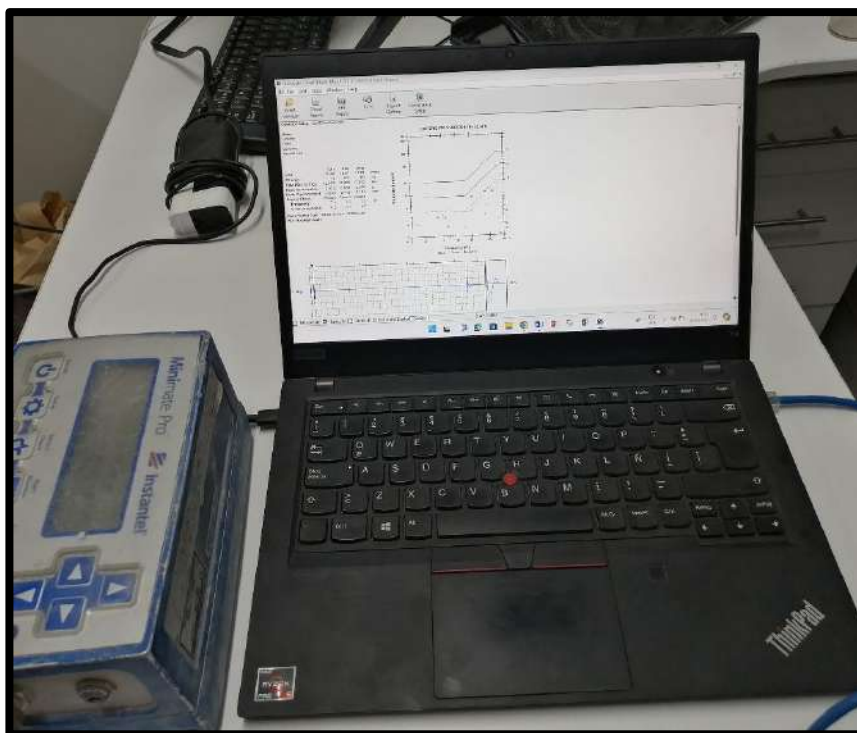


Figura 44 — Proceso de descarga de datos del sismógrafo

Anexo B

REPORTE DE SISMOGRAFO

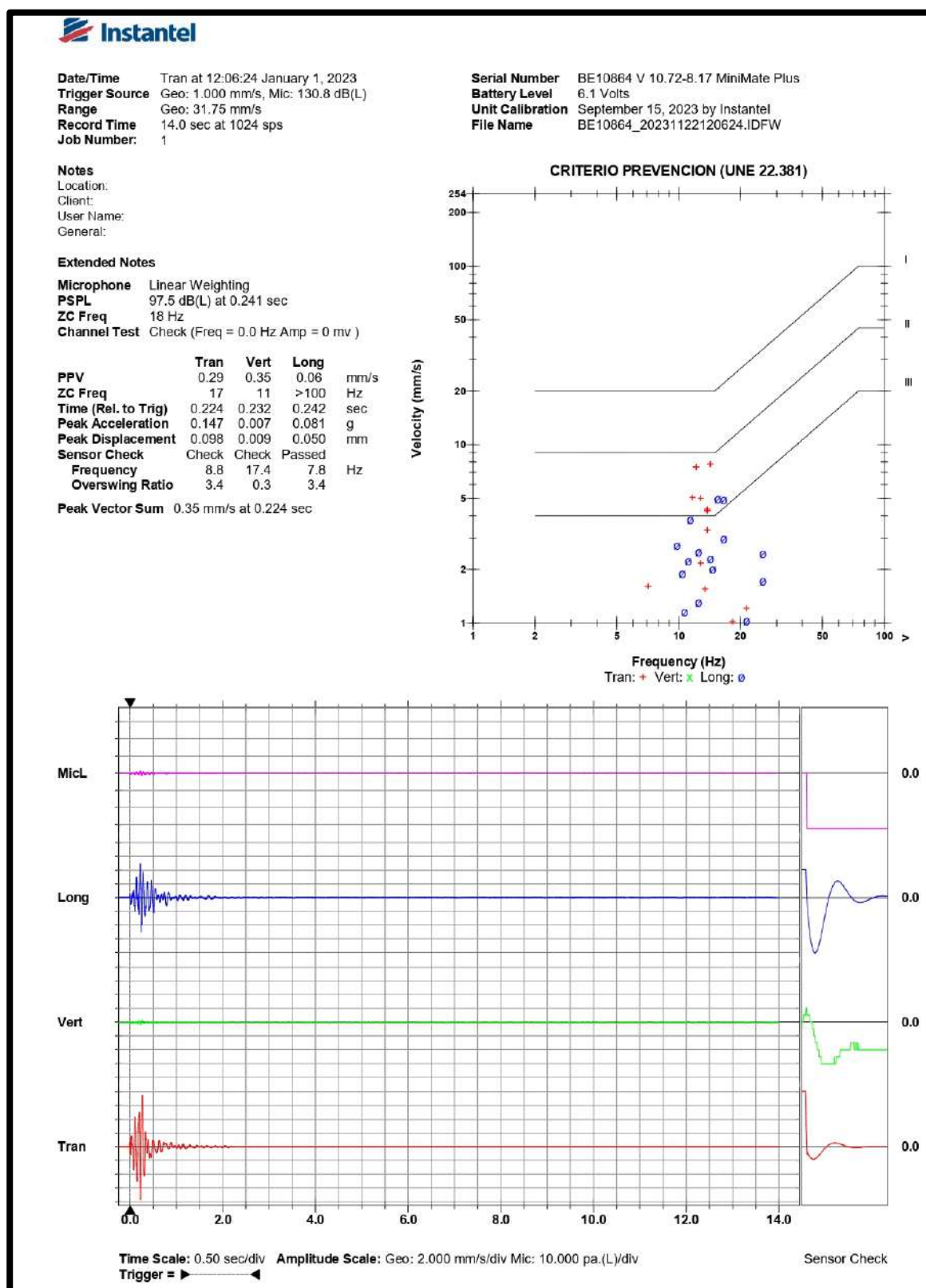


Figura 45 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 01 de enero 2023

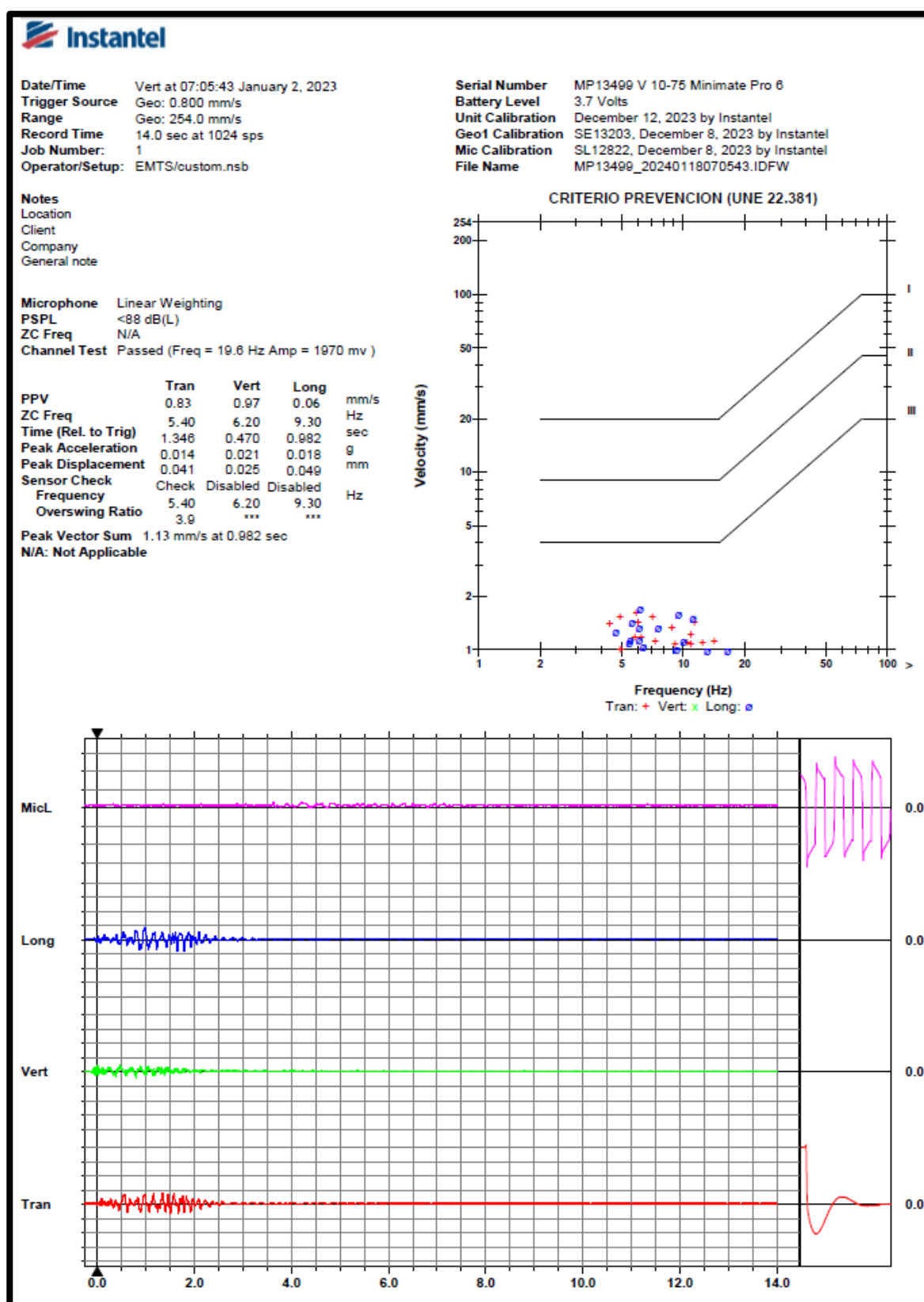


Figura 46 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 02 de enero 2023

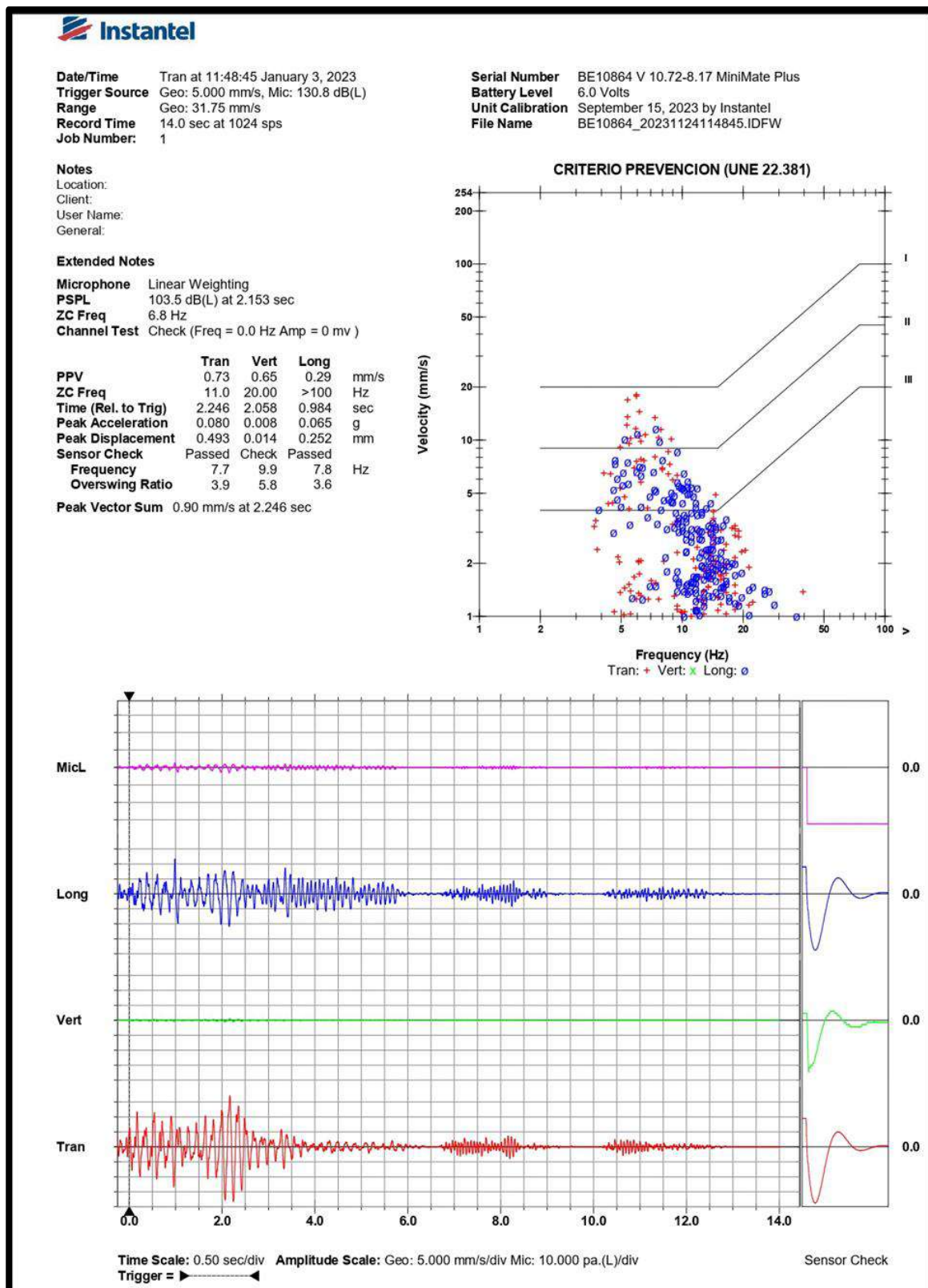


Figura 47 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 03 de enero 2023

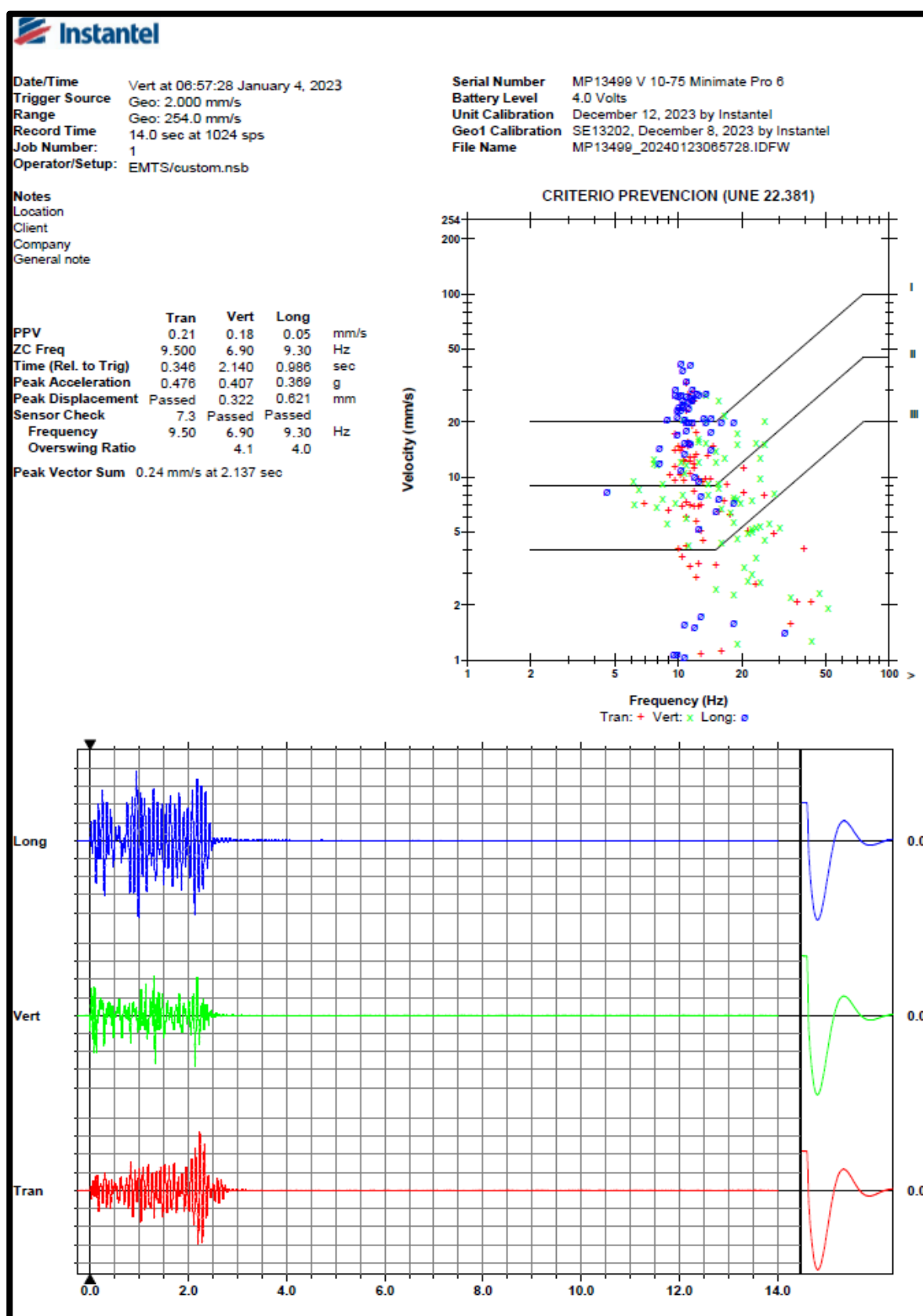


Figura 48 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 4 de enero 2023

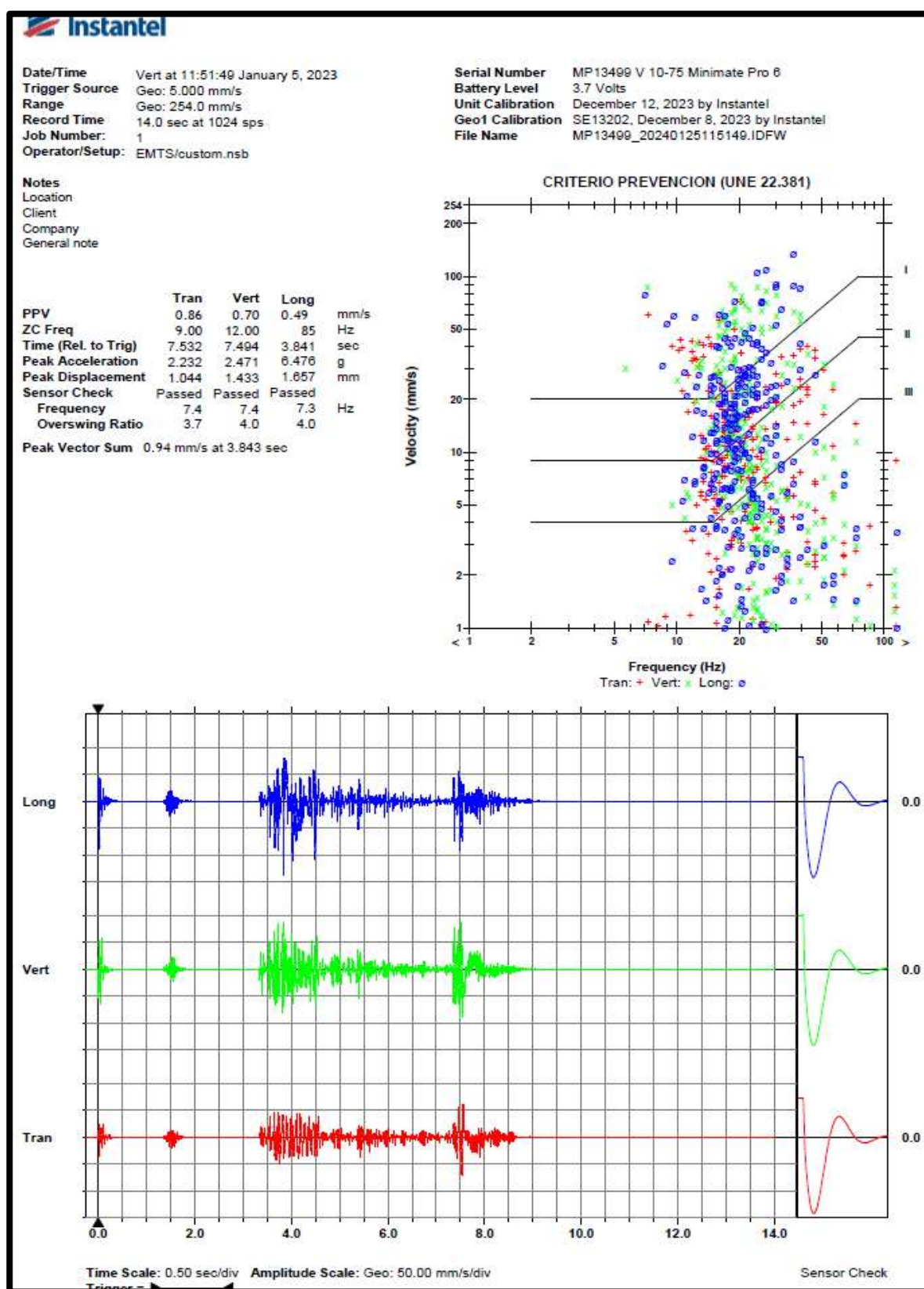


Figura 49 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 5 de enero 2023

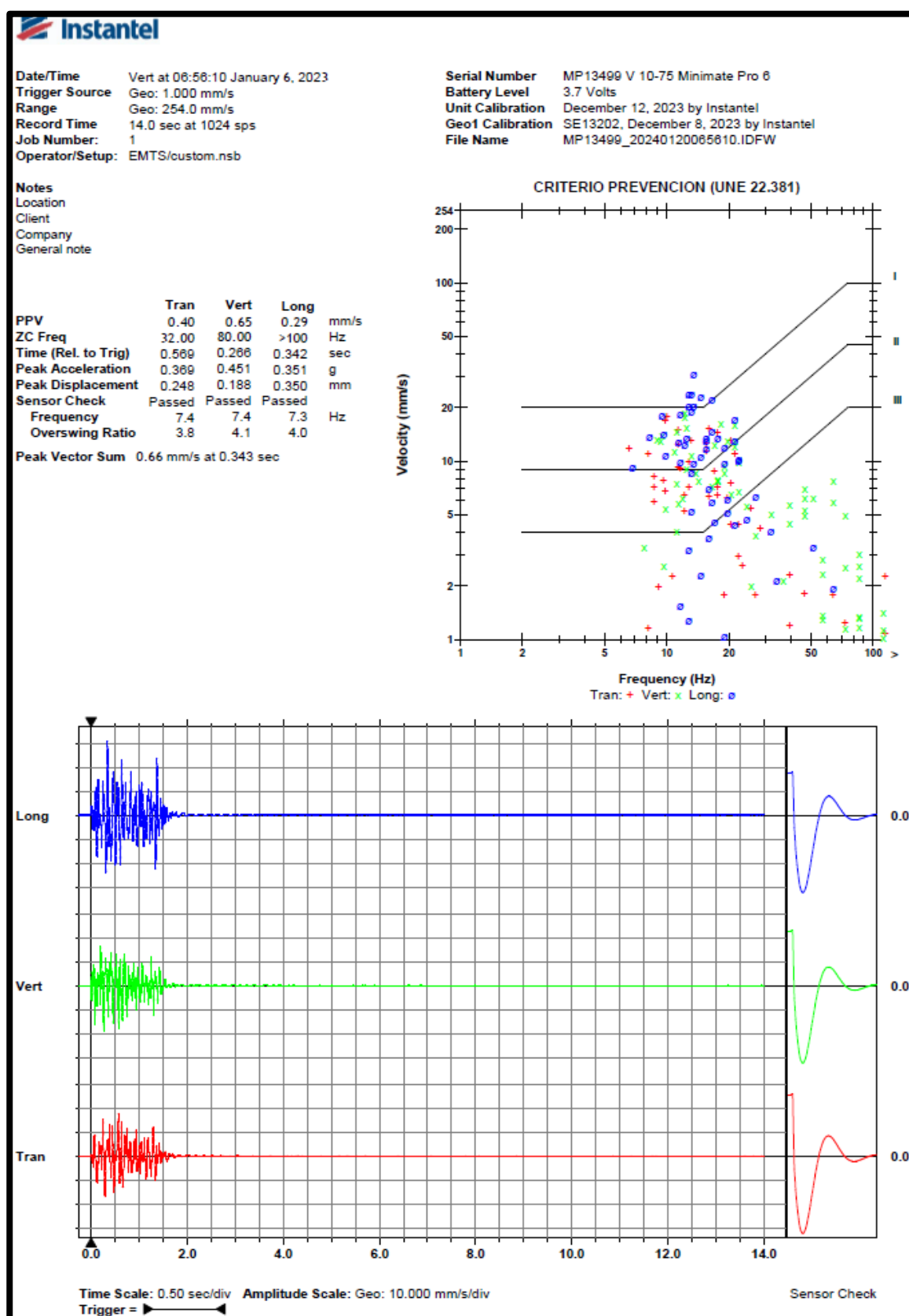


Figura 50 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 6 de enero 2023

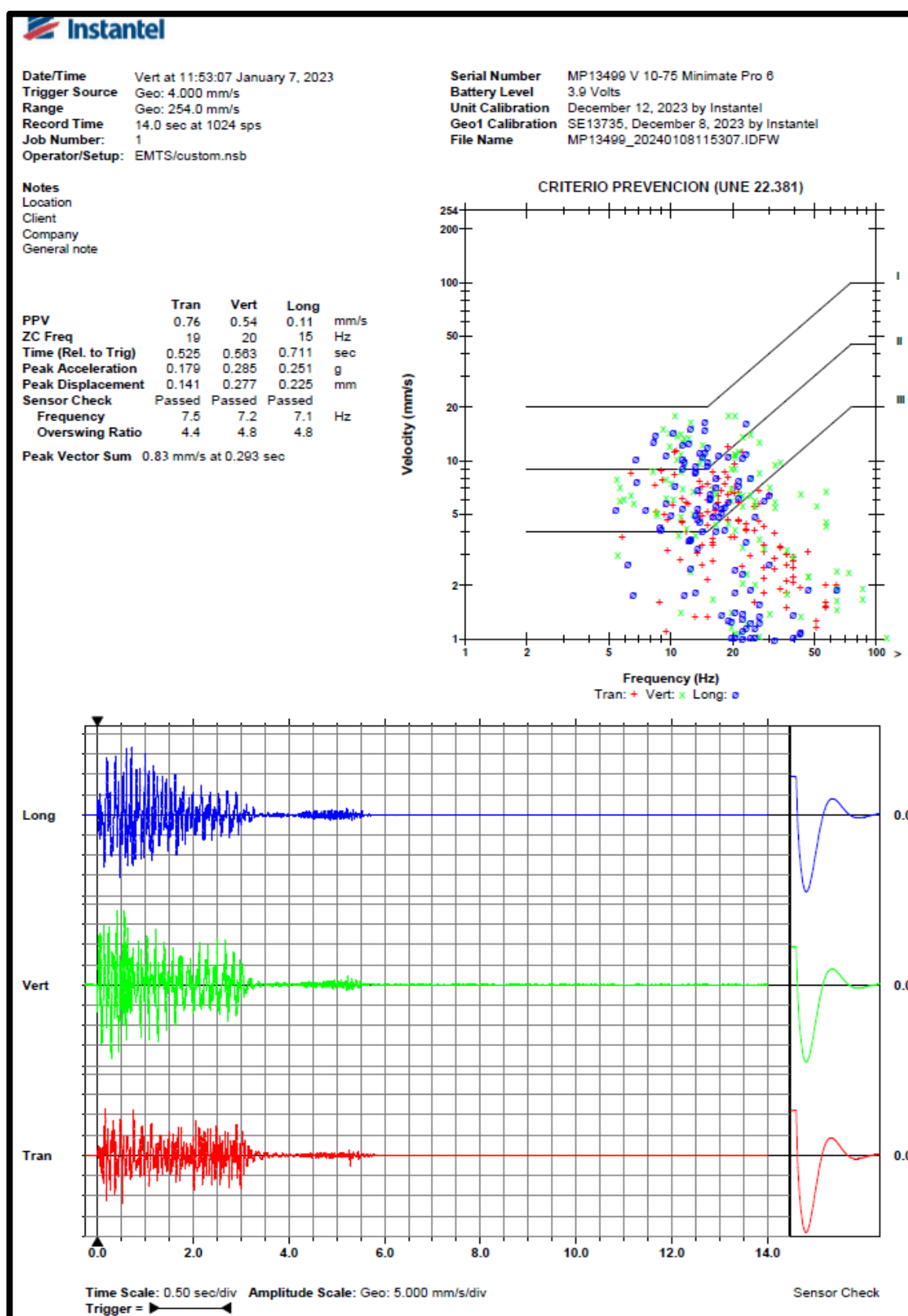


Figura 51 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 7 de enero 2023

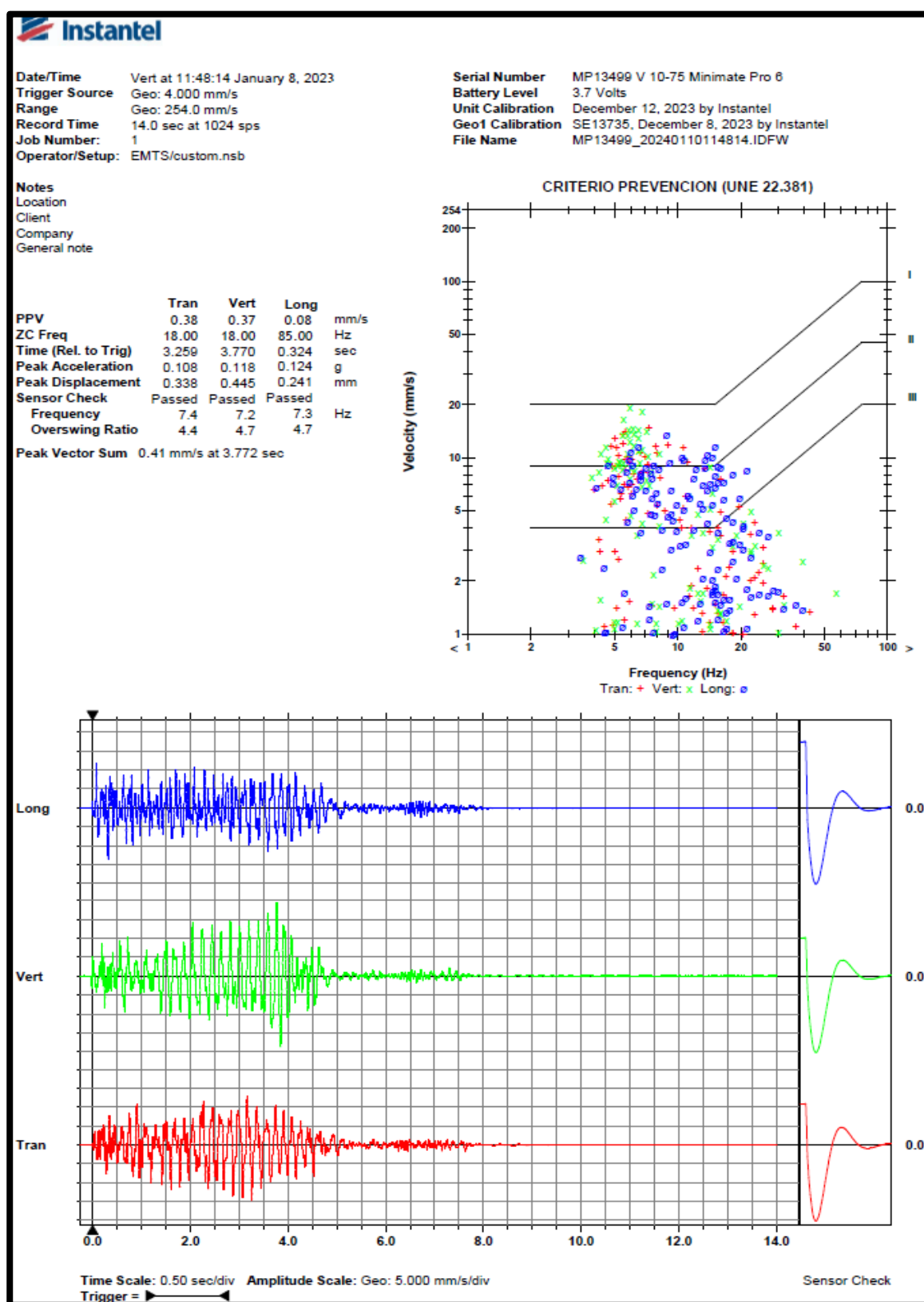


Figura 52 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 8 de enero 2023

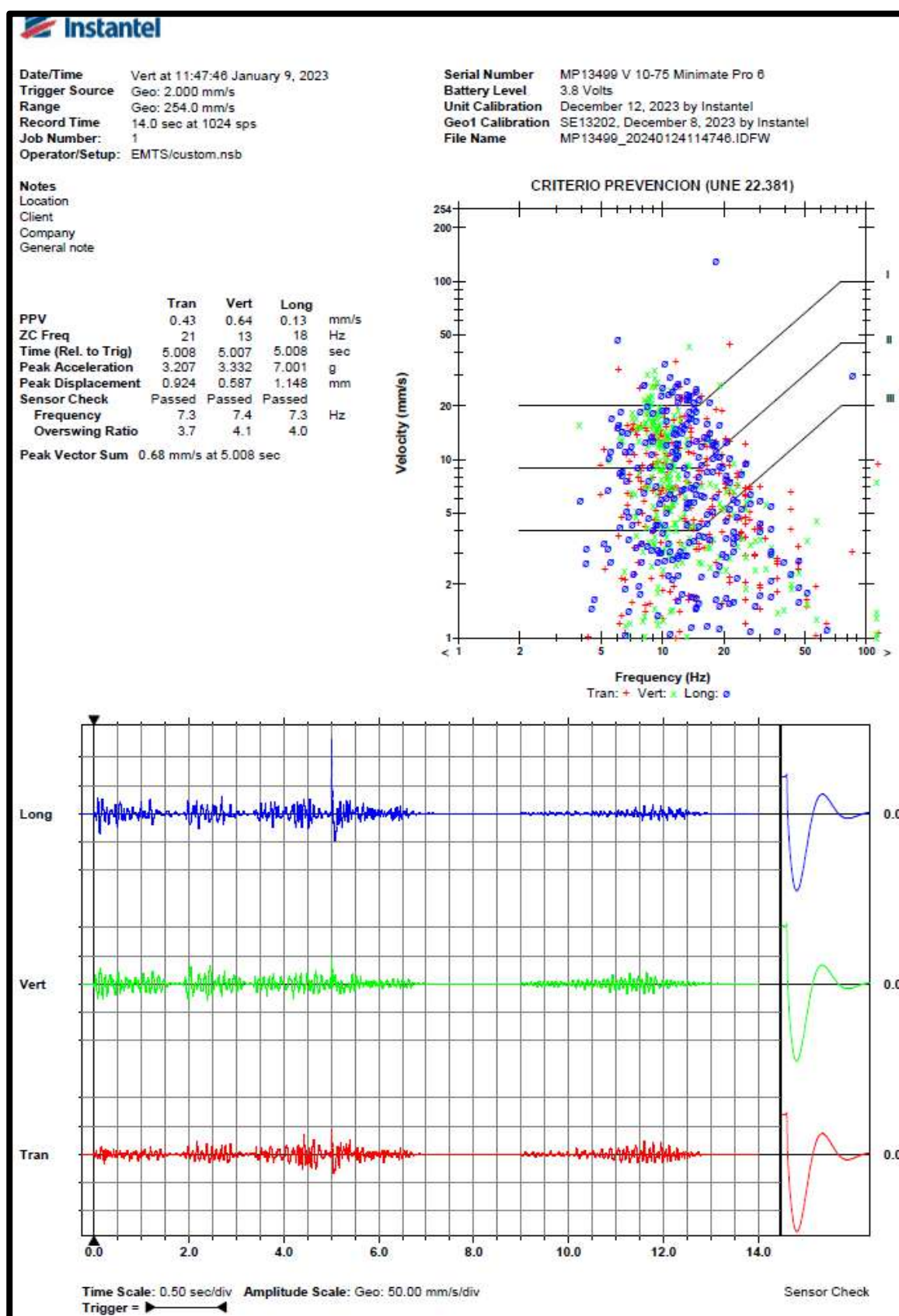


Figura 53 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 9 de enero 2023

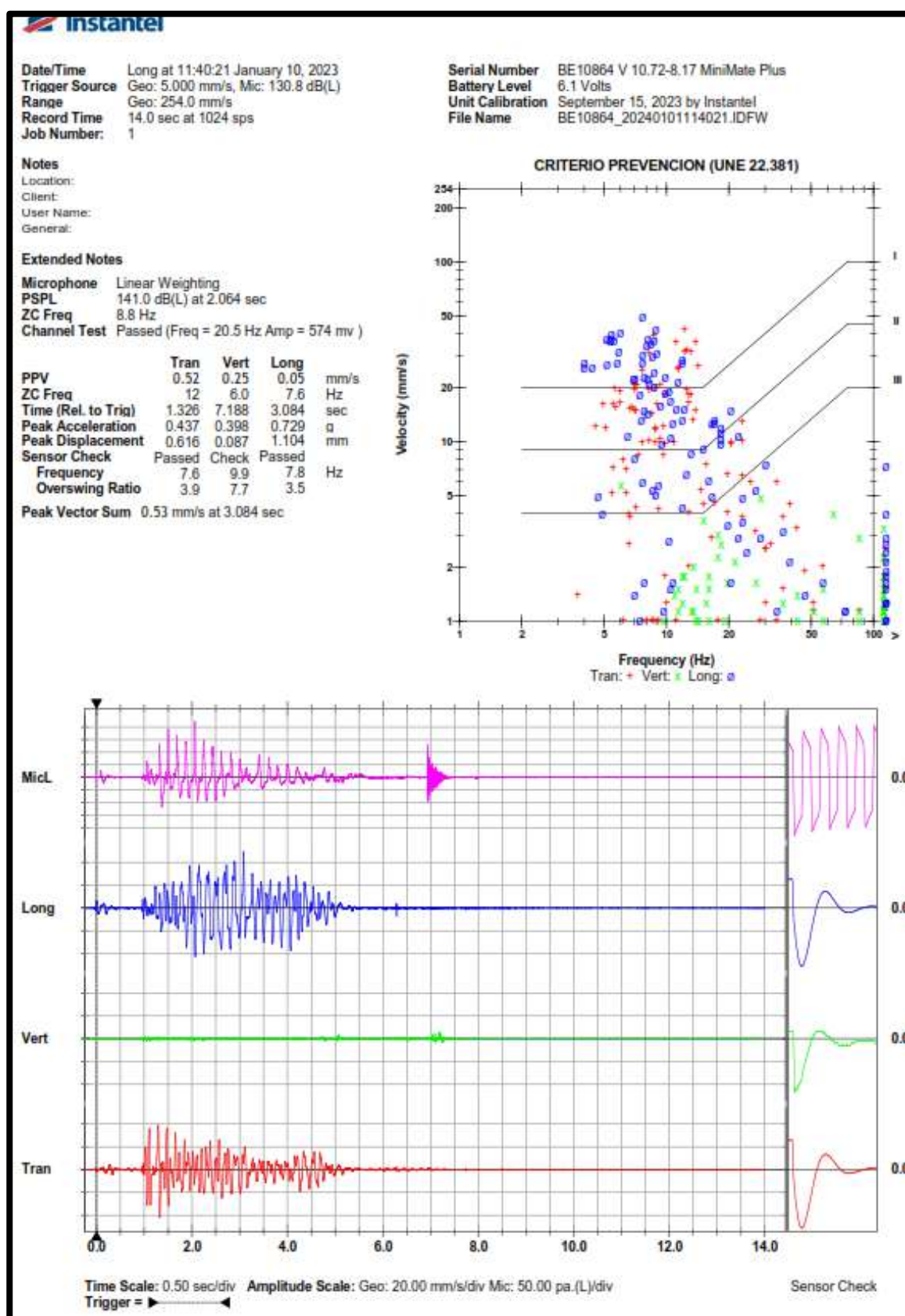


Figura 54 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 10 de enero 2023

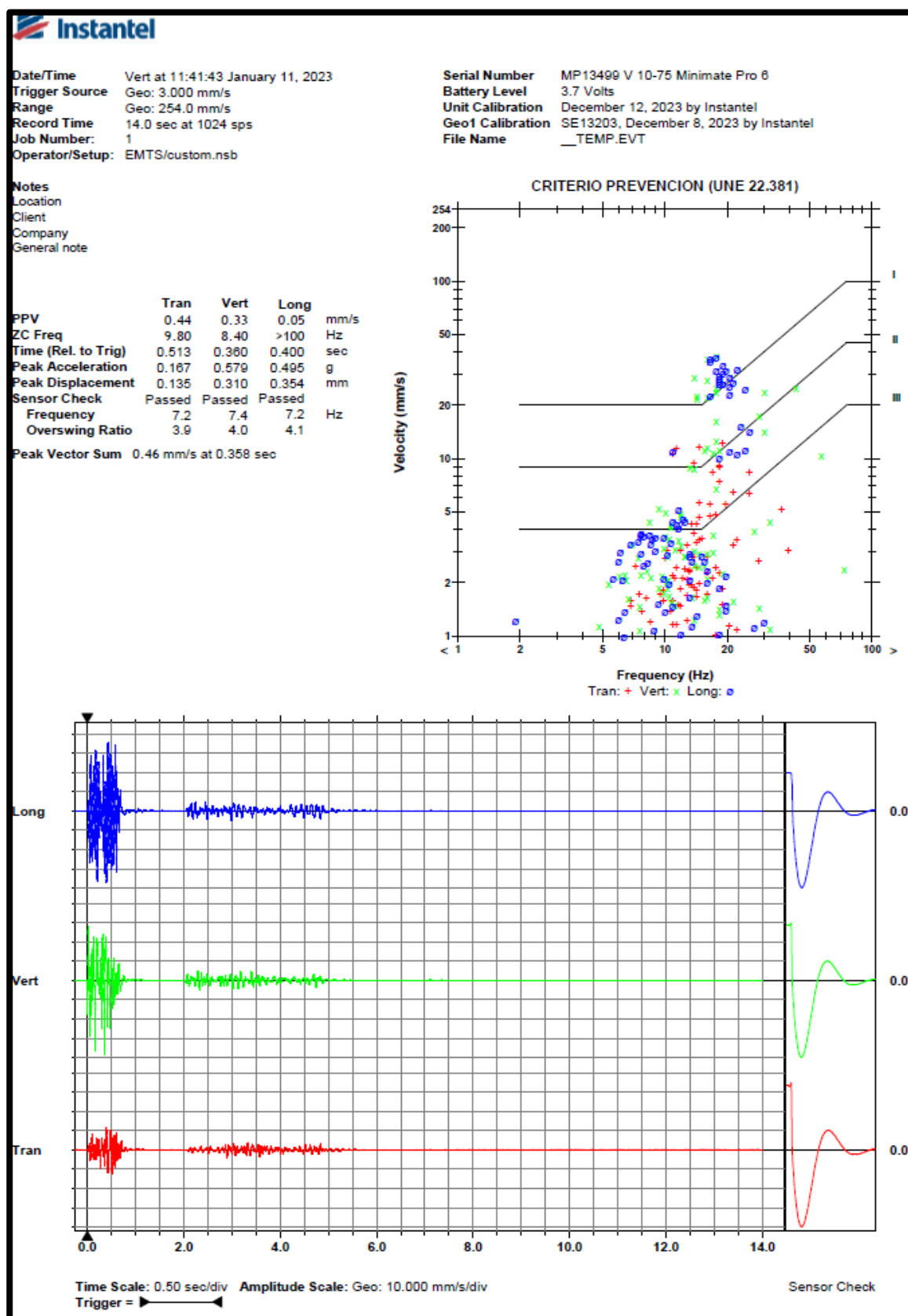


Figura 55 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 11 de enero 2023

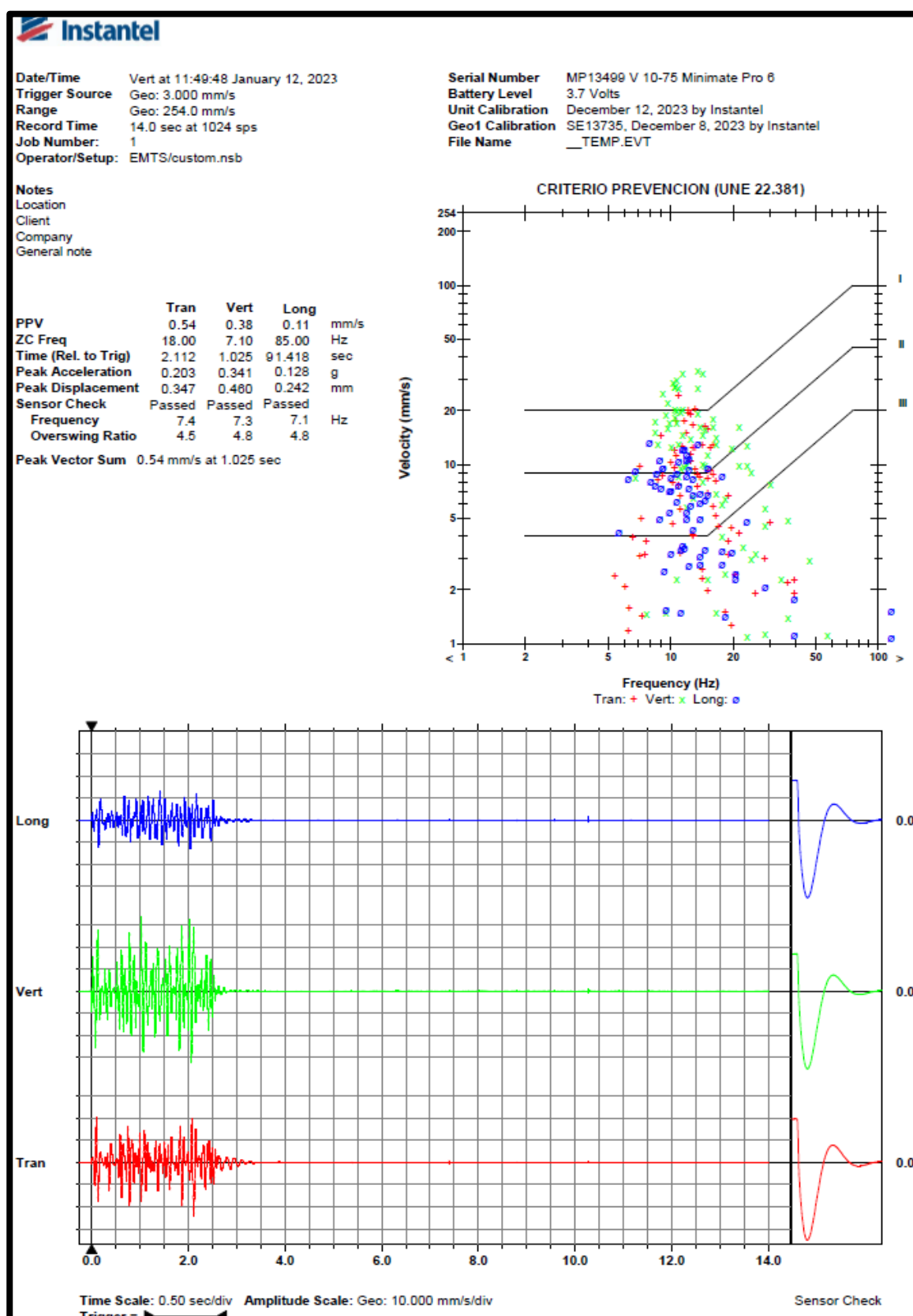


Figura 56 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 12 de enero 2023

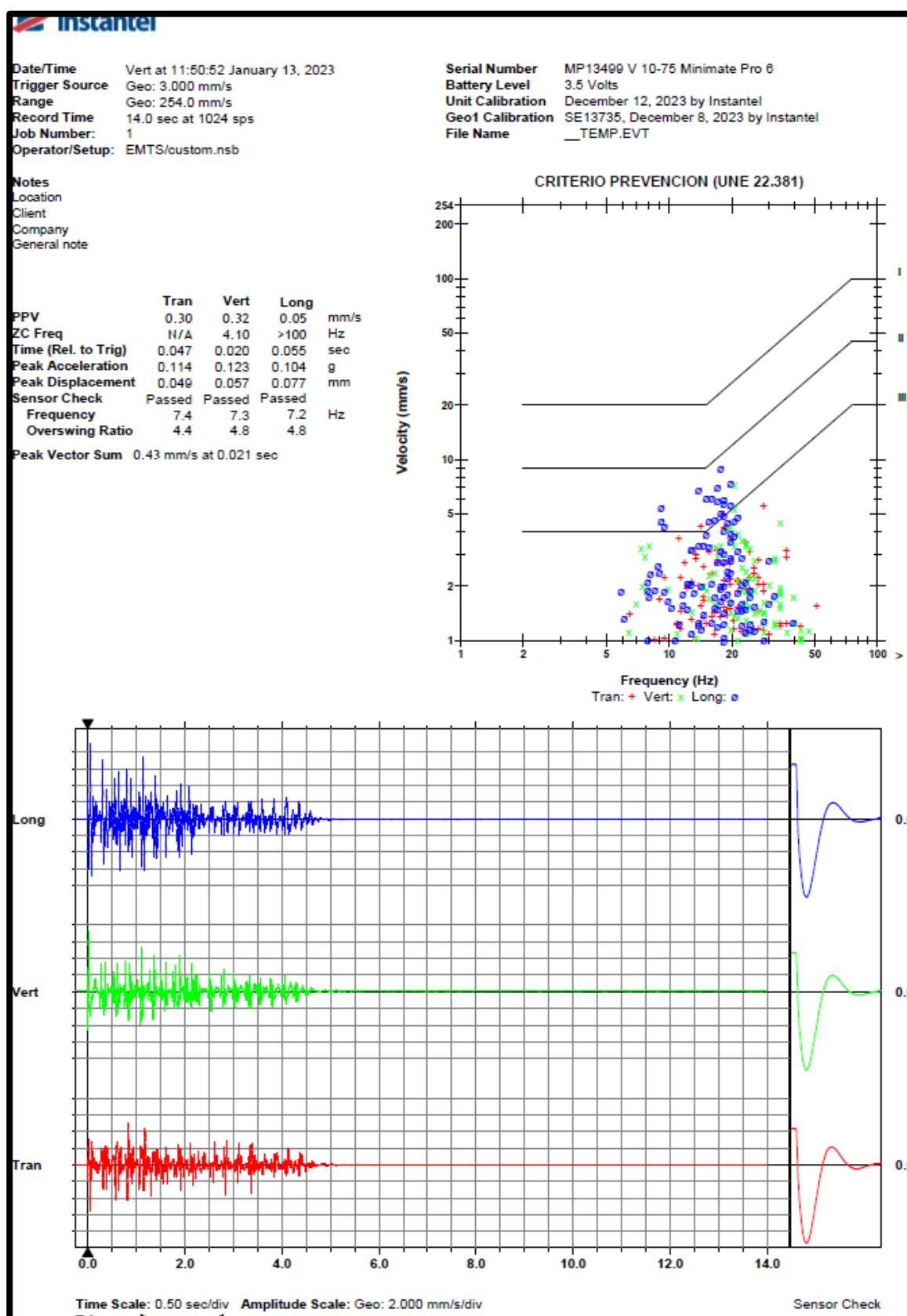


Figura 57 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 13 de enero 2023

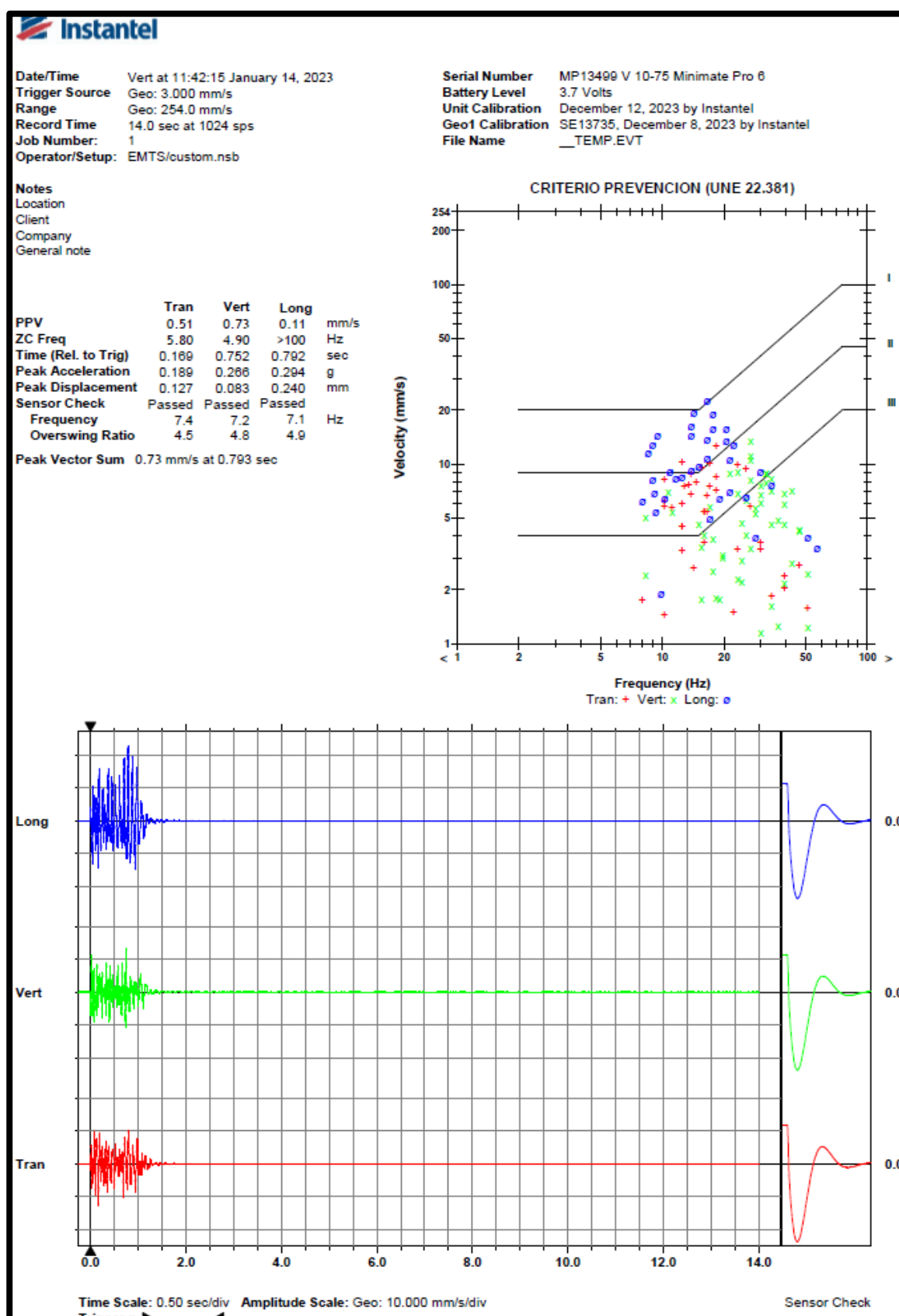


Figura 58 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 14 de enero 2023

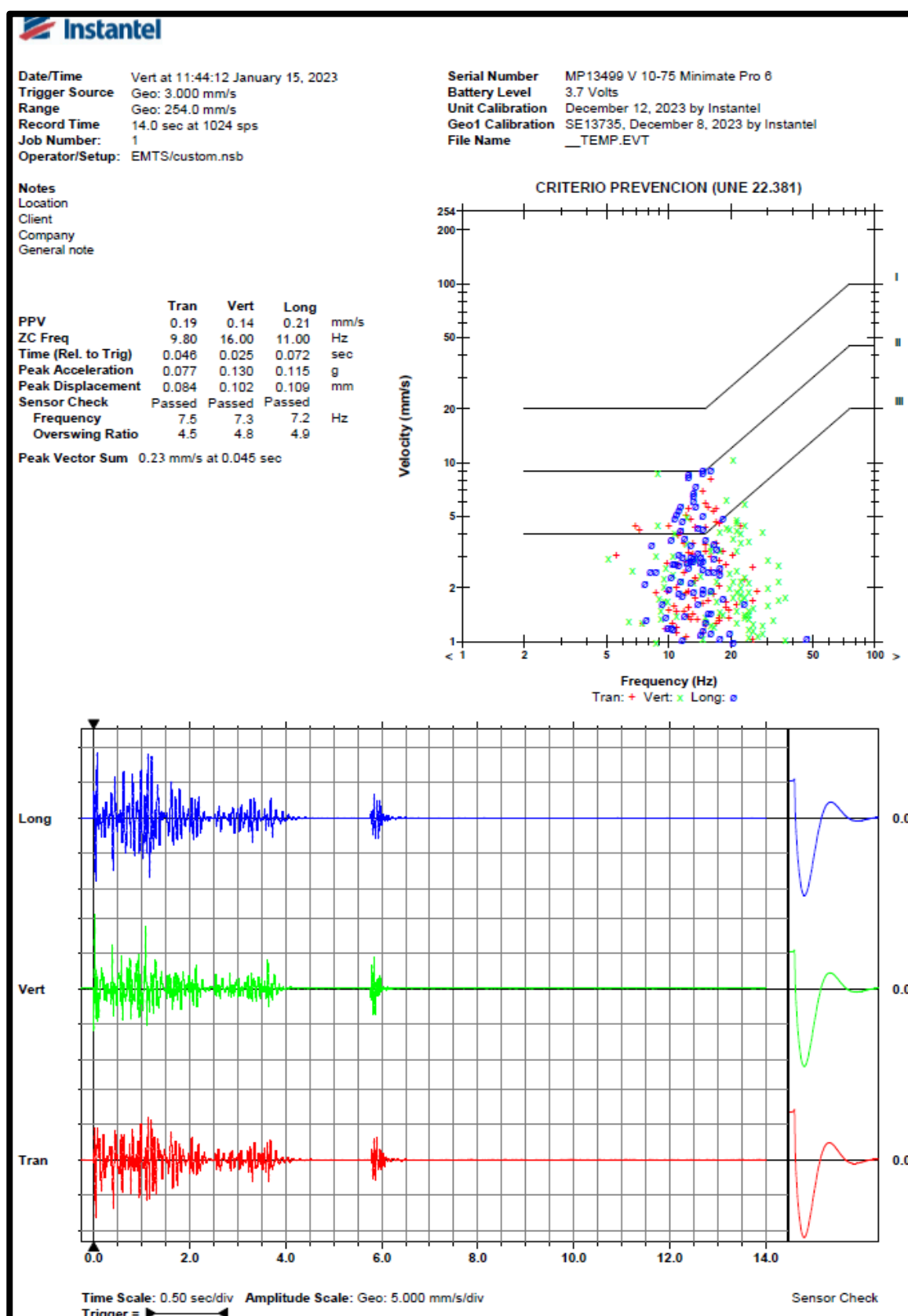


Figura 59 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 15 de enero 2023

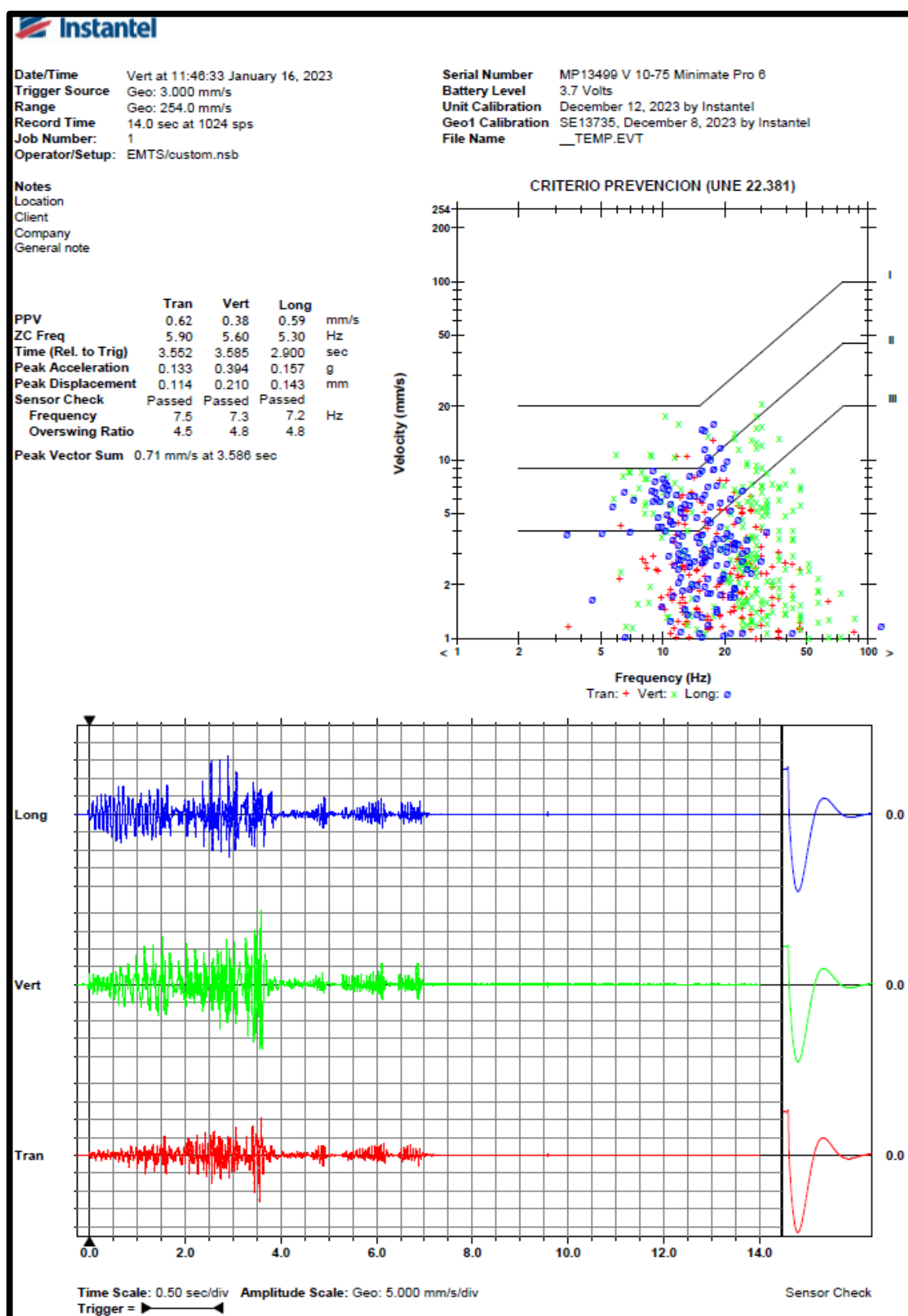


Figura 60 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 16 de enero 2023

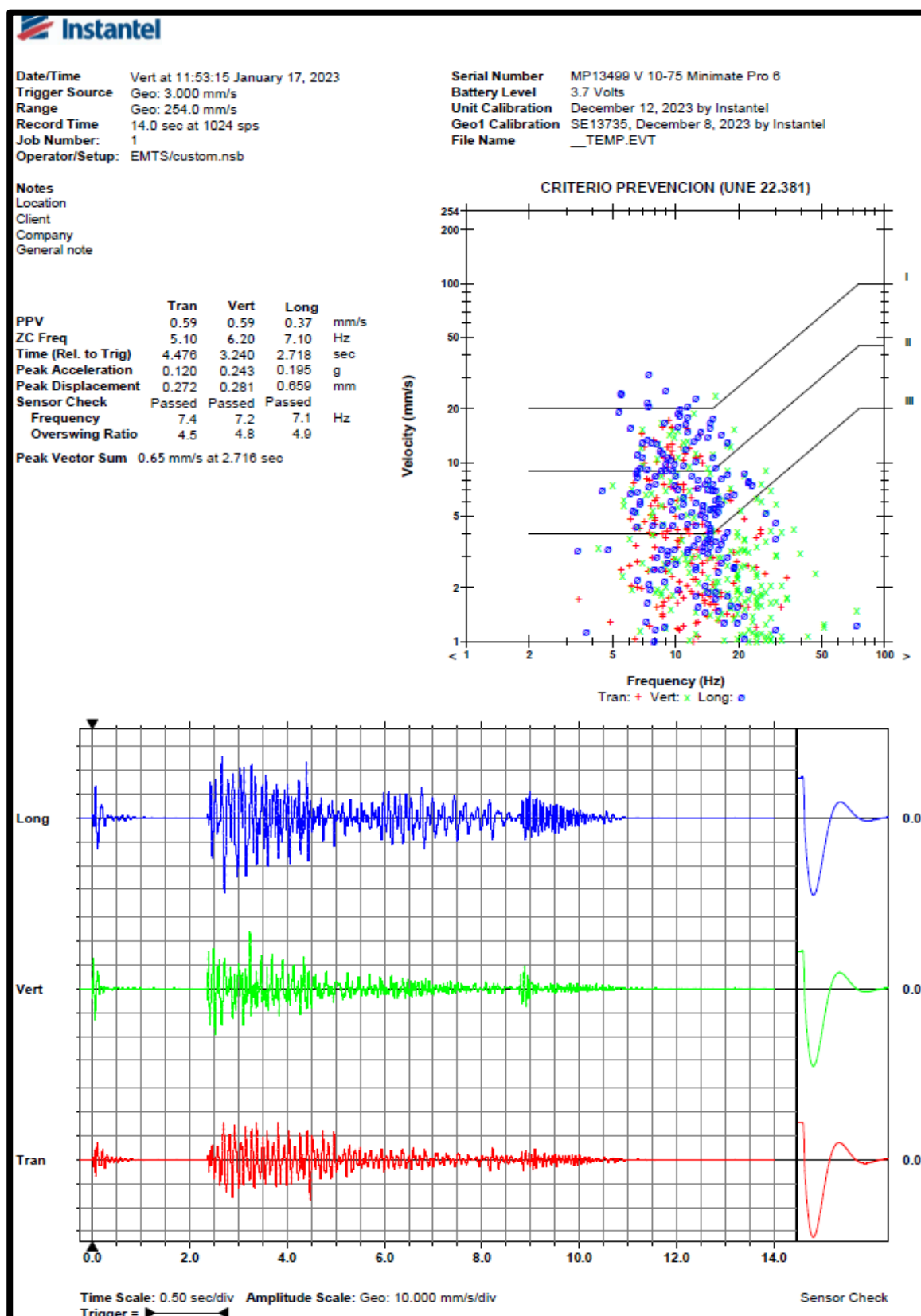


Figura 61 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 17 de enero 2023

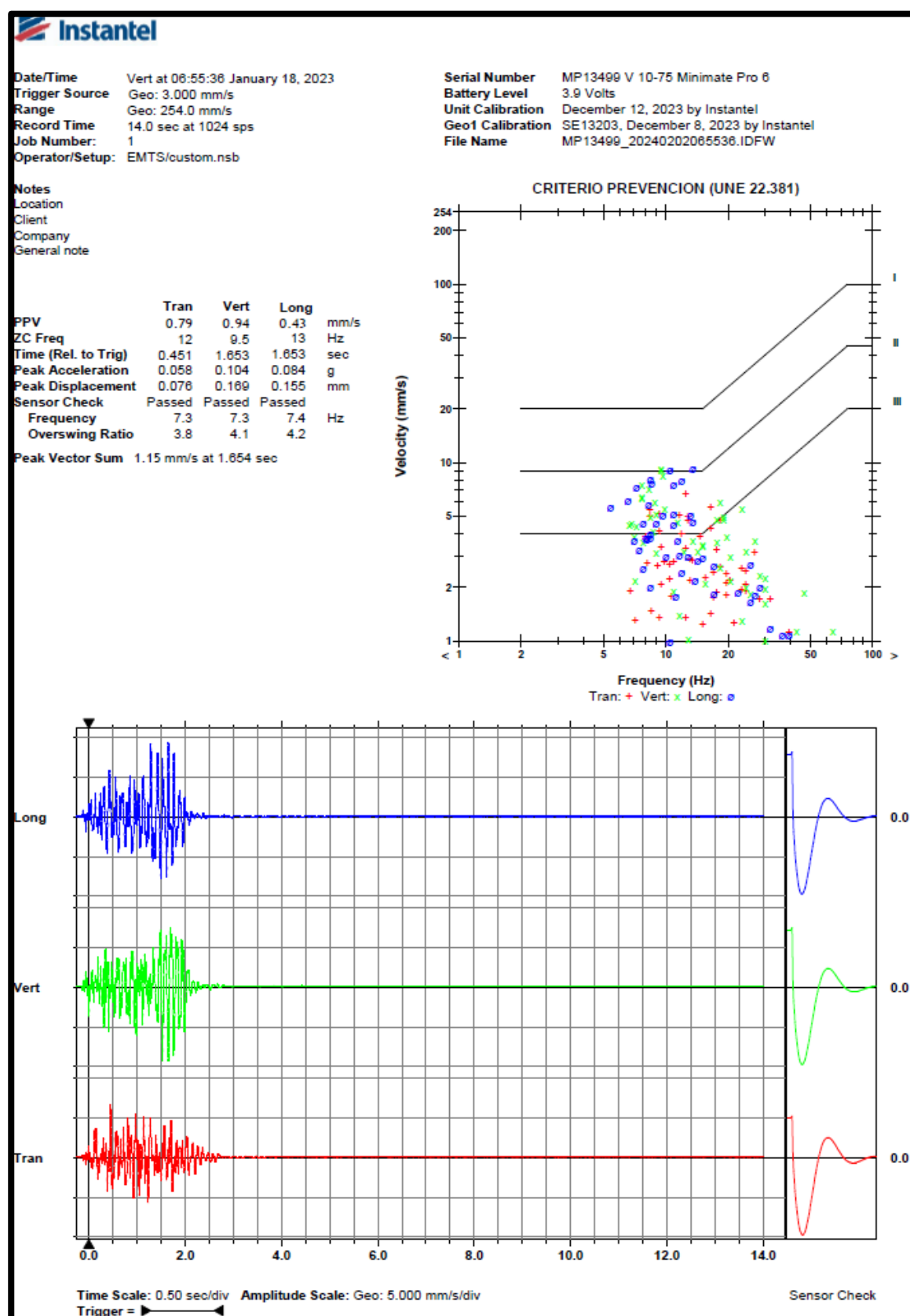


Figura 62 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 18 de enero 2023

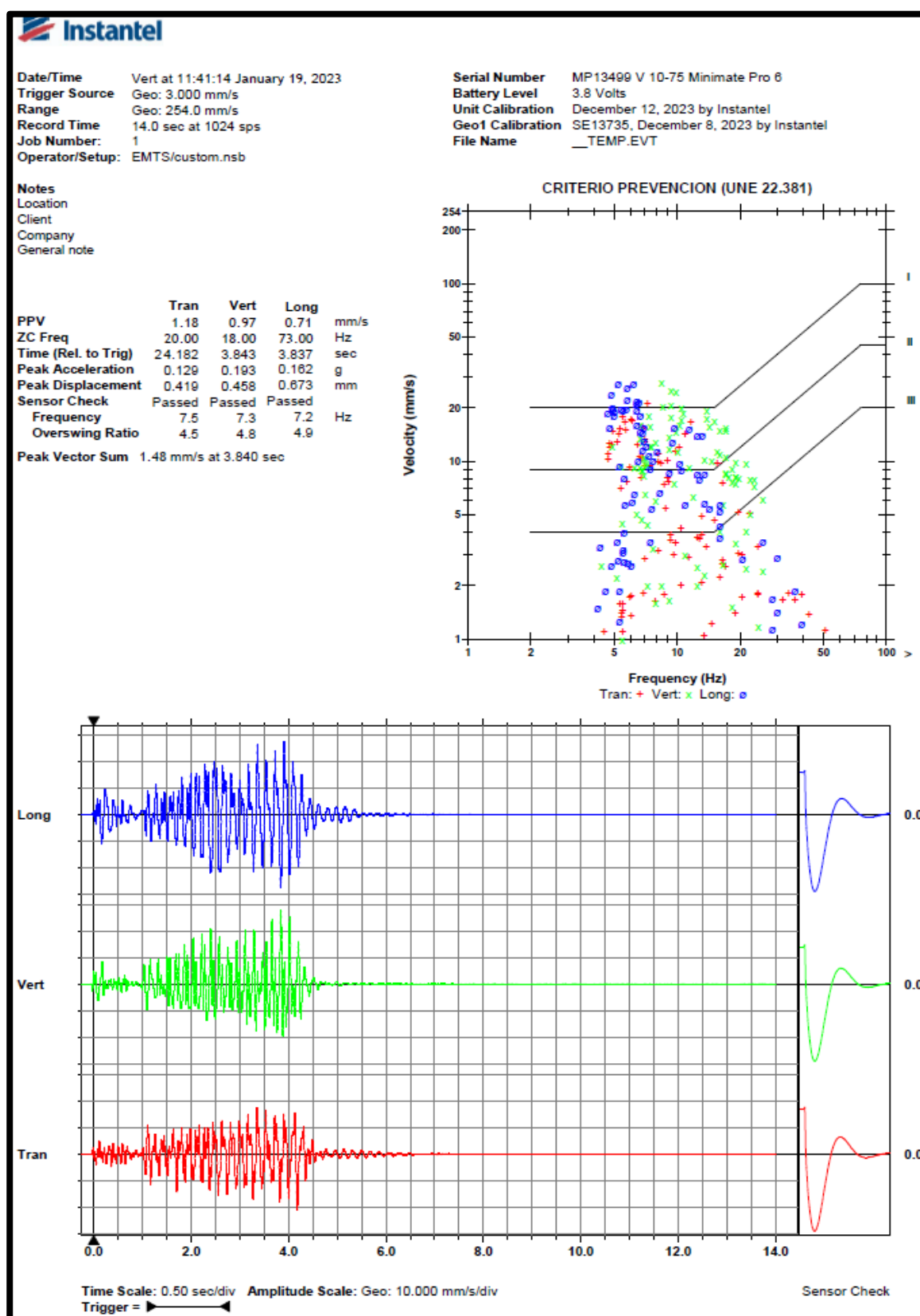


Figura 63 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 19 de enero 2023

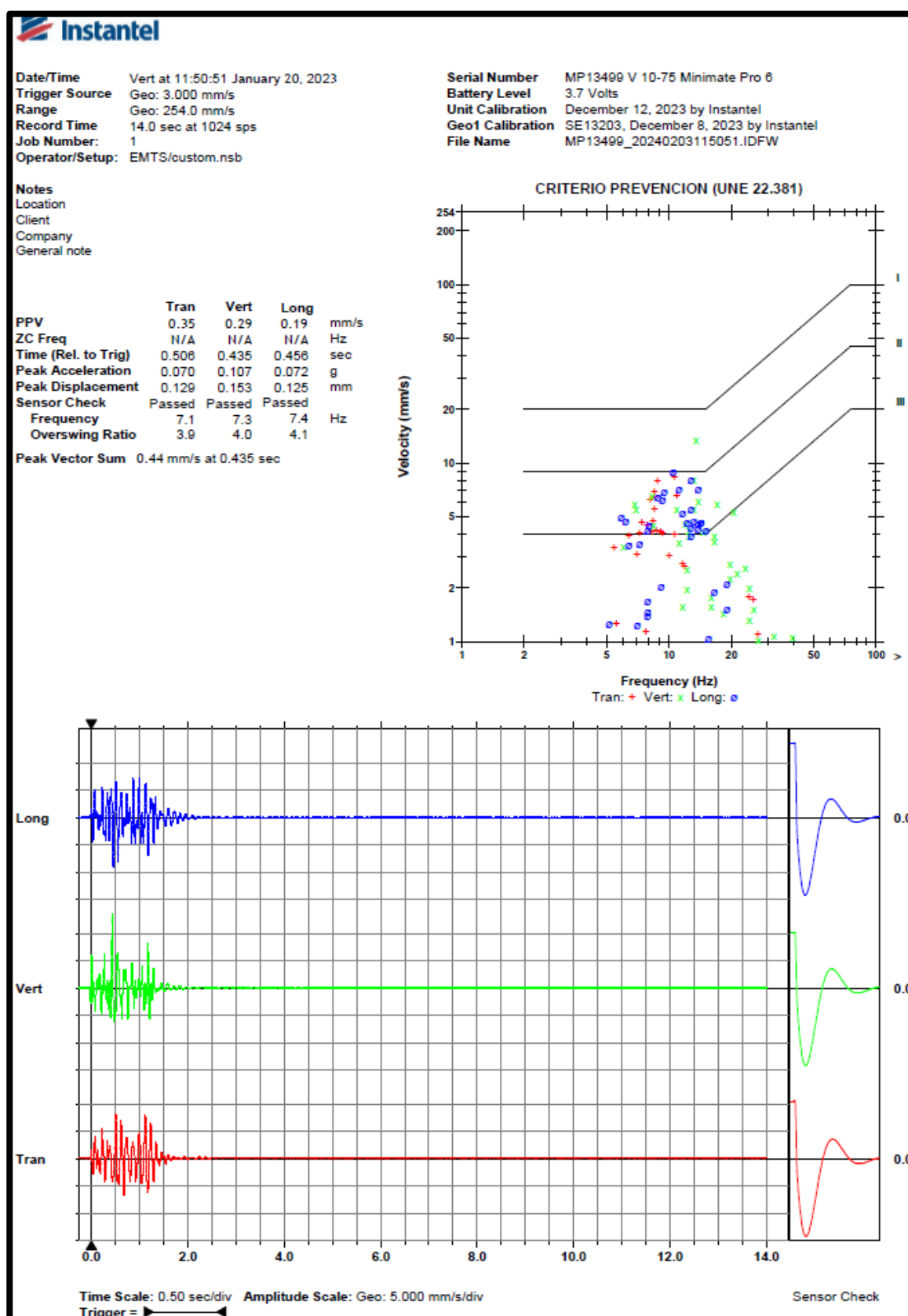


Figura 64 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 20 de enero 2023

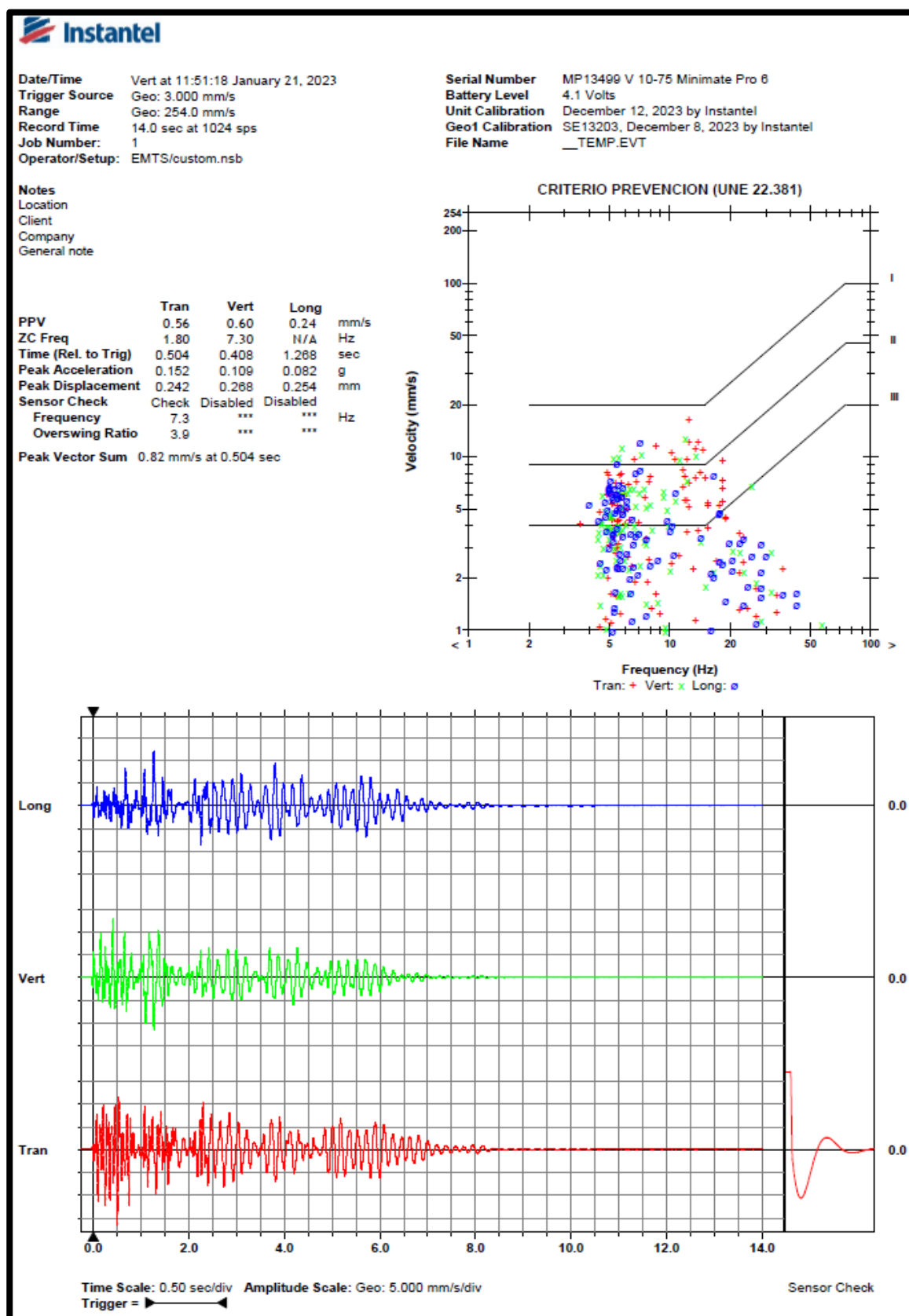


Figura 65 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 21 de enero 2023

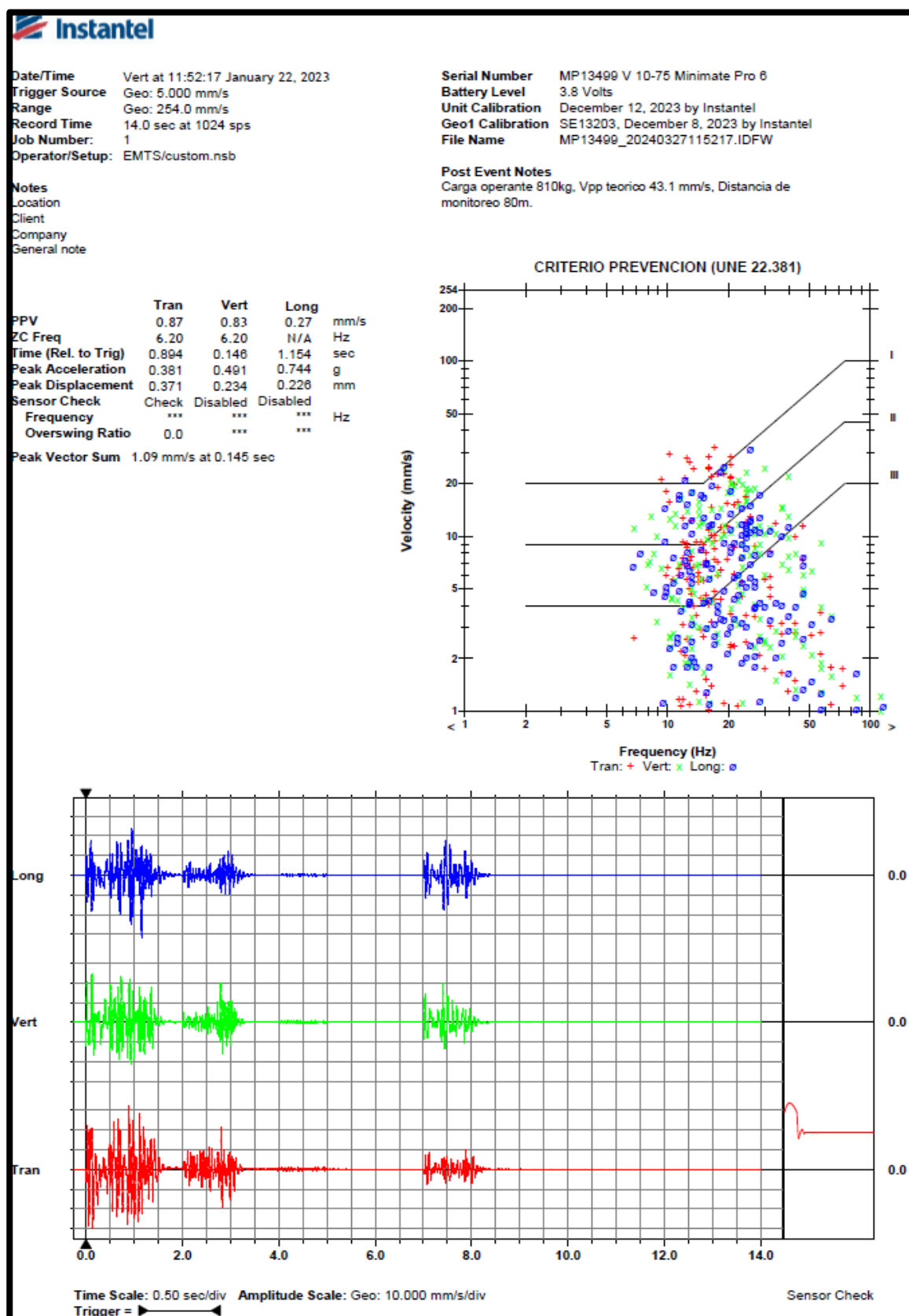


Figura 66 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 22 de enero 2023

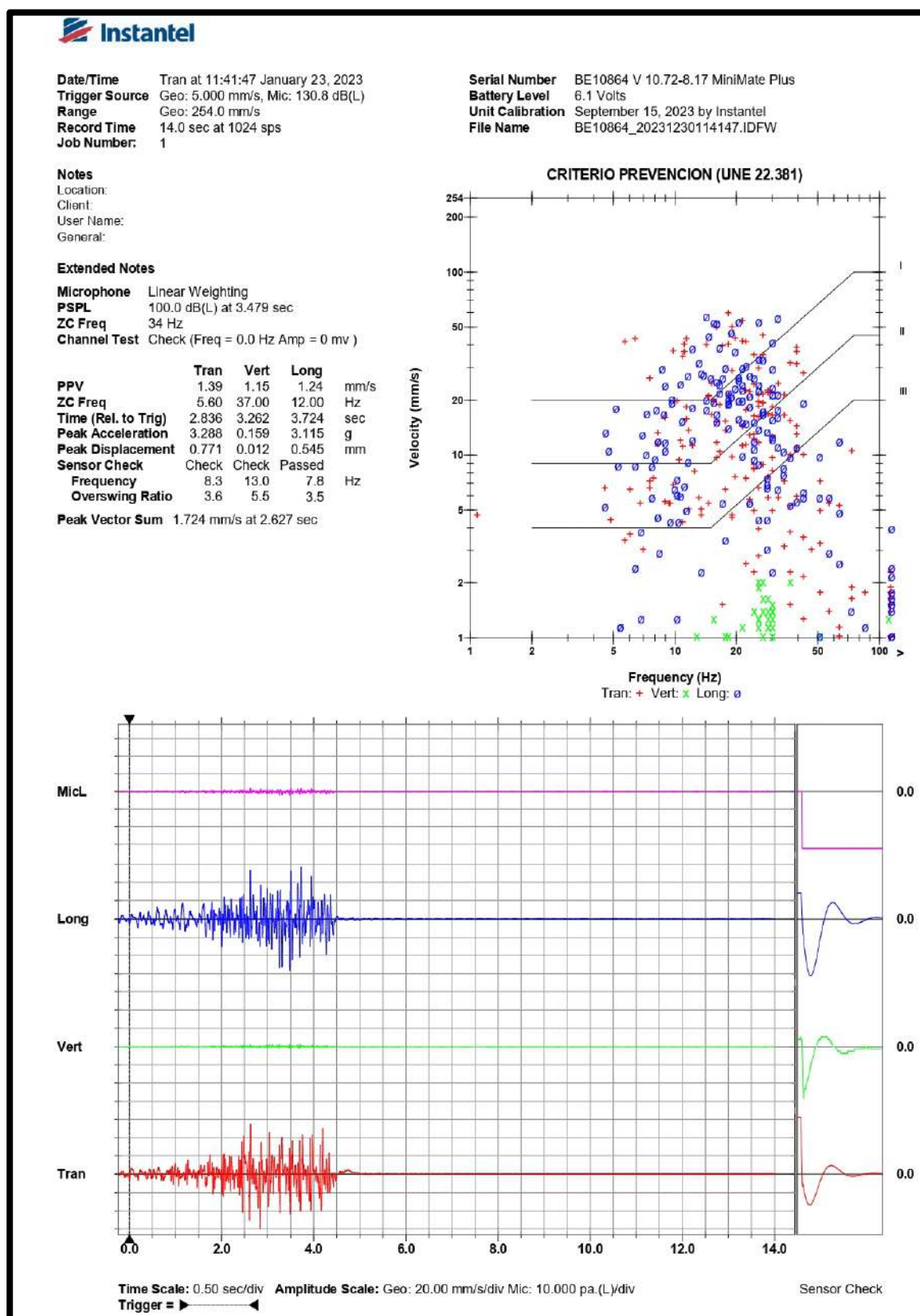


Figura 67 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 23 de enero 2023

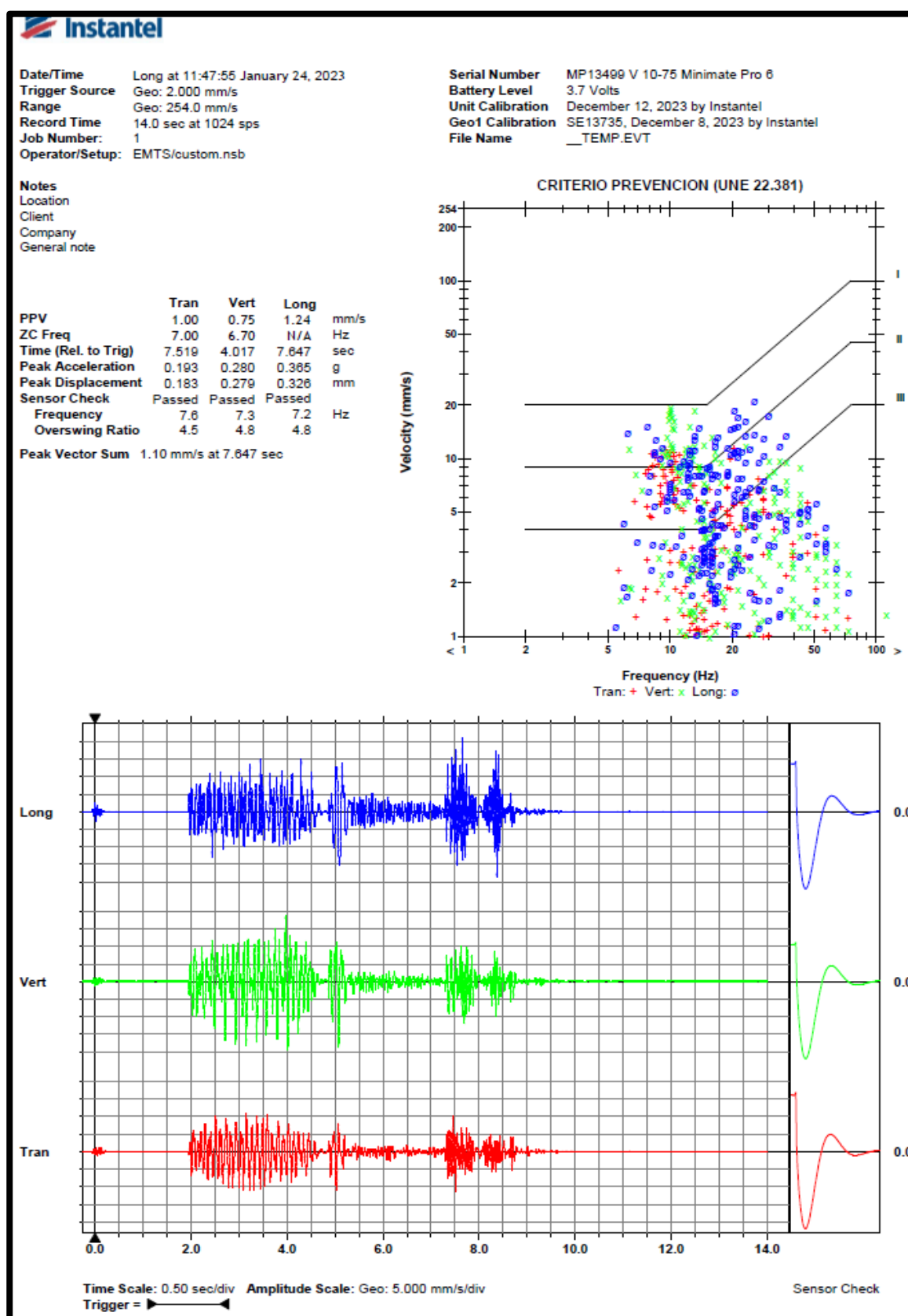


Figura 68 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 24 de enero 2023

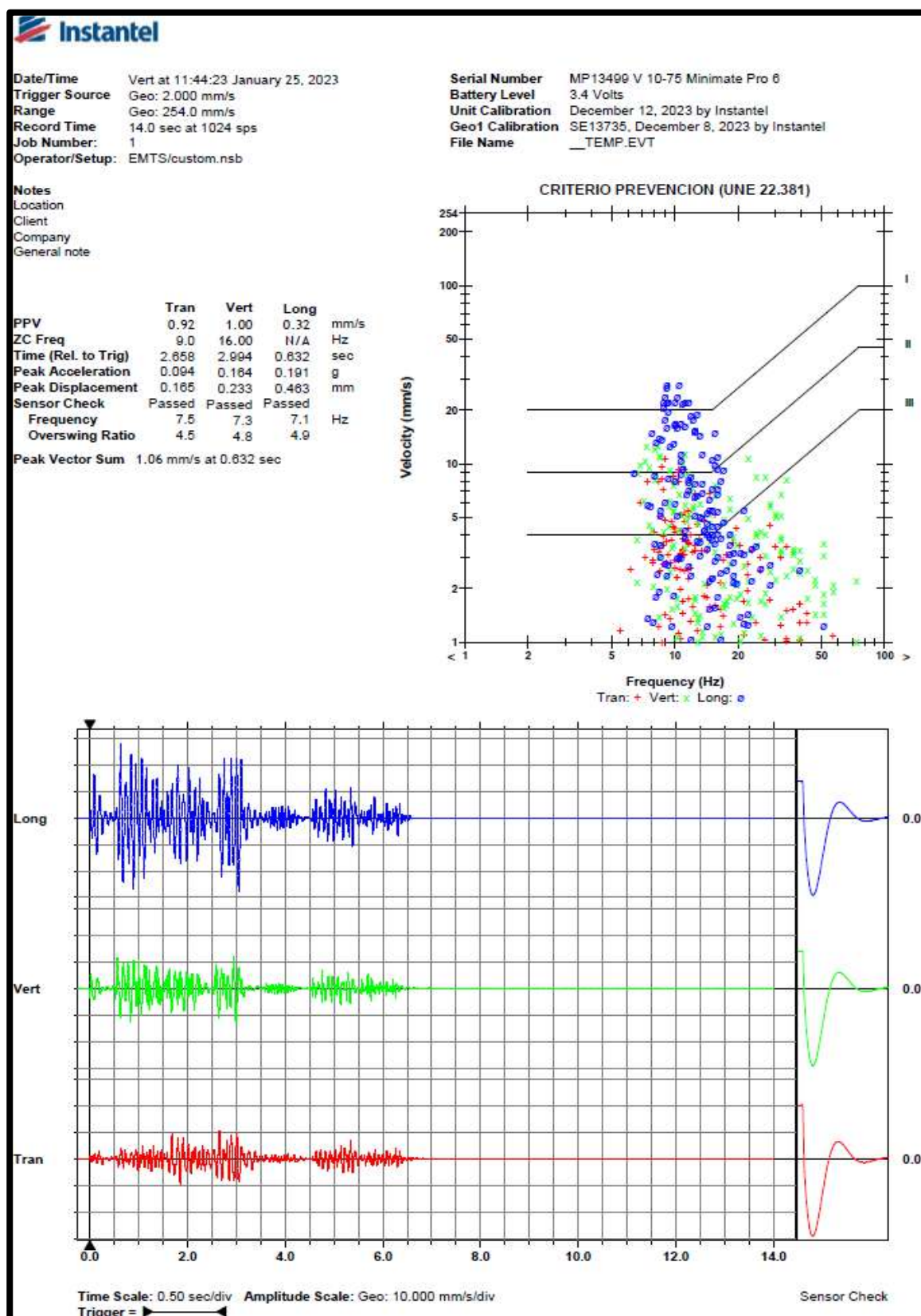


Figura 69 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 25 de enero 2023

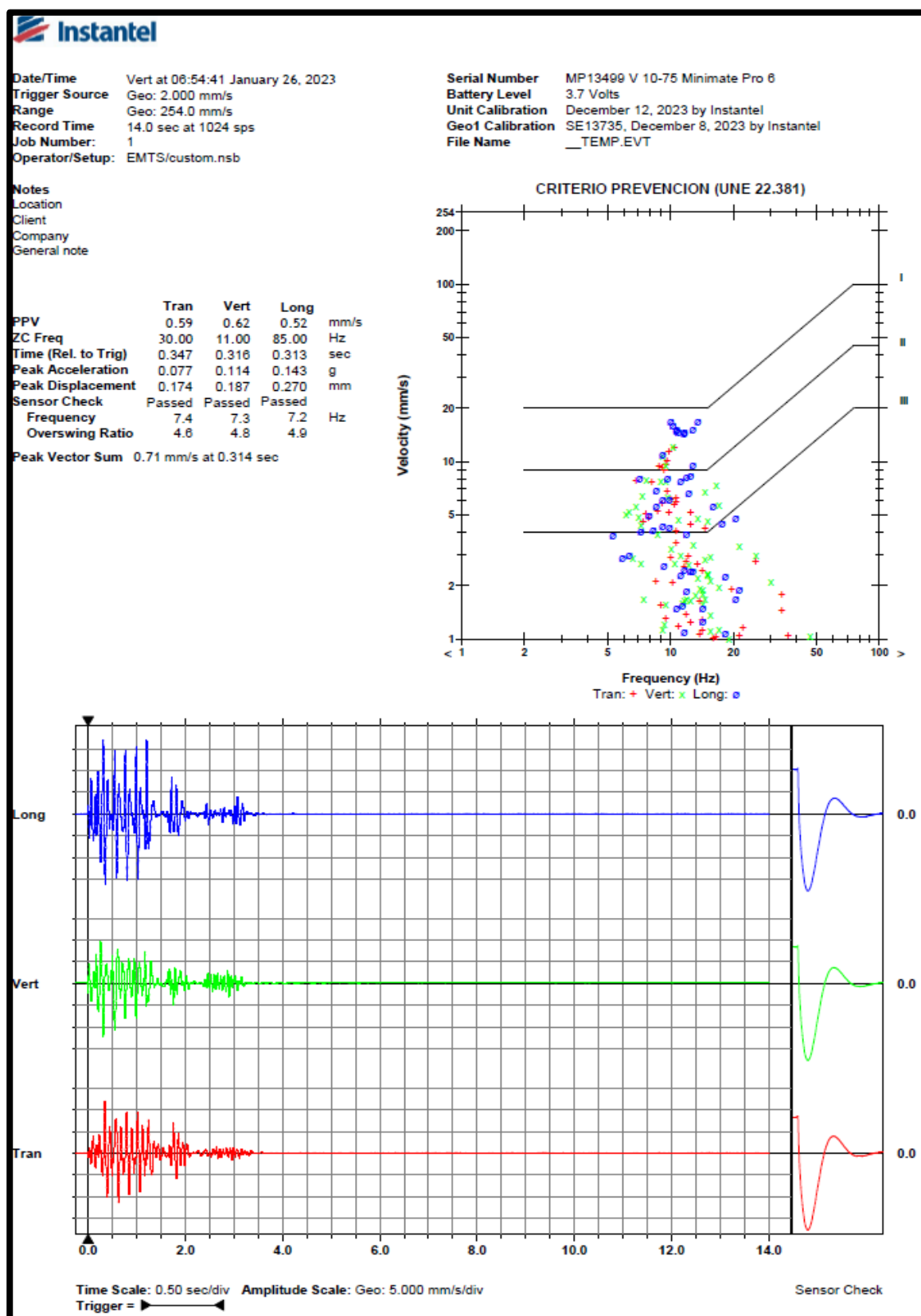


Figura 70 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 26 de enero 2023

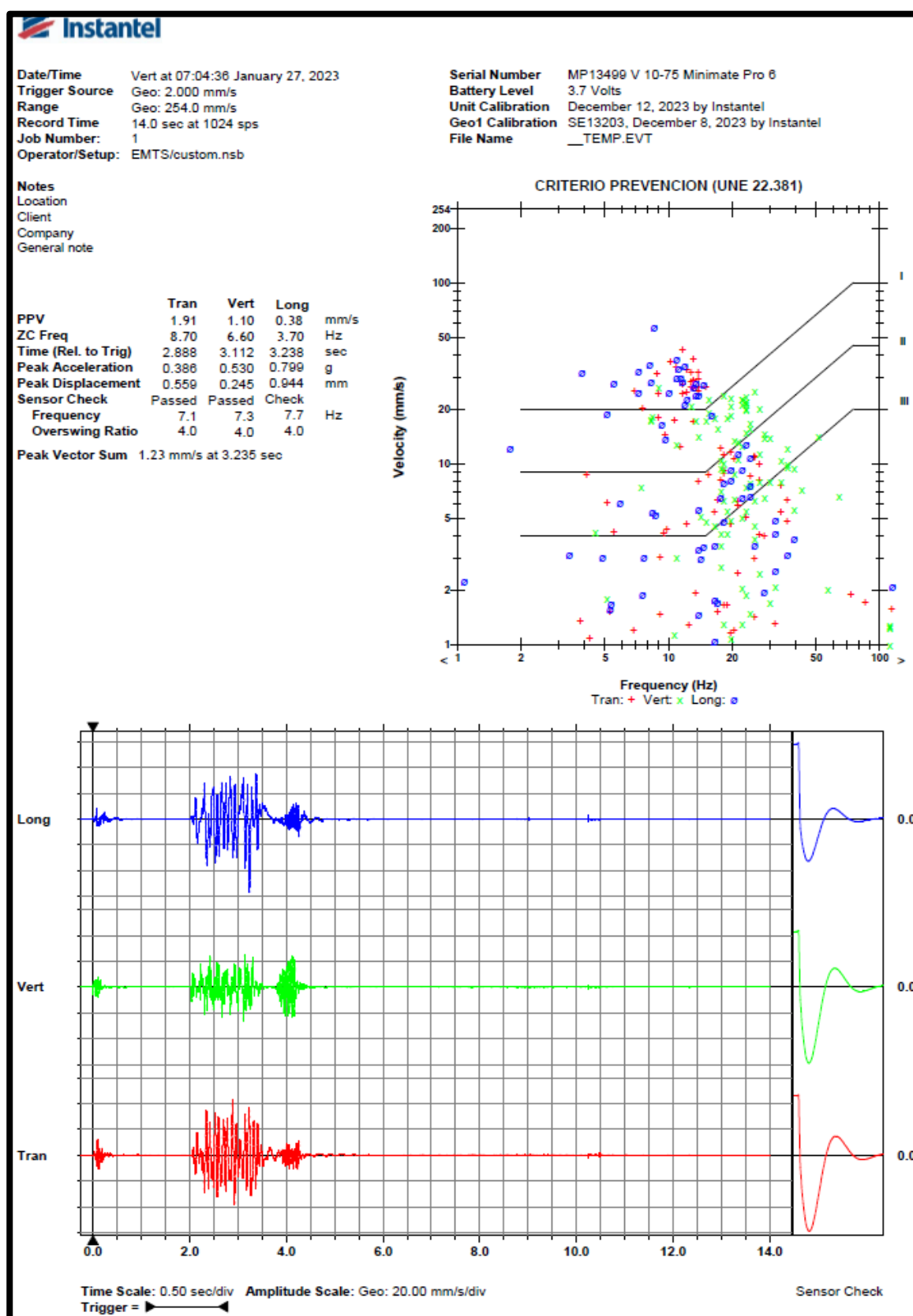


Figura 71 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 27 de enero 2023

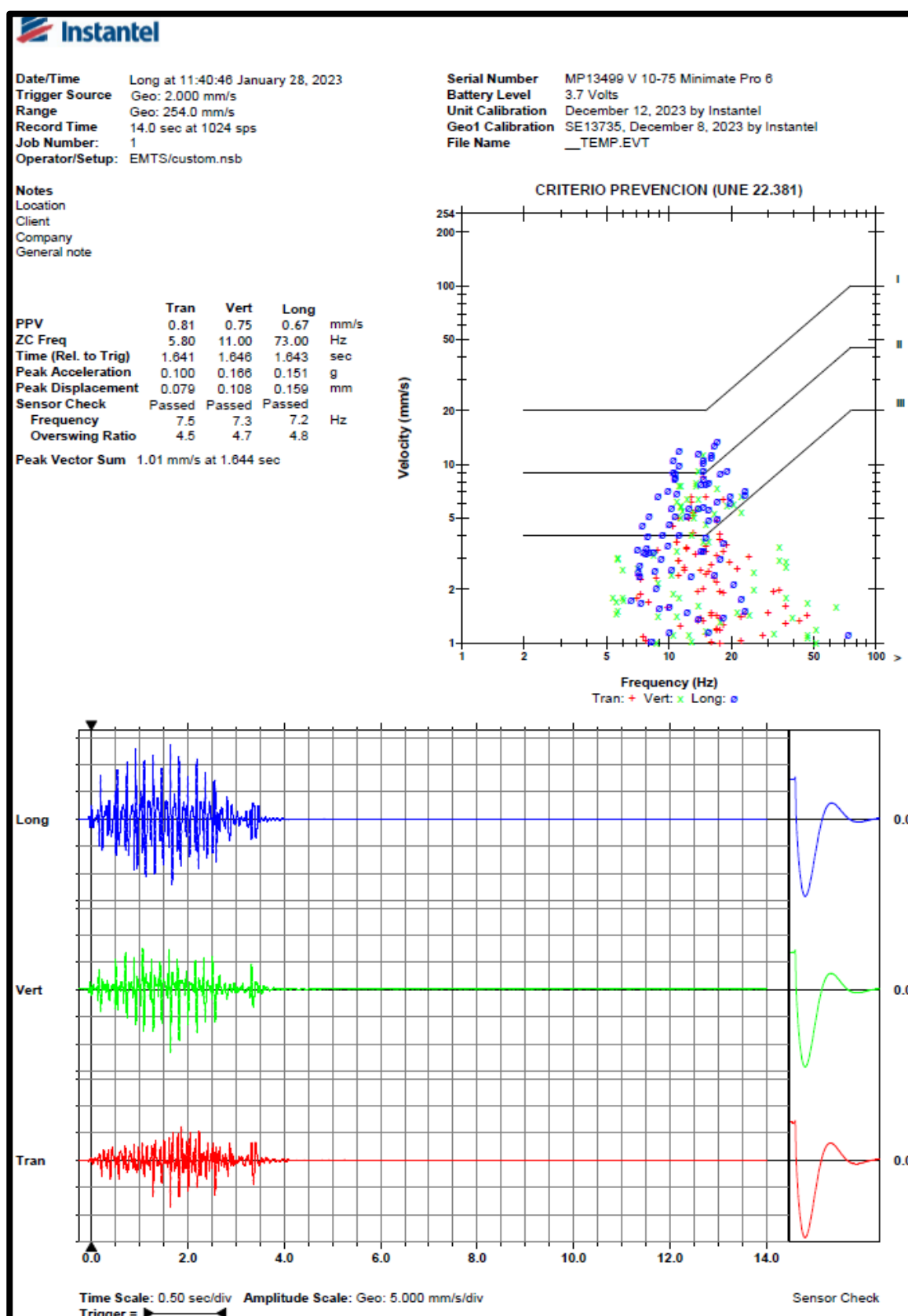


Figura 72 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 28 de enero 2023

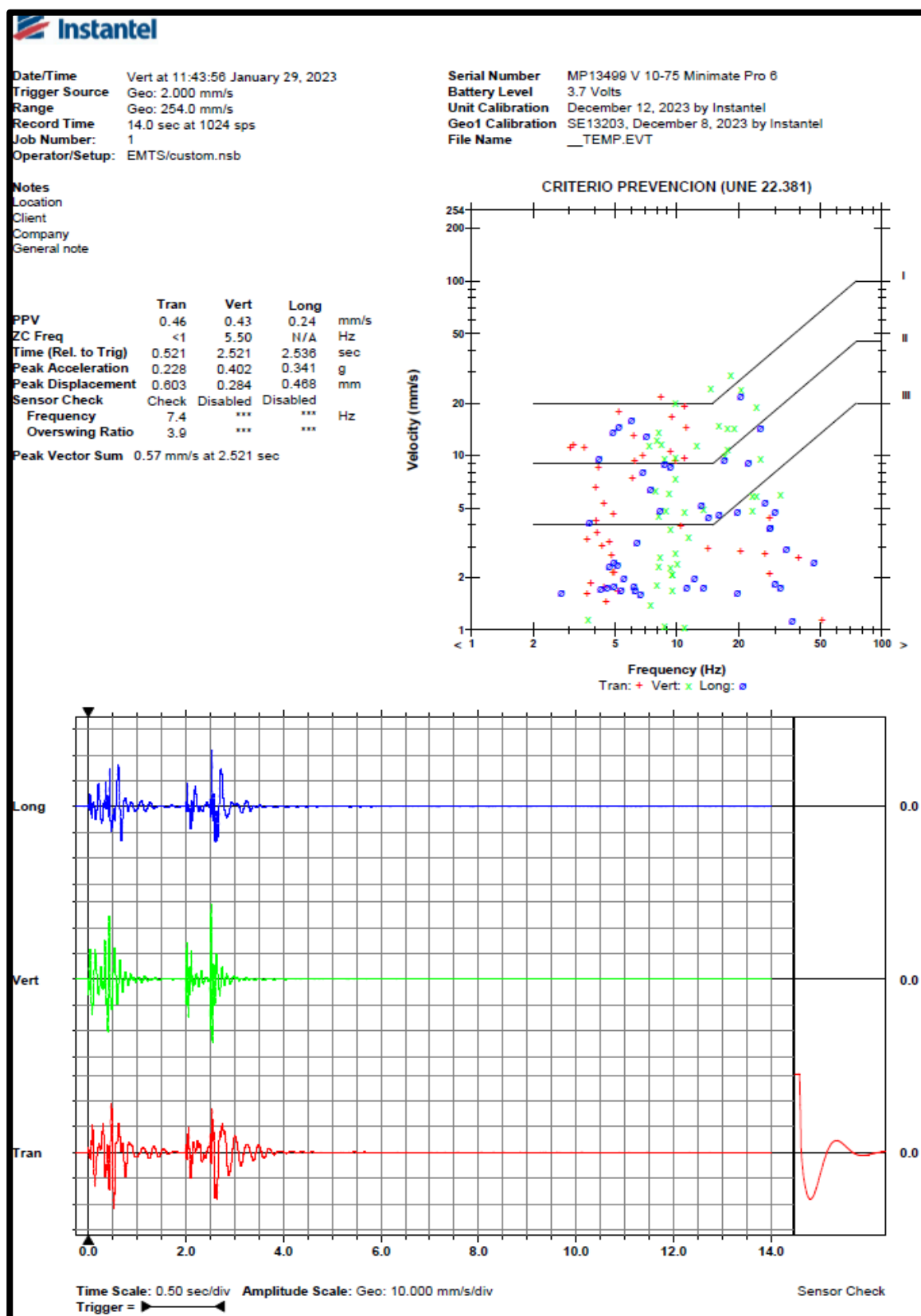


Figura 73 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 29 de enero 2023

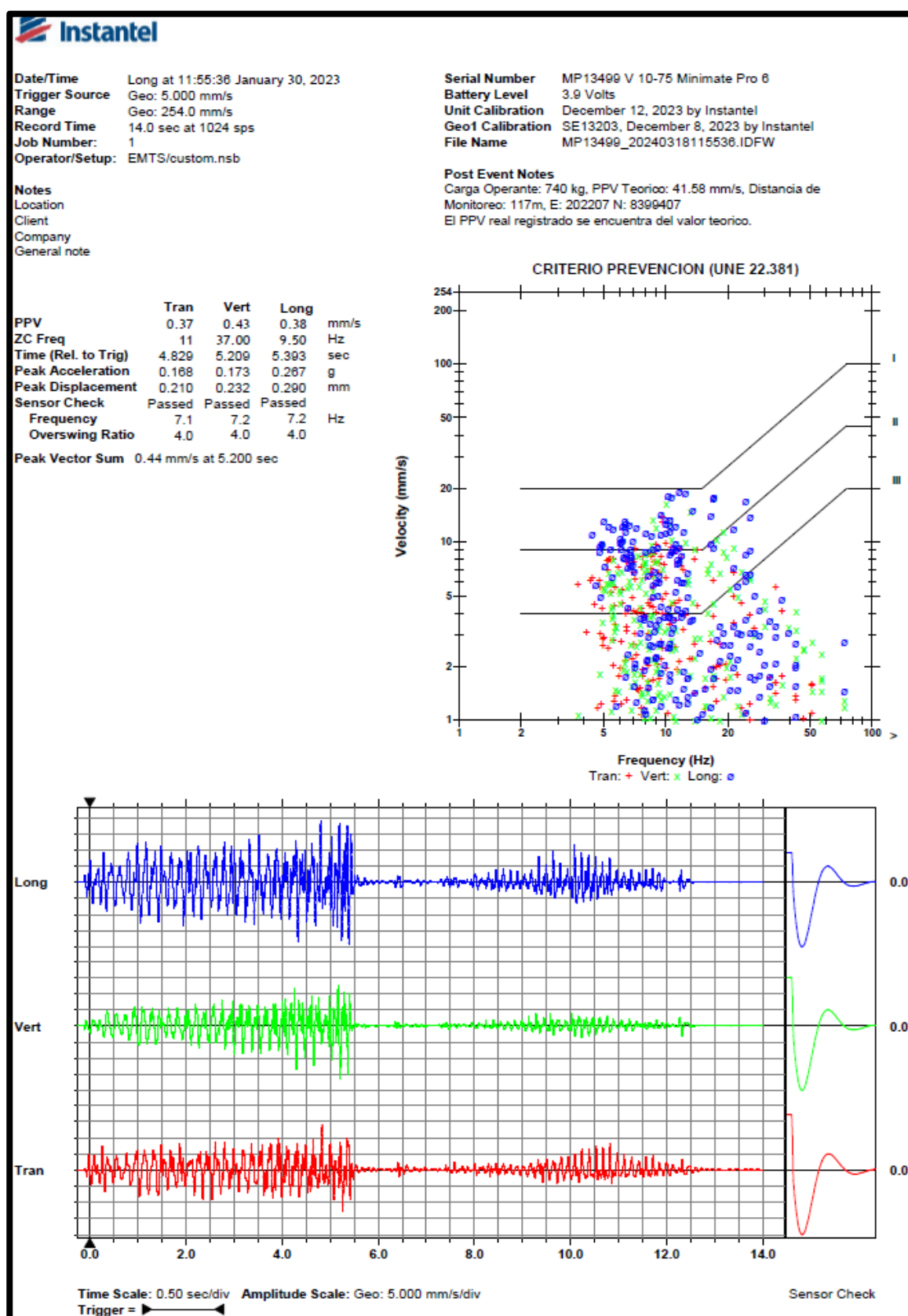


Figura 74 — Reporte de datos extraídos del sismógrafo el 30 de enero 2023



PERÚ

Ministerio de Energía y Minas

Viceministerio de Minas

Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros

FICHA TÉCNICA PUNTO DE CONTROL DE MONITOREO

Titular Minero :

Unidad Minera :

Resolución que aprobó punto de control
(De ser nuevo punto emitido)

IDENTIFICACION DEL PUNTO

Código de Punto de Control ⁽¹⁾ :

Tipo de Muestra :

Clase :

Zona de muestreo ⁽²⁾ :

Tipo Procedencia / Ubicación ⁽³⁾ :

Categoría :
(Categorizado de Acuerdo al R. J. N° 202-2019-ANA)

Descripción ⁽⁴⁾ :

L= Líquido G= Gaseoso S= Sólido B= Biológico R= Ruido o Vibración

E = Efuyente / Emisión R = Receptor

Colocar Clase anterior, solo para los Titulares que están actualizando Fichas SIA

UBICACIÓN

Distrito :

Cuenca :

Provincia :

Departamento :

Coordenadas U.T.M. (En Datum Horizontal UTM WGS84) (De Acuerdo al R. J. N° 086-2011-IGM/OAJ/DGC)

Norte : Este : Zona : (17, 18 o 19)

Altitud : (metros sobre el nivel del mar)

PLAN DE MONITOREO ⁽⁵⁾

Parametro	Frecuencia de Muestreo (SEMANA, MENSUAL, TRIMESTRAL O SEMESTRAL)	Frecuencia de Reporte (TRIMESTRAL, SEMESTRAL O ANUAL)

Fotografía : Deberá ser tomada a un mínimo de 20 mts. de distancia del punto de monitoreo, permitiendo reconocer el paisaje

Elaborado por : _____

Nota: Todo texto e ítem debe ser en letra MAYÚSCULA.

Fecha : ____/____/____

Sistema de Información Ambiental Minero

FUENTE: resolución ministerial N°030-2011-MEM/DM, 2024

Figura 75 — Formato de registro de vibraciones por voladura de rocas

Anexo C

FISURACIÓN EN EDIFICACIONES



Figura 76 — Fisuración en pared



Figura 77 — Fisuración en esquina de una venta



Figura 78 — fisuración en pared



Figura 79 —Desprendimiento separación de las capas de concreto

Anexo D

PLANO DE VOLADURA

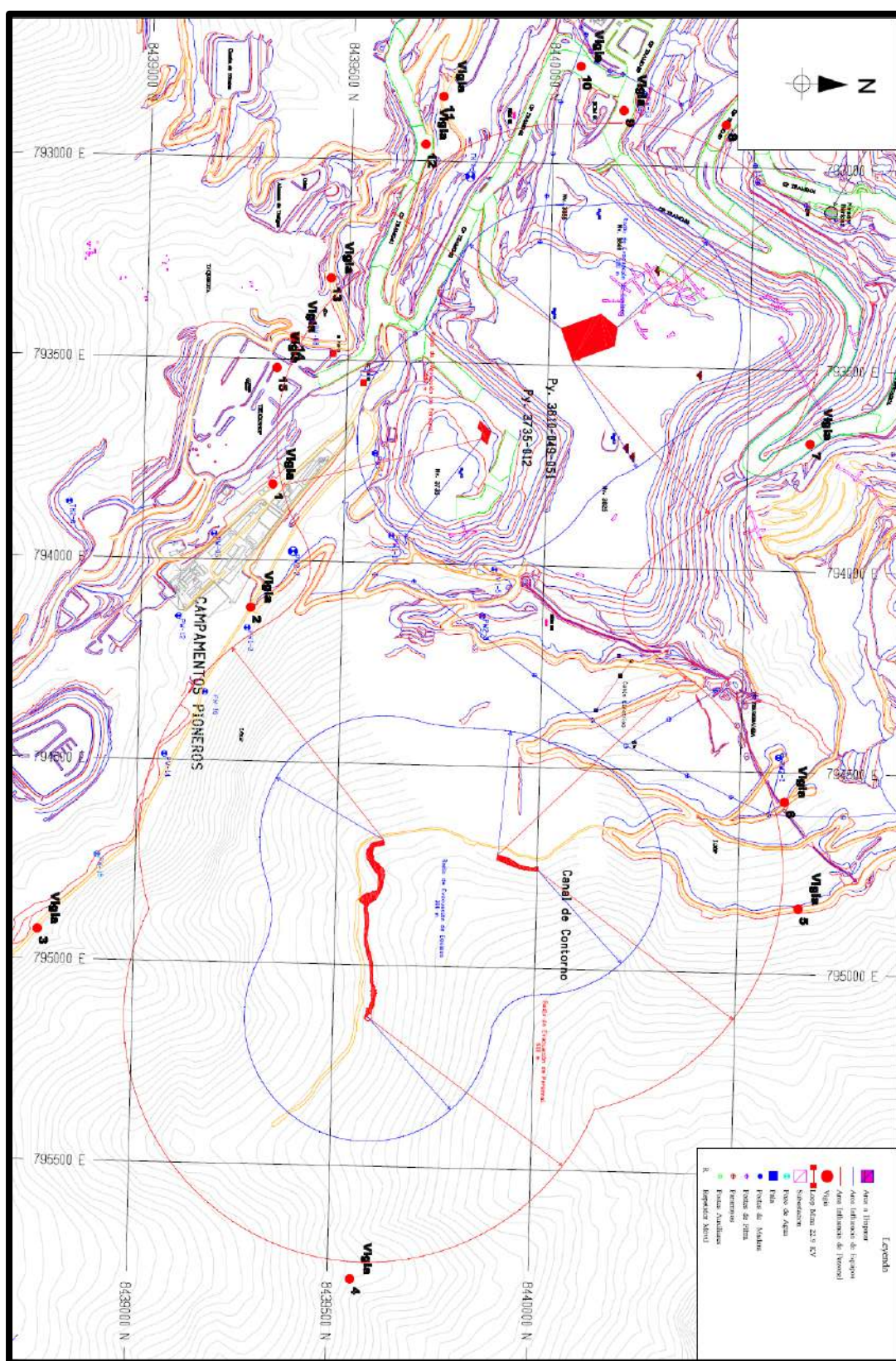


Figura 80 — Plano de voladura del 13 de enero del 2023

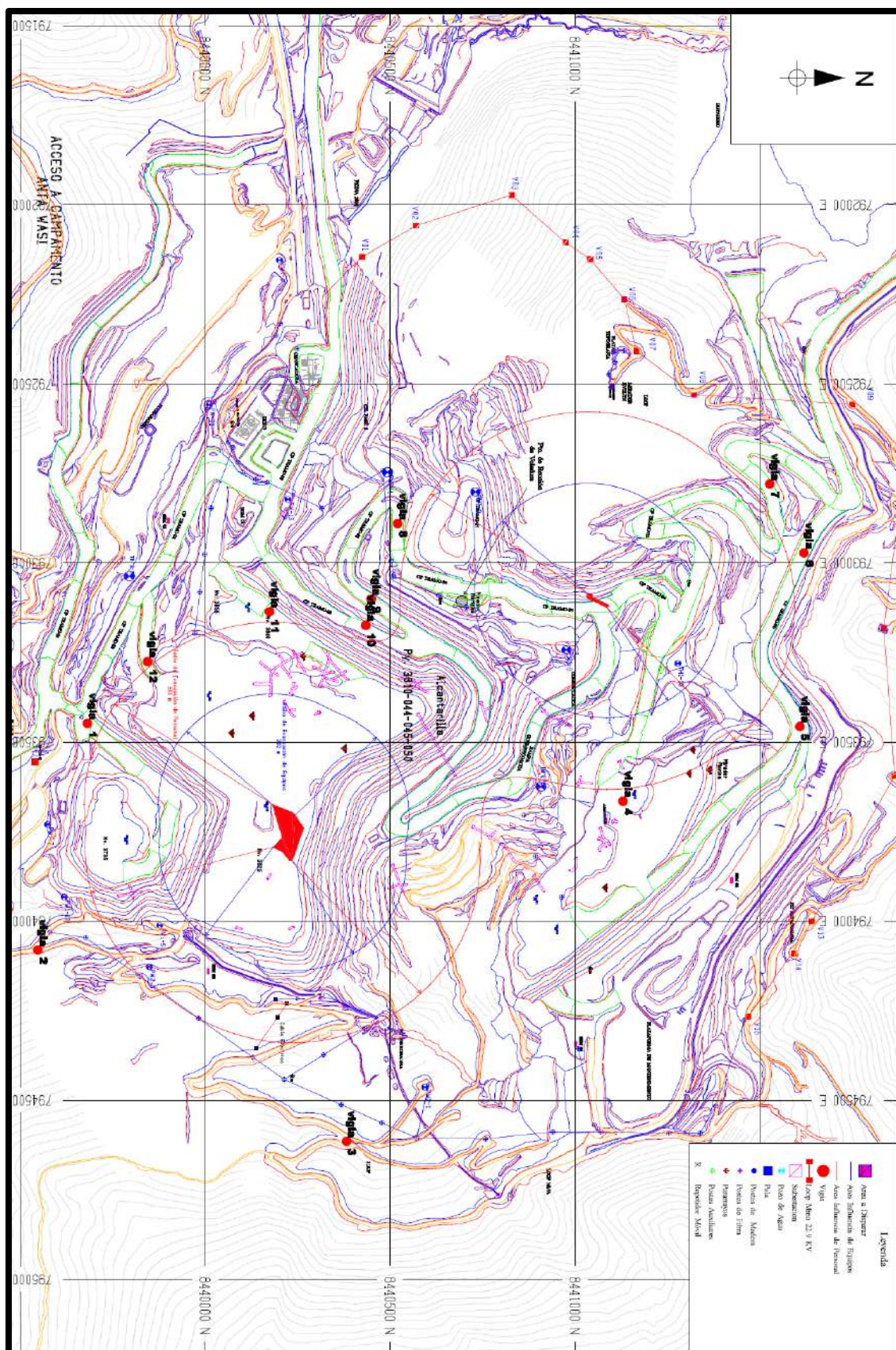


Figura 81 — Plano de voladura del 26 de enero del 2023