

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**PREDICCIÓN DE VIBRACIONES EN CAMPO LEJANO PARA
ESTIMAR LA VELOCIDAD PICO PARTÍCULA EN UNA MINA A
TAJO ABIERTO**

**Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO DE MINAS**

Autor:

Bach. Hansell Yanini Cotrina Angulo

Asesor:

Mg Cs. Elmer Ovidio Luque Luque

Cajamarca – Perú

2026

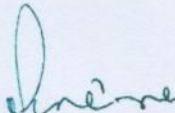
CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD **-FACULTAD DE INGENIERÍA-**

1. **Investigador:** HANSELL YANINI COTRINA ANGULO
DNI: 46499794
Escuela Profesional: Ingeniería de Minas
2. **Asesor(a):** M. Cs. Elmer Ovidio Luque Luque
Facultad: Ingeniería
3. **Grado académico o título profesional:**
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
4. **Tipo de Investigación:**
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
5. **Título de Trabajo de Investigación:**

PREDICCIÓN DE VIBRACIONES EN CAMPO LEJANO PARA ESTIMAR LA VELOCIDAD
PICO PARTÍCULA EN UNA MINA A TAJO ABIERTO
6. **Fecha de evaluación:** 30/01/2026
7. **Software antiplagio:** ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
8. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 2 %
9. **Código Documento:** oid:::3117:551072097
10. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**

☒ **APROBADO** ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 2 de febrero del 2026

Firma y/o Sello Emisor Constancia	
 M. Cs. Ing. Elmer Ovidio Luque Luque. Asesor FIRMA DEL ASESOR M. Cs. Ing. Luque Luque Elmer Ovidio DNI: 02044966	 FIRMA DIGITAL Firmado digitalmente por: BAZAN DIAZ Laura Sofia FAU 20148258001 soft Motivo: En señal de conformidad Fecha: 02/02/2026 10:01:11-0500 UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

* En caso se realizó la evaluación hasta septiembre de 2023



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

ACTA N° 0039-2026

TITULO : *PREDICCIÓN DE VIBRACIONES EN CAMPO LEJANO PARA ESTIMAR LA VELOCIDAD PICO PARTÍCULA EN UNA MINA A TAJO ABIERTO*

ASESOR : *M.Cs. Ing. Elmer Ovidio Luque Luque.*

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Art. 035 del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, da a conocer que, a los **cuatro días del mes de febrero de 2026**, siendo las nueve horas (09:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Vocal : Dr. Ing. Wilder Chuquiruna Chávez.
Secretario : M.Cs. Ing. César Fabiano Lobe Jinez.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada *PREDICCIÓN DE VIBRACIONES EN CAMPO LEJANO PARA ESTIMAR LA VELOCIDAD PICO PARTÍCULA EN UNA MINA A TAJO ABIERTO*, presentado por el Bachiller en Ingeniería de Minas *HANSELL YANINI COTRINA ANGULO*, asesorado por el M.Cs. Ing. Elmer Ovidio Luque Luque, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante, debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : ⁵ PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : ¹⁰ PTS.
EVALUACIÓN FINAL : ¹⁵ PTS. *Quince* (En letras)

En consecuencia, se lo declara *APROBADO* con el calificativo de ¹⁵ acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las *10:00am* horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Presidente

Dr. Ing. Wilder Chuquiruna Chávez.
Vocal

M.Cs. Ing. César Fabiano Lobe Jinez.
Secretario

M.Cs. Ing. Elmer Ovidio Luque Luque.
Asesor

AGRADECIMIENTO

A mi alma Mater la Universidad Nacional de Cajamarca porque dentro de sus aulas forjo mi carácter, habilidades y pensamiento crítico asimismo me brindo las herramientas para mi desarrollo profesional.

También agradezco a mi asesor el distinguido ingeniero Elmer Luque y mis docentes universitarios por su paciencia y sabios consejos durante mi vida universitaria.

Y por último a la empresa ORICA por darme la oportunidad de pertenecer a su organización y brindarme las facilidades para la construcción de esta investigación

Hansell Cotrina

DEDICATORIA

A Dios por concederme la vida, por ser mi guía y
mi fortaleza, por darme la sabiduría suficiente
para culminar esta etapa profesional.

A mi familia mis padres María Elena y Pepito, a
mi hermano Dante y mi tía Santos; por su
incontrastable ayuda y siempre creer en mi
persona en medio de mis peores tormentas fueron
el bastión para lograr la superación.

A mi compañera de vida y mi pequeño Enzo que
llegaron para ser mi fuente de inspiración sin
ellos nada de esto tendría sentido.

También a todos mis amigos y compañeros de
cátedra que acompañaron y guiaron en todo
momento los sinuosos caminos de la época
universitaria.

Hansell Cotrina

CONTENIDO	pág.
AGRADECIMIENTO.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
CONTENIDO	iv
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPITULO I.	
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO II.	
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	4
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	4
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	5
2.1.3. Antecedentes Locales	7
2.2. BASES TEÓRICAS.	8
2.2.1. Predicción de Vibraciones.....	8
2.2.1.1. Vibraciones.....	8
2.2.1.2. Cómo se Originan las Vibraciones en las Voladuras.	8
2.2.1.3. Mecánica de Rotura de la Roca.....	9
2.2.1.4. Ondas de una Vibración.....	14
2.2.1.5. Tipos de Onda de Una Vibración.....	17
2.2.1.6. Variables que Afectan las Vibraciones.	21
2.2.1.7. Medición de las Vibraciones Inducidas por Voladuras.....	29
2.2.2. Modelos para Estimar las Vibraciones.....	31
2.2.2.1. Modelo de Vibraciones en Campo Cercano.....	32
2.2.2.2. Modelo de Vibración en Campo Lejano.	35
2.2.2.3. Modelos Predictivos de Vibraciones.....	36
2.2.2.4. Modelo de Predicción por Redes Neuronales.	38
2.3. DEFINICIÓN DE TERMINOS.....	39
CAPITULO III.	
MATERIALES Y MÉTODOS.....	42

	Pág.
3.1. UBICACIÓN GEOGRAFICA.	42
3.2. CLIMA Y VEGETACIÓN.	42
3.3. GEOLOGÍA.	42
3.3.1. Geología Económica.	42
3.3.2. Alteraciones Hidrotermales.	42
3.4. PROCESO DE MINADO.	43
3.4.1. Perforación.	43
3.4.2. Voladura.	44
3.4.2.1. Diseño de la Malla de Perforación.	44
3.4.2.2. Diseño de Cargas de las Voladuras Monitoreadas.	45
3.4.2.3. Agentes Explosivos Utilizados en el Proyecto.	46
3.4.2.4. Ejecución de la Voladura.	49
3.4.2.5. Calidad de Gases.	50
3.4.3. Carguío.	51
3.4.4. Acarreo.	51
3.5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.	52
3.5.1. Tipo de Investigación.	52
3.5.2. Nivel De Investigación.	52
3.5.3. Diseño de la Investigación.	52
3.5.4. Tipo de Investigación Según el Tipo de Datos.	53
3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA.	53
3.6.1. Población.	53
3.6.2. Muestra.	53
3.7. TÉCNICA E INSTRUMENTOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS.	53
3.7.1. Técnica de Recolección de Datos.	53
3.7.2. Instrumentos de Recolección de Datos.	54
3.7.3. Software y Herramientas de Análisis.	54
3.8. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.	54
3.8.1. Recolección y Depuración de Datos.	54
3.8.2. Desarrollo de los Modelos Empíricos.	55
3.8.3. Desarrollo del Modelo con Redes Neuronales.	55
3.8.4. Parámetros que Tienen Influencia en El Modelo.	56

	Pág.
3.8.5. Comparación de Modelos.....	56
CAPITULO IV.	
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	57
4.1. PREDICCIÓN DE LAS VIBRACIONES.....	57
4.1.1. Datos de las voladuras.....	57
4.1.2. Monitoreo de las Vibraciones en Campo Lejano.	58
4.1.3. Modelo Predictivo de las Vibraciones en Campo Lejano.	63
4.1.3.1. Modelo Predictivo de Devine.....	63
4.1.3.2. Modelo Predictivo en función del Burden.	66
4.1.3.3. Modelo Predictivo con Redes Neuronales Artificiales.	67
4.2. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA VPP.	71
4.2.1. Correlación Entre Variables.	71
4.2.1.1. Normalidad de las Variables.	71
4.2.1.2. Gráfico de Normalidad de las Variables.	72
4.3. DESEMPEÑO PREDICTIVO DE LOS MODELOS.	78
4.4. REDUCCIÓN DE LAS VIBRACIONES	83
4.5. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.	86
4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	88
CAPITULO V.	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	90
5.1. CONCLUSIONES.....	90
5.2. RECOMENDACIONES.....	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	92
ANEXOS.....	95

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores de K y α para diferentes explosivos	22
Tabla 2. Cantidad de explosivo según longitud de taladro	23
Tabla 3. Efectos de la relación de rigidez	26
Tabla 4. Modelos empíricos de vibraciones en campo lejano	35
Tabla 5. Valores de k y α para la ecuación de Devine.....	37
Tabla 6. Niveles de gases.	50
Tabla 7. Flota de carguío	51
Tabla 8. Datos de campo para generación de los modelos.	60
Tabla 9. Grupo de Datos para el entrenamiento de la Red Neuronal	67
Tabla 10. Resultados del modelo con RNA para datos de prueba	69
Tabla 11 Pruebas de Normalidad para las variables en estudio.....	72
Tabla 12. Resumen de la normalidad de las variables.....	75
Tabla 13. Escala del coeficiente de Spearman.....	76
Tabla 14 Correlación de Spearman para las variables en estudio	76
Tabla 15 Resultados del modelo de Devine para datos de prueba	79
Tabla 16 Resultados del modelo en función del Burden	80
Tabla 17. VPP para los dos modelos propuestos.....	81
Tabla 18. Resumen de las variables estadísticas por cada modelo de predicción.	83
Tabla 19. Datos para determinar la VPP a diferentes distancias.	84
Tabla 20 Correlación entre VPP y las demás variables.....	87
Tabla 21. Matriz de Operacionalización de variables	101

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes de un taladro.....	10
Figura 2. Inicio de las ondas hacia la cara libre.....	11
Figura 3. Agrietamiento por tensión.....	12
Figura 4. Fase 03 rotura de expansión.....	12
Figura 5. Fase 04: Expansión Máxima. La roca actúa como una viga.	13
Figura 6. Formación de pila de escombros.....	13
Figura 7. Proceso de rotura de las rocas.	14
Figura 8. Onda completa de la vibración.....	16
Figura 9. Estimación de la velocidad a 300 m.....	17
Figura 10. Ondas primarias (p).....	18
Figura 11. Onda secundaria (S).	19
Figura 12. Ondas Raileigh.	20
Figura 13. Ondas Love (L).	21
Figura. 14 Componentes de una malla de perforación.	25
Figura 15. Efectos de una carga explosiva según el burden.	27
Figura 16. Sismógrafo que mide el nivel de vibraciones.	30
Figura 17. Modelo de campo cercano (Holmberg and Pearson).	32
Figura 18. Proceso para determinar el daño a las paredes del talud.....	33
Figura 19. Distribución de los geófonos para campo cercano.....	34
Figura 20. Distribución de taladros para campo cercano.	34
Figura 21. Estructura de una red neuronal.....	39
Figura 22. Proceso de minado.	43
Figura 23. Perforadora Pit Viper en la zona de estudio.....	43
Figura 24 Diseño de la malla de perforación.....	45
Figura 25 Taladros de procedimiento y producción.....	45
Figura 26. Taladro de procedimiento	45
Figura 27. Diseño de carga en roca suave.	46
Figura 28 Diseño de carga en roca media.....	46
Figura 29 Diseño de carga en roca dura.	46
Figura 30. Mezcla Explosiva Comercial Quantex 73.....	48
Figura 31 Gráfica de la densidad y el nitrito de sodio.....	48
Figura 32 Cálculo de la densidad del explosivo	49

Figura 33 Colocación de mangas plásticas.....	49
Figura 34. Vaciado de explosivo	50
Figura 35. Detonación del explosivo.....	50
Figura 36. Acarreo de mineral con camión CAT 793	51
Figura 37 Instalación del geófono según el estándar establecido.....	59
Figura 38. Modelo predictivo de vibraciones en campo lejano para el Quantex 73	66
Figura 39. Modelo predictivo en función al burden	66
Figura 40 Arquitectura de la Red Neuronal Artificial	67
Figura 41 VPP real vs VPP predicha para datos de entrenamiento de RNA	68
Figura 42 VPP real vs VPP predicha para datos de prueba de RNA	70
Figura 43 Campana de Gauss para la variable Cantidad de Carga.....	72
Figura 44 Campana de Gauss para la variable Distancia al punto de Monitoreo.....	73
Figura 45 Campana de Gauss para Distancia Escalada.....	73
Figura 46 Campana de Gauss para la Velocidad Pico Partícula.....	73
Figura 47 Campana de Gauss para el Burden.....	74
Figura 48 Campana de Gauss para el Burden.....	74
Figura 49 Campana de Gauss para la frecuencia.....	74
Figura 50 Campana de Gauss para la densidad	75
Figura 51 Correlación entre la VPP y la Distancia al punto de monitoreo.	77
Figura 52 Correlación entre VPP y Cantidad de carga por retardo	77
Figura 53 Correlación entre VPP y la Distancia Escalada	78
Figura 54 Comparación de la VPP entre RNA y Devine	82
Figura 55 Diagrama de barras para observar el comportamiento de los errores.	82
Figura 56 Ábaco de diseño para la MEC QUANTEX 73.	85
Figura 57 Registro de las vibraciones del 02/07/2025	97
Figura 58 Registro de la VPP del 13/07/2025	98
Figura 59 Registro de VPP del 31/07/2025	99
Figura 60 Registro de la VPP del 08/08/2025	100

LISTA DE ABREVIATURAS

VPP:	Velocidad Pico Partícula.
RNA:	Red Neuronal Artificial.
Q:	Cantidad de Carga por Retardo.
D:	Distancia al punto de Monitoreo.
FS:	Factor de Carga.
SD:	Distancia Escalada
H&P:	Homlberg and Pearson.
K:	Factor de amplitud.
α :	Factor de Atenuación
Tj:	Tajo
Vv:	Velocidad de Vibración Crítica.
RMSE:	Error medio
R^2 :	Coeficiente de Determinación
A(t):	Amplitud de Onda.
F:	Frecuencia
Σ :	Sumatoria.
Vp:	Velocidad de onda primaria
P:	Ondas primarias.
Vs:	Velocidad de Ondas secundarias
σ :	Densidad
N:	Cantidad de Datos
MEC:	Mezcla explosiva comercial
PETS:	Procedimiento escrito de Trabajo.

Log: Logaritmo

ReLu: Unidad Lineal Rectificada

mm/s: milímetros por segundo

RMR: Rock Mass Rating

r: Correlación

Sig.: Significancia.

Gl: número de datos

DIN: Instituto Alemán de Normalización

g/cc: Gramos por Centímetro Cúbico

m: metros

Kg/tal: Kilogramos por taladro

RESUMEN

En la minería a tajo abierto para fragmentar el macizo rocoso, es indispensable el uso de agentes explosivos; a este procedimiento se lo conoce como voladura, los explosivos generan vibraciones que afectan a la infraestructura de la mina y de los pueblos aledaños, la VPP es el principal indicador para medir el nivel de vibraciones y una predicción inadecuada puede llevar a diseños de voladuras poco eficientes; ante esta problemática, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo fundamental predecir las vibraciones en campo lejano para estimar la VPP, determinar cuáles son los parámetros de mayor influencia, comparar el desempeño predictivo de los modelos. Para lo cual, se tomará datos de monitoreo con el sismógrafo y se desarrollará dos modelos predictivos en función a la distancia (D) y cantidad de carga (W) uno de Devine y el otro modelo de Redes Neuronales Artificiales. La validez de cada modelo se realizará mediante estimadores estadísticos como el coeficiente de determinación y el error cuadrático medio. Obteniendo los siguientes resultados que el modelo de Devine con su ecuación $VPP = 1849.8(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-1.743}$ presentó un mejor desempeño predictivo en comparación de la RNA para los datos del grupo de pruebas. En conclusión, se logró realizar el modelo de vibraciones, que la distancia es la variable con más correlación para determinar la VPP y que los modelos tradicionales continúan siendo herramientas confiables para la predicción de vibraciones en campo lejano, el cual permiten apoyar el diseño de voladuras, el control de vibraciones y la prevención de impactos sociales.

Palabras claves: Predicción de Vibraciones, Velocidad Pico Partícula (VPP), Redes Neuronales Artificiales (RNA), Modelo de Devine, voladura de rocas.

ABSTRACT

In open-pit mining, the use of explosive agents is essential to fragment the rock mass; this procedure is known as blasting. The explosives generate vibrations that affect the mine's infrastructure and the surrounding towns. The PPV is the main indicator for measuring vibration levels, and an inadequate prediction can lead to inefficient blasting designs. Given this problem, the fundamental objective of this research is to predict far-field vibrations to estimate the PPV, determine the most influential parameters, and compare the predictive performance of the models. To this end, monitoring data will be collected from a seismograph, and two predictive models will be developed based on distance (D) and charge quantity (W): one using Devine's model and the other using Artificial Neural Networks. The validity of each model will be assessed using statistical estimators such as the coefficient of determination and the mean squared error. The results showed that the Devine model, with its equation $PPV = 1849.8(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-1.743}$, exhibited better predictive performance compared to the ANN for the test group data. In conclusion, the vibration model was successfully implemented, and distance was found to be the variable with the strongest correlation for determining the PPV. Traditional models remain reliable tools for far-field vibration prediction, supporting blast design, vibration control, and the prevention of social impacts.

Keywords: vibration prediction, peak particle velocity (PPV), Artificial Neural Networks (ANN), Devine model, rock blasting.

CAPITULO I.

INTRODUCCIÓN.

La minería en la actualidad sigue siendo la principal fuente económica de nuestro país teniendo un 60% del total de las exportaciones, para su extracción la actividad minera contempla varias etapas dentro de ellas la explotación, realizar la etapa mencionada indica ejecutar el proceso de voladura de rocas mediante el uso de explosivos que hoy en día es la única manera más económica de fragmentar un macizo rocoso, las voladuras luego de ser detonados liberan energía, la cual no es utilizada completamente en el proceso de fragmentación sino que una gran parte se disipa en forma de ondas sísmicas y ondas áreas. La presencia de ondas sísmicas produce un fenómeno físico conocido como vibraciones quienes a su vez generan inestabilidad en los taludes, daños en las estructuras o edificaciones dentro de la mina y fuera de ella, condiciones inseguras de trabajo y problemas ambientales, todo esto representa un gran riesgo para la continuidad del proyecto.

Para determinar cuánto daño se genera producto de las vibraciones es necesario determinar la VPP (velocidad de pico partícula), indicador que mide la intensidad del movimiento del suelo, medir este parámetro es un gran desafío por los diversos factores que presenta una mina, para determinar este parámetro es necesario realizar medidas con sismógrafos, luego realizar un modelo empírico o un modelo basado en redes neuronales y seleccionar cuál de todos los modelos de predicciones presenta un grado de correlación elevado. La mina en la cual se está realizando el estudio no tiene ningún modelo para predecir las vibraciones en campo lejano, por consecuencia podría tener problemas dentro de la mina o con viviendas de comunidades cercanas, por tal motivo es esencial contar con un modelo predictivo confiable que permita estimar la VPP con precisión y así garantizar el cumplimiento de los límites establecidos por normas internacionales y nacionales.

Existen muchos modelos matemáticos para predecir las vibraciones como entre los que se incluyen algunos modelos predictivos ampliamente reconocidos propuestos por el Departamento de Minería de Estados Unidos, U.S. Bureau of Mines, a partir de análisis de una gran base de datos tomados en campo y están en función de la distancia y la cantidad de carga por retardo. Algunos de los modelos presentan limitaciones por lo que generan

márgenes de error elevados, por tal motivo emplearemos modelos de predicción basados en las Redes neuronales Artificiales, para tener una predicción más ajustada a la realidad de la mina y así poder contribuir de manera eficiente al control de vibraciones.

Por todo lo antes escrito, nos plantearemos la siguiente pregunta general ¿Cómo predecir la velocidad pico partícula (VPP) mediante un modelo de vibraciones acorde a las condiciones de una mina a tajo abierto? en relación con esta pregunta se establece la hipótesis general. El desarrollo de un modelo predictivo de vibraciones considerando las variables operativas permitirá estimar con mayor precisión la velocidad pico de partícula en campo lejano.

La investigación presente, desde el punto de vista social fue necesario porque, teniendo un control fidedigno de las vibraciones generadas por las voladuras, las cuales tienen un gran impacto en la seguridad de las personas y bienestar de las comunidades cercanas se podrá reducir el riesgo de daños a las paredes de taludes o daños estructurales a la infraestructura, por ende disminuir los conflictos sociales y mejorar la percepción de la actividad minera, aspectos que cada día que pasa están en mayor decaimiento, por lo tanto la predicción de vibraciones nos permite tener operaciones seguras y sostenibles.

Asimismo, en la práctica se justifica porque uno de los modelos ofrecerá una predicción confiable que permitirá optimizar el diseño de malla de perforación, así poder seleccionar la carga y distancia adecuada. Todo esto se traduce en mejoras económicas para la empresa, ofrecer lugares de trabajo seguros, mayor fragmentación y menor riesgo en equipos y estructuras, así mismo el modelo puede replicarse en otras minas dónde las condiciones geológicas sean muy parecidas y finalmente, desde el punto de vista teórico, esta investigación aporta al mejor y fácil entendimiento del comportamiento de las vibraciones en campo lejano, además permite evaluar si es que un modelo clásico de predicción puede ser aplicado en diferentes condiciones geológicas o se optara por los modelo de inteligencia artificial, de esta manera se contribuye al enriquecimiento y fortalecimiento del estudio de vibraciones en voladuras, sirviendo como base para futuras investigaciones dónde se pueden desarrollar nuevos modelos predictivos.

Esta investigación se centra exclusivamente en desarrollar y validar un modelo predictivo de vibraciones en campo lejano, a partir de datos registrados por un sismógrafo en un tajo de una mina a cielo abierto en el norte del país en la provincia de Cajamarca, plasmando como principal objetivo, predecir las vibraciones en campo lejano para estimar

la velocidad pico partícula en una mina a tajo abierto; así también se plantea los objetivos específicos: Determinar cuáles son los parámetros que mayor influencia tienen en los modelos de predicción, comparar el desempeño predictivo de cada modelo mediante indicadores estadísticos y reducir las vibraciones de las voladuras de rocas para evitar problemas sociales con las comunidades aledañas y estructuras dentro de la mina.

Los capítulos están distribuidos de la siguiente manera: Capítulo I una introducción dando a conocer los detalles de la investigación, capítulo II en el marco teórico se considera los antecedentes internacionales, nacionales y locales, en las bases teóricas todos los conceptos que afianzan el estudio respecto a las vibraciones producidas por voladuras y los modelos a utilizar, en el capítulo III se describe la ubicación geográfica del lugar donde se realizó el estudio, como se desarrolla el procedimiento para realizar el modelo de las vibraciones y todas las regresiones lineales y estadísticas que se realizan a los datos obtenidos para generar el modelo de vibraciones, así como también la parte epistemológica de la investigación y como se realiza el muestreo y como se presentan los resultados. En el capítulo IV se realiza el análisis y discusión de resultados de acuerdo con el modelo de vibraciones, cuál de los modelos es el más apropiado y contrastando la hipótesis. En el capítulo V se detalla las conclusiones y recomendaciones, para futuras investigaciones que se llega después de realizar la investigación, acorde a nuestros objetivos propuestos y por último se presenta la bibliografía y los anexos.

CAPITULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes Internacionales.

Díaz (2024) en la Universidad de Chile realiza un trabajo de investigación “Predicción de vibraciones producidas por tronaduras mediante redes neuronales artificiales” cuyo objetivo principal es desarrollar una metodología donde se determine la predicción de vibraciones mediante redes neuronales artificiales (ANN) empleando la mayor cantidad de datos. El autor analizó 1302 datos correspondiente a la recolección de voladuras desde el 2018 y 2020, a su muestra le realizó una depuración para eliminar datos atípicos que se cometen por errores humanos, para la modelación de la velocidad pico partícula utilizo el modelo de Devine para cada estación de monitoreo llegando a tener un ajuste máximo de 85.4% el cual considera como un ajuste de moderado a bueno, también utilizo las redes neuronales con tres capas internas de 73, 77 y 66 neuronas cada una, este modelo llego a un coeficiente de determinación de 93.8% lo que significa que el modelo logra una excelente capacidad predictiva, el autor llega a la conclusión de que la configuración compleja de la red neuronal genera una mayor precisión en la predicción mientras que el modelo tradicional se ve limitado para algunas ubicaciones.

De Cospedal (2019) en su trabajo de investigación denominado “Utilización de la medida de vibraciones en voladuras para el conocimiento de los daños al macizo de roca ornamental” cuyo objetivo fundamental es intentar conocer la distancia mínima de influencia del explosivo por cada capa de roca, para poder avanzar con las voladuras sin generar planos de corte conocidos como el precorte que lo realizan de manera mecánica, en su estudio concluyó que mediante vibraciones, la utilización de los ensayos mecánicos de la roca y la medida de la propagación de las ondas sísmicas que se desarrollan dentro del macizo rocoso, se puede establecer con un gran porcentaje de aceptabilidad a que distancia la roca ornamental no será dañada por la detonación de los explosivos. También concluye que, la distancia mínima para reducir los daños queda calculada una vez que se han establecido las leyes más útiles de la amortiguación de vibraciones el cual permite el cálculo

directo de la distancia de daño, añadiendo la carga operante utilizada por taladro (Q) los coeficientes de transmisión (K, α y β), velocidad de Vibración Crítica V_v y el factor de seguridad FS, la relación matemática es la siguiente.

$$D = \left(\frac{K * Q^\alpha}{\frac{V_v}{FS}} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

En su estudio también concluye que el ajuste de los valores de los coeficientes de transmisión es el más complejo de realizar, pero el de más importancia y que existe 3 métodos para calcular, las cuales son las siguientes: Basadas en la distancia reducida (DR), Estimación Lineal Múltiple y ajuste parcial, en dos etapas, basado en valores de carga constante.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Cornejo y Huamán (2020) investigaron sobre la “Estimación de un modelo predictivo de vibraciones inducidas por voladura en campo medio y lejano para el cuidado de estructuras en una mina superficial en proceso de cierre” teniendo como objetivo general crear un modelo matemático basado en las predicciones de las vibraciones inducidas por las voladuras y también proponer un límite en las cargas operativas en base al modelo realizado para el cuidado del talud final y las estructuras cercanas; su muestra de estudio fueron los datos históricos durante 2 años de la velocidad pico partícula de una mina a cielo abierto en la sierra peruana. Llegando a concluir que, para construir un buen modelo predictivo de vibraciones es necesario hacer una filtrado rigurosa todos los datos que se obtiene del monitoreo de vibraciones, llegando a tener un índice de confiabilidad de 78% en campo lejano con 3 interacciones matemáticas y de 92% en campo medio, cabe resaltar que todo el trabajo de investigación realizado está basada en el modelo de Devine que es el modelo de campo lejano teniendo una variación por la distancia que se toman los puntos de monitoreo y la variedad del macizo rocoso.

Herrera (2020) en su tesis “Análisis y monitoreo de las vibraciones producidas por voladura para reducir daños al macizo rocoso en el Tj 753E de la UEA San Cristóbal - Minera Bateas S.A.C. Arequipa - 2020” su objetivo fue determinar si el análisis y monitoreo de las vibraciones producidas por la voladura permite reducir daños al macizo rocoso. El diseño fue no experimental, de tipo aplicada y de nivel explicativo, el muestreo que realizó fue intencional en el tajo 753E, recogió los datos de vibraciones de diferentes voladuras con

un sismógrafo para luego los datos anotar en una ficha técnica y en un software realizar el modelo de vibraciones bajo la metodología de Devine. Concluyó que al analizar el monitoreo de vibraciones que la PPV en relación con la frecuencia no sobrepasan los límites permisibles según la norma USBM RI-8507, por lo tanto, el análisis de vibraciones y monitoreo permite reducir significativamente los daños al macizo rocoso y si hubiesen pasado el límite se tendrá que diseñar una malla de perforación acorde al nuevo modelo.

Cáceres (2023) plasmó una investigación de tipo tecnológica y de enfoque aplicativo llevando por título “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”

El objetivo del autor es controlar las vibraciones que producen los explosivos Fortis Advantage y Flexigel extra 100 y así poder reducir la probabilidad de un deslizamiento del tajo, el cuál presenta un problema estructural debido a la falla que atraviesa por todo el tajo Ferrobamba, los resultados luego del estudio por campo cercano indican que, se ha reducido en un 47% el impacto por vibraciones a la pared del talud en la zona de inestabilidad del tajo con respecto al explosivo que se venía utilizando, es importante también resaltar del presente estudio el valor del PPV del macizo rocoso que fue de 418 mm/s y las variables de atenuación del modelo de campo cercano del explosivo en estudio el Flexigel Extra -100 son las siguientes; el valor de $K = 31.59$ y el valor de $\alpha = 0.9363$ y a raíz de estos datos se elabora un nuevo diseño de voladura, para la minera las Bambas en el tajo Ferrobamba.

Guerrero (2022) elabora una tesis de tipo aplicada y diseño experimental que lleva por título “Modelamiento Predictivo de vibraciones en campo lejano para inferir vibraciones en voladuras masivas cerca a estructuras de concreto”. El problema general es que en la mina Quellaveco se pretende ejecutar un proyecto en la parte inferior del botadero “Construcción de Obras a Pie de Botadero – Área 2000” para controlar el aporte de las aguas superficiales como subterráneas hacia el río Asana, durante el proceso constructivo de las obras que se van ejecutar se encontró la presencia de roca fija el cuál no puede ser minado con maquinaria, por lo tanto se tiene que hacer uso de los explosivos, la zona dónde se realiza los trabajos se encuentra cerca de estructuras que pueden ser afectados. Para evitar el deterioro de dichas estructuras el autor utilizó la metodología del campo lejano mediante el modelo de Devine, teniendo como datos el registro de vibraciones generadas por un taladro

de prueba, para a partir de estos datos generar un modelo de predicciones para luego ser validas con la realización de voladuras masiva.

Los resultados indican que para el punto de monitoreo llamado el túnel se obtuvo un PPV de 150 mm/s y para la plataforma de bombas de 5 mm/s a 50 mm/s pero cuándo se realiza la comparación del modelo predictivo de campo cercano con los datos reales obtenidos de una voladura hay diferencia de -260% en el Túnel y de 32% en las plataformas, por tal motivo el autor recomienda que para investigaciones futuras dónde los macizos rocosos presentan diferentes tipos de estructuras como (fallas, diaclasas o presencia de agua) la metodología no es muy recomendable debido a la variedad de la data sísmica.

Valdivia (2023) realiza un estudio sobre la “comparación de los modelos empíricos tradicionales vs los modelos predictivos de Machine Learning para estimar la velocidad pico partícula”, cuya tesis es de tipo tecnológica y de diseño experimental. La muestra fue conformada por 200 mediciones de la PPV de 121 proyectos realizados en una mina a tajo abierto al sur del país, el objetivo general es desarrollar una comparación tanto objetiva como cuantitativa de los modelos de predicción tradicionales con los modelos que diseña machine Learning para la predicción de las vibraciones; con el fin de encontrar cual modelo es más representativo. Tras el desarrollo de la investigación llego a la conclusión de que el modelo desarrollado por redes neuronales artificiales fue el que más representatividad obtuvo con un valor de RMSE de 11.54 unidades y un valor de coeficiente de determinación de 0.88 y dentro de los modelos tradicionales el que mejor performance obtuvo fue el de Rai & Singh con un valor de RSME de 20.65 y un coeficiente 0.61.

2.1.3. Antecedentes Locales

Ruiz y Suárez (2021) en su tesis “diseño del modelo predictivo de vibraciones por voladura en una mina de oro a tajo abierto”, de enfoque aplicada de diseño no experimental, cuyo objetivo principal es diseñar un modelo predictivo de vibraciones producto de la voladura, realizo el modelo predictivo de Devine (campo lejano) obteniendo los siguientes valores de atenuación de la roca: $K = 22.292$ y de alfa = -0.015 con un nivel de confianza de 95%, el modelo se realizó en una roca de tipo III, con un RMR de 43. También concluye que en los 67 proyectos de voladuras del año 2019 y de año 2020, las cuales fueron sus muestras, el PPV promedio de las muestras fue de 25.4 mm/s, el cual indica se encuentra por debajo de los límites permisibles establecidos según la norma peruana del MINEM y la norma americana USBM.

2.2. BASES TEÓRICAS.

La minería es el aliado ideal para la tecnología y para facilitarnos nuestra vida dentro de la sociedad, la cual no sería la misma sino hacemos uso apropiado de la minería, desde los utensilios de una cocina hasta los metales que se usan para producir energía, todos ellos están conformado por minerales o tiene un vínculo muy estrecho, pero detrás de esta producción existe todo un proceso de extracción de los minerales, para que esté beneficio esté presente en nuestras vidas de manera cotidiana es indispensable el uso del explosivo, ellos son los que proveen de una gran fuente de energía para fragmentar la roca y luego con procesos químicos poder separar los minerales.

Todo este proceso del uso de explosivos para reducir de tamaño a la roca, es conocido como la voladura de rocas, que dentro del ciclo de minado de una operación minera constituye una de las operaciones unitarias con mayor influencia en todo el proceso extractivo, sin embargo, el empleo de explosivos en la matriz rocosa trae efectos secundarios como: (vibraciones y onda área). La mayor preocupación se tiene en las vibraciones por que trae problemas de inestabilidad a los taludes, comunidades aledañas e infraestructura dentro de la mina. En la presente investigación definiremos todos los conceptos que nos ayuden a plasmar nuestros objetivos, conceptos de las vibraciones y modelos campo lejano.

2.2.1. Predicción De Vibraciones.

2.2.1.1. Vibraciones

Desde la física se menciona que un cuerpo cualquiera experimenta una vibración cuando describe un movimiento oscilante con respecto a una posición de referencia, así Mobley (1999) define a una vibración mecánica a la variación de un parámetro físico en el tiempo respecto a su posición inicial que se encuentra en equilibrio. Las vibraciones pueden clasificarse en libres o forzadas, la primera ocurre cuando un sistema oscila bajo la acción de fuerzas inherentes al sistema mismo y por otro lado vibración forzada se crea por el producto de fuerzas externas al sistema (Thomson 1982). Por lo general, el parámetro físico de medición es la amplitud de vibración.

2.2.1.2. Cómo se Originan las Vibraciones en las Voladuras.

Antes de conceptualizar cómo se origina las vibraciones en las voladuras, es importante conocer el proceso de rotura que experimentan las rocas, porque es ahí donde encontraremos explicación a este fenómeno fisicoquímico y poder comprender los conceptos que son base para el presente trabajo de investigación.

Con respecto a la rotura o fragmentación Exsa (2019) indica que para fragmentar la roca por voladuras comprende el trabajo físico que realiza un explosivo al detonar y la consecuente respuestas del macizo rocoso circundante, incluyendo algunos factores como: tiempo, energía termodinámica presencia de ondas entre otros todo esto en cuestión de segundos. Chaucayanqui (2005) nos hace referencia que los materiales que se encuentran dentro de una perforación son de tipo explosivos, los cuales son mezclas que generalmente se encuentran en estado sólido o líquido, la mezclas explosivas al tener un iniciador también conocido como cebo, sufren reacciones químicas de oxidación y reducción (redox), lo que dan lugar a una reacción exotérmica muy rápida, generando productos gaseosos que se encuentran a altas temperaturas y presiones, propiedades generales de los gases.

Todos estos fenómenos físico químico de los explosivos son utilizados para producir energía y así poder realizar la rotura de materiales pétreos en lo que compone la “ciencia de la voladura de rocas”, porque hoy en día dejo de ser una técnica u arte, para pasar a estudiarse como una ciencia. Toda operación minera usa explosivos para fragmentar la roca, una parte de la energía liberada produce vibraciones la International Society of Explosives Engineers ISEE (2008:29) indica lo siguiente “La energía liberada por la detonación de los explosivos produce cuatro efectos básicos: Fragmentación de la roca, desplazamiento de la roca, vibraciones del terreno y sobrepresión de aire, adicional de cierta cantidad de humos tóxicos y no tóxicos que son lanzados a la atmósfera”.

2.2.1.3. Mecánica de Rotura de la Roca.

Se hace referencia por rotura, a la disminución de tamaño de la roca mediante el uso de explosivos. Cuando la mezcla explosiva llega a iniciarse reacciona químicamente y se liberan 2 principales fuentes de energía, la energía de choque y la energía de gas.

“Cuando un explosivo detona se transforma en un gas luciente con temperatura hasta 4500 °C y la presión interna hasta 250 000 atm. La detonación se propaga como una onda de choque, esta onda comprime el explosivo y como consecuencia sube la temperatura. La reacción es muy rápida y solamente tarda unos milésimos de segundo” (Samuelson 1985)

Los explosivos, liberan energía dependiendo de sus propiedades físicas como: la velocidad de detonación, densidad, sensibilidad, presión de detonación resistencia al agua, humos, flamabilidad, entre otros, de acuerdo a estas propiedades y al diseño de malla de perforación se obtendrá los mejores resultados en la fragmentación.

Al aplicarse la energía de los explosivos, se cumple la tercera ley de Newton dónde toda acción tiene una reacción, el macizo rocoso envía una respuesta ante la energía liberada. Exsa (2019) en su manual de voladura, establece el mecanismo de rotura de la roca en seis fases o etapas, todas en conjunto se da en un tiempo muy corto para ser más específicos en milisegundos, desde el inicio de la detonación hasta la fragmentación de la roca y desplazamiento total del material volado.

Como se puede apreciar en la Figura 1, en la primera etapa se observa un taladro (hoyo construido por una perforadora) dónde se identifica los componentes básicos y necesarios de un taladro como: Burden, taco, cara libre, iniciador.

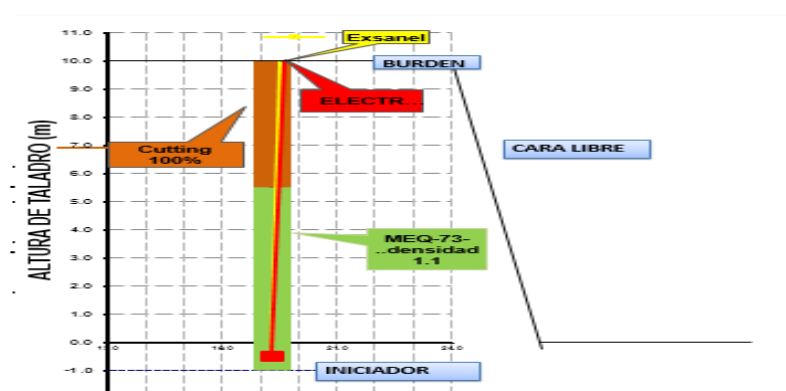


Figura 1. Componentes de un taladro.
Fuente: Diseño de la voladura por ORICA

En la etapa número 02. Propagación de la onda de choque. Después de algunas milésimas de segundos de la detonación de la fase 01, tiene lugar una serie de fenómenos, se libera la energía química del explosivo, el cual se encuentra en estado sólido y se transforma en un gas a elevadas temperaturas ($2000^{\circ}\text{C} - 4000^{\circ}\text{C}$) y alta presión (20-30 kbar) entonces se da origen a la onda de choque o también conocida como la onda de compresión, que se encuentra a una velocidad entre los 3 000 y 5 000 m/s Langefors y Kihlstrom (1963). Acá en esta fase se produce la trituración de la roca cerca al taladro López et al. (2003:283) indica “el tamaño de la roca triturada con explosivos de alta potencia y en rocas porosas puede llegar a tener un diámetro de hasta 8 veces el diámetro de perforación, pero lo normal es que oscile entre 2 a 4 veces el diámetro”. La trituración o también llamada descomposición de la roca se da porque la onda de choque viaja con una energía muy elevada el cual no le da tiempo a la roca para responder elásticamente sino que se funde o pulveriza. Como se puede apreciar en la Figura 2 se inicia la marcha de la onda de choque de manera radial y cilíndrica hasta encontrar una cara libre y dónde no se encuentra la cara libre daña al macizo rocoso en forma de vibraciones.

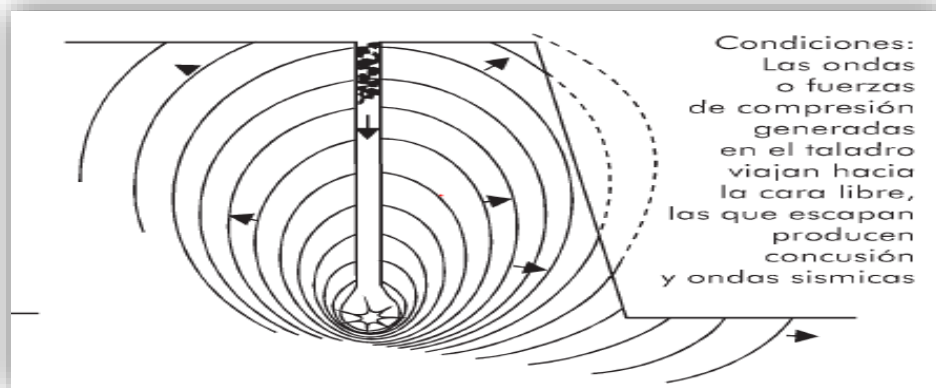


Figura 2. Inicio de las ondas hacia la cara libre.

Fuente: Tomada de EXSA (2019)

En la etapa o fase 03 las ondas se reflejan al encontrar una cara libre, se entiende por cara libre a la zona dónde ya no hay más resistencia que el aire, en términos de física es una frontera libre de esfuerzos, Hoek y Brown (1986:434) manifiesta que cuando:

“Las ondas de compresión radial viajan hacia la cara libre se convierten en una onda reflejada de esfuerzo a la tensión, este esfuerzo se desplaza en sentido contrario rumbo al inicio de la detonación y aparte de provocar desmoronamiento en el frente libre, también puede alterar el campo de los esfuerzos alrededor del barreno y alterar la distribución de las fisuras”.

Cuando la onda de choque refleja al encontrar un frente libre Figura 3 se produce otra nueva onda con esfuerzos tensionales y como la roca se comporta más débil a los esfuerzos por tracción se produce la fragmentación de la roca, según Samuelson (1985) establece que la resistencia a la tracción que experimenta una roca es menor que la resistencia a la compresión establece que en rocas homogéneas varía de 4 a 5 % de los esfuerzos compresionales. López et al. (2003:284) indica que la fracturación de la roca se da por reflejo de las ondas compresionales en forma de ondas tensionales. Como se puede ver en la Figura 3, se da la rotura por descostre o spalling

“Si las tensiones de tracción superan la resistencia dinámica de la roca se produce un fenómeno conocido como descostramiento o spalling; este mecanismo de las ondas reflejadas contribuye relativamente poco al proceso de fragmentación, estimándose que la carga de explosivo necesaria para producir la rotura de la roca por la acción exclusiva de la reflexión de la onda de choque sería ocho veces mayor que la carga normal, sin embargo en

distancias cerca al taladro dónde se encuentran discontinuidades o presencia de alguna falla y que no estén rellenas por ningún elemento, el efecto de estas ondas es mucho más significativo por la diferencia de impedancias”.

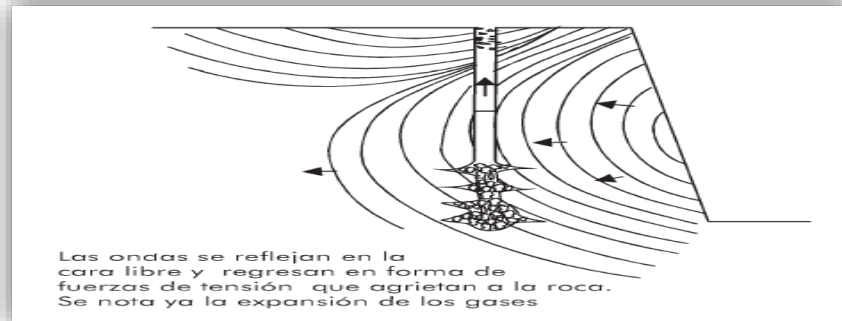


Figura 3. Agrietamiento por tensión.

Fuente: Tomado de EXSA (2018)



Figura 4. Fase 03 rotura de expansión.

Fuente: Extraída del manual de EXSA (2018)

En la etapa N° 05 luego del pase de las ondas tanto compresionales como tensionales la energía y expansión de los gases vuelve a realizar nuevamente su trabajo, las ondas apertura nuevas grietas o amplían las ya existentes los gases comienzan a expandirse y penetrarse en las fracturas López et al. (2003), en su manual de perforación y voladura de rocas manifiesta que, la presión de los gases provoca un campo de esfuerzos tensionales cuasiestáticos en la zona contigua al taladro de perforación, los gases comienzan a penetrarse en las fracturas y las grietas radiales tienen una dimensión más amplia. Si el Burden (distancia entre el taladro a la cara libre) está debidamente calculada la roca fragmentada tiende a ceder, para que los gases que aún quedan desplazan hacia adelante, hasta perder su fuerza por la caída de presión y de temperatura, en ese instante la pila de escombros se inicia a formar.

Si la medida entre el taladro y la cara libre está correctamente calculada, la roca entre ambos puntos cederá al esfuerzo, luego los gases que se crearon desplazan rápidamente el material triturado hacia la parte delantera del burden, hasta perder su fuerza por disminución de temperatura y por aumento de volumen de la cavidad formada en la roca, en ese instante los fragmentos o detritos caen y se acumulan para formar la pila de escombros o material volado, como se puede apreciar en la Figura 4 estos gases también hace que la rotura se realice por flexión así López et al. (2003:286) Describe que “la presión ejercida por los gases de explosión sobre el material situado, hace que la roca actúe como una viga doblemente empotrada en el fondo del barreno y en la zona del retacado produciéndose la deformación por fenómenos de flexión” y por último es importante mencionar que ocurre una rotura por colisión entre fragmentos rocosos producto de la proyección de los fenómenos anteriores.

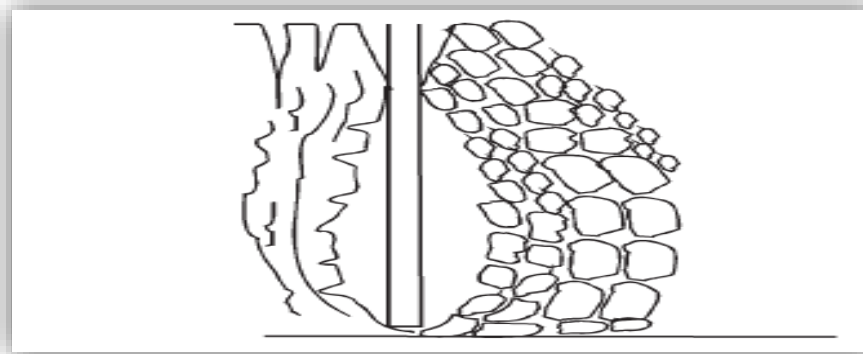


Figura 5. Fase 04: Expansión Máxima. La roca actúa como una viga.

Fuente: Tomado de EXSA (2019)

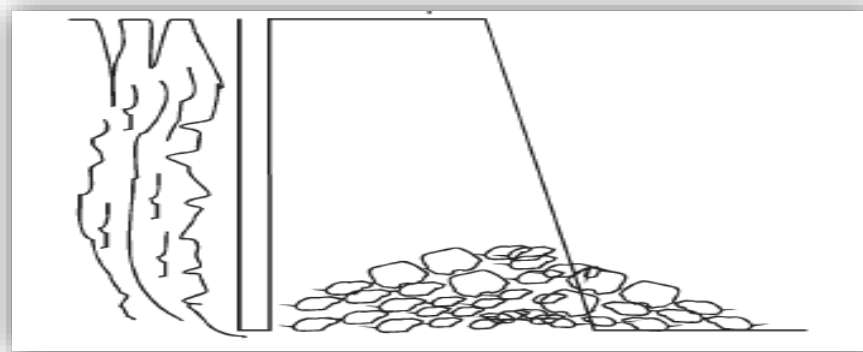


Figura 6. Formación de pila de escombros.

Fuente. EXSA (2019)

Otros autores como López también realizan una descripción de la rotura de rocas, la cual lo identifica por etapas como se aprecia en la Figura 7, todos los autores coinciden con

la teoría sobre la rotura de rocas, que el explosivo al detonar genera una onda de choque y gases a altas temperaturas y presiones, las ondas reflejan en una cara libre y retornan como ondas tensionales producción de la fragmentación de la roca.

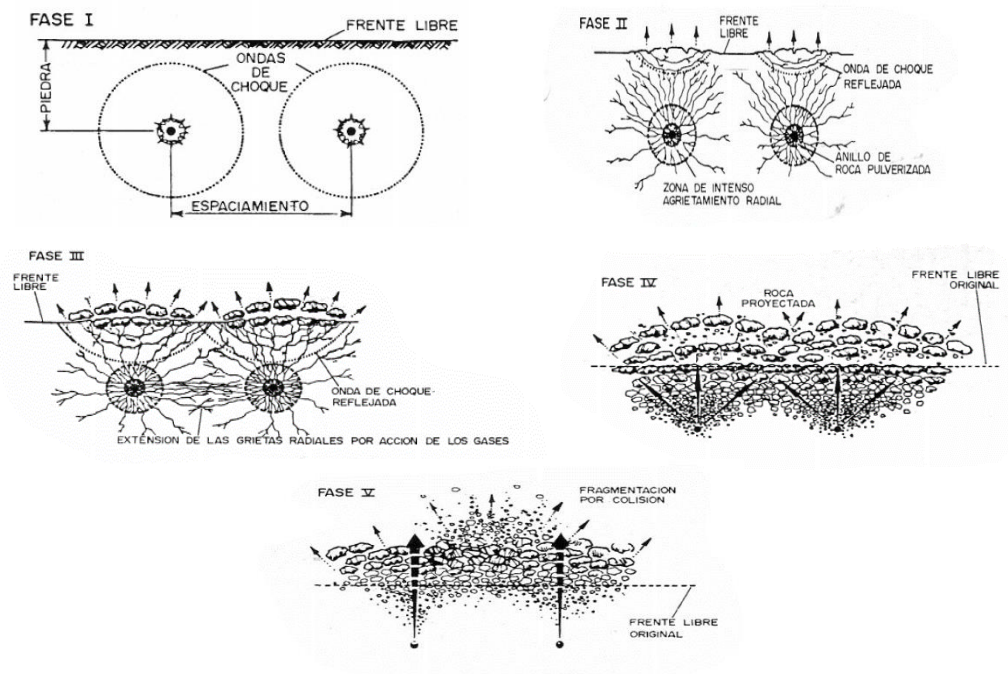


Figura 7. Proceso de rotura de las rocas.

Fuente: López (2008)

2.2.1.4. Ondas de una Vibración.

En la ciencia de la física existen 2 tipos de ondas: las ondas mecánicas y las ondas electromagnéticas, las ondas mecánicas son las que necesitan un medio para propagarse y las ondas electromagnéticas pueden viajar por el vacío. En cuanto a las ondas de una vibración pertenecen a las ondas sísmicas u onda mecánica desde ese punto de vista oscilatorio se realizarás los conceptos y parámetros de las vibraciones, así como Konya (2008:225) señala que: “Las propiedades fundamentales que describen el movimiento de las ondas se denomina parámetro de las ondas. Esto se miden y cuantifican cuando se analiza el movimiento de ondas o vibración”. Entonces los parámetros más resaltantes en un movimiento oscilatorio son: amplitud, frecuencia de onda, velocidad de propagación.

La ecuación de la onda lo define Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex (CINTEX 2005) el cual es una ecuación de tipo sinusoidal que manifiesta las características del movimiento de una partícula por el paso de una onda ver ecuación N° 01.

$$A(t) = A_0 * \text{Sen} (2\pi * f * t)$$

Ecuación 1

Donde:

A (t): amplitud de onda.

A₀: pico de amplitud sobre la onda completa.

F: frecuencia de onda

T: tiempo.

2.2.1.4.1. Parámetros de Una Onda Sísmica.

Los principales parámetros son los siguientes: Frecuencia, amplitud, duración, longitud y velocidad de propagación.

a. Frecuencia de las vibraciones.

Es el número de ciclos completos por unidad de tiempo, también tenemos que es el “Número de vibraciones u oscilaciones que ocurren en un segundo, designado como Hertz” (Konya, 2008: 227) para CINTEX (2005) la frecuencia de las vibraciones hace referencia a la cantidad de veces por un segundo que la onda de propagación describe un ciclo completo de compresión y tensión. Su unidad de medida es el Hertz o ciclo/segundo. Con respecto a la importancia sobre los resultados de una voladura hay que resaltar lo que indica Exsa (2019) que el principal factor que influye en la frecuencia es la carga lineal, para taladros cuya cantidad de explosivo es alta tienden a producir bajas frecuencias y otros factores como el tipo de roca, la velocidad de detonación también influye, pero a menor escala.

b. Amplitud.

Dentro de las ondas mecánicas la amplitud es la máxima elongación o desplazamiento desde la posición de equilibrio durante la propagación de la onda, la unidad de medida por lo general es mm.

La amplitud por lo general está relacionada con el daño estructural que puede causar las voladuras a mayor amplitud mayor daño genera la onda sísmica, esto se explica en su relación que tiene con la energía, así CINTEX (2005:7) afirma que “la energía de una onda de vibración es proporcional al cuadrado de su amplitud”.

c. Duración de la vibración.

La duración por vibración es el rango de tiempo en la cual, la onda generada por la voladura presenta amplitudes apreciables, este parámetro obedece de los siguientes factores: la cantidad de carga, la distancia al punto de monitoreo y el tiempo de salida de cada taladro. CINTEX (2025). Como se puede apreciar en la Figura 8 , al inicio se muestra un tiempo quieto en el segundo 0.5 inicia la vibración

teniendo una duración de 2 segundos para que luego nuevamente pase a una estabilidad. El tiempo de duración de la vibración siempre es más amplio que el de la voladura por lo general de 300 ms a 400 ms de diferencia.

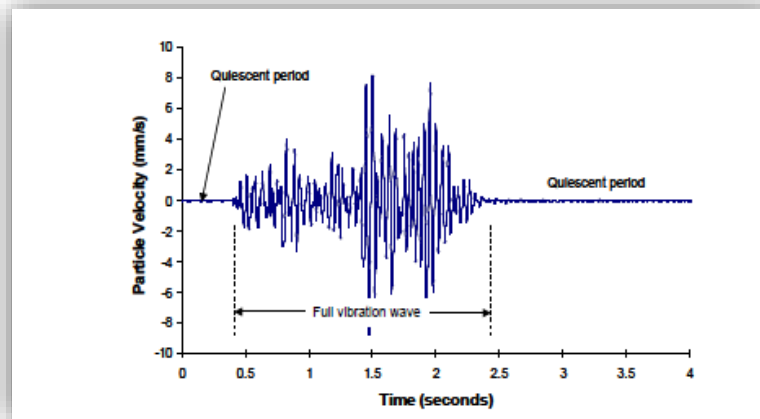


Figura 8. Onda completa de la vibración.

Fuente: Tomado de CINTEX (2005)

d. Longitud de la onda de vibración.

En el estudio de las ondas mecánicas la definición de onda está relacionada con las distancia entre dos puntos consecutivos de una onda periódica distancia entre dos crestas o valles, su representación es la letra landa λ , la unidad de longitud de medida se clasifica según el tipo de onda que puede ser milímetros, pulgadas o centímetros, con respecto a la longitud de onda producto de una voladura CINTEX (2005) define a la longitud de onda como un ciclo de compresión de tensión y es de suma importancia el registro de la longitud para discutir el daño a las estructuras.

e. Velocidad de propagación.

La velocidad de propagación describe el viaje de la onda por el macizo rocoso, para determinar su módulo es necesario hacer uso de la metodología de Cross Hole, CINTEX (2005) indica que “la velocidad puede ser medida utilizando dos geófonos a diferente distancia de la voladura y mediante la medición de la diferencia de tiempo de arribo de cada señal” (p. 8). En la figura 9 se determina la velocidad de propagación, se ubican dos geófonos separados a una distancia de 300 m y la diferencia de tiempo de arribo de las ondas a cada geófono es de 80 ms, al aplicar la relación matemática (ecuación 2) velocidad es igual a distancia entre tiempo.

$$V_p = \frac{s}{t} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

V_p : velocidad de la Onda primaria (P)

S: espacio o distancia de propagación.

T: tiempo de la propagación.

Se obtiene una velocidad de propagación de 3750 m/s. El valor varía en relación con el tipo de roca, para una roca dura es mayor a 4000 m/s, para una roca media de 2000 a 4000 m/s y para una roca blanda menor a 2000 m/s (Bernaola et al., 2013, generalmente la velocidad de propagación disminuye por las fracturas y grietas que presenta la roca.

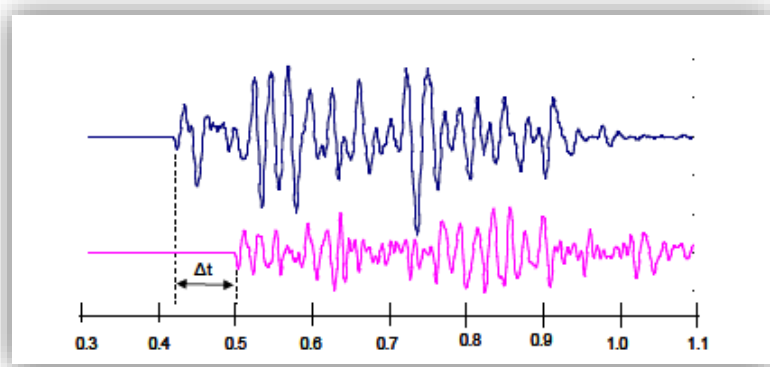


Figura 9. Estimación de la velocidad a 300 m.

Fuente: Tomado de CINTEX (2005)

2.2.1.5. Tipos de Onda de Una Vibración

Muchos autores consideran que la descripción de una onda producto de la voladura no se debe clasificar como una onda elástica, pero luego de determinar el origen de las vibraciones en el ítem anterior y conocer que las vibraciones se estudian dentro de las ondas mecánicas, entonces serán estudiadas en este campo, porque hasta la fecha es el mejor modelo que se asemeja, dónde las ondas se trasladan por algún material llamado medio, en las voladuras el medio es el macizo rocoso, así como Zemansky (2009: 488) manifiesta que “una onda mecánica viaja por un material o una sustancia que es el medio de la onda, al viajar la onda por el medio las partículas que lo constituyen sufren un desplazamiento de varios tipos, dependiendo de la naturaleza de la onda”. Es así como Bernaola et al. (2013) clasifica a las ondas producto de las voladuras en dos tipos: Ondas internas y ondas de superficie la ISEE también realiza una clasificación como ondas de cuerpo y ondas superficiales, como se puede apreciar ambos autores entre otros afirman que las ondas que se producen en una voladura son de dos tipos.

2.2.1.5.1. Ondas Internas o de Cuerpo.

Bernaola et al. (2013) Indica que las ondas de cuerpo son las que se propagan y transmiten por el interior del sólido rocoso, mientras que Chiappetta (2014) define de igual manera, pero agrega una descripción más, que las ondas internas pueden penetrar muchos kilómetros dentro de la corteza terrestre, las ondas internas se dividen en dos tipos de onda: las ondas principales y las ondas secundarias.

a. Ondas primarias o de compresión.

En la sismología (ciencia que estudia los terremotos y el comportamiento de las ondas) las ondas internas son conocidas como las ondas P, el cual hace referencia al vocablo griego “primae” que significa primero, entonces haciendo referencia a la etimología de primae, son las ondas que llegan primero a un punto de monitoreo, otra característica de las primarias lo define el ISEE (2008) con respecto a las voladuras la onda primaria es la misma onda que transmite el sonido a través del agua y que en el medio que viaja que en este caso es un macizo rocoso su velocidad es variable que puede ir desde los 1830 m/s hasta los 6500 m/s dependiendo del tipo de roca. Según estas velocidades se encuentra la explicación del porque son las primeras ondas en llegar. Para López, las ondas de compresión, lo define así.

Son ondas que se irradian dentro de los materiales, originando alternativamente compresiones y rarefacciones, dando lugar a un movimiento de partículas en dirección de propagación de las ondas. Las ondas P son las de mayor velocidad y producen cambios de volumen, pero no de forma en el material a través del que se propagan. (López et al, 2008:669). Tal como se puede apreciar en la figura 10 que en las ondas primarias las partículas se mueven en la misma dirección que la propagación.

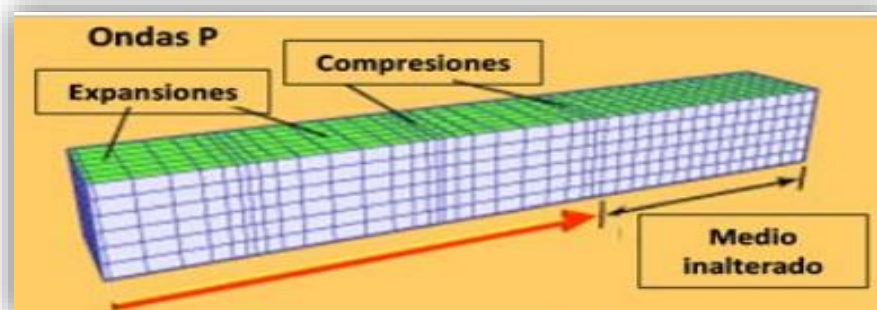


Figura 10. Ondas primarias (p).

Fuente: Bernaola et al. (2013)

- b. Ondas de cizallamiento o transversales. Figura 11, estas ondas también son conocidas como ondas secundarias (s) que proviene del latín “secondae” y como su nombre lo indica son las ondas que llegan luego de las ondas principales, el retraso se debe a su velocidad que por lo general es de 3/5 de las ondas de compresión, con respecto a las ondas (S) el Instituto Geológico Minero de España (IGME, 1985:17) indica que:

Sólo se transmiten en materiales susceptibles de soportar esfuerzos de corte y el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación. Se transmiten tanto por el interior del medio como por su superficie, pero en el caso de terrenos incoherentes están polarizadas según la superficie de separación de ambos medios.

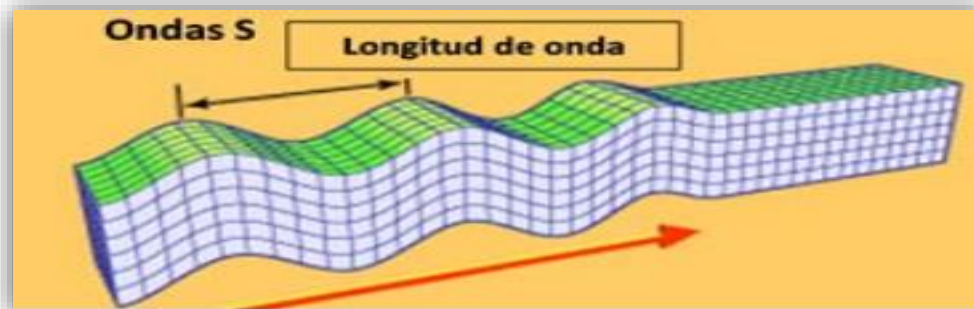


Figura 11. Onda secundaria (S).
Fuente: Bernaola et al. (2013).

Para determinar el módulo tanto de las ondas S como de las ondas P usaremos las ecuaciones N° 3 y 4, las cuáles son propuestas por Pearse et al (1994).

$$Vp = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

$$Vs = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Dónde:

ρ : densidad de roca.

ν : Relación de Poisson

E : módulo de Young (Pa)

Vp : Velocidad de propagación de la onda P

Vs: Velocidad de propagación de la onda S

2.2.1.5.2. Ondas Superficiales.

Son las ondas que, a diferencia de las ondas internas, éstas viajan por la superficie, demoran en llegar, pero son las que más daño provocan a las estructuras ya que su energía no se disipa tan rápidamente, las ondas superficiales también tienen una gran correlación con la VPP y generalmente en campo lejano cuanto mayor sea la amplitud de éstas ondas mayor será la velocidad pico de partícula. Para clasificar las ondas superficiales tomaremos como referencia a Bernaola et al. (2013:200) “Las ondas superficiales únicamente se transmiten por la superficie del material y entre las que se encuentran: las ondas Raileigh R y las ondas Love L”.

a. Ondas Rayleigh (R).

También llamadas ondas R en honor al físico Lord Raileigh quien fue el primero en estudiarlos, normalmente las ondas R tienen una velocidad de 0.9 veces la velocidad de las ondas S dependiendo de las propiedades elásticas del terreno, se propagan en el plano ZX, originando en el plano oscilaciones de movimiento de la partícula de trayectoria elíptica, con un sentido contrario a la propagación de la onda. (Bernaola et al. 2013). En términos más concretos cuando éstas ondas entran en contacto el suelo o la partícula se mueve hacia adelante, hacia atrás y también hacia arriba y abajo. Como se puede ver en la Figura 12.

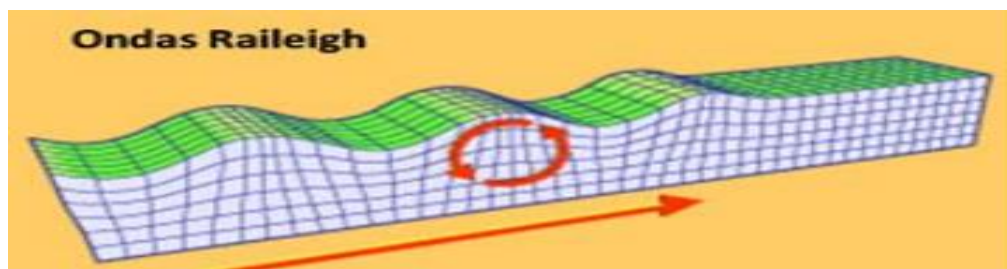


Figura 12. Ondas Raileigh.

El movimiento de la partícula es en forma circular. Fuente: Bernaola et al. (2013)

La velocidad pico partícula (VPP) proviene principalmente de las ondas Raileigh, como lo señala Yang (2024) que “los resultados del ajuste de los datos de vibración medidos, se puede concluir que el coeficiente de atenuación pico a de la vibración inducida por la onda R es entre un 12 % y un 30 % menor que el de la onda P. Por lo tanto, al aumentar la distancia de propagación, también cambiarán los componentes de vibración inducidos por los diferentes tipos de ondas en la vibración de voladura medida”

b. Ondas Love (L).

Se llaman ondas Love en honor al matemático Augustus Edward Hough Love, Bernaola et al (2013) define a las ondas L como aquella que se propaga en el plano XY su movimiento de partículas es transversal a la propagación de onda, la velocidad que experimenta es muy parecida a las ondas Raileigh. Lo que no quiere decir Bernaola es que mientras que las ondas R hacen que el terreno suba y baje como las olas del mar, la Love hace que las partículas se muevan lateralmente de un lado a otro tal como se puede apreciar en la Figura 13.

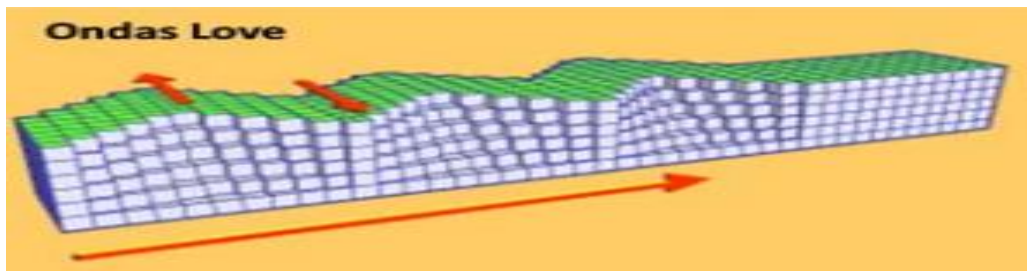


Figura 13. Ondas Love (L).

Fuente: Bernaola et al. (2013)

2.2.1.6. Variables que Afectan las Vibraciones.

Las variables que tienen influencia en las características de las vibraciones por lo general son las mismas variables que influyen en la voladura de rocas, así es como Cánovas et al (2021) divide a las variables que afectan a las vibraciones en dos grupos: Las variables que se pueden controlar y las incontrolables, dentro del grupo de las controlables se encuentra relacionado con el diseño de la malla de perforación y las que no se puede controlar son las condiciones en las que se encuentra el macizo rocoso, para un mejor entendimiento, se analizará otro subgrupo dentro de las variables controlables, las que tienen que ver específicamente con las propiedades del explosivo y la otra con los factores geométricos de una malla de perforación.

Otros autores como López et al. (2003) identificaron las principales variables que tienen incidencia en las vibraciones, las cuales son las siguientes

- Geología local y características del macizo rocoso.
- Peso de la carga operante
- Distancia al punto de la voladura.
- Tipo de explosivo.
- Tiempo de retardos entre taladros.

- Variables geométricas de las voladuras.

2.2.1.6.1. Variables Controlables.

- Tipo de explosivo.

Hay una gran relación entre el tipo de explosivo a utilizar y el nivel de vibraciones generados, si bien es cierto que no determina la cantidad de vibraciones pero si influye en la toma de decisiones al momento de utilizar el explosivo indicado, por ejemplo hay explosivos que generan presiones bajas por consecuencia el nivel de vibraciones son inferiores, López et al (2003) indica que explosivos de baja densidad como el Anfo si se lo compara con un hidrogel aluminizado pero en igual cantidad, la intensidad de las vibraciones será menor en 2 veces que el hidrogel, por su parte Cáceres (2023) luego de realizar un estudio en campo lejano indica que el explosivo Fortis Advantage tiene niveles más altos de vibraciones en un 47% que el explosivo Flexigel extra 100 en mismas cantidades y mismas condiciones de roca, tal como se aprecia en la Tabla 1. La densidad de los explosivos es variada 1.25 y 1 respectivamente.

Tabla 1. Valores de K y α para diferentes explosivos

Tipo de explosivo	Constante		Variación de las vibraciones
	k	α	
Fortis Advantage 70 – G1	591.08	1.07	47 %
Flexigel Extra – 100 – G1	313.59	0.94	

Nota: los valores de k y α varían en un 47%, por eso que hay explosivos que hacen más daño a la roca en comparación con otros. Tomado de Cáceres (2023)

- Consumo específico de explosivo.

El consumo de explosivo también conocido como factor de carga (kg/tm), que viene hacer la cantidad de carga para detonar una cierta cantidad de roca, es importante recalcar que no es lo mismo carga operante que factor de potencia (FP), frente a los problemas de las vibraciones López et al (2003:666) manifiesta que “algunos diseñadores plantean reducir el consumo específico del explosivo, pero no hay nada más alejado de la realidad, pues se han llegado a registrar voladuras dónde se le disminuye hasta el 20% con respecto al óptimo y los niveles de vibración medidos se ha multiplicado por 2 y por 3”.

- Peso de la carga operante.

Según Cánovas (2021) el factor más influyente en la generación de vibraciones es la carga operante junto con la distancia, porque la carga operante está relacionada con la cantidad de energía que libera el explosivo, son directamente proporcionales con las vibraciones a mayor carga operante mayor vibración. La carga operante en voladuras hace referencia a la cantidad de kilos de explosivo que se detona por retardo que es muy diferente a la cantidad de carga utilizada por la voladura que en términos numéricos esta última es mucho mayor, con respecto a los intervalos de tiempo López et al. (2003:665) afirma que “el intervalo de retardo tiene que ser suficientemente grande para que no exista interferencia constructiva entre las ondas generadas por los distintos grupos de barrenos”, la recomendación más óptima de retardo entre taladro es de 7 ms a 8 ms cuando se tiene voladuras electrónicas y de 20 ms a 25 ms cuando por lo general pueden ser voladuras pirotécnicas, así Dick et al (1982) establecieron que “el nivel de vibraciones generado por dos cargas con un retardo de 8 o 9 milisegundos entre sí no genera un mayor nivel de vibraciones, puesto que las ondas no provocan ese efecto sumatorio y se pueden considerar disparos independientes”. En el presente trabajo se tiene una consideración de 7 ms de retardo entre taladro justamente para evitar la superposición de ondas y la cantidad de carga por retardo tiene que ver con el tipo de roca y las dimensiones del taladro como se puede ver en la siguiente tabla que es para una roca dura.

Tabla 2. Cantidad de explosivo según longitud de taladro

Carga por taladro kg	Longitud de taladro (m)
338.44	9.0
372.28	9.5
372.28	10.0
406.12	10.5
406.12	11.0
412.89	11.5
406.12	12.0
406.12	12.5
406.12	13.0
426.43	13.5
426.43	14.0
778.40	14.5

Nota. La tabla indica los kg de explosivo según la longitud de taladro.

Fuente diseño de malla de perforación Orica.

- Distancia al punto de la voladura.

Es otro de los factores que tiene alto grado de significancia para la generación de las vibraciones, como su nombre lo indica es la separación entre la fuente y el sensor sísmico, por lógica se deduce que son inversamente proporcionales a mayor distancia menor VPP, esto se debe a la atenuación de las ondas, parte de la energía se disipa por el macizo rocoso y las fracturas existentes, así también lo indica López et al (2003) “Conforme la distancia aumenta la intensidad de las vibraciones disminuye de acuerdo a una ley”, la ley se puede apreciar en la siguiente ecuación matemática

$$V \propto \frac{1}{d^b}$$

Ecuación 5

Dónde:

b: el valor de “b” según el U.S. Bureau of mines, es del orden de 1.6.

- Tiempos de retardo.

El tiempo de retardo es el intervalo temporal (tiempo) entre un taladro detonado y el siguiente que va a detonar dentro de una secuencia de voladura, se tiene que tener consideración con el tipo de voladura si es electrónica o convencional, porque ahí está la diferencia entre un tiempo nominal o el tiempo de retardo efectivo (López et al, 2003). Los retardos en el proceso unitario de la voladura de rocas son usados para asegurar que la intensidad de las vibraciones provenientes de la detonación de diferentes taladros no elabore una interferencia constructiva, generando niveles muchos mayores que de un solo taladro Dueñas (2018). Los dos autores coinciden que con una buena distribución de intervalos de tiempo entre taladros y filas se reduce el nivel de vibraciones, un buen diseño de secuencia de detonación permite distribuir la energía, disminuir la VPP y proteger las estructuras cercanas. “Es necesario un cierto tiempo de retardo entre filas para asegurar una cara libre a cada taladro, pero si el tiempo de retardo demasiado prolongado entre filas adyacentes, el efecto será contraproducente ya que ellas no se protegerán unas a otras durante la detonación” (Exsa, 2019, p. 152). Los retardos muy prolongados traen deficiencias operacionales, como fragmentación ineficiente, pilas de escombros mal formadas

- Variables geométricas de las voladuras.

Las variables geométricas tienen que ver con los parámetros de una voladura a tajo abierto, los principales se pueden apreciar en la de los cuales se definirán los que tienen mayor trascendencia en las vibraciones.



Figura. 14 Componentes de una malla de perforación.

Fuente: Tomado de Bernaola et al. (2013)

En el diseño de una malla de voladura para determinar el diámetro de perforación se tiene que considerar estos dos aspectos: la disponibilidad del equipo de perforación y la altura del banco. López et al. (2003) indica, aumentar el diámetro de perforación trae consecuencias negativas en las vibraciones, esto se debe que hay una relación matemática donde indica que la cantidad de explosivo por taladro es proporcional al cuadrado del diámetro de perforación, si no se respeta esta relación hay una probabilidad de que la carga operante aumente y por consecuencia incrementen las vibraciones, pero el diámetro no es un factor relevante porque cada unidad minera de tajo abierto tiene estandarizado sus diámetros de perforación acorde a las perforadoras que tienen a disposición, como es en el caso donde se realizó el presente estudio que el diámetro de perforación es 10 7/8, aumentar este diámetro implica cambiar toda la malla de voladura y eso se ve reflejado en costos, por tal motivo es recomendable modificar otros aspectos de la voladura y no el diámetro.

Altura de banco.

La altura de banco tiene una proporción con respecto al Burden que debe ser mayor o igual que 2, entonces $H/B \geq 2$ también conocida como la relación de rigidez, sino existe esta relación se tendrá problemas de fragmentación presentar bolonería, la rasante del piso será deficiente, y las vibraciones aumentaran. López et al (2003), como se puede apreciar en la **Tabla 3** sobre efectos de la relación de rigidez, por lo tanto debe de mantenerse una relación cercana al valor óptimo

Tabla 3. Efectos de la relación de rigidez

Efectos	Relación de rigidez (H/B)			
	1	2	3	4
Fragmentación	Mala	Regular	Buena	Excelente
Onda aérea	Mala	Regular	Buena	Excelente
Proyecciones	Mala	Regular	Buena	Excelente
Vibraciones	Mala	Regular	Buena	Excelente

Nota: Los efectos en las vibraciones están directamente proporcionales a más relación de rigidez los efectos son mejores.

Fuente: Tomado de Cánovas (2021)

Burden y espaciamiento.

El Burden es una variable geométrica de la voladura es conocido también como: piedra, bordo o línea de menor resistencia a la cara libre, Exsa (2019:170) establece un concepto sobre Burden “Es la distancia desde el pie o eje del taladro a la cara libre perpendicular más cercana. También la distancia entre filas de taladros en una malla de voladura” el Burden es el parámetro de más significancia en la voladura de rocas, todos los demás parámetros de una malla están estrechamente vinculados con el Burden y existen muchas fórmulas para encontrar su valor numérico. López et al (2018) nos indica sobre la importancia del Burden, si este es muy amplio el explosivo encontrará mayor resistencia para agrietar y desplazar la roca, está energía traerá consecuencias como aumentar el nivel de vibraciones y si el burden es reducido los gases se escaparán a una velocidad muy alta, ocasionando fly rock y ruido. En la Figura 15, se puede ver los efectos del explosivo según el burden.

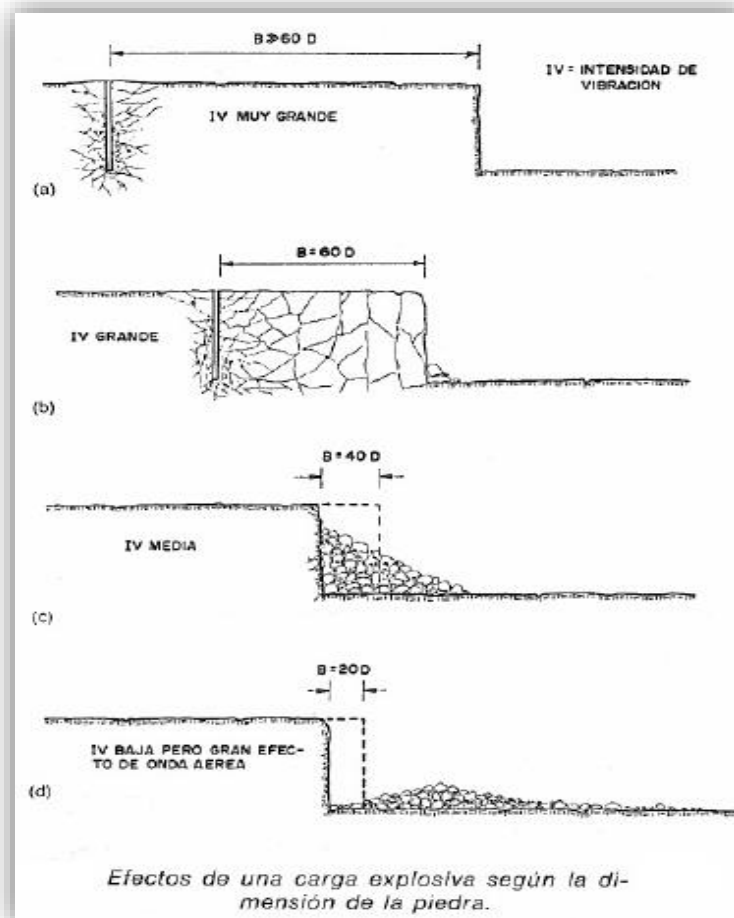


Figura 15. Efectos de una carga explosiva según el burden.

Fuente: Tomado de López et al. (2003)

Es trascendente informar que algunos autores en las investigaciones que realizaron nos indican que no se ha presentado una correlación matemática entre el burden y las vibraciones, así manifiesta Balir y Armstrong (2001) citado por Cospedal indican que “No encontraron una correlación estadística y sugirieron que cualquier relación puede deberse a las variaciones que existe en el macizo rocoso” otros autores también realizaron investigaciones y el principal problema es por la dispersión de datos que presentan cada estudio. Uysal et al (2007) realiza un trabajo de burden de 3m y 14m y encuentra una débil relación matemática entre burden y vibraciones debido a la desviación estándar de los datos.

Espaciamiento.

Es la distancia entre taladros de una misma fila que se disparan simultáneamente o con algún retardo, su dimensionamiento está en relación al burden y las vibraciones de igual manera, si se emplea una relación entre el burden y espaciado mayor que uno, se obtendrá mayor fragmentación y no se generará muchas vibraciones (López et al, 2003)

Sobreperforación. (SD)

Es importante para mantener la rasante del piso y tener los niveles adecuados, si la SD es corto quedarán lomos en la plataforma y es excesiva se producirá sobre excavación Exsa (2019), mientras que para López et al. (2003) Si la sobreperforación es mayor a la necesaria la energía del explosivo no tiene implicancia en el proceso de fractura del macizo rocoso, disminuyendo el cizallamiento y el movimiento de la roca en la base, por lo tanto un porcentaje de esta energía se pierde en forma de vibraciones, generando un incremento de costos en el carguío, perforación y dejando un piso irregular.

Taco.

En un taladro para la voladura generalmente no se llena todo el volumen quedando una parte para llenarlo con detritus producto de la voladura o con material fino como grava, esta parte es conocida como taco, Exsa (2019:167) “Normalmente el taladro no se llena en su parte superior o collar, la que se rellena con material inerte que tiene la función de retener a los gases generados durante la detonación, sólo durante fracciones de segundo, suficientes para evitar que estos gases fuguen” si la longitud del taco esta fuera del rango trae problemas en la fragmentación eficiente aumentando el P80, se aumenta el confinamiento pudiendo dar lugar a vibraciones.

2.2.1.6.2. Variables Incontrolables.

Geología local y características del macizo rocoso.

Los factores no controlables son las características geológicas y geomecánicas del macizo rocoso, en estos parámetros no se puede manipular o modificar porque son innatos desde su formación, estas formaciones geológicas tienen mucha influencia en el nivel de vibraciones, según López et al. (2003) “en los macizos rocosos homogéneos y masivos las vibraciones se propagan en todas las direcciones, pero en estructuras geológicas complejas, la propagación de las ondas puede variar con la dirección y por consiguiente presentar diferentes índices de atenuación o leyes de propagación”, como se puede apreciar el concepto de macizo

rocoso está latente en el estudio de las vibraciones, así Oyanguren y Monge (2004:1) manifiesta que “un macizo rocoso estará definido por la roca y la estructura , que a su vez contendrá planos de estratificación, fallas, juntas, pliegues y otros caracteres estructurales. Los macizos rocosos por tanto son discontinuos y pueden presentar propiedades heterogéneas y anisotrópicas”. Las vibraciones también se ven afectadas por las condiciones geológicas y estructurales del macizo rocoso, porque las fracturas, discontinuidades que pueden presentar hacen que exista una infinidad de planos de reflexión de ondas y así disturbar la propagación de las mismas. (Bernaola et al. 2013).

2.2.1.7. Medición de las Vibraciones Inducidas por Voladuras

La medición de las vibraciones producto de las voladuras constituye un componente esencial dentro del proceso de control y evaluación de los efectos dinámicos que produce la detonación de un explosivo. La importancia de la medición de las vibraciones radica en que proporciona información cuantitativa y verificable que permite analizar el comportamiento energético de las voladuras, evaluar en cumplimiento de límites normativos y lo más resaltante generar modelos empíricos y modelos con inteligencia artificial con el único fin de mejorar el proceso de voladura.

Para el monitoreo de las vibraciones producto de las voladuras es necesario contar con equipos calibrados y de última generación, determinar que patrones se tienen que medir y comparar estos resultados con algunos límites que pueden establecer diferentes instituciones tanto nacionales como internacionales, los principales equipos para medir los parámetros de vibraciones son los sismógrafos, como se puede apreciar en la Figura 16, el cual es de la marca Instantel modelo Minimate Pro 4 y tiene un rango hasta 250 mm/s, (CINTEX 2005) Establece que la instrumentación para monitoreo de vibraciones consiste en los siguientes componentes:

- **TRANSDUCTORES:** Geófonos o Acelerómetros que se instalan en forma asociada a la roca
- **SISTEMA DE CABLES:** Son los encargados de llevar la señal captada por los transductores al equipo de monitoreo.
- **EQUIPO DE ADQUISICIÓN:** el cual recibe la señal y la guarda en memoria
- **COMPUTADORA O LAPTOP:** el cual tiene incorporado el software requerido para el traspaso de la información desde el equipo Monitor, y su análisis posterior



Figura 16. Sismógrafo que mide el nivel de vibraciones.

El sismógrafo Instantel de un rango hasta 254 mm/s, entrega resultados basados en la norma DIN 45669-1. Fuente: Tomado de <https://terrasensor.com.pe/producto-geofisica-y-sismica-sismografo-para-monitoreo-de-voladuras/>

Todos estos equipos trabajan en conjunto para medir la VPP, la medida lo realizan en los 3 ejes. ISSE (2008:543) dice que “El movimiento de la partícula en la superficie es muy similar a la de un corcho sobre una superficie de agua cuando una ola pasa por debajo. El corcho en movimiento (partícula vibrante) tiene un desplazamiento, una frecuencia de velocidad y aceleración.”. El registro de vibraciones por voladuras implica diferentes parámetros que son captados y almacenados por los equipos de monitoreo, pero la velocidad pico partícula (PPV o VPP) está considerada como el parámetro más fiable y representativo para predecir el fenómeno de las vibraciones, aunque también se puede medir aceleración y frecuencia. Cospedal (2019).

2.2.1.7.1. Velocidad pico de partícula (VPP).

Las ondas sísmicas cuando se trasladan viajan o desplazan por un medio, generan un movimiento de partícula cuya velocidad varía según donde se produzca, a esto se le llama vibraciones “El movimiento de la partícula en la superficie es muy similar a la de un corcho sobre una superficie de agua cuando una ola pasa por debajo. El corcho en movimiento (partícula vibrante) tiene un desplazamiento, una frecuencia de velocidad y aceleración.” (ISSE, 2008:543), entonces la velocidad pico partícula es el valor máximo de la velocidad instantánea del movimiento del suelo o roca durante el paso de una onda, es importante recalcar que son totalmente diferentes la velocidad de onda y la VPP Guerrero (2022) nos dice que, “guardan correlación, pero la primera esta referenciada a la velocidad con la que la vibración se propaga por un medio transmisor, mientras que la segunda está determinada por las oscilaciones que experimenta una partícula, excitada por el paso de las ondas de

energía vibratoria”. La velocidad de partícula es el único parámetro más relevante y universalmente aceptado para medir la intensidad de las vibraciones, se expresa generalmente en mm/s o cm/s. (ISSE 2008), la medición de la velocidad de partícula permite establecer límites de daños en el macizo rocoso o en estructuras dónde tenga alcance las vibraciones, por ejemplo cuándo se tiene un PPV alto quiere decir que el daño al macizo rocoso es mucho mayor, puede causar fracturas no deseadas y afectar alguna estructura o talud, de acuerdo a este PPV medido el diseñador de mallas tiene que volver a reajustar su diseño para poder optimizar la energía del explosivo y reducir al máximo el PPV crítico. Conociendo cualquier parámetro de una onda se puede deducir el valor de los demás cómo la PPV o la frecuencia, pero de todos estos parámetros la que se toma en el tema de voladuras es el de la velocidad de la partícula, es con la que mejor se representa las vibraciones y los daños producidos. Córdova (2010).

2.2.1.7.2. Frecuencia de vibración.

Es el número de ciclos por segundo (Hertz) está relacionado también con el daño que se puede ocasionar a estructuras, por lo general frecuencias altas suelen amortiguarse más rápidamente y producen menos daño, mientras que frecuencias bajas generan daños en estructuras flexibles. Existen diferentes normas que establecen un límite para las frecuencias como la DIN 4150, USBM y el MINEM.

2.2.2. Modelos para Estimar las Vibraciones.

Un modelo de predicción de vibraciones constituye una herramienta muy práctica para buscar estimar la velocidad pico partícula (PPV) generada por una voladura, la predicción se realiza mediante los datos obtenidos en campo por un sismógrafo, generalmente los modelos predictivos están basados en los siguientes parámetros: en la cantidad de carga por retardo y la distancia del punto de monitoreo hacia la voladura, su principal propósito es anticipar el nivel de vibración máximo, con el fin de controlar efectos adversos en estructuras, comunidades, taludes y equipos cercano, una de las primeras predicciones lo elaboró Morris (1950) citado por López et al (2003) estableciendo la siguiente relación matemática.

$$A = K * \frac{\sqrt{Q}}{DS} \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

A: Amplitud máxima de partícula (mm)

Q: Peso de la carga del explosivo (kg)

DS: distancia desde la voladura al punto de registro (m)

K: Constante característica del lugar que tiene rangos entre 0.57 para roca competente y 3.40 para suelos frágiles.

Para que se realice un correcto modelo de predicción de vibraciones es necesario elaborar un estudio en campo cercano o en campo lejano de manera detallada, y a cada una de las metodologías se puede aplicar métodos empíricos acompañados de matemáticos y los heurísticos los cuales en muchos estudios presentan un alto grado de confianza.

2.2.2.1. Modelo de Vibraciones en Campo Cercano.

Se desarrolla un modelo de campo cercano cuando los monitoreos de las vibraciones son de distancias cortas zona inmediata al lugar dónde se inicia la detonación, donde las ondas presentan un comportamiento complejo generalmente un modelo de campo cercano hace relación al propuesto por Holmberg and Pearson desarrollado en 1970, López et al. (2003) manifiesta que “para estimar la intensidad de vibración resultante en puntos en los que las distancias a las cargas del explosivo son relativamente pequeñas comparadas con la longitud de éstas, se puede partir del método propuesto por Holmberg and Pearson” el modelo en campo cercano utiliza la siguiente ecuación para determinar la velocidad pico partícula (PPV).

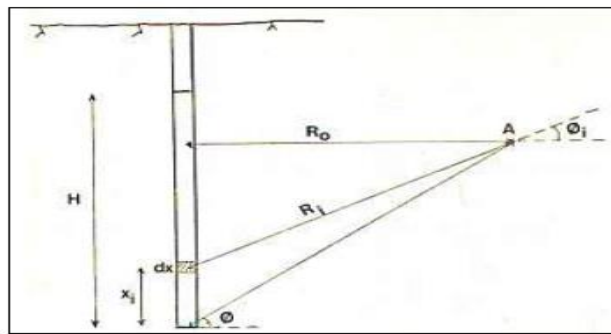


Figura 17. Modelo de campo cercano (Holmberg and Pearson).

Fuente: Holmberg et al. (1970)

$$PPV = k * \left(\frac{L}{r_0}\right) x \left[\arctan\left(\frac{H+x_s+x_o}{r_0}\right) + \arctan\left(\frac{x_o-x_s}{r_0}\right) \right]^\alpha \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

PPV: velocidad pico partícula. (mm/s)

K: Factor de amplitud (adimensional)

R0: distancia horizontal (m)

H: Longitud de carga (m)

L: densidad de carga lineal

Xs: Longitud de taco.

Xo: Profundidad del sensor.

α : Factor de atenuación. (Adimensional)

Los valores de k y α son constantes de atenuación que van variando de acuerdo al macizo rocoso, pero Holmberg and Pearson (1979) después de un estudio informa lo siguiente “para una roca en Suecia establece unos valores para estas constantes de 700 para k y 0.7 para alfa” así también Dueñas (2018:75) nos hace referencia que “la ecuación de H&P indica que el factor que tiene el mayor impacto en la vibración Peak y en el daño no es el peso de la carga por retardo como es evidente en la ecuación de Devine, sino que más bien la carga lineal, que se controla por una combinación de diámetro del hoyo y densidad de carga”.

Cuando se determina el modelo de las vibraciones por campo cercano el estudio es importante porque permite diseñar voladuras controladas evitando dañar los bancos o taludes, ajustar parámetros de carga y reducir el nivel de vibraciones pero para que el modelo sea representativo se tiene que seguir la siguiente metodología: Determinar la velocidad de onda P (V_p) mediante pruebas sísmicas, realizar el modelo de Holmberg and Pearson mediante regresión lineal, determinar el criterio de daño mediante la velocidad pico partícula crítica (VPPc) escalada al macizo rocoso y por último realizar un ábaco de diseño con cargas de explosivo para controlar los daños, como se puede apreciar en la Figura 18.

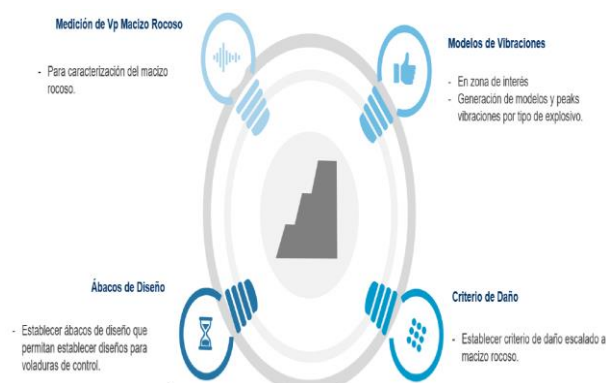


Figura 18. Proceso para determinar el daño a las paredes del talud.

Fuente: Adaptada del diseño de malla de perforación de Orica.

Cáceres (2023) describe de como en una mina se debe realizar un modelo en campo cercano, primero con la perforación de taladros dónde se colocaran los geófonos, la instalación de los equipos implica 2 geófonos triaxiales de 28 Hz empotrados con cemento,

con una separación de 6.5 metros cada uno como se puede apreciar en la Figura 19, otro taladro dónde se colocará un booster y aplicar la prueba sísmica para detectar la velocidad de onda P. Adicionalmente se realiza un arreglo para el explosivo que se quiere estudiar que por lo general son dos explosivos uno que se viene utilizando para las voladuras cotidianas y otro que posiblemente sea mejor. Así Cáceres informa de cómo debe ir distribuido los taladros que contienen los explosivos

“Los taladros que se emplean para la medición se colocaron en una disposición ortogonal con respecto a las barrenas que contienen las cargas detonantes regulares de la voladura. Para los exámenes que miden la velocidad máxima de las partículas generadas por el movimiento en el lugar cercano, se detonó un conjunto de 12 taladros con el mismo esquema de carga explosiva. Se utilizaron secuencias de detonación que tengan un retraso de 500 ms para dividir y descifrar correctamente la onda generada por cada carga, como se muestra en la figura siguiente” (p, 67 – 68)

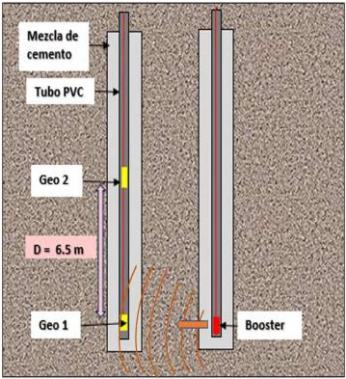


Figura 19. Distribución de los geófonos para campo cercano.

Fuente: Tomada de Cáceres (2023)

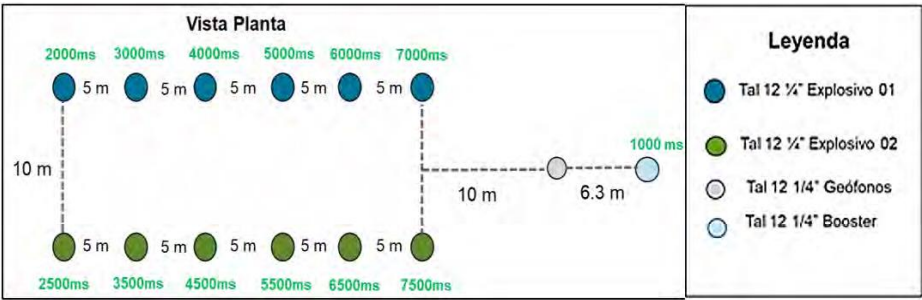


Figura 20. Distribución de taladros para campo cercano.

Fuente: de Cáceres (2023)

Luego de la detonación de los explosivos se realiza el trabajo en gabinete dónde se descarga los datos del sismógrafo como la velocidad pico de partícula (VPP) y frecuencia,

se realiza el modelo por regresión lineal por el método de mínimos cuadrados para determinar los parámetros de K y alfa que son distintos para cada tipo de roca y tipo de explosivo, con la velocidad de onda primaria (Vp) se determina la velocidad pico partícula crítica para que luego por el daño establecido por Mc Kenzie se establece cuánto daño produce el explosivo al macizo rocoso y así realizar nuevos ábacos de diseño.

2.2.2.2. Modelo De Vibración En Campo Lejano.

Se llaman modelos en campo lejano porque la distancia al frente de voladura es lo suficientemente grande para que las ondas se comporten de manera lineal, el estudio en campo lejano se realiza con más frecuencia y la distancia óptima es, cuando los puntos de monitoreo están de 3 a 5 veces la altura de la columna explosiva, este estudio se realiza generalmente para determinar daños en estructuras como casas, pozas o molinos tanto dentro del tajo como fuera del mismo. Contreras (2009). Las vibraciones en campo cercano es la que más estudios ha tenido llegando a encontrarse diferentes relaciones matemáticas propuestas por diferentes autores, pero la más importante y la que más se utiliza por su facilidad de adaptación y alto grado de confiabilidad es el modelo de DEVINE, a continuación, en la tabla se presenta algunos modelos empíricos.

Tabla 4. Modelos empíricos de vibraciones en campo lejano

AUTOR	MODELO
Langefors y Kihlström (1963)	$PPV = K \left(\frac{Q}{D^{2/3}} \right)^{\frac{b}{2}}$
Davies et al. (1964)	$PPV = K \cdot D^b \cdot Q^a$
Indian Standard (1973)	$PPV = K \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-b} e^{-\alpha D}$
Ghosh y Daemen (1983)	$PPV = K \left(\frac{D}{Q^{1/3}} \right)^{-b} e^{-\alpha D}$
Rai and Singh (2004)	$PPV = K \cdot D^{-b} \cdot Q^a \cdot e^{-\alpha D}$
Simangunsong y Wahyudi (2015)	$N_c \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-b}$
Murmu et al. (2018)	$PPV = K \left(\frac{D}{Q^{2/5}} \right)^{-b}$

Fuente: Cánovas (2021)

Durante muchas décadas diferentes autores realizan estudio de predicciones en campo lejano basada en el estudio de la velocidad pico partícula en la **Tabla 4** Se muestra algunos de los más empleados la mayoría de los autores se basan en la velocidad pico de partícula versus distancia escalada y la raíz de la carga por retardo, así es como Vásquez (2013) indica que un gran número de investigadores estudia el modelo de VPP y llegan a la conclusión que es proporcional a la cantidad de explosivo utilizado e inversamente proporcional a la distancia. Pero el que más se utiliza es el modelo de Devine, así como también lo afirma Contreras (2009), indica que el modelo más utilizado en el mundo minero es el de Devine y Duvall

2.2.2.3. Modelos Predictivos de Vibraciones.

2.2.2.3.1. Modelo de Devine.

El modelo de Devine es un modelo predictivo empírico que mejor se adapta para describir las vibraciones de una voladura (Paquera, 2021) este modelo fue desarrollado cuando los autores (Devine, Beck, Meyer, & Duvall, 1966), realizaron una investigación por el United States Bureau of Mines (USBM) para predecir las vibraciones producto de una voladura. La investigación que realizaron consistió en monitorear 39 proyectos de voladuras en una cantera a diferentes distancias y registrar sus velocidades pico partícula (VPP) en las tres direcciones, de las 39 voladuras 12 voladuras se dieron de manera instantánea sin usar retardos, 5 voladuras con retardos consecutivos y 22 con retardos múltiples, la carga total del explosivo varía desde los 3.6 kg hasta los 680 kg y la carga por retardo de 11 kg hasta los 2.095 kg. El modelo se basa en análisis estadístico con respecto a la distancia y a la carga por retardo.

Devine llega a establecer una relación matemática, que hoy en día es utilizada por casi todas las minas para control de vibraciones y base para otros modelos.

$$PPV = K * \left[\frac{D}{\sqrt{W}} \right]^{-\alpha} \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

PPV: velocidad pico partícula

D: distancia a punto de monitoreo.

W: carga operante.

K: factor de amplitud.

α : Factor de atenuación.

Los valores de k y α son las constantes de atenuación que están vinculadas al macizo rocoso y a las características del explosivo, algunos autores ya presentan valores a las constantes como Scherpenisse et al. (2000) En la Tabla 5 indica algunos valores para las constantes de (K y α), estos valores fueron obtenidos en diferentes tipos de rocas y diferentes minas del país, dónde se pueden encontrar valores de k que varían desde 99 hasta 703 (quiere decir que puede variar hasta 7 veces) y para los valores de (α) están en un rango de -1.54 y -2.49. Es importante recalcar que los valores varían en un elevado porcentaje de una mina a otra por tal sentido no se debe hacer el uso indiscriminado de estos datos porque se estaría cometiendo un error y no se analizaría las vibraciones de la manera correcta, porque cada mina presenta condiciones distintas debido al yacimiento donde se formaron los minerales y al macizo rocoso.

Tabla 5. Valores de k y α para la ecuación de Devine

FACTOR DE AMPLITUD K	FACTOR DE ATENUACIÓN (ALFA)	FACTOR DE AMPLITUD K	FACTOR DE ATENUACIÓN (ALFA)
597	-2.34	99	-2.33
500	-2.11	227	-1.60
321	-2.39	499	-2.01
495	-2.12	175	-1.63
262	-2.28	112	-1.94
284	-1.72	428	-2.49
481	-1.74	168	-1.54
299	-2.48	703	-2.21
597	-2.32	177	-2.04

Nota: Los valores son representativos para la mina donde se realizó la prueba.

Fuente. Tomado de Scherpenisse, Adamson y Díaz (2000)

El Procedimiento a seguir y no tener ningún inconveniente para realizar el modelo de predicción de vibraciones en campo lejano propuesto por el autor Devine es el siguiente:

- Diseñar la malla de perforación.
- Establecer los puntos dónde se colocará el sismógrafo para el monitoreo.
- Medir la distancia desde la voladura al punto de monitoreo (D)
- Calcular la carga por retardo. (W)
- Realizar el proceso de voladura
- Descargar la data registrada
- Con los datos registrados utilizar la fórmula de Devine y graficar su curva.
- La curva es VPP vs distancia escalada
- Mediante regresión lineal se determinan los valores de (K y α).
- Realizar ajustes a la curva para tener un R elevado y proponer el modelo.

2.2.2.4. Modelo de Predicción por Redes Neuronales.

Las redes neuronales artificiales (RNA) son algoritmos diseñados en el cerebro humano, de modo que los computadores aprendan a lidiar con problemas complejos como lo hace el ser humano, así Daza (2016) define a las RNA como una imitación de las neuronas del cerebro que están organizadas con el fin de hacer que el algoritmo sea capaz de realizar un aprendizaje complejo, extraer patrones y detectar tendencias. Las redes neuronales están conformadas por un conjunto de unidades de procesamiento, llamadas neuronas artificiales, conectadas entre sí para transmitir información, los datos de entrada atraviesan toda una red de neuronas se someten a distintas operaciones y aprendizajes y devuelven un valor de salida, Valdivia (2023).

- Estructura de una red neuronal.

En una red neuronal típica siempre está compuesta por 3 capas: Una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. Salazar (2023) indica que estas capas a su vez están compuestas de neuronas y que existen pesos que se interrelacionan entre ellos. En la Figura 21, podemos ver que la capa de entrada esta de color naranja y como su nombre lo indica son los datos que se va ingresar, la capa de celeste es la capa oculta es aquí donde la red neuronal encontrará y aprenderá patrones comunes antes de hacer una predicción, llamado entrenamiento de neuronas, se considera oculta porque los valores calculados no son mostrados y por último tenemos la capa morada que es el resultado de la red neuronal, por tanto entregará la predicción que estamos buscando.

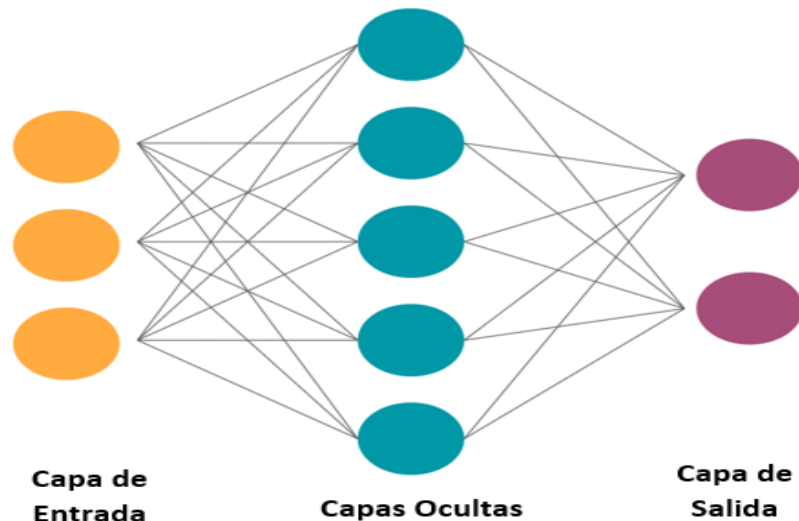


Figura 21. Estructura de una red neuronal.

Fuente Valdivia (2023)

El uso de las redes neuronales en la predicción de vibraciones permite mejorar la precisión de la predicción comparado a modelos empíricos como el modelo de Devine, esto se debe a que se utilizan más datos como el tipo de roca, la frecuencia, burden entre otros.

2.3. DEFINICIÓN DE TERMINOS.

➤ VIBRACIONES.

Representan un estado de esfuerzos (energía) y movimientos oscilatorios que se transmiten en el macizo rocoso como ondas sísmicas producto de la detonación del explosivo de los taladros de voladura. (Exsa 2019).

➤ EXPLOSIVOS.

Son una mezcla de sustancias químicas con un grado de inestabilidad, bajo ciertas condiciones de iniciación sufren una reacción exotérmica, dónde se libera una gran cantidad de gases, calor y energía.

➤ MODELO DE VIBRACIONES.

Los modelos de vibraciones son herramientas matemáticas que permite estimar el comportamiento de las vibraciones y el daño que ocasionan a la roca generada por las explosiones de un taladro. Existe dos maneras de realizar el modelo de vibraciones: en campo cercano y campo lejano todas relacionadas con encontrar la velocidad pico partícula.

➤ VELOCIDAD PICO PARTÍCULA

Es un parámetro de medida para evaluar las vibraciones generada durante la detonación de un explosivo y el efecto sobre la masa rocosa y las estructuras cercanas

su unidad de medida es (mm/s) y su principal uso es en determinar el daño al macizo rocoso.

➤ VELOCIDAD PICO PARTICULA CRÍTICA

Es el valor máximo que presenta la roca, está en función de la velocidad de onda P y el módulo de Young, a partir de la (VPPc) se puede establecer el daño real que se le puede ocasionar a la roca. Es fundamental en el estudio de vibraciones porque permite establecer el límite de seguridad para proteger diferentes estructuras.

➤ CRITERIO DE DAÑO

Es el complemento de la velocidad pico partícula crítica, dónde se puede predecir el efecto sobre la roca: intenso fracturamiento, creación de nuevas fracturas o extensión de fracturas existentes, de acuerdo al criterio de daño existen diferentes normas internacionales.

➤ CAMPO CERCANO.

Es la zona más cercana a la columna explosiva, dónde las ondas de compresión y tensión tiene una influencia directa, para predecir un modelo de vibraciones es necesario utilizar la relación matemática de Holmberg and Pearson, y utilizar geófono empotrados para medir la velocidad pico partícula, para que luego se desarrolle mediante regresión lineal un modelo de campo cercano.

➤ CROSS HOLE

Es un método geofísico que se utiliza para determina la velocidad de onda primaria que viaja por el medio dónde se realiza el estudio para luego ser medido por un sismógrafo.

➤ VELOCIDAD DE ONDA P

Son las ondas de compresión son de tipo de onda de cuerpo y se propagan a través de sólidos, líquidos y gases. El nombre ondas P hace referencia a primarias porque son las primeras ondas en llegar a un punto de monitoreo o en llegar a la superficie.

➤ EMULSIÓN.

Es un agente explosivo que se utiliza para fragmentar la roca, están compuestas por una fase oxidante y una fase combustible, estabilizadas mediante un emulsionante y sensibilizadas por el nitrito de sodio, es de fácil carguío a los taladros mediante un camión fábrica y su principal característica es su VOD y la resistencia al agua.

➤ FACTOR DE CARGA.

También conocido (FC) es una unidad de medida muy importante en la voladura de rocas, representa la cantidad de explosivo que se utiliza por una unidad de volumen. Generalmente se expresa en kg/m³ o kg/tn. Los rangos del FC para una voladura a tajo abierto varían entre 0.3 a 0.7.

➤ REDES NEUROLANES ARTIFICIALES.

Es una imitación de las hormonas del cerebro que están debidamente organizadas que tienen la facilidad de hacer que el algoritmo sea capaz de realizar un aprendizaje complejo, extraer patrones y detectar tendencias.

➤ DISTANCIA. (R).

Es el módulo o cantidad en metros desde la voladura hasta el punto de monitoreo del sismógrafo.

➤ PYTHON.

Es un lenguaje de programación muy utilizado en la actualidad de código abierto, lo que lo hace ideal para principiantes.

CAPITULO III.

MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. UBICACIÓN GEOGRAFICA.

El lugar dónde se realizó la investigación se encuentra ubicada al norte del Perú en el departamento de Cajamarca y provincia del mismo nombre, la distancia es de 45 km hacia el norte desde el centro de la ciudad y 800 km desde la ciudad de Lima, la mina en estudio se encuentra entre los 3500 y 4100 metros sobre el nivel del mar y viene explotando desde el año 1993 hasta la actualidad. El acceso hacia la zona se realiza mediante la carretera hacia Bambamarca en un desvío en el km 37, el tiempo de viaje en movilidad a 30 km/h aproximadamente es de 1.20 horas.

3.2. CLIMA Y VEGETACIÓN.

El clima en la zona de estudio es variado teniendo desde días muy lluviosos hasta días con presencia de intenso sol, en época de invierno el frío es intenso llegando hasta -3°C cayendo bastantes heladas por la noche, el invierno por lo general se da entre los meses de octubre y abril con intensas precipitaciones, granizo y tormentas eléctricas, el resto del año entre mayo y septiembre es la época seca o de verano dónde la temperatura llega a sobrepasar los 20°C con presencia de fuertes vientos con velocidades promedios de 35 km/h generalmente entre los meses de julio y agosto.

3.3. GEOLOGÍA.

3.3.1. Geología Económica.

“El depósito dónde se realiza la investigación es un yacimiento de alta sulfuración que se encuentra entre rocas piroclásticas y muchos eventos de brechas. La mineralización generalmente se encuentra asociada a los óxidos con las alteraciones de sílice masiva, sílice granular, sílice alunita y sílice clay. Las zonas de alta ley mayor a 1 g/t se encuentran vinculada a delgados cuerpos de brecha hidrotermal, controlada por las fallas y con presencia de bastantes óxidos de hierro”. Delgado (2021).

3.3.2. Alteraciones Hidrotermales.

“El ensamble de alteración típicos en este depósito es de un sistema ácido-sulfato (alta sulfuración), con una gran zona de sílice masiva en profundidad debajo de 100m, cubierto

por un nivel sílice granular que llega hasta la superficie, las alteraciones gradan hacia los bordes y superficie a un ensamble sílice alunita, sílice clay y propilítico y están más relacionadas con las unidades porfíricas andesíticas” Delgado (2021).

3.4. PROCESO DE MINADO.

El proceso de minado como en toda mina a tajo abierto lo contemplan 4 operaciones unitarias fundamentales: la perforación, la voladura, carguío y finalmente el acarreo. Como se puede ver en la Figura 22.

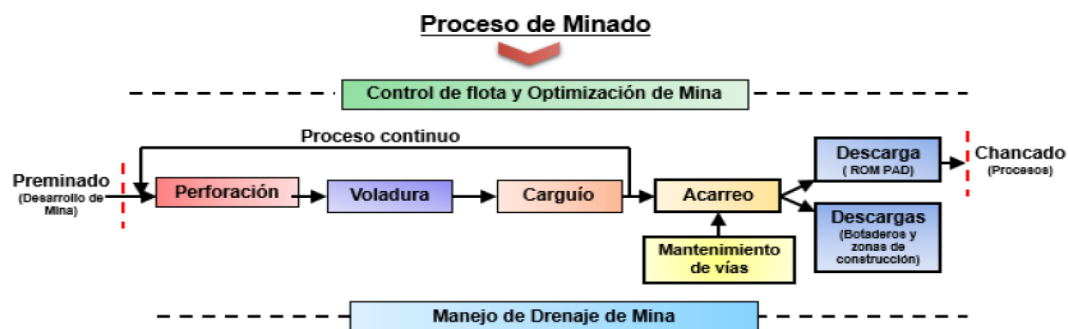


Figura 22. Proceso de minado.

Fuente: Reporte de mina

3.4.1. Perforación.

La perforación se basa en dos principios físicos que son: de percusión y rotación, el impacto de estos principios produce un astillamiento o trituración de la roca en un área que es equivalente al diámetro de la broca y la profundidad lo marca el barrenado de la perforadora. Bernaola (2013).

En la mina dónde se realizó el estudio se utiliza tres tipos de perforadoras: la perforadora Roc L8-30 el cual es una perforadora rotopercutiva, DML – Ingersoll Rand para taladros de procedimiento y la otra perforadora Pit Viper 271 las cuales perfora todo lo que es producción.



Figura 23. Perforadora Pit Viper en la zona de estudio

3.4.2. Voladura.

La voladura es un proceso unitario que consiste en vaciar explosivo en los taladros dejados por la perforación para luego detonarlos y fragmentar la roca, evitando efectos ambientales como las vibraciones, para realizar la voladura depende del tipo de roca y el tipo de explosivo que se encuentre en el mercado, para la mina donde se realiza el estudio generalmente se cuenta con dos explosivos: La emulsión y el Quantex, pero para el estudio realizado solo se utiliza el Quantex 73.

3.4.2.1. Diseño de la Malla de Perforación.

El diseño de la malla de perforación lo realiza el área de planeamiento, acorde a las condiciones de la roca, la maquinaria que se tiene a disposición y la zona dónde se va a minar pero generalmente está compuesto por 3 mallas ver Figura 24.

- Malla de precorte. Cumple la función de mitigar la energía que produce los explosivos, reducir las vibraciones y así cuidar las paredes finales del tajo, generalmente son rectos o tienen una inclinación de 75°, la fila de taladros de precorte no se carga con ningún explosivo, que a diferencia de otras minas el precorte lo cargan. Diámetros de perforación (7 7/8")
- Malla de Procedimiento. También conocida como Buffer, su misión también es de control o disminuir la energía del explosivo para, evitar el aumento de vibraciones y cuidar las paredes del talud En la mina dónde se realizó el estudio, se diseñan dos filas de procedimiento conocidas como la 700 y la 600, su diseño es distinto que los taladros de producción llevan una cámara de aire en su interior como se puede ver en la Figura 25 y Figura 26, el diámetro de perforación es de (9 7/8")
- Malla de Producción. Su función es fragmentar la roca de manera óptima reduciendo los bolones y vibraciones teniendo en consideración la salida y el secuenciamiento de la voladura, si es que se tiene que cuidar cualquier estructura la salida se realiza en dirección contraria de lo que se desea cuidar comúnmente conocido como la "patada de la voladura", si bien es cierto que, puede influir en las vibraciones, pero en la presente investigación no se toma en cuenta para el modelo debido a que a campo lejano las ondas ya han tenido una amortiguación que están en función de distancia y carga operante. Todos los monitoreos realizados se ejecutaron en la malla de producción, debido a que en esta malla se tiene la mayor carga por retardo que promedia los 380 kg, el diámetro de perforación es de (10 5/8")

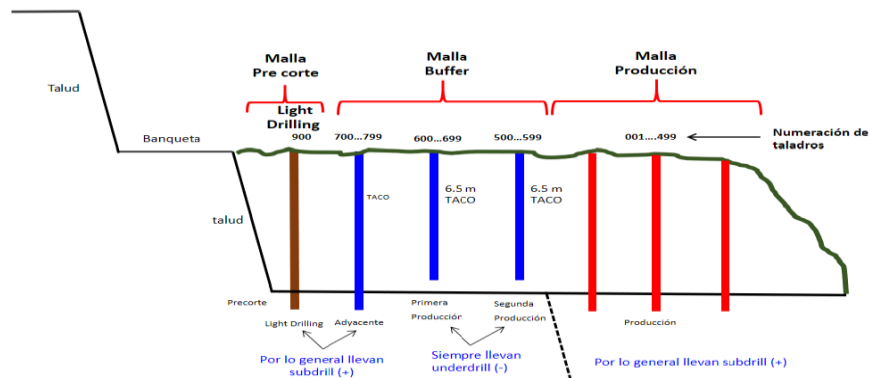


Figura 24 Diseño de la malla de perforación.
Fuente: Tomado del área de planeamiento.

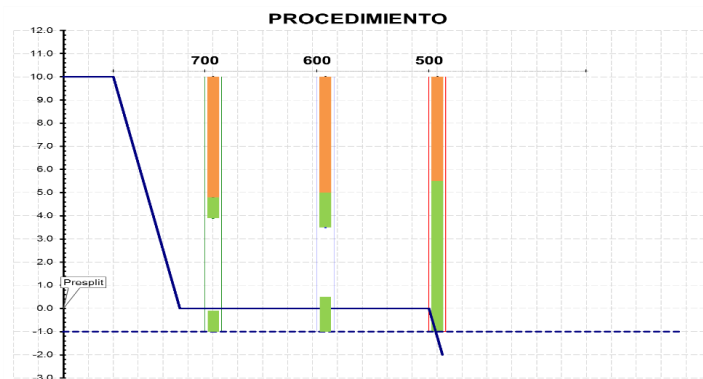


Figura 25 Taladros de procedimiento y producción
Fuente: Malla de perforación Orica

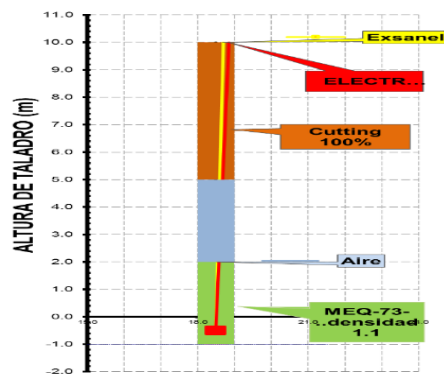


Figura 26. Taladro de procedimiento
Fuente: Malla de perforación Orica.

3.4.2.2. Diseño de Cargas de las Voladuras Monitoreadas.

Las voladuras registradas para el estudio contemplan desde el 6 de enero hasta el 29 de septiembre del 2025, el cual tienen ya un diseño establecido, según el tipo de roca que presenta la zona a minar, así, las figuras 27, 28 y 29 muestran el diseño de carga a utilizar para diferentes tipo de rocas como suave, media y dura.

Longitud Taladro (m)	Taco Final Cutting (m)	Carga Superior Final (m)	Carga Inferior Final (m)	Taco Intermedio (m) Cámara de Aire	Aire superior (m)	FP (Kg/Ton)	kg/tal	SD	Carga Inferior Inicial (m)	Taco Inicial Cutting (m)
9.0	5.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.236	265.77	1.15	3.5	5.5
9.5	5.2	0.0	4.3	0.0	0.0	0.254	285.70	1.18	3.7	5.8
10.0	5.8	0.0	4.2	0.0	0.0	0.248	279.06	1.29	3.7	6.3
10.5	5.8	0.0	4.7	0.0	0.0	0.277	312.28	1.29	4.1	6.4
11.0	5.8	0.0	5.2	0.0	0.0	0.307	345.50	1.29	4.5	6.5
11.5	5.8	0.0	5.7	0.0	0.0	0.336	378.73	1.29	5.0	6.5
12.0	5.8	2.2	3.0	1.0	0.0	0.307	345.50	1.29	2.6	8.4
12.5	5.8	2.2	3.0	1.5	0.0	0.307	345.50	1.29	2.6	8.4
13.0	5.8	2.2	3.0	2.0	0.0	0.307	345.50	1.29	2.6	8.4
13.5	5.2	0.0	6.3	2.0	0.0	0.372	418.59	1.18	5.5	8.0
14.0	5.2	0.0	6.3	2.5	0.0	0.372	418.59	1.18	5.5	8.5
14.5	3.0	0.0	11.5	0.0	0.0	0.678	764.09	0.79	10.0	4.5
15.0	3.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.708	797.32	0.79	10.4	4.6

Figura 27. Diseño de carga en roca suave.

Fuente: Diseño de malla Orica (2024)

Longitud Taladro (m)	Taco Final Cutting (m)	Carga Superior Final (m)	Carga Inferior Final (m)	Taco Intermedio (m) Cámara de Aire	Aire superior (m)	FP (Kg/Ton)	kg/tal	SD	Carga Inferior Inicial (m)	Taco Inicial Cutting (m)
9.0	4.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.296	333.46	0.97	4.3	4.7
9.5	4.5	0.0	5.0	0.0	0.0	0.296	333.46	1.06	4.3	5.2
10.0	4.6	0.0	5.4	0.0	0.0	0.320	360.14	1.07	4.7	5.3
10.5	5.1	0.0	5.4	0.0	0.0	0.320	360.14	1.16	4.7	5.8
11.0	5.6	0.0	5.4	0.0	0.0	0.320	360.14	1.25	4.7	6.3
11.5	5.7	0.0	5.8	0.0	0.0	0.343	386.81	1.27	5.0	6.5
12.0	5.6	2.4	3.0	1.0	0.0	0.320	360.14	1.25	2.6	8.4
12.5	5.6	2.4	3.0	1.5	0.0	0.320	360.14	1.25	2.6	8.4
13.0	5.6	2.4	3.0	2.0	0.0	0.320	360.14	1.25	2.6	8.4
13.5	5.2	0.0	6.3	2.0	0.0	0.373	420.16	1.18	5.5	8.0
14.0	5.2	0.0	6.3	2.5	0.0	0.373	420.16	1.18	5.5	8.5
14.5	3.0	0.0	11.5	0.0	0.0	0.681	766.96	0.79	10.0	4.5
15.0	3.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.710	800.30	0.79	10.4	4.6

Figura 28 Diseño de carga en roca media

Fuente: Imagen extraída Diseño de malla Orica (2024)

Longitud Taladro (m)	Taco Final Cutting (m)	Carga Superior Final (m)	Carga Inferior Final (m)	Taco Intermedio (m) Cámara de Aire	Aire superior (m)	FP (Kg/Ton)	kg/tal	SD	Carga Inferior Inicial (m)	Taco Inicial Cutting (m)
9.0	4.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.295	332.22	0.97	4.3	4.7
9.5	4.0	0.0	5.5	0.0	0.0	0.324	365.44	0.97	4.8	4.7
10.0	4.5	0.0	5.5	0.0	0.0	0.324	365.44	1.06	4.8	5.2
10.5	4.5	0.0	6.0	0.0	0.0	0.354	398.66	1.06	5.2	5.3
11.0	5.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.354	398.66	1.15	5.2	5.8
11.5	5.4	0.0	6.1	0.0	0.0	0.360	405.30	1.22	5.3	6.2
12.0	5.0	3.0	3.0	1.0	0.0	0.354	398.66	1.15	2.6	8.4
12.5	5.0	3.0	3.0	1.5	0.0	0.354	398.66	1.15	2.6	8.4
13.0	5.0	3.0	3.0	2.0	0.0	0.354	398.66	1.15	2.6	8.4
13.5	5.2	0.0	6.3	2.0	0.0	0.372	418.59	1.18	5.5	8.0
14.0	5.2	0.0	6.3	2.5	0.0	0.372	418.59	1.18	5.5	8.5
14.5	3.0	0.0	11.5	0.0	0.0	0.678	764.09	0.79	10.0	4.5
15.0	3.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.708	797.32	0.79	10.4	4.6

Figura 29 Diseño de carga en roca dura.

Fuente: Diseño de malla Orica (2024)

3.4.2.3. Agentes Explosivos Utilizados en el Proyecto

Los explosivos que se usan en la mina en estudio son las emulsiones dentro de ellas una emulsión al 100% y el Quantex que es una mezcla entre emulsión y nitrato de amonio.

3.4.2.3.1. MEC Emulsión.

Consisten en una fase dispersa formada por pequeñas gotas de disolución de NH_4NO_3 o de NaNO_3 en agua, que están rodeadas de una fina película de 10^{-4} mm de aceite mineral (fase continua). Se trata, por tanto, de explosivos compuestos básicamente por nitrato amónico o nitrato sódico con un contenido en agua entre el 14 y el 20 %, un 4 % aproximadamente de gasoil y menores cantidades (1 – 2 %) de otros productos.

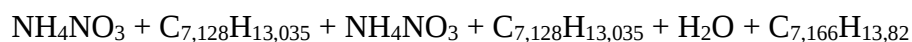
3.4.2.3.2. MEC Quantex.

El Quantex es una mezcla explosiva comercial de la línea de Exsa Figura 30, el cual es un agente explosivo que contiene 70% de emulsión, 30% de nitrato de amonio y 4% de diésel (petróleo), es vaciado por un camión fábrica directo a los taladros y se le añade un porcentaje de nitrito de sodio que le permite sensibilizarse y detonar. El nitrito de sodio también le permite disminuir su densidad que varía entre los 0.99 a 1.4 g/cm³, generalmente se estabiliza dentro de 40 minutos.

En el presente trabajo de investigación el explosivo que se utiliza para todos los datos que se tomó del sismógrafo es el Quantex 73, que se usa generalmente para rocas duras, tiene buena resistencia al agua, optimiza la fragmentación de la roca, es vaciado o bombeado mediante un camión fábrica. Su fórmula química está basada en la que está compuesta para el ANFO, es la fórmula básica para el Anfo pesado.



Un mal balanceo de oxígeno tendrá como consecuencia la presencia de gases nitrosos, para el Quantex 73 que es un HEVY ANFO se utiliza la siguiente ecuación química que puede variar de acuerdo a cada empresa de explosivos sobre todo en los componentes de los emulsificantes y en los combustibles.



Según la ecuación química para un 94.49% de nitrato de amonio en el Anfo y el 75% de nitrato de amonio en la emulsión, se tendrá un balance negativo de oxígeno de -2.64, para tener un balance positivo de oxígeno es necesario aumentar el nitrato de amonio en el Anfo y estar a 96.6% así obtener un balance de oxígeno de 2.68



Figura 30. Mezcla Explosiva Comercial Quantex 73

3.4.2.3.3. DENSIDAD DEL EXPLOSIVO.

Es importante determinar la densidad del explosivo, porque de ello dependerá gran parte de su trabajo energético, como se trata de un agente explosivo que está compuesta por nitrato de amonio y emulsión, por lo tanto, su densidad inicial es distinta a su densidad final. Según los estudios realizados en campo por el tesista la densidad inicial tienen un promedio de 1.335 g/cc y la densidad final de 1.101 g/cc, esto quiere decir que la mezcla explosiva QUANTEX sufre un fenómeno físico conocido como esponjamiento, que es el aumento del volumen inicial y esto se debe porque se le inyecta nitrito de sodio el cual proporciona la burbujas de gas de nitrógeno que generan puntos calientes y ayudan con la detonación del explosivo, generalmente se le inyecta entre el 0.05% hasta 0.25% de NaNO_2

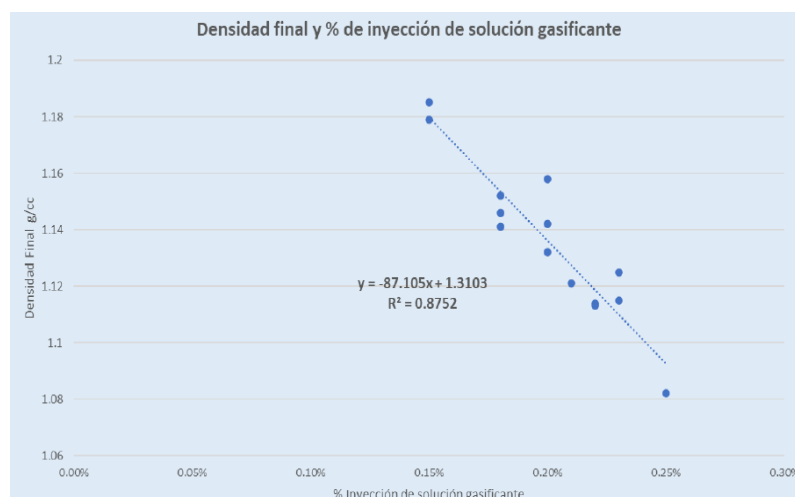


Figura 31 Gráfica de la densidad y el nitrito de sodio.

Según la gráfica de densidades con respecto a la solución gasificable para llegar a la densidad de 1.1 es necesario inyectar 0.24% de nitrito de sodio, caso contrario, si inyectamos

mucho más la densidad será menor de 1g/cc, y esto trae como consecuencia deficiencias en las voladuras como bolonería, proyección de rocas, entre otros y si le inyectamos poco nitrito de sodio tendremos problemas de vibraciones porque la densidad será alta.



Figura 32 Cálculo de la densidad del explosivo

3.4.2.4. Ejecución de la Voladura.

Para la voladura en el lugar de la investigación se sigue el siguiente proceso en el orden establecido: Verificación de la perforación de taladros que los trabajadores comúnmente lo llaman como estaqueo, colocación de mangas plásticas, primado de booster y colocación en el taladro, vaciado o bombeo de explosivo desde el camión fábrica, control de calidad, Amarre de los detonadores, vaciado de taco, verificación de detonadores, evacuación de personal y equipos de minado fuera del rango de voladura y protocolo de detonación. En las figuras 33 y 34 se describe algunas de las actividades realizadas por el personal de ORICA para el proceso de voladura.



Figura 33 Colocación de mangas plásticas



Figura 34. Vaciado de explosivo



Figura 35. Detonación del explosivo

3.4.2.5. Calidad de Gases.

La calidad de gases en la mina se divide en 6, que tiene que ver con presencia del oxígeno en las mezclas explosivas, para evitar estos gases la mezclas deben estar bien balanceadas químicamente, aunque también muchas de las veces dependen del tipo de roca a la que se expone el explosivo.

Tabla 6. Niveles de gases.

Nivel	Gases nitrosos	% malla
0	No humos	0
1	Leve humos color amarillo	<15%
2	Menor humos amarillos/anaranjado	<30%
3	Moderado humos naranjas	<50%
4	Significante humos naranjas	>50%
5	Alto humos color naranja a rojo	>70%

Fuente: Planeamiento Mina

3.4.3. Carguío.

Luego de la voladura se realiza el carguío, la empresa cuenta con palas ver **Tabla 6**, estas palas están debidamente equipadas con tecnología donde se puede ver en tiempo real (tasa de excavación, consumo de combustible, precisión de minado entre otros) además se cuenta con un sistema de gestión de flotas DISPATCH.

Tabla 7. Flota de carguío

Equipos	cantidad	Capacidad de cuchara en m3
Hitachi EX5500 Pala	2	29 – 30
Hitachi EX2500 Excavadora	4	17
Cat 994 Cargador sobre ruedas	1	20

Fuente: Planeamiento de la Mina

3.4.4. Acarreo.

El material es transportado en camiones gigantes de 240 toneladas modelo Cat 793. Figura 36 se acarrea dependiendo del material si es desmonte se irá a los depósitos y si es mineral a la pila de lixiviación, Gold mill o stock piles.



Figura 36. Acarreo de mineral con camión CAT 793

3.5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

3.5.1. Tipo de Investigación.

El presente estudio que se realiza sobre la elaboración de un modelo de vibraciones para predecir la VPP es de tipo aplicada, porque busca construir un nuevo conocimiento útil a partir de modelos matemáticos y computacionales con datos reales de una mina para solucionar un problema práctico de las voladuras que es controlar el nivel de vibraciones y reducir los daños ambientales. Tal como lo manifiesta Jiménez (1998:23) “Si el problema surge directamente de la practica social y genera resultados que pueden aplicarse (son aplicables y tienen aplicación en el ámbito donde se realizan) la investigación se considera aplicativa”

3.5.2. Nivel de Investigación.

El nivel de investigación a emplear es correlacional – explicativo. Es correlacional porque busca determinar un grado de relación que pueda existir entre las variables operativas de la voladura como cantidad de carga por retardo y la velocidad pico de partícula, otra relación es la distancia y la velocidad pico de partícula, tal como lo señala Sampieri (2014) los estudios correlacionales pretenden asociar variables mediante un patrón que se pueda predecir y tiene como finalidad establecer una relación o grado de asociación entre dos o más conceptos. Es explicativa puesto que pretende establecer las causas que originan la modificación de las vibraciones en campo lejano y porque causan daño a los taludes o estructuras de la mina, como dice Hernández (1997:74) “Los estudios explicativos van más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; están dirigidos a responder a las causas de los eventos físicos o sociales”.

3.5.3. Diseño de la Investigación.

Para definir si nuestro estudio es experimental o no experimental, nos basamos en el concepto de Martínez (2020) lo cual nos dice que “un diseño experimental es aquel en el que para obtener los resultados se ha tenido que hacer un experimento, o sea, a las personas, a las máquinas o a los procesos se les ha hecho algo; se les ha enseñado; se les ha aplicado, se les ha implementado se les ha desarrollado”

Según este concepto el estudio es de tipo no experimental, porque no se manipula deliberadamente las variables, sino que se observan analizan y establece un modelo predictivo, si es que existe daño solo se evalúa pero no se hace nada por modificar alguna variable, es de corte transversal porque los datos recolectados tienen un tiempo determinado

que es de enero hasta septiembre; coherente con lo que describe Martínez (2020) nos manifiesta que “en los estudios transversales los instrumentos para recoger la información se dan en un solo momento o en una sola etapa”

3.5.4. Tipo de Investigación Según el Tipo de Datos.

El estudio es de tipo cuantitativo, ya que mide las variables físicas producto de las voladuras con instrumentos como sismógrafos (geófonos y acelerómetros), también se aplican modelos matemáticos para predecir la PPV, todo esto genera resultados numéricos para luego ser comparados, validados estadísticamente y graficados.

3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.6.1. Población.

La población de la investigación estará representada por el total de proyecto de voladuras realizadas durante el periodo que duro el estudio (enero – septiembre de 2025), voladuras en las cuales fue posible registrar su velocidad pico partícula. (VPP)

3.6.2. Muestra.

Según Hernández et al. (2014) Define a la muestra como un “Subgrupo del universo o población del cual se recolectan los datos y que debe ser representativo de ésta” la muestra en la investigación que se está realizando consta de 148 proyectos de voladuras, con explosivo Quantex, el proceso de selección de la muestra fue no probabilística porque la elección depende de la conveniencia del autor, considerando criterios técnicos de disponibilidad, accesibilidad y calidad de registro.

3.7. TÉCNICA E INSTRUMENTOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS.

3.7.1. Técnica de Recolección de Datos.

Falcon & Herrera (2005:12) nos informa sobre la recolección de datos que es “el procedimiento o forma particular de obtener los datos o información. La aplicación de una técnica conduce a la obtención de la información, la cual debe ser resguardada mediante un instrumento de recolección de datos”

La técnica de recolección de datos para el presente trabajo de investigación es la medición instrumental, observación directa sistemática y análisis documental

3.7.2. Instrumentos de Recolección de Datos.

Sabino (1992:88) define al concepto de recolección de datos como “cualquier recurso que se resguarda el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos la información. El instrumento sintetiza en sí, toda la labor de la investigación resume los aportes del marco teórico al seleccionar datos que corresponden a los indicadores, a las variables o conceptos utilizados”.

Los instrumentos utilizados en el presente estudio son los reportes que proporciona el sismógrafo que permite registrar la VPP para cada voladura, asegurando que los datos estén estandarizados, para ello se verificara si el instrumento esta calibrado, mediante un certificado de calibración, tal como recomienda la normativa de vibración en voladuras. Adicionalmente se empleará una ficha de datos para observación directa y el reporte de diseño de voladura.

3.7.3. Software y Herramientas de Análisis.

Para el procesamiento, modelación y análisis estadístico de los datos se utilizará las siguientes herramientas.

- Microsoft Excel. Para la organización de los datos, depuración y filtrado de datos.
- Python ejecutado en la plataforma google Colab para el entrenamiento de la red neuronal, donde se empleará librerías como TensorFlow/keras.
- Software del sismógrafo Instantel para la descarga y visualización de los datos monitoreados.
- SPSS para en análisis de correlación

3.8. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.

Para elaborar todo el estudio de manera metodológica se realiza el paso a paso de cómo se ejecutó la investigación, para la cual se divide en 4 fases o etapas: recolección de datos, procesamiento, modelación y evaluación de modelos empíricos.

3.8.1. Recolección y Depuración de Datos.

Los datos son recolectados de las voladuras ejecutadas en la mina dónde se realizó el estudio, los datos se obtienen del sismógrafo instalado en campo lejano en lugares estratégicos: mirador bicentenario, poza Yeni, Cabana, mirador antenas.

Actividades que se realizaron:

- Recolección de la velocidad pico partícula (VPP) por cada evento.

- Obtención de los parámetros operativos como: cantidad de carga, cantidad de taladros, tipo de explosivo, distancia al punto de monitoreo entre otros, los datos se obtienen de la asistencia técnica de ORICA.
- Identificación del tipo de roca predominante en el área de voladura.
- Depuración de los datos, eliminando registro inconsistente.

3.8.2. Desarrollo de los Modelos Empíricos.

Luego que se obtienen los datos de los sismógrafos y depurados, se procede a realizar el modelo de Devine y un modelo en función del burden.

Pasos que seguir para la modelación de DEVINE.

- Una de las opciones es convertirlo a escala logarítmica con el fin de que se encuentren los datos más lineales.
- Aplicación de regresión polinómica a los datos depurados.
- Determinar los coeficientes k y σ .
- Obtención de la ecuación del modelo empírico.
- Validación de la ecuación mediante el coeficiente de determinación R^2 .

Pasos a seguir para la modelación en función del burden.

- Depuración de datos.
- Aplicación de Regresión Lineal.
- Obtención de la ecuación del modelo.
- Validación mediante el coeficiente de determinación R^2

3.8.3. Desarrollo del Modelo con Redes Neuronales.

Con la intención de mejorar la capacidad de predicción se optó por un modelo de redes neuronales artificiales (RNA), para el cual se utilizará la programación en Python con la colaboración de GoogleColab, hay que precisar que con el GoogleColab ya se encuentra una librería que se puede aplicar las redes neuronales, el autor solamente entrenará a las neuronas con los parámetros de una voladura como distancia (R) y cantidad de carga por retardo (W) y otras como tipo de roca, durante el entrenamiento la red compara los valores que predice con los reales medidos en campo luego ajusta los pesos para reducir el error, este proceso se repite hasta que la red aprende la relación entre las variables.

La base de datos para las redes neuronales se prepara de la siguiente manera: 70% para el entrenamiento, 15 % para validación y el otro 15% restante para la prueba. La arquitectura será una básica: con dos capas de entrada (carga por retardo, distancia), las capas ocultas serán de 2 o 3, con un rango aproximado de 8 y 16 neuronas por capa y por última una capa de salida dónde estará la VPP.

3.8.4. Parámetros que tienen Influencia en el Modelo.

Los parámetros que tienen mayor influencia están determinado por el grado de correlación que presentan las variables, por tal motivo se aplica la estadística descriptiva e inferencial, para determinar la correlación que existe entre las variables independientes y de dependientes: se determina la relación directa o inversa entre: Distancia y VPP; Cantidad de Carga y VPP; Distancia escalada y VPP; Burden y VPP, espaciamiento y VPP; densidad y VPP.

3.8.5. Comparación de Modelos.

Para la comparación de modelos a los datos del grupo de prueba se le aplicará parámetros de estadística descriptiva como:

- Coeficiente de determinación (R^2). Mide el grado de ajustes del modelo con los datos, cuando está más cerca de 1, el modelo es más representativo.
- Error cuadrático medio. (RMSE) Evalúa el error entre valores reales y estimados.
- Error absoluto Medio (MAE). Mide el error promedio entre valores reales y predicciones.

Con estos parámetros se determina cuál de los modelos es el más apropiado para la predicción de las vibraciones.

CAPITULO IV.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

4.1. PREDICCIÓN DE LAS VIBRACIONES

Para la predicción de vibraciones se utilizan dos modelos, el modelo clásico de Devine y el modelo de Redes Neuronales Artificiales. Para los dos modelos mencionados es necesario el acopio de la información que proporciona el sismógrafo, los modelos están basados en las principales variables que influyen en la determinación de la VPP como la distancia escalar cuyos componentes principales son: la distancia hacia el punto de monitoreo y la cantidad de carga por retardo. Adicional se generó un modelo en función a burden pero la correlación de esta variable con la VPP no existe y la predicción del modelo no es buena como se puede apreciar en los puntos más adelante.

4.1.1. Datos de las voladuras.

Para generar un buen modelo de vibraciones es necesario contemplar los principales parámetros de la malla de perforación, explosivo que se utiliza y lugar dónde se recolecta los datos.

- Lugar de Monitoreo: Campo lejano (Poza Yeny)
- Tipo de Explosivo: Quantex 73 (70% emulsión y 30% ANFO)
- Densidad del explosivo: 1.3 g/cm³ +/- 5% depende de la cantidad de nitrito de sodio.
- Factor de Potencia (FP): para taladros de 11 m en roca dura 0.354 kg/ton y para roca media 0.32 kg/ton.
- Diámetro crítico: 4.5 pulgadas
- VOD: 4 000 m/s a 6 000 m/s
- Iniciador: Booster de 1 libra para roca media y Booster de 2 libras para roca dura
- Altura de taladro: 11 metros.
- Sobre perforación: 1 metro.
- Taco Final: 5.6 metros para roca media y 5 metros para roca dura
- Carga por taladro: 360.14 kg para roca media y 398.66 kg para roca dura.
- Burden x espaciamiento: 6 x 6; 6.50 x 7.50; 6.80 x 7.80; 7 x 8 y 8 x 9.20
- Tipo de roca: Roca media y Roca dura.

- Malla de voladura: los datos se registraron la malla de producción.
- Metros Cúbicos por Taladro: $B \times E \times H = 7 \times 8 \times 10 = 560 \text{ m}^3$
- Tipo de Sismógrafo: Instantel Minimate Plus BE21139

4.1.2. Monitoreo de las Vibraciones en Campo Lejano.

El monitoreo de las vibraciones se realizó en campo lejano a orillas de la poza Yeny (el cual es una poza de acumulación de aguas de lluvia), se escogió este lugar porque es una estructura a la cual se desea proteger y también por el acceso que se tiene a la zona, para realizar la medición de las vibraciones el sismógrafo se instaló en una superficie rígida y estable con dirección a la voladura, garantizando el perfecto acoplamiento del geófono, los modelos a utilizar son 2: un sismógrafo minimate plus con serie BE21139 y un sismógrafo minimate plus 8 con serie BE17613, ambos instrumentos están debidamente calibrados en el año presente el 14/02/2025 y el 09/07/2025 respectivamente, como se puede verificar en el anexo N° 03 dónde se presenta el certificado de calibración, algunas especificaciones de los sismógrafos son las siguientes, tienen un rango de monitoreo hasta de 300 mm/s, una precisión de $\pm 0.5\%$ o 0.5 mm/s, su rango de frecuencia se encuentra entre 2 a 250 Hz. Para la medición de las vibraciones se debe realizar según el PETS (procedimiento escrito de trabajo seguro) establecido por la empresa para evitar errores en el registro de los datos y accidentes de trabajo no cumplir con este procedimiento invalida la toma de datos, los pasos a seguir se contemplan a continuación:

- El personal responsable de esta tarea debe tener radio comunicaciones óptimo, en uso y frecuencia establecida durante toda su labor en mina
- Inspección de todos los equipos a utilizar antes de iniciar la tarea, deben estar cargados energéticamente, la memoria debe tener suficiente espacio para almacenar datos registrados.
- Trasladar todos los equipos y herramientas necesarios para la tarea hasta los puntos de monitoreo de vibraciones.
- El área de Geotecnia de la empresa mandante puede sugerir los puntos y distancias a evaluar, llegado el personal de asistencia técnica a la zona, evalúa peligros y demás riesgos, según el caso, puede ubicar los equipos en ese punto o determinar otra zona segura.

- Se coloca al geófono sobre sus tres púas para anclarlo a la superficie (opcional), o se entierra el geófono a una distancia de 10cm aproximadamente. Direccionando la flecha del geófono hacia el disparo.
- Sobre el geófono ya anclado y/o enterrado se le coloca un peso de 2 kg aproximadamente (saco con arena).
- Conectar el geófono al monitor del equipo; se programa el equipo con los parámetros de grabación solicitados y/o dependiendo del tipo de registro a obtener.
- Encender el equipo para registros de vibraciones.
- Colocar la caja metálica de protección, sobre el equipo de vibraciones, verificar que no haya contacto interno entre el equipo y la caja metálica protectora. Delimita el área con conos y cinta, comunicar instalación de equipo y salida de la zona a supervisor de voladura ENAEX, evacuar el área.
- Estando fuera de la zona, comunicar a supervisor de voladura su ubicación final para dar inicio a la detonación del explosivo.



Figura 37 Instalación del geófono según el estándar establecido.

Tabla 8. Datos de campo para generación de los modelos.

N° Datos	W (kg)	D (m)	VPP (mm/s)	SD	log VPP	(log VPP)^2	Log SD	(Log SD)^2	Log(VPP)* Log(SD)
1	393	512	6.36	25.826	0.803	0.645	1.412	1.994	1.134
2	395	824	4.98	41.470	0.697	0.486	1.618	2.617	1.128
3	394	833	4.24	41.954	0.627	0.393	1.623	2.633	1.018
4	399	894	3.39	44.733	0.530	0.281	1.651	2.725	0.875
5	381	736	4.39	37.714	0.642	0.413	1.576	2.485	1.013
6	401	751	5.51	37.522	0.741	0.549	1.574	2.478	1.167
7	381	799	5.73	40.942	0.758	0.575	1.612	2.599	1.222
8	401	930	4.28	46.448	0.631	0.399	1.667	2.779	1.053
9	401	643	5.39	32.114	0.732	0.535	1.507	2.270	1.102
10	401	629	5.85	31.426	0.767	0.589	1.497	2.242	1.149
11	401	928	4.00	46.331	0.602	0.362	1.666	2.775	1.003
12	401	752	2.53	37.544	0.403	0.163	1.575	2.479	0.635
13	401	698	5.42	34.848	0.734	0.539	1.542	2.378	1.132
14	401	895	1.40	44.717	0.146	0.021	1.650	2.724	0.241
15	402	813	4.47	40.559	0.650	0.423	1.608	2.586	1.046
16	401	746	3.96	37.272	0.598	0.357	1.571	2.469	0.939
17	405	831	5.30	41.303	0.724	0.525	1.616	2.611	1.170
18	405	792	2.24	39.365	0.350	0.123	1.595	2.544	0.559
19	405	704	2.26	34.991	0.354	0.125	1.544	2.384	0.547
20	384	390	12.8	19.895	1.107	1.226	1.299	1.687	1.438
21	401	779	1.78	38.892	0.250	0.063	1.590	2.528	0.398
22	404	824	3.98	40.971	0.600	0.360	1.612	2.600	0.967
23	404	552	3.98	27.446	0.600	0.360	1.438	2.069	0.863
24	405	800	1.98	39.733	0.297	0.088	1.599	2.557	0.474
25	407	302	22.60	14.972	1.354	1.834	1.175	1.381	1.591
26	405	315	13.70	15.645	1.137	1.292	1.194	1.427	1.358
27	405	784	3.99	38.939	0.601	0.361	1.590	2.529	0.956
28	405	853	2.39	42.366	0.378	0.143	1.627	2.647	0.616
29	405	824	1.87	40.925	0.272	0.074	1.612	2.599	0.438
30	405	797	3.59	39.584	0.555	0.308	1.598	2.552	0.887
31	405	789	2.96	39.187	0.471	0.222	1.593	2.538	0.751
32	407	723	4.44	35.843	0.647	0.419	1.554	2.416	1.006
33	407	260	19.80	12.890	1.297	1.681	1.110	1.233	1.440
34	405	541	3.75	26.889	0.574	0.330	1.430	2.044	0.821
35	405	782	4.37	38.868	0.640	0.410	1.590	2.527	1.018
36	405	734	4.35	36.455	0.638	0.408	1.562	2.439	0.997
37	405	814	4.25	40.429	0.638	0.408	1.607	2.581	1.026
38	407	850	2.80	42.139	0.447	0.200	1.625	2.640	0.726
39	407	836	2.02	41.445	0.305	0.093	1.617	2.616	0.494
40	385	890	3.79	45.335	0.579	0.335	1.656	2.744	0.958
41	386	862	1.50	43.892	0.176	0.031	1.642	2.697	0.289
42	385	523	4.71	26.670	0.673	0.453	1.426	2.034	0.960
43	385	621	4.71	31.643	0.673	0.453	1.500	2.251	1.010

N° Datos	W (kg)	D (m)	VPP (mm/s)	SD	log VPP	(log VPP)^2	Log SD	(Log SD)^2	Log(VPP)* Log(SD)
44	405	682	5.54	33.898	0.744	0.553	1.530	2.341	1.138
45	405	613	5.54	30.468	0.744	0.553	1.484	2.202	1.103
46	371	655	3.38	34.003	0.529	0.280	1.532	2.346	0.810
47	385	887	3.92	45.232	0.593	0.352	1.655	2.741	0.982
48	385	684	4.07	34.880	0.610	0.372	1.543	2.380	0.940
49	385	684	5.65	34.880	0.752	0.566	1.543	2.380	1.160
50	385	693	3.65	35.339	0.562	0.316	1.548	2.397	0.871
51	405	480	8.71	23.858	0.940	0.884	1.378	1.898	1.295
52	405	554	3.15	27.536	0.498	0.248	1.440	2.073	0.718
53	385	904	3.61	46.099	0.558	0.311	1.664	2.768	0.928
54	418	318	12.50	15.549	1.097	1.203	1.192	1.420	1.307
55	405	748	5.55	37.164	0.744	0.554	1.570	2.465	1.169
56	405	844	2.23	41.934	0.348	0.121	1.623	2.633	0.565
57	385	853	4.27	43.482	0.630	0.397	1.638	2.684	1.033
58	383	400	8.17	20.451	0.912	0.832	1.311	1.718	1.196
59	403	491	8.17	24.468	0.912	0.832	1.389	1.928	1.267
60	383	946	1.20	48.312	0.079	0.006	1.684	2.836	0.133
61	336	952	1.27	51.930	0.104	0.011	1.715	2.943	0.178
62	384	802	4.78	40.928	0.679	0.462	1.612	2.599	1.095
63	386	860	0.80	43.791	-0.095	0.009	1.641	2.694	-0.156
64	386	562	5.88	28.617	0.769	0.592	1.457	2.122	1.121
65	383	687	3.54	35.098	0.549	0.301	1.545	2.388	0.848
66	386	910	1.00	46.336	0.000	0.000	1.666	2.775	0.000
67	343	868	1.80	46.864	0.255	0.065	1.671	2.792	0.426
68	383	741	2.35	37.857	0.371	0.138	1.578	2.491	0.586
69	370	700	2.35	36.407	0.371	0.138	1.561	2.437	0.579
70	383	403	7.72	20.589	0.888	0.788	1.314	1.726	1.166
71	371	469	7.72	24.365	0.888	0.788	1.387	1.923	1.231
72	370	859	3.14	44.676	0.497	0.247	1.650	2.723	0.820
73	370	848	4.04	44.104	0.606	0.368	1.644	2.704	0.997
74	370	658	5.42	34.222	0.734	0.539	1.534	2.354	1.126
75	371	678	5.42	35.223	0.734	0.539	1.547	2.393	1.135
76	336	360	9.43	19.637	0.975	0.950	1.293	1.672	1.260
77	371	589	3.61	30.600	0.558	0.311	1.486	2.207	0.828
78	303	522	3.58	30.003	0.554	0.307	1.477	2.182	0.818
79	370	619	3.95	32.182	0.597	0.356	1.508	2.273	0.899
80	336	833	4.10	45.438	0.613	0.376	1.657	2.747	1.016
81	390	586	3.80	29.668	0.580	0.336	1.472	2.168	0.854
82	370	576	4.51	29.946	0.654	0.428	1.476	2.180	0.966
83	382	450	8.52	23.033	0.930	0.866	1.362	1.856	1.268
84	357	629	3.53	33.313	0.548	0.300	1.523	2.318	0.834
85	381	605	5.79	30.989	0.763	0.582	1.491	2.224	1.137
86	368	544	4.98	28.367	0.697	0.486	1.453	2.111	1.013
87	388	650	3.46	33.006	0.539	0.291	1.519	2.306	0.819

N° Datos	W (kg)	D (m)	VPP (mm/s)	SD	log VPP	(log VPP)^2	Log SD	(Log SD)^2	Log(VPP)* Log(SD)
88	375	621	4.06	32.068	0.609	0.370	1.506	2.268	0.916
89	374	757	3.06	39.120	0.486	0.236	1.592	2.536	0.773
90	374	772	5.04	39.895	0.702	0.493	1.601	2.563	1.125
91	374	857	1.67	44.288	0.223	0.050	1.646	2.710	0.367
92	381	756	2.49	38.724	0.396	0.157	1.588	2.522	0.629
93	382	740	2.40	37.876	0.380	0.145	1.578	2.491	0.600
94	389	205	31.90	10.394	1.504	2.261	1.017	1.034	1.529
95	388	715	2.74	36.280	0.438	0.192	1.560	2.433	0.683
96	247	821	1.68	52.196	0.225	0.051	1.718	2.950	0.387
97	388	719	4.77	36.483	0.679	0.460	1.562	2.440	1.060
98	355	656	4.73	34.821	0.675	0.455	1.542	2.377	1.041
99	355	691	4.63	36.641	0.675	0.455	1.564	2.446	1.055
100	388	746	3.13	37.853	0.496	0.246	1.578	2.490	0.782
101	381	600	4.11	30.733	0.614	0.377	1.488	2.213	0.913
102	387	824	3.71	41.873	0.569	0.324	1.622	2.631	0.923
103	382	614	5.78	31.427	0.762	0.581	1.497	2.242	1.141
104	389	543	4.16	27.532	0.619	0.383	1.440	2.073	0.891
105	388	868	2.15	44.043	0.332	0.111	1.644	2.702	0.546
106	389	735	2.67	37.267	0.427	0.182	1.571	2.469	0.670
107	388	613	5.28	31.104	0.723	0.522	1.493	2.229	1.079
108	388	711	4.94	36.077	0.694	0.481	1.557	2.425	1.080
109	389	811	2.90	41.120	0.462	0.214	1.614	2.605	0.746
110	369	550	5.40	28.637	0.732	0.536	1.457	2.123	1.067
111	382	708	2.48	36.238	0.394	0.156	1.559	2.431	0.615
112	388	802	1.94	40.694	0.288	0.083	1.610	2.591	0.463
113	388	774	3.28	39.303	0.516	0.266	1.594	2.542	0.823
114	388	661	3.48	33.540	0.516	0.266	1.526	2.327	0.787
115	368	920	1.47	47.974	0.167	0.028	1.681	2.826	0.281
116	388	551	4.51	27.979	0.654	0.428	1.447	2.093	0.946
117	402	664	3.50	33.101	0.544	0.296	1.520	2.310	0.827
118	368	585	5.01	30.505	0.700	0.490	1.484	2.203	1.039
119	389	687	4.55	34.833	0.658	0.433	1.542	2.378	1.015
120	354	632	4.55	33.572	0.658	0.433	1.526	2.329	1.004
121	382	628	4.70	32.120	0.672	0.452	1.507	2.270	1.013
122	382	725	2.96	37.081	0.471	0.222	1.569	2.462	0.740
123	354	530	6.67	28.154	0.824	0.679	1.450	2.101	1.195
124	381	648	4.97	33.180	0.696	0.485	1.521	2.313	1.059
125	388	803	3.06	40.760	0.486	0.236	1.610	2.593	0.782
126	368	741	3.71	38.615	0.569	0.324	1.587	2.518	0.903
127	348	776	2.90	41.600	0.462	0.214	1.619	2.621	0.749
128	388	819	4.42	41.572	0.645	0.417	1.619	2.621	1.045
129	368	691	5.36	36.032	0.729	0.532	1.557	2.423	1.135
130	368	661	5.04	34.455	0.702	0.493	1.537	2.363	1.080
131	274	625	5.14	37.733	0.702	0.493	1.577	2.486	1.108

N° Datos	W (kg)	D (m)	VPP (mm/s)	SD	log VPP	(log VPP)^2	Log SD	(Log SD)^2	Log(VPP)* Log(SD)
132	368	796	2.31	41.492	0.364	0.132	1.618	2.618	0.588
133	368	642	5.68	33.477	0.754	0.569	1.525	2.325	1.150
134	368	810	1.90	42.238	0.279	0.078	1.626	2.643	0.453
135	368	748	3.67	39.005	0.565	0.319	1.591	2.532	0.898
136	355	613	3.67	32.550	0.565	0.319	1.513	2.288	0.854
137	355	637	5.41	33.825	0.733	0.538	1.529	2.339	1.121
138	368	702	2.69	36.592	0.430	0.185	1.563	2.444	0.672
139	381	767	2.66	39.273	0.425	0.181	1.594	2.541	0.677
140	355	550	3.08	29.205	0.489	0.239	1.465	2.148	0.716
141	368	674	4.11	35.133	0.614	0.377	1.546	2.389	0.949
142	368	940	0.68	49.017	-0.165	0.027	1.690	2.857	-0.279
143	381	554	4.80	28.377	0.681	0.464	1.453	2.111	0.990
144	328	936	0.54	51.710	-0.268	0.072	1.714	2.936	-0.460
145	388	723	2.48	36.713	0.394	0.156	1.565	2.449	0.617
146	388	647	4.33	32.854	0.626	0.392	1.517	2.300	0.950
147	388	768	4.23	38.998	0.626	0.392	1.591	2.531	0.997
148	388	626	3.95	31.788	0.597	0.356	1.502	2.257	0.896
Sumatorias:					86.197	59.506	227.992	353.105	129.495
N=148									

Nota: Los datos de VPP son obtenidos por el Sismógrafo en la poza Yeny, los demás datos desde la columna 6 son cálculos para la regresión por mínimos cuadrados.

4.1.3. Modelo Predictivo de las Vibraciones en Campo Lejano.

Para realizar el modelo predictivo se desarrollarán de dos maneras con el método de Devine y con las Redes Neuronales Artificiales haciendo uso de los datos de la **Tabla 8**.

4.1.3.1. Modelo Predictivo de Devine.

Este modelo predictivo se basa en la relación matemática (Ecuación N° 08) propuesta por Devine y Duvall.

$$VPP = k \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-\alpha}$$

Dónde:

PPV: velocidad pico partícula

D: distancia a punto de monitoreo.

W: carga operante.

K: factor de amplitud.

α : Factor de atenuación.

Esta ecuación lo expresamos de la siguiente manera, en función de SD que viene hacer la distancia escalada.

$$VPP = k (SD)^{-\alpha} \quad \text{Ecuación 9}$$

Como se puede apreciar la ecuación de Devine es de tipo exponencial, por lo que se tiene que transformar a una lineal para realizar mínimos cuadrados, entonces la ecuación 09 quedará de la siguiente manera. Para que la expresión se convierta en una ecuación lineal es necesario agregarle logaritmo tanto al primer miembro como al segundo.

$$\log(VPP) = \log(k (SD)^{-\alpha}) \quad \text{Ecuación 10}$$

Se aplica las propiedades de los logaritmos para despejar la ecuación 10.

$$\log(VPP) = \log(k) + \alpha \log(SD) \quad \text{Ecuación 11}$$

Como se puede observar la ecuación 11, ahora se convirtió a una ecuación tipo lineal y por consiguiente aplicar una regresión lineal por mínimos cuadrados, para lo cual se recurren las siguientes ecuaciones de métodos numéricos.

$$\alpha = \frac{n \sum \log VPP \cdot \log SD - \sum \log(VPP) \cdot \sum \log(SD)}{n \sum \log(SD)^2 - (\sum \log(SD))^2} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$k = 10^{\frac{\sum \log(VPP)}{n} - \alpha \frac{\sum \log(SD)}{n}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Para determinar el grado de correlación se utilizará la siguiente relación matemática.

$$r^2 = \frac{(\sum \log VPP \cdot \log(SD) - \frac{[\sum \log(VPP) \cdot \sum \log(SD)]^2}{n})^2}{\left[\sum \log(SD)^2 - \frac{(\sum \log(SD))^2}{n} \right] \left[\sum \log(VPP)^2 - \frac{(\sum \log(VPP))^2}{n} \right]} \quad \text{Ecuación 14}$$

En la **Tabla 8** se puede identificar los datos y cálculos que se realiza, para determinar la regresión lineal y posterior predicción de las vibraciones. La regresión lineal examina la relación entre dos variables manteniéndolo a una constante.

Luego de obtener los datos, identificaremos la relación entre la variable SD y la velocidad pico de partícula, mediante regresión lineal por mínimos cuadrados aplicando las ecuaciones 12, 13 y 14.

Cálculo de la constante de atenuación alfa.

$$\alpha = \frac{n \sum \log VPP \cdot \log SD - \sum \log(VPP) \cdot \sum \log(SD)}{n \sum \log(SD)^2 - (\sum \log(SD))^2} = \frac{148 \cdot 129.495 - 227.992 \cdot 86.197}{148 \cdot 353.105 - 227.992^2} = -1.743$$

Cálculo de la constante de atenuación K.

$$k = 10^{\frac{\sum \log(VPP)}{n} - \frac{\alpha \cdot \sum \log(SD)}{n}} = 10^{\frac{86.197}{148} - \frac{-1.743 \cdot 227.992}{148}} = 1849.8$$

Estos resultados de las variables se reemplazan en las ecuaciones 8 y 9, quedando de la siguiente manera. La ecuación N° 15 estará en función a la distancia escalada y la ecuación N° 16 estará en función de la distancia y la raíz cuadrada de la carga por retardo.

$$VPP = 1849.8 (SD)^{-1.743} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$VPP = 1849.8 \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.743} \quad \text{Ecuación 16}$$

La ecuación 16 es el modelo predictivo de vibraciones mediante modelos numéricos matemáticos, la cual permite predecir la cantidad de vibraciones que se generará para diferentes distancias y cantidad de carga, así poder manipular el diseño de carga según el caso lo amerite, respetando las normas internacionales y nacionales. Para analizar qué tan representativa es la predicción realizada por el modelo de Devine de la ecuación N° 16 de los datos mostrados es necesario encontrar el coeficiente de determinación (R^2) el cuál indicará el porcentaje de varianza de la variable dependiente que es predecible a partir de las variables independientes y así poder contrastar nuestra hipótesis, el R^2 tiene un rango entre 0 y 1 o expresado en porcentaje es de (0% -100%), en el método de mínimos cuadrados, si el resultado de R^2 se acerca a 1 el modelo calculado no explica ninguna de la variabilidad en los datos y si en el modelo el R^2 es 1 significa que explica toda la variabilidad. Para calcular el coeficiente de determinación existen muchas modalidades, pero la que utilizaremos para el presente trabajo es el de la ecuación N° 14.

$$R^2 = \frac{(\sum \log VPP \cdot \log(SD) - \frac{[\sum \log(VPP) \cdot \sum \log(SD)]}{n})^2}{\left[\sum \log(SD)^2 - \frac{(\sum \log(SD))^2}{n} \right] \left[\sum \log(VPP)^2 - \frac{(\sum \log(VPP))^2}{n} \right]}$$

$$R^2 = \frac{(129.495 - \frac{(227.992 \times 86.197)}{148})^2}{\left[353.105 - \frac{(227.992)^2}{148} \right] \left[59.506 - \frac{(86.197^2)}{148} \right]} = 0.6163$$

Como se puede apreciar el coeficiente de determinación es de 0.6163 quiere decir que el 61% del modelo se debe a las variables operativas como la distancia y la cantidad de carga. Para un mejor entendimiento de los valores encontrados se grafica en el programa computacional Excel, el modelo de Devine para tener un mejor panorama del comportamiento de la curva, la función y el coeficiente de determinación, la gráfica

representa todos los datos tomados en la tabla 13, para un agente explosivo de tipo Quantex con una densidad promedio de 1.1 g/cmc. Ver gráfico N° 38

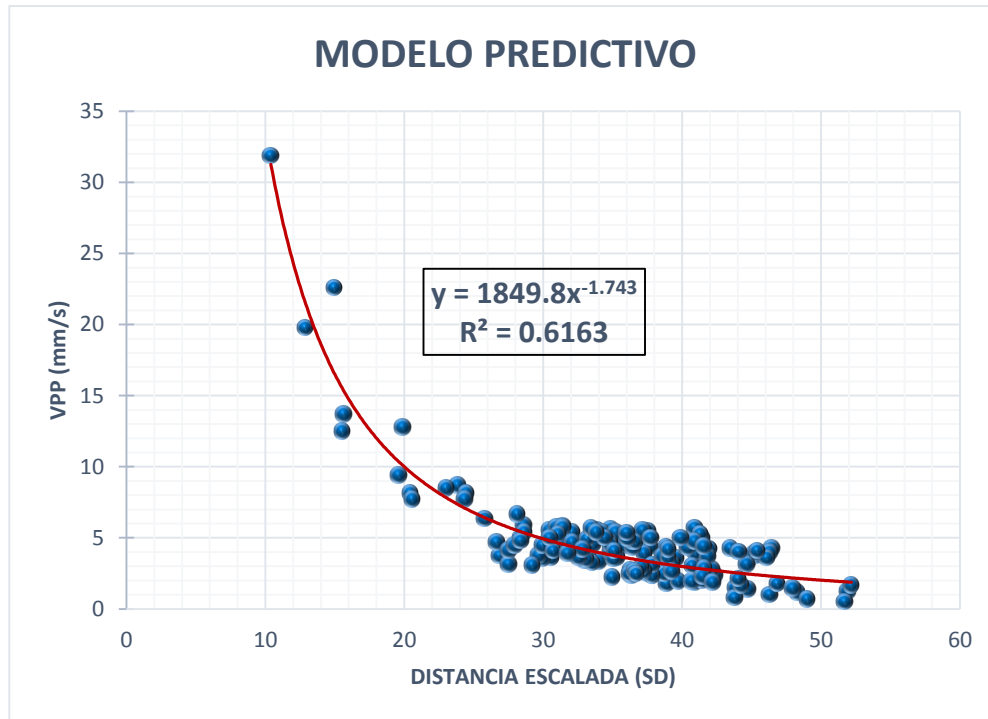


Figura 38. Modelo predictivo de vibraciones en campo lejano para el Quantex 73

Nota: El modelo tiene un 61 % de datos que explican la incertidumbre inicial.

4.1.3.2. Modelo Predictivo en función del Burden.

Para realizar el modelo predictivo con respecto al burden se encontró el promedio general de cada uno y así, poder establecer una VPP por cada uno de ellos, como se puede apreciar tiene un alto coeficiente de correlación, pero eso no significa que sea un buen predictor.

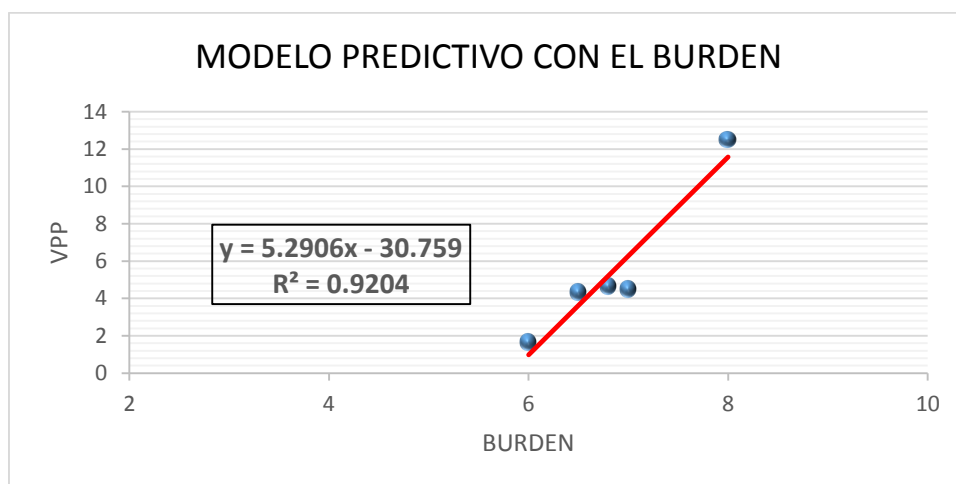


Figura 39. Modelo predictivo en función al burden

4.1.3.3. Modelo Predictivo con Redes Neuronales Artificiales.

Para realizar el modelo predictivo basado en redes neuronales artificiales (RNA) y así estimar la velocidad pico de partícula (VPP) a partir de variables operativas como (distancia y cantidad de carga por retardo) se hará uso de la programación Python en la plataforma de Google Colab, porque en dicha plataforma ya viene preinstalado y las librerías como (Numpy, Pandas, Scikit Learn, TensorFlow, Matplotlib) también vienen incluidas en la plataforma del Colab, pero de la misma manera se puede correr el código en PyCharm.

El modelo predictivo desarrollado hace referencia a la siguientes arquitectura: un perceptrón multicapa de tipo feedforward, con una capa de entrada que está compuesta por dos neuronas asociadas a distancia (D) y carga (W), una capa oculta con un número determinado de ocho neuronas y una capa de salida que representa la VPP, ver Figura 40.

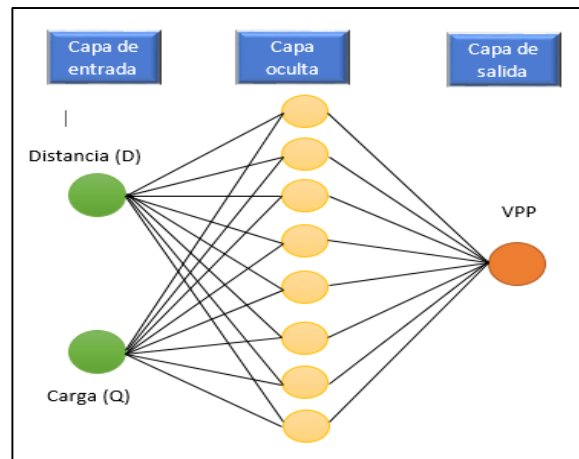


Figura 40 Arquitectura de la Red Neuronal Artificial

Nota: La RNA está compuesta por 8 neuronas en la capa oculta utilizando la función ReLu.

El conjunto total de datos de la **Tabla 8** fue dividido en tres grupos de entrenamiento, validación y prueba, usando 104 datos para entrenamiento de la red neuronal, ver **Tabla 9**.

Tabla 9. Grupo de Datos para el entrenamiento de la Red Neuronal

Grupo de datos	Cantidad de Datos	Porcentaje
Entrenamiento	104	70.3 %
Verificación	21	14.2%
Prueba	22	15.5%
Total	148	100%

Nota. Se utiliza el 70% para entrenamiento para que la RNA aprenda patrones si utilizamos menos será poco representativa.

La validación sirve para controlar el comportamiento del modelo, detectar algún sobre ajuste y detener el entrenamiento si el error aumenta, los datos de prueba que este caso son el 15.5% del total son los más importantes para corroborar que tan efectivo es el modelo de predicción de la red neuronal, no se coloca este grupo de datos dentro del modelo para que no aprenda de estos patrones, por lo tanto nos permite realizar una evaluación objetiva sobre el modelo comparar valores reales vs valores predichos y también realizar otra comparación con el modelo de Devine.

4.1.3.3.1. Resultado del Modelo de Redes Neuronales

La programación del código para crear el modelo se encuentra en el anexo N 01 que luego de ejecutarlo en el Google Colab muestra los valores predichos al grupo de entrenamiento y al grupo de prueba, el desempeño del modelo es evaluado empleando las métricas predictivas como error cuadrático (RMSE) y el coeficiente de determinación al grupo de prueba (R^2). La elección de los datos es de manera aleatoria en la Figura 41, se muestra la gráfica de los valores reales vs los valores que ha calculado el modelo para los datos de entrenamiento, donde el coeficiente de determinación es de 0.86, es un resultado muy cercano a 1 el cual muestra un alto grado de confianza, es importante remarca que estos datos solamente son para el entrenamiento el cual por los resultados obtenidos se nota que la red neuronal aprendió bien la relación.

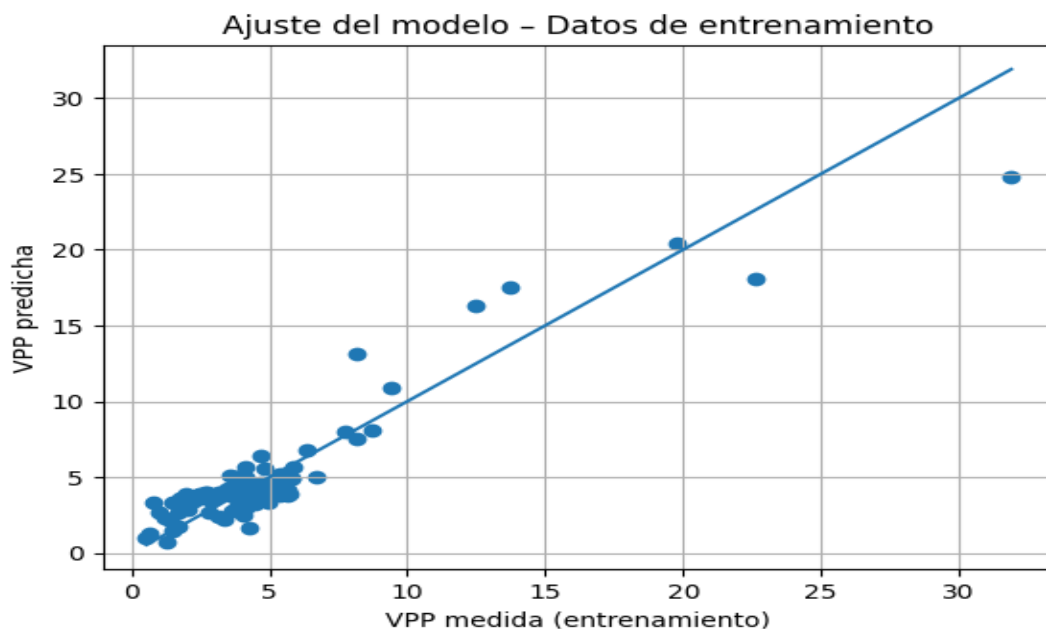


Figura 41 VPP real vs VPP predicha para datos de entrenamiento de RNA

Nota: los valores se acercan a la línea, tiene un R^2 de 0.86

Para saber si la red neuronal ha trabajado de manera significativa, es momento de utilizar los datos de prueba y observar como varia y cuanto de error existe entre el valor real y el valor calculado, también de determinar su coeficiente de determinación, el código de programación se encuentra en el Anexo N° 01. En la **Tabla 10** se muestran los resultados de la velocidad pico de partícula que proporciona dicho modelo, como se puede apreciar para un valor de 3.4 predice 4.5, a simple vista se nota que no se alejan demasiado, pero es importante encontrar su coeficiente de determinación para ver cómo están relacionados, para lo cual usaremos la siguiente ecuación matemática.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(real-pred)^2}{\sum(real-media)^2} \quad \text{Ecuación 17}$$

Tabla 10. Resultados del modelo con RNA para datos de prueba

Distancia (D)	Carga (Q)	VPP_real	VPP_predicha	Error	(real-pre)^2	(real-pro)^2
831	405	5.3	2.978	2.322	5.390	1.265
552	404	3.98	4.758	-0.778	0.606	0.038
687	383	3.54	3.730	-0.190	0.036	0.404
674	368	4.11	3.954	0.156	0.024	0.004
819	388	4.42	3.753	0.667	0.444	0.060
551	388	4.51	5.699	-1.189	1.413	0.112
868	388	2.15	3.122	-0.972	0.946	4.102
723	388	2.48	3.968	-1.488	2.215	2.874
576	370	4.51	4.868	-0.358	0.128	0.112
390	384	12.8	13.756	-0.956	0.915	74.387
589	371	3.61	4.745	-1.135	1.288	0.319
844	405	2.23	2.812	-0.582	0.338	3.784
632	354	4.55	4.275	0.275	0.076	0.140
789	405	2.96	3.467	-0.507	0.257	1.477
403	383	7.72	12.920	-5.200	27.043	12.565
741	383	2.35	3.890	-1.540	2.372	3.331
544	368	4.98	5.188	-0.208	0.043	0.648
868	343	1.8	2.129	-0.329	0.108	5.642
629	401	5.85	4.016	1.834	3.364	2.805
704	405	2.26	4.045	-1.785	3.186	3.668
768	388	4.23	3.981	0.249	0.062	0.003
655	371	3.38	4.082	-0.702	0.493	0.632
796	368	2.31	3.509	-1.199	1.436	3.479
Promedio		4.175		Suma	52.183	121.851

Nota. Se observa que el dato más alejado es -5.2 pero en general tienen un promedio de 0.5 de error.

Para calcular el coeficiente de determinación (R^2) aplicamos la ecuación número 17.

$$R^2 = 1 - \frac{52.183}{121.851} = 0.572$$

En la Figura 42 se puede observar la gráfica para los datos a prueba, donde generalmente los datos se acercan a la línea divisoria.

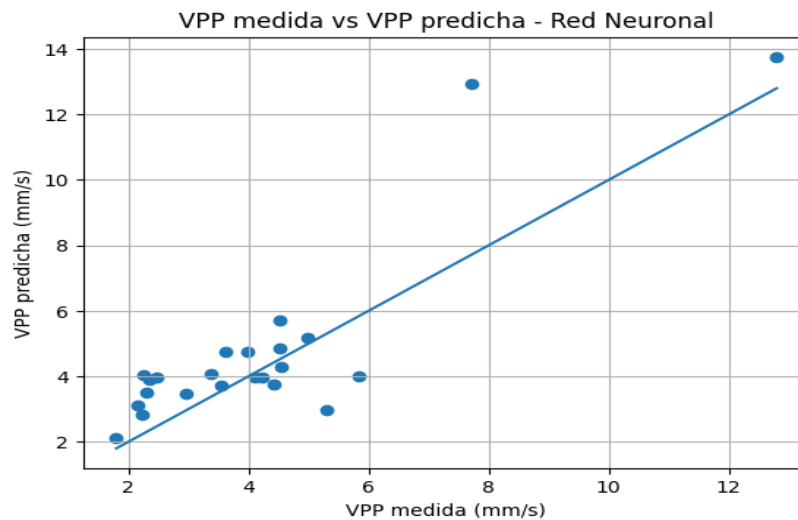


Figura 42 VPP real vs VPP predicha para datos de prueba de RNA

En el modelo de la red neuronal artificial (RNA) se obtuvieron los siguientes resultados.

- RMSE: 1.5062633292605103
- R^2 : 0.57174818537570

El cual coincide con el cálculo efectuado de la ecuación 17, entonces tenemos dos diferentes valores del coeficiente de determinación uno para el entrenamiento que es de 0.86 y el de prueba que es de 0.57 y esta variedad ocurre por el siguiente motivo; en el grupo de entrenamiento mide el ajuste interno del modelo y el grupo de prueba calcula su capacidad de generalización con los datos no observados, los cuales son datos completamente nuevos para la red, lo que indica un desempeño adecuado de la red neuronal.

Los tres modelos tanto el de Devine, el de Redes Neuronales Artificiales y el de regresión lineal con respecto al burden, muestran un coeficiente de determinación mayor a 0.5 l su RMSE de ambos modelos también es bajo por lo tanto los dos modelos predicen la VPP de manera eficiente teniendo consideración las variables operativas como distancia y cantidad de carga por retardo.

4.2. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA VPP.

Según los modelos que se desarrollamos están relacionados con la distancia al punto de monitoreo (D) y la Cantidad de Carga por Retardo (W), adicionalmente se lo considera la distancia escalada (SD) por ser una variable compuesta por las dos anteriores, adicional hay otras variables que afectan a las vibraciones como el burden espaciado, densidad frecuencia y tipo de roca, entonces para verificar cuál de los datos tiene más afinidad con la VPP es necesario aplicar la estadística inferencial y determinar la correlación de las variables.

4.2.1. Correlación Entre Variables.

En el siguiente apartado se establecerá el grado de correlación que muestran las variables, se utilizará el software SPSS que significa paquete estadístico para las Ciencias Sociales, se iniciará por ver la normalidad de los datos para luego ver que parámetros estadísticos aplicamos.

4.2.1.1. Normalidad de las Variables.

Las técnicas de análisis para los datos cuantitativos en una investigación científica suelen clasificarse de acuerdo a las ciencias de la estadística, como las que usan pruebas paramétricas y las no paramétricas, para el uso de cualquiera de estas dos pruebas es necesario estudiar la normalidad de los datos, si los datos son normales se usará una prueba paramétrica si los datos no presentan una distribución normal se recurrirá a las pruebas no paramétricas.

Los datos en la naturaleza tienen dos tipos de distribución una distribución normal y la distribución no normal que puede ser de exponencial, de Poisson, binomial, etc. Son ejemplos de distribución normal estatura y peso, leyes de los minerales, errores de medición, tonelaje de mineral entre otros y son ejemplos de distribución no normal número de accidentes por turno, falla de los explosivos, tiempo entre fallas de bombas. Para nuestro estudio por ser una medida de velocidad podría encontrarse dentro de una distribución normal, para conocer a ciencia cierta que distribución tienen los datos usaremos la prueba de normalidad.

Se aplicará la prueba de KOLMOGOROV-SMIRNOV porque es una prueba de significancia estadística y se emplea para variables cuantitativas continuas para una muestra de tamaño mayor a 50, como es el caso de estudio “Predicción de Vibraciones en campo Lejano para estimar la VPP en una mina a Tajo Abierto” que cuenta con 148 datos de

registros de VPP por el geófono triaxial ubicado en la Poza Yeny del proyecto, para llevar a cabo la normalidad de las variables se hará uso del Software SPSS

Tabla 11 Pruebas de Normalidad para las variables en estudio

	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Distancia	,063	148	,200*	,959	148	,000
Velocidad Pico	,259	148	,000	,593	148	,000
Partícula	,067	148	,096	,969	148	,002
Distancia Escalada	,249	148	,000	,731	148	,000
Burden	,283	148	,000	,613	148	,000
Espaciamiento	,208	148	,000	,905	148	,000
Densidad	,302	148	,000	,723	148	,000
Frecuencia	,175	148	,000	,804	148	,000
Cantidad de Carga por Retardo						

*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Según la Tabla 11 las variables que tienen significancia < 0.05 son: Cantidad de carga por retardo, Velocidad Pico de Partícula, Burden, espaciamiento, densidad y frecuencia; las que tienen significancia ≥ 0.05 son: distancia escalada, distancia al punto de monitoreo.

4.2.1.2. Gráfico de Normalidad de las Variables.

Para ver la normalidad de los datos de las diferentes variables es necesario, graficar el histograma de los datos, para luego colocar la campana de Gauss y observar cómo se comporta la campana.

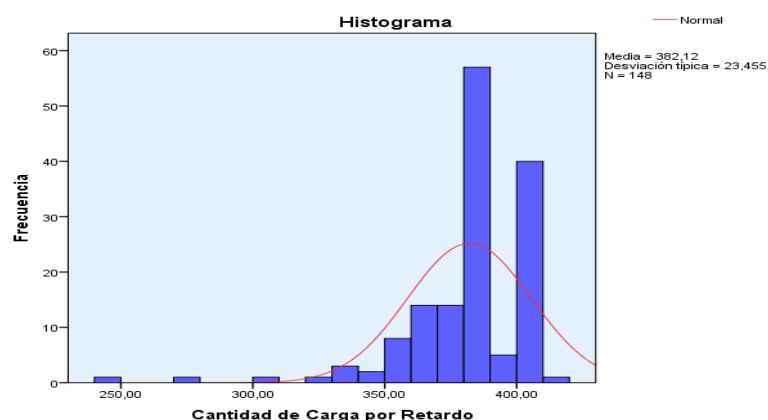


Figura 43 Campana de Gauss para la variable Cantidad de Carga

Nota: El gráfico muestra una distribución no normal con barras que están fuera de la superficie de la campana.

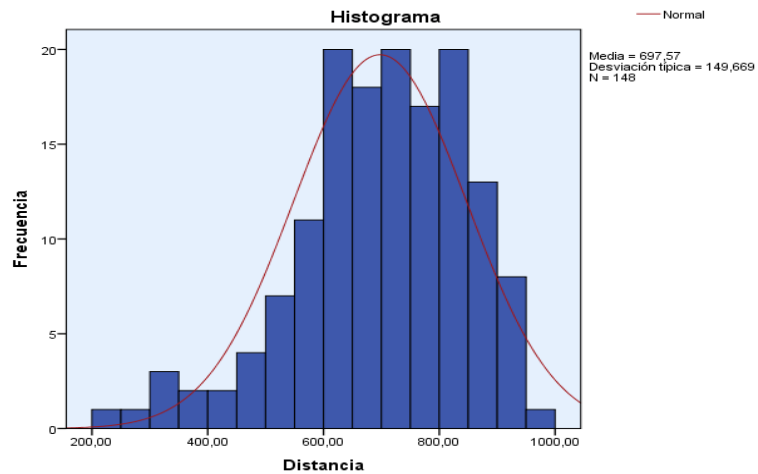


Figura 44 Campana de Gauss para la variable Distancia al punto de Monitoreo
Nota: El gráfico muestra la mayoría de los datos dentro de la campana de Gauss, estamos frente a una distribución normal.

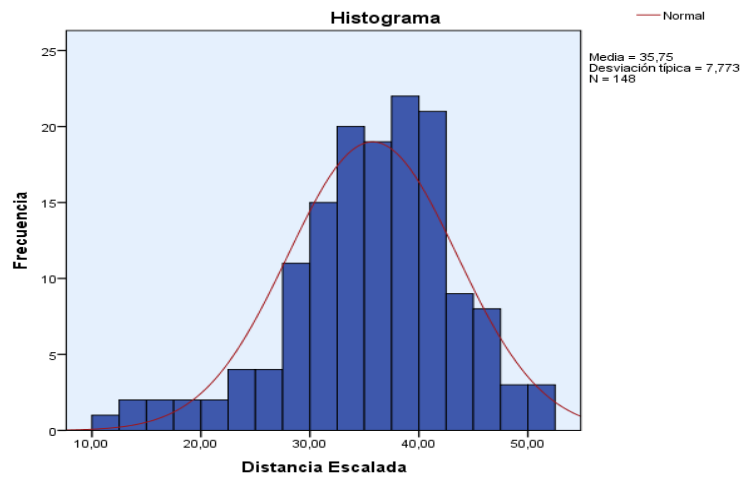


Figura 45 Campana de Gauss para Distancia Escalada
Nota: Los datos se encuentran dentro de la campana de Gauss.

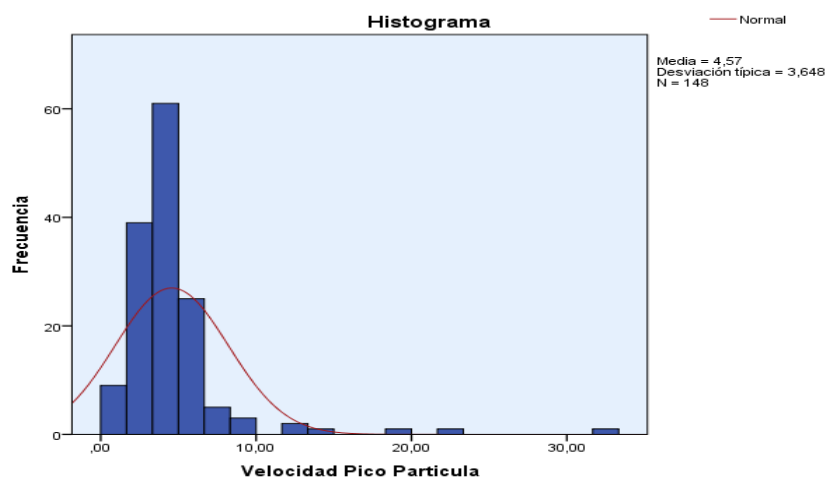


Figura 46 Campana de Gauss para la Velocidad Pico Partícula.
Nota: La gráfica muestra una distribución no normal

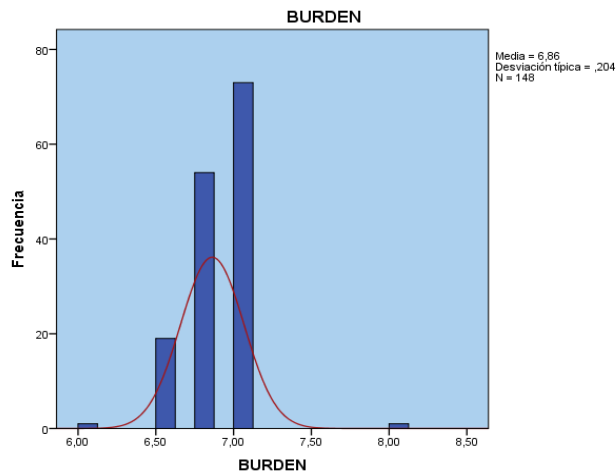


Figura 47 Campana de Gauss para el Burden

Fuente: Software SPSS

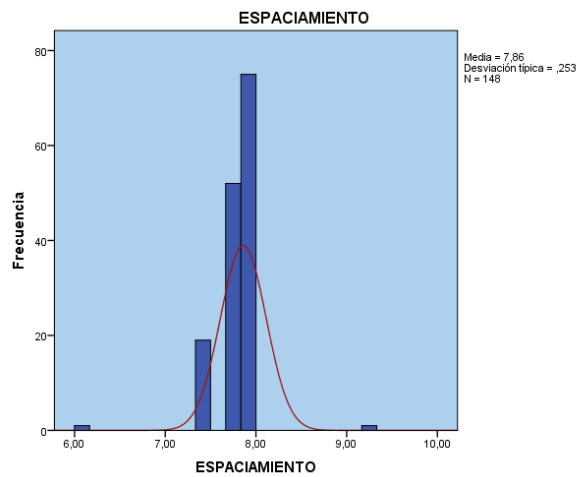


Figura 48 Campana de Gauss para el Burden

Fuente: Software SPSS

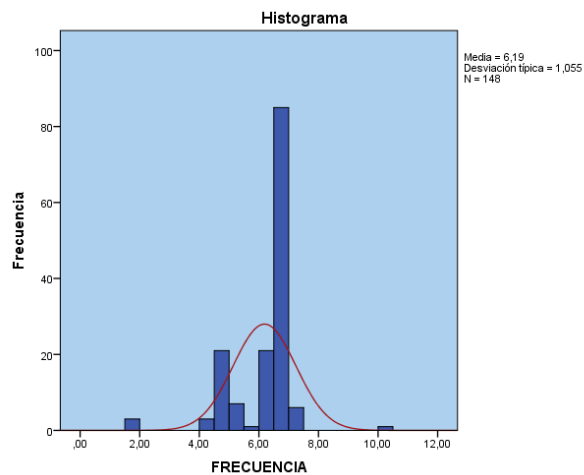


Figura 49 Campana de Gauss para la frecuencia

Fuente: Software SPSS

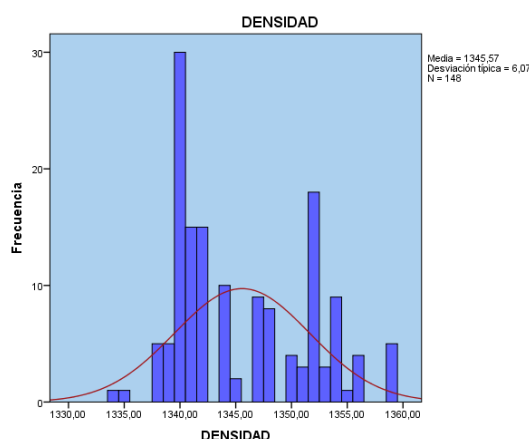


Figura 50 Campana de Gauss para la densidad

Fuente: Software SPSS

En base a las pruebas de normalidad ver la **Tabla 11** y las figuras 43 a 50, elaboramos un cuadro resumen de la normalidad de las variables, para ver que pruebas estadísticas se aplica. Dónde los datos con una significancia mayor a 0.05 muestran una distribución normal.

Tabla 12. Resumen de la normalidad de las variables.

Variables	Significancia	Normal	No Normal
Cantidad de carga por retardo	0	NO	SI
Distancia al punto de monitoreo	0.2	SI	NO
Distancia Escalada	0.096	SI	NO
Velocidad Pico Partícula	0	NO	SI
Burden	0	NO	SI
Espaciamiento	0	NO	SI
Frecuencia	0	NO	SI
Densidad	0	NO	SI

Nota: Los resultados mostrados están corroborados por la gráfica y por la prueba de Kolgomorov

Según la **Tabla 12**, la distribución de los datos es de dos tipos por lo tanto, para determinar el grado de correlación entre las variables, se usará las pruebas no paramétricas, dentro de ellas el coeficiente de Spearman y la significancia bilateral del coeficiente para garantizar la verdadera correlación, para lo cual se considera la **Tabla 13**. Si el coeficiente es negativo estaremos ante una correlación inversa y si es positivo serán datos con correlación directa.

Tabla 13. Escala del coeficiente de Spearman

Valor del Spearman	Fuerza de correlación
$ r =0$	No existe
$0< r \leq 0.25$	Débil
$0.25< r \leq 0.5$	Media
$0.5< r \leq 0.8$	Alta
$0.8< r \leq 1$	Muy Alta
$ r =1$	Perfecta

Fuente: la tabla fue adaptada de Arias (2023)

En el programa SPSS determinamos los coeficientes de Spearman como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 14 Correlación de Spearman para las variables en estudio

		D	VPP	DS	B	E	W	FR	Q	
Rho de Spearman	VPP	Coeficiente de correlación	-,650**	1,000	-,653**	-,092	-,092	-,008	-,029	,055
		Sig. (bilateral)	,000	.	,000	,267	,266	,928	,723	,504
	DS	Coeficiente de correlación	,987**	-,653**	1,000	-,103	-,107	-,065	-,049	-,028
		Sig. (bilateral)	,000	,000	.	,215	,198	,433	,557	,731
	B	Coeficiente de correlación	-,090	-,092	-,103	1,000	,982**	,082	,010	,045
		Sig. (bilateral)	,279	,267	,215	.	,000	,321	,907	,591
	E	Coeficiente de correlación	-,095	-,092	-,107	,982**	1,000	,087	,030	,024
		Sig. (bilateral)	,253	,266	,198	,000	.	,291	,714	,768
	D	Coeficiente de correlación	-,027	-,008	-,065	,082	,087	1,000	-,019	,375**
		Sig. (bilateral)	,741	,928	,433	,321	,291	.	,815	,000
	F	Coeficiente de correlación	-,070	-,029	-,049	,010	,030	-,019	1,000	-,272**
		Sig. (bilateral)	,395	,723	,557	,907	,714	,815	.	,001
	Q	Coeficiente de correlación	,081	,055	-,028	,045	,024	,375**	-,272**	1,000
		Sig. (bilateral)	,326	,504	,731	,591	,768	,000	,001	.
	Q	Coeficiente de correlación	,081	,055	-,028	,045	,024	,375**	-,272**	1,000

También se muestran los gráficos de dispersión de las variables para observar el comportamiento de los datos de cada variable con respecto a la VPP medida en campo.

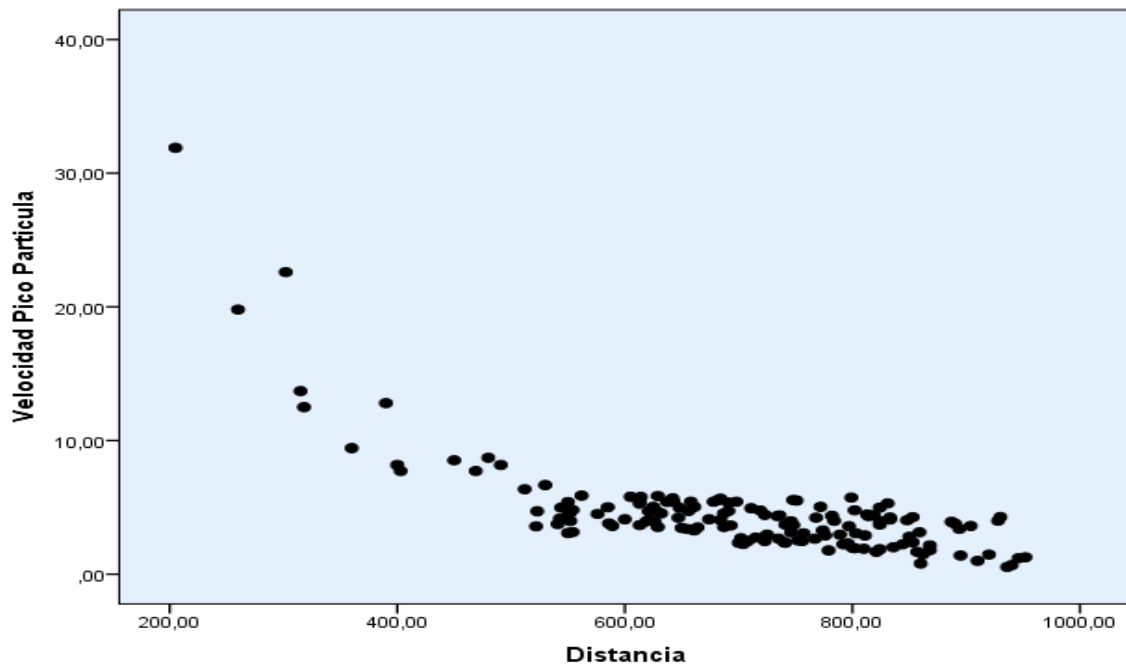


Figura 51 Correlación entre la VPP y la Distancia al punto de monitoreo.

Fuente: SPSS.

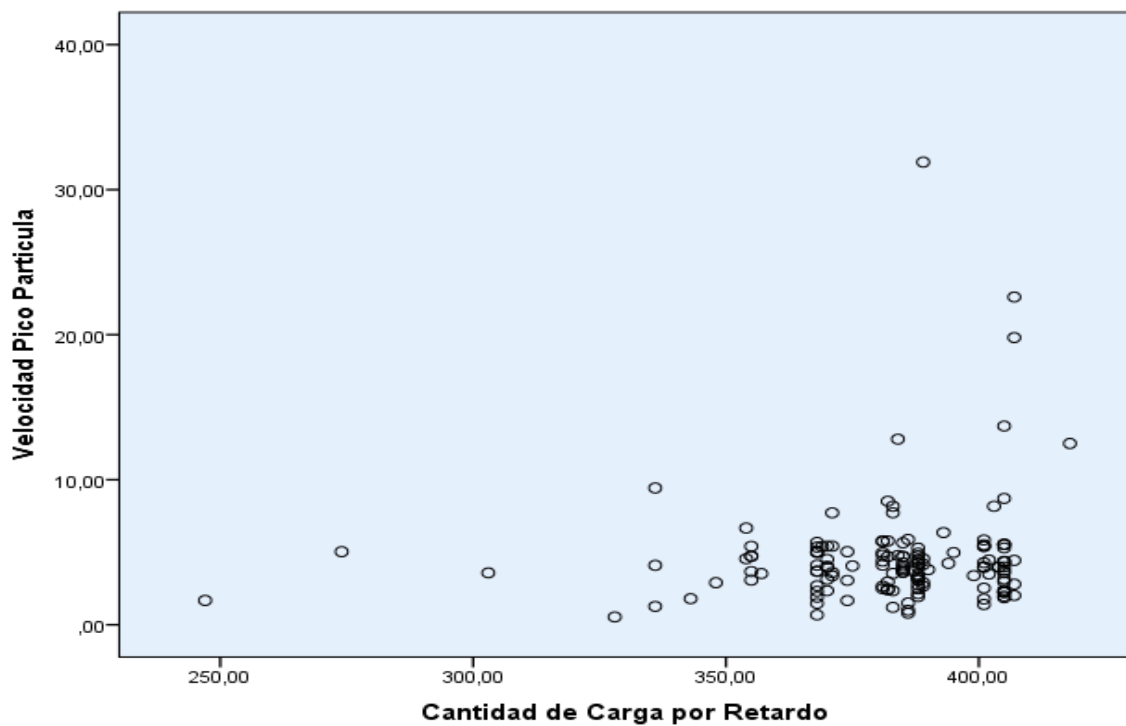


Figura 52 Correlación entre VPP y Cantidad de carga por retardo

Fuente: SPSS.

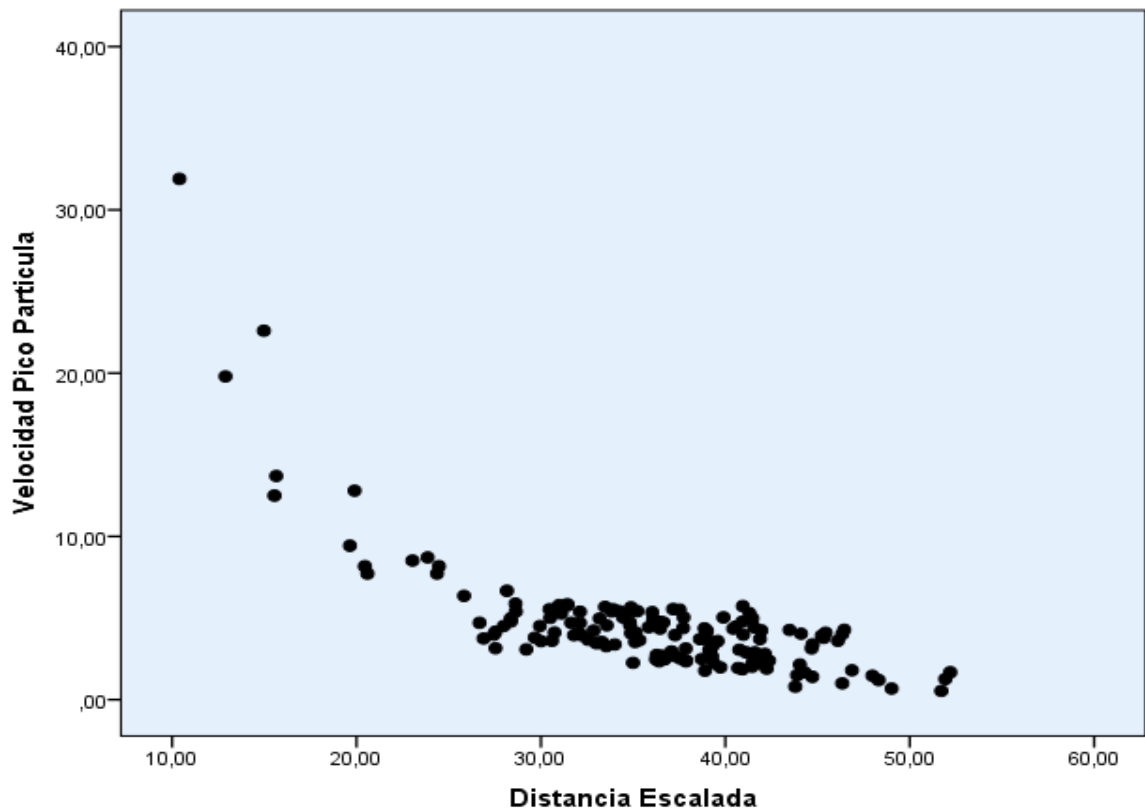


Figura 53 Correlación entre VPP y la Distancia Escalada

Nota: Al igual que con la distancia se aprecia una correlación inversa, valores donde la distancia escalada es alta los valores de la VPP son bajos. Fuente SPSS

4.3. DESEMPEÑO PREDICTIVO DE LOS MODELOS.

Son dos modelos con metodología de predicción totalmente distintos pero con un único fin predecir la VPP del Quantex 73 en una mina a tajo abierto, el modelo de Devine es un modelo empírico basado en la relación matemática, por otro lado la red neuronal artificial constituye un modelo de tipo no lineal y de carácter implícito, adicionalmente se colocara en desempeño el modelo en función del burden simplemente para corroborar que no es un buen predictor, para determinar cuál de los modelos tiene mayor desempeño se evaluará a los modelos en mismas condiciones en los datos de prueba. Pero antes de ello se debe calcular el coeficiente de determinación R^2 y la RSME de los valores reales y predichos de la VPP, para los datos del grupo de prueba en el modelo de Devine y del Burden. Para lo cual usaremos la ecuación número 17 con los datos de la **Tabla 15**.

Tabla 15 Resultados del modelo de Devine para datos de prueba

Distanci a	Carga_por_retard o	VPP_rea l	Devin e	Error De	(real- pro)^2	(real- pre)^2
831	405	5.3	2.823	2.477	1.265	6.137
552	404	3.98	5.759	-1.779	0.038	3.164
687	383	3.54	3.933	-0.393	0.404	0.154
674	368	4.11	4.066	0.044	0.004	0.002
819	388	4.42	2.895	1.525	0.060	2.325
551	388	4.51	5.777	-1.267	0.112	1.605
868	388	2.15	2.616	-0.466	4.102	0.217
723	388	2.48	3.598	-1.118	2.874	1.250
576	370	4.51	5.347	-0.837	0.112	0.700
390	384	12.8	10.551	2.249	74.387	5.058
589	371	3.61	5.143	-1.533	0.319	2.350
844	405	2.23	2.747	-0.517	3.784	0.268
632	354	4.55	4.549	0.001	0.140	0.000
789	405	2.96	3.090	-0.130	1.477	0.017
403	383	7.72	9.965	-2.245	12.565	5.040
741	383	2.35	3.447	-1.097	3.331	1.203
544	368	4.98	5.907	-0.927	0.648	0.859
868	343	1.8	2.616	-0.816	5.642	0.666
629	401	5.85	4.586	1.264	2.805	1.597
704	405	2.26	3.769	-1.509	3.668	2.276
768	388	4.23	3.238	0.992	0.003	0.983
655	371	3.38	4.274	-0.894	0.632	0.799
796	368	2.31	3.042	-0.732	3.479	0.537
Promedio		4.175		Suma	121.851	37.207

Nota: El error más alto es de 2.5 unidades los demás datos se acercan a 0, y tienen una media de -0.3.

Calculo del R^2 para el grupo de datos de prueba con el modelo de Devine.

$$R^2 = 1 - \frac{37.207}{121.851} = 0.695$$

Cálculo del root mean square error (RSME) para los datos de prueba mediante la siguiente ecuación.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum (VPP_{real} - VPP_{pre})^2} \quad \text{Ecuación 18}$$

Reemplazando los datos de la **Tabla 15** se obtiene el error absoluto promedio (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{23} * 37.207} = 1.272$$

Se observa que el valor de 1.272 está muy cerca a cero, significa que el modelo tiene pocos datos que se desvían del promedio, por lo tanto, las predicciones que desarrolla el modelo de Devine son más precisas están muy cerca al valor real de la velocidad pico de partícula medida en campo.

Tabla 16 Resultados del modelo en función del Burden

Distancia	Burden	VPP_real	VPP_preB	Error	(real-pro)^2	(real-pre)^2
831	6.5	5.3	3.63	1.67	1.27	2.79
552	7	3.98	6.28	-2.30	0.04	5.27
687	6.8	3.54	5.22	-1.68	0.40	2.81
674	6.8	4.11	5.22	-1.11	0.00	1.23
819	6.5	4.42	3.63	0.79	0.06	0.62
551	6.8	4.51	5.22	-0.71	0.11	0.50
868	7	2.15	6.28	-4.13	4.10	17.02
723	6.8	2.48	5.22	-2.74	2.87	7.49
576	7	4.51	6.28	-1.77	0.11	3.12
390	6.8	12.8	5.22	7.58	74.39	57.50
589	7	3.61	6.28	-2.67	0.32	7.10
844	7	2.23	6.28	-4.05	3.78	16.36
632	6.8	4.55	5.22	-0.67	0.14	0.44
789	7	2.96	6.28	-3.32	1.48	10.99
403	7	7.72	6.28	1.44	12.57	2.09
741	7	2.35	6.28	-3.93	3.33	15.41
544	7	4.98	6.28	-1.30	0.65	1.68
868	7	1.8	6.28	-4.48	5.64	20.03
629	7	5.85	6.28	-0.43	2.80	0.18
704	7	2.26	6.28	-4.02	3.67	16.12
768	6.8	4.23	5.22	-0.99	0.00	0.97
655	6.8	3.38	5.22	-1.84	0.63	3.37
796	7	2.31	6.28	-3.97	3.48	15.72
Promedio		4.175		Suma	121.85	208.82

Calculo del R^2 para el grupo de datos de prueba con el modelo predictivo en función del Burden.

$$R^2 = 1 - \frac{208.82}{121.85} = -0.71$$

Aplicando la ecuación 18, se encuentra el valor numérico del RSME.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{23} * 208.82} = 3.01$$

Como se puede verificar este modelo es completamente obsoleto por tener un coeficiente de determinación negativo, es un modelo engañoso que no logra capturar las tendencias, por lo tanto no es apto para el conjunto de datos, en términos estadísticos esto se debe a que la suma de los cuadrados de los residuos es mayor que la suma de los cuadrados totales, y en la práctica se debe a que tanto el burden y el espaciamiento son parámetros que influyen en las vibraciones pero no determinan el modelo, por la medida de datos que se tomó en campo lejano, por esta razón ya no se lo incluye en la tabla 17.

Tabla 17. VPP para los dos modelos propuestos

Distancia	Carga_por_retardo	VPP_real	RNA	Devine
831	405	5.30	2.978	2.823
552	404	3.98	4.758	5.759
687	383	3.54	3.730	3.933
674	368	4.11	3.954	4.066
819	388	4.42	3.753	2.895
551	388	4.51	5.699	5.777
868	388	2.15	3.122	2.616
723	388	2.48	3.968	3.598
576	370	4.51	4.868	5.347
390	384	12.8	13.756	10.551
589	371	3.61	4.745	5.143
844	405	2.23	2.812	2.747
632	354	4.55	4.275	4.549
789	405	2.96	3.467	3.090
403	383	7.72	12.920	9.965
741	383	2.35	3.890	3.447
544	368	4.98	5.188	5.907
868	343	1.80	2.129	2.616
629	401	5.85	4.016	4.586
704	405	2.26	4.045	3.769
768	388	4.23	3.981	3.238
655	371	3.38	4.082	4.274
796	368	2.31	3.509	3.042

Nota: En el cuadro se especifica los valores de la VPP reales tomado en campo y los valores predichos por cada modelo, para una distancia de 403m el geófono registró 7.72 la RNA predijo 12.92 y el modelo de Devine de 9.96, para este caso el modelo de Devine tiene más acierto.

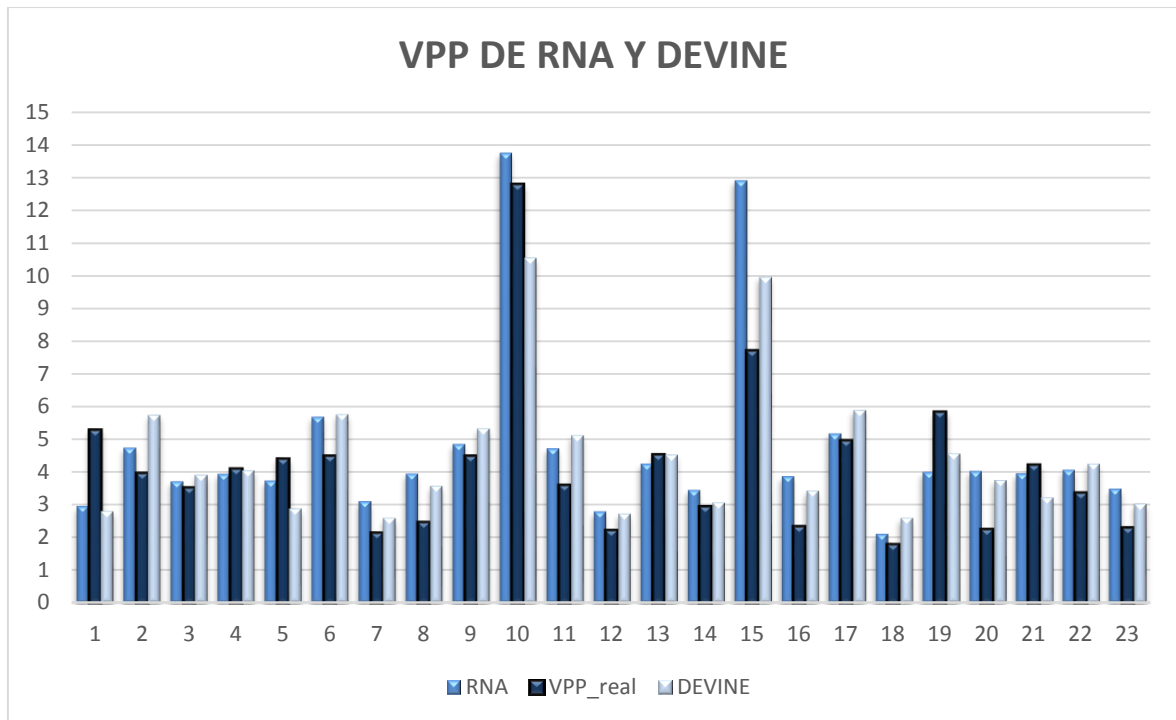


Figura 54 Comparación de la VPP entre RNA y Devine

Nota: El gráfico representa la comparación entre lo real y lo predicho para el grupo de prueba, los datos 1 y 10 son los que más error muestran.

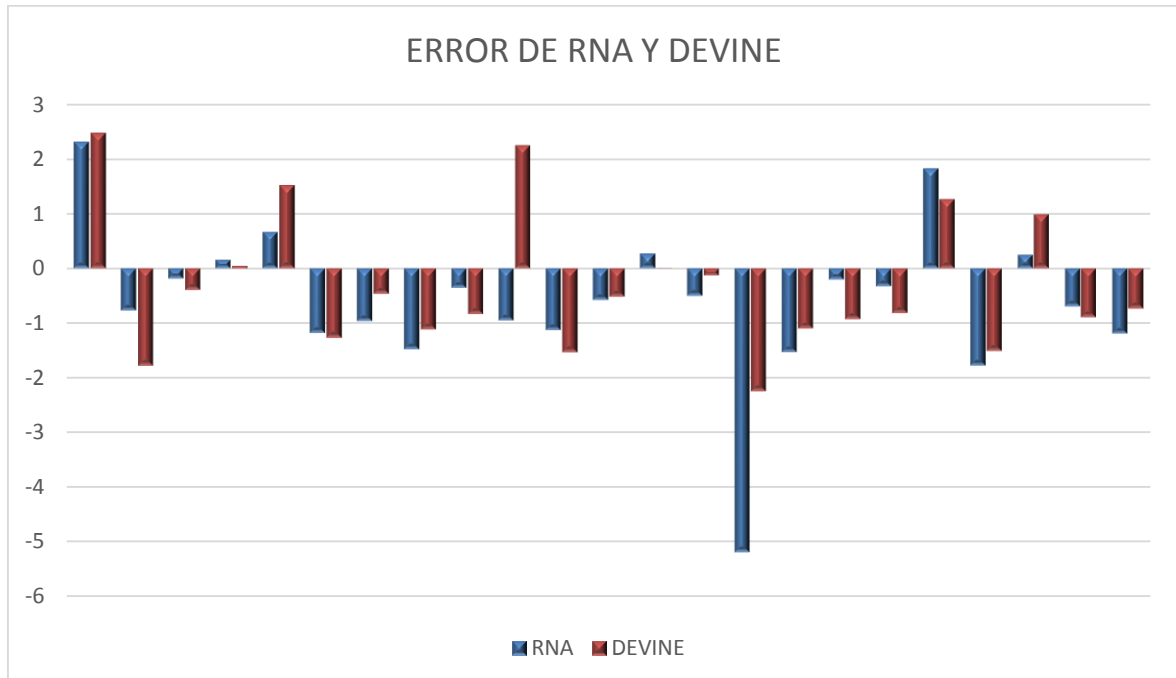


Figura 55 Diagrama de barras para observar el comportamiento de los errores.

Nota: Como se puede apreciar los errores generalmente se encuentran en la misma dirección, solo el dato 10 que se encuentra en ambas direcciones quiere decir que uno es superior que el otro.

En la Figura 54, se observa que los datos de ambos modelos, tanto el de la red neuronal como el de Devine se acercan a la VPP real, excepto en el dato 15 dónde la predicción supera hasta en 3 y 6 unidades a la VPP real, en el dato número 4 dónde la distancia de monitoreo es de 674 m y la cantidad de carga por retardo es de 662 kg es dónde menos error presentan como se puede apreciar en el gráfico de barras de la Figura 54; realizando una observación a los gráficos antes mencionados se puede apreciar a simple vista que los dos modelos tienen alto grado de confianza, pero es necesario analizar su coeficiente de determinación de ambos modelos, para corroborar cuál de los dos modelos es el más representativo y se puede utilizar para predecir los niveles de vibraciones para futuros proyectos de voladuras. Por lo tanto para que sean más entendible los resultados encontrados en las páginas anteriores se elabora la siguiente tabla.

Tabla 18. Resumen de las variables estadísticas por cada modelo de predicción.

MODELO PREDICTIVO	R ²	RSME
Redes Neuronales Artificiales	0.572	1.506
Devine & Duvall	0.694	1.272

Nota: Ambos modelos tienen un R² aceptable porque es cercana a uno quiere decir que la predicción es muy acertada.

Como se aprecia en la **Tabla 18**, el modelo predictivo de Devine que es un modelo empírico donde su predicción lo realiza en base a regresión matemática muestra un coeficiente de determinación R² mayor que el de una red neuronal con una diferencia de 0.122 con respecto al resultado del error medio (RSME) el resultado del modelo de Devine & Duvall es menor que el de la red neuronal artificial, con respecto a los 23 datos del grupo de prueba evidenciando que el modelo empírico tiene una mayor precisión en la VPP.

4.4. REDUCCIÓN DE LAS VIBRACIONES

Una vez que se tiene el modelo que más desempeño muestra se hace uso de la relación matemática que predice las vibraciones, basado en la distancia escalada y la velocidad pico de partícula, se puede elaborar un ábaco de modelamiento de VPP a diferentes distancias y diferente cantidad de carga para campo lejano y así tener un mayor alcance para el diseño de las voladuras en zonas o estructuras dónde se necesita reducir las vibraciones y proteger estructuras dentro de la mina. En la **Tabla 19** se especifica los datos para distancias en campo lejano mayores a 100 metros y las cargas por retardo se encuentran

entre los 550 kg y 270 kg, dónde también se encuentra los 380 kg el cual es la media aritmética de los datos recolectados.

Tabla 19. Datos para determinar la VPP a diferentes distancias.

Distancia (m)	Cantidad de explosivo (kg/tal)				
	550	500	420	380	270
350	16.64	15.31	13.15	12.05	8.95
400	13.18	12.13	10.42	9.55	7.09
450	10.73	9.88	8.49	7.78	5.77
500	8.93	8.22	7.06	6.47	4.81
550	7.57	6.96	5.98	5.48	4.07
600	6.50	5.98	5.14	4.71	3.50
650	5.66	5.20	4.47	4.10	3.04
700	4.97	4.57	3.93	3.60	2.67
750	4.41	4.06	3.48	3.19	2.37
800	3.94	3.62	3.11	2.85	2.12
850	3.54	3.26	2.80	2.57	1.91
900	3.21	2.95	2.54	2.32	1.73
950	2.92	2.69	2.31	2.11	1.57
1000	2.67	2.46	2.11	1.93	1.44
1050	2.45	2.26	1.94	1.78	1.32

Nota: Entre los 300 y 800 metros para una carga promedio de 380 kg tenemos el límite de 3 mm/s según la norma DIN.

Con los datos de la tabla anterior se realiza el ábaco de cantidad de carga vs VPP para así tener en consideración al momento de diseñar una malla de voladura siempre y cuando se desee proteger estructuras cerca del área de la voladura o viviendas de la comunidad cuando el proyecto de voladura se encuentre cerca de ellas, por ejemplo si se tiene alguna estructura dentro de los 650 m de distancia, según el ábaco Figura 56 máximo se tiene que cargar con 270 kg por retardo, como se puede apreciar este ábaco es de suma importancia para el control de vibraciones.

También el ábaco nos proporciona más información útil como la siguiente: mientras la distancia aumenta la VPP disminuye características que también se demostrara en el análisis estadístico de las muestras y caso contrario mientras más cerca está y la carga por retardo aumenta la velocidad pico partícula también aumenta de manera exponencial.

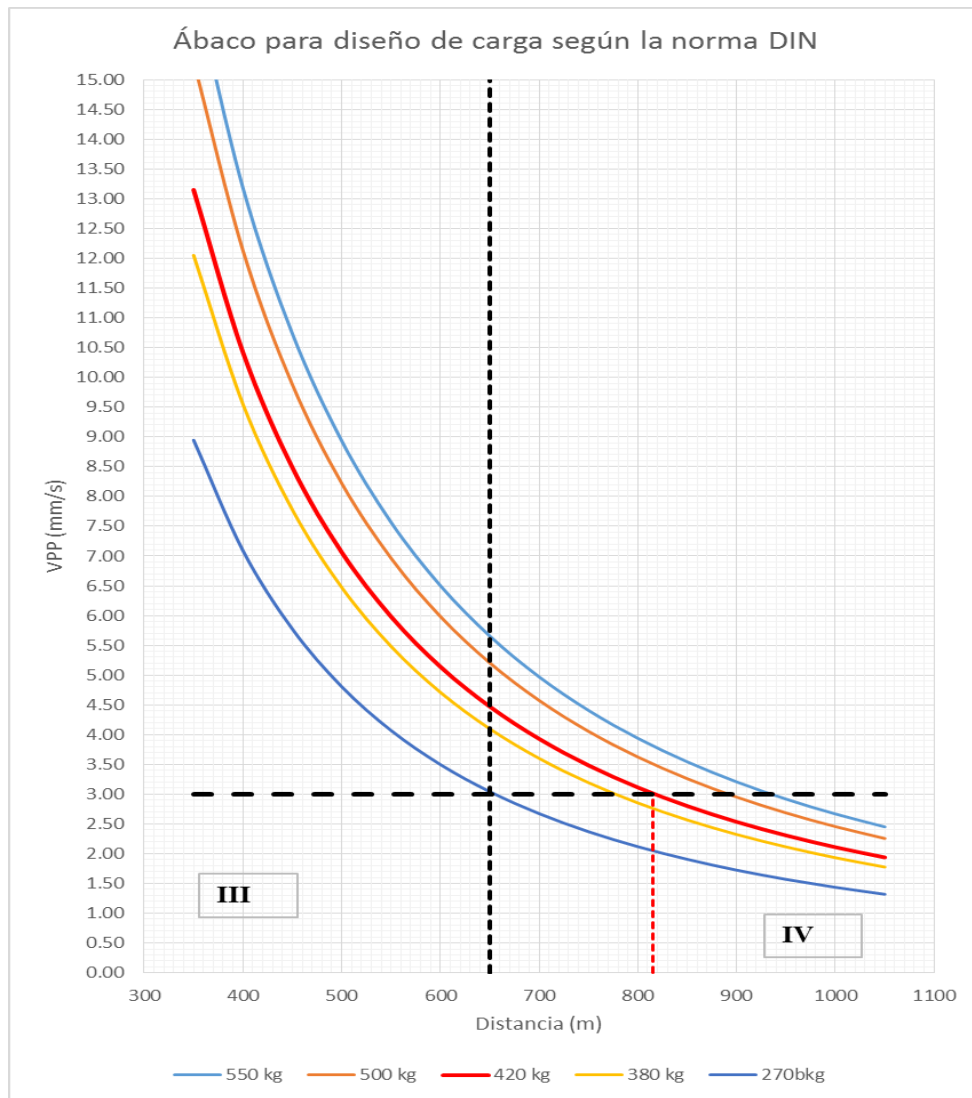


Figura 56 Ábaco de diseño para la MEC QUANTEX 73.

Nota. La norma DIN establece que para proteger estructuras mínimo se debe tener 3 mm/seg de VPP.

En la Figura 56, en el primer cuadrante todas las cargas graficadas menores a 650 m superan el límite que establece la norma alemana DIN 4150 de 3 mm/s para frecuencias bajas, en cuadrante 2 se encuentra la carga promedio de los datos donde indica que hasta los 820 m provoca algún daño o relajamiento en las estructuras y que a partir de los 820 m en adelante la vibración disminuye y no hay ningún daño, el cuadrante 3 sirve para verificar que ninguna estructura es dañada a distancias menores a 650 m en el cuadrante cuatro se tiene todas las cargas que inician los daños en las estructuras y los límites de sus distancias. En el caso de la mina en estudio la propiedad o vivienda más cercana es de 2577 m, cuando ocurre una voladura con una carga promedio de 380 kg de Quantex, la estructura experimentará una VPP de 0.3 mm/s, el cual se encuentra bajo la norma.

4.5. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.

Para contrastar la hipótesis general y las hipótesis específicas del trabajo de investigación de la “Predicción de vibraciones en campo lejano para estimar la VPP en una mina a tajo abierto”, se dispondrá de los resultados obtenidos en los ítems anteriores:

- **HIPÓTESIS GENERAL.**

HG0: El desarrollo de un modelo predictivo de vibraciones considerando las variables operativas no permitirá estimar con mayor precisión la velocidad pico de partícula en campo lejano.

HG1: El desarrollo de un modelo predictivo de vibraciones considerando las variables operativas permitirá estimar con mayor precisión la velocidad pico de partícula en campo lejano.

Se desarrollaron dos modelos de predicción con redes neuronales y la predicción matemática de Devine & Duvall, en base a la distancia del punto de monitoreo (D) y de la cantidad de carga por Retardo (Q); dónde se obtuvieron niveles aceptables de precisión (coeficiente de determinación R^2) es de 0.572 y 0.694 respectivamente, como se puede apreciar en la **Tabla 18**, modelos que por estar cerca de la unidad presentan un alto grado de exactitud, además el RMSE de los dos modelos de los cuales fueron 1.506 para redes neuronales y 1.272 para el modelo de Devine, son valores cercanos a cero significa que las predicciones de la VPP son muy cercanas a los valores reales, entonces se hace referencia a modelos robustos y fiables en sus predicciones. Por lo tanto, como R^2 de los modelos es ≥ 0.5 y RSME tienden a 0 se acepta la Hipótesis General 1 y se rechaza la hipótesis General 0.

- **HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1.**

HE₁ 0: La distancia al punto de monitoreo y la carga por retardo son los parámetros que menos influencia tienen en la velocidad pico de partícula.

HE₁ 1: La distancia al punto de monitoreo y la carga por retardo son los parámetros que más influencia tienen en la velocidad pico de partícula.

Para contrastar la hipótesis específica fue necesario analizar la normalidad de los datos, por lo tanto, se aplica los métodos estadísticos no paramétricos, para determinar si las variables independientes y dependientes presentan alguna correlación según Spearman, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 20 Correlación entre VPP y las demás variables

Variables		VPP
Rho de Spearman	Distancia al punto de monitoreo (W)	Coeficiente de correlación -,650**
		Sig. (bilateral) ,000
	Velocidad Pico Partícula (VPP)	Coeficiente de correlación 1,000
		Sig. (bilateral) .
	Distancia Escalada (DS)	Coeficiente de correlación -,653**
		Sig. (bilateral) ,000
	Burden (B)	Coeficiente de correlación -,092
		Sig. (bilateral) ,267
	Espaciamiento (E)	Coeficiente de correlación -,092
		Sig. (bilateral) ,266
	Densidad (D)	Coeficiente de correlación -,008
		Sig. (bilateral) ,928
	Frecuencia (F)	Coeficiente de correlación -,029
		Sig. (bilateral) ,723
	Cantidad de Carga por retardo (Q)	Coeficiente de correlación ,055
		Sig. (bilateral) ,504

Se observa que las dos variables Cantidad de carga por retardo y Distancia al punto de monitoreo el valor de su coeficiente de correlación (r), se encuentra dentro de la escala de Spearman, pero para la primera variable la significancia es mayor a 0.05 indicando que no existe correlación, en la segunda variables el resultado es de -0.650 y el valor numérico de la significancia bilateral es de 0 el cual es menor que 0.05, entonces se confirma la correlación; el cual es de tipo inversa por el signo negativo, quiere decir que a mayor distancia la VPP disminuye. Las otras variables de la voladura no tienen correlación con la VPP por tener valores de significancia mayores a 0.05, para contrastar la hipótesis usaremos la integración de las dos variables porque nuestro modelo de Devine & Duvall se basa en las dos variables juntas reflejada en la Distancia Escalada; dónde se puede apreciar que el valor del coeficiente de correlación es de -0.653 y la significancia bilateral es 0, con lo cual se demuestra una correlación alta. Por lo tanto, como r de Spearman se encuentra entre 0.5 y 0.8 y el Rho de Spearman es < 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

- **HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2**

HE₂ 0: El modelo predictivo de los modelos tradicionales presenta un menor error cuadrático en comparación con el modelo de redes neuronales artificiales.

HE₂ 1: El modelo predictivo de redes neuronales presenta un menor error cuadrático en comparación con los modelos tradicionales

Para contrastar la Hipótesis específica 2 es necesario hacer uso de los resultados de la tabla 15 dónde nos informa que la Red Neuronal artificial tiene un R^2 de 0.572, el modelo tradicional de Devine muestra un R^2 de 0.694 y el modelo en función del burden un R^2 de 0.7 en relación a los 23 datos que son para prueba, así todos los modelos fueron utilizados en las mismas condiciones, entonces los resultados obtenidos indican que bajo condiciones evaluadas y utilizando variables consideradas el modelo empírico tradicional muestra un menor error cuadrático rechazando la hipótesis y se acepta la hipótesis nula.

4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en la presente investigación, evidencian una adecuada concordancia con estudios previos nacionales en internacionales, que establecen a la distancia al punto de monitoreo y la carga por retardo, como herramientas eficaces para predecir las vibraciones en campo lejano por voladuras en una mina a tajo abierto, estos resultados también demuestran que el modelo de Devine & Duval como el modelo de las Redes Neuronales Artificiales muestran un alto índice de confiabilidad y precisión para predecir la velocidad pico partícula a diferentes Distancias.

En primer lugar, el modelo de Devine nos permite tener un ajuste de 62% respecto a los datos que conforman la curva con valores de $K = 1849.8$ y $\alpha = -1.73$; siendo esto coeficientes variables para cada mina debido a las condiciones geológicas, el tipo de explosivo diseño de malla de perforación. Esta afirmación se respalda con los estudios de Cornejo (2020) quien evidenció que para realizar el modelo de Devine es necesario realizar un filtrado riguroso de datos para tener un ajuste de 71%, así también Cáceres (2023) $K = 31.59$ y el valor de $\alpha = 0.9363$ y Ruiz y Suárez (2021) determinan que los valores de K es 22.292 y el valor de $\alpha = -0.015$, como se puede observar todos los valores son distintos y es imposible que en algún lugar se repitan.

Con respecto a la comparación de los dos modelos utilizando los mismos datos de prueba, se observó y se corroboró numéricamente que el modelo de Devine supero al modelo

de la Red Neuronal Artificial en término de coeficiente de determinación y error cuadrático medio. El buen desempeño del modelo de Devine se debe a que las Redes Neuronales Artificiales en la presente investigación solamente utilizan dos datos en su capa de entrada, caso contrario en el estudio de Valdivia (2023) dónde utiliza 7 datos para la capa de entrada como (UCS, RQD, distancia en 3 direcciones, número de taladros y la cantidad máxima por retardo) llega a tener un coeficiente de determinación de 0.88 y los modelos tradicionales de 0.61, así también Díaz (2024) utiliza 3 datos para su capa de entrada llegando a un coeficiente de determinación de 93.8%. Entonces quiere decir que a más datos la Red Neuronal Artificial funciona mejor que los tradicionales.

Finalmente, el mejor desempeño del modelo de Devine & Duval permitió, elaborar un ábaco para estimar la VPP en campo lejano a diferentes distancia, diferente cantidad de carga, herramienta que constituye un aporte práctico del presente estudio, que puede ser utilizada para la planificación del diseño de la voladura para no pasar los límites que establecen las diferentes normas internacionales y nacionales, a través del ábaco ya se puede predecir la VPP para la vivienda que está cerca del proyecto minero a 2577 metros con una carga promedio de 380 kg de Quantex 73 se estará llegando a un valor de 0.3 mm/seg, el cual está por debajo de los parámetros que establece la norma DIN 4150.

CAPITULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CONCLUSIONES.

Se logró predecir las vibraciones generado por los explosivos en una voladura a tajo abierto en campo lejano, mediante dos modelos para un modelo empírico (Devine & Duval) y el otro modelo basado en Redes Neuronales Artificiales. Ambos modelos de 148 datos presentan un coeficiente de determinación (R^2) de 0.69 y 0.57 respectivamente lo cual indica que los modelos de predicción son válidos para aplicarse en condiciones similares al área de estudio.

Se determinó que tanto la distancia al punto de monitoreo y la distancia escalada son los parámetros que mayor influencia tiene en la predicción de la VPP, estos parámetros demostraron una correlación inversa de -0.6 a mayor distancia menor vibración y con respecto a la cantidad de carga tiene una correlación, pero no es significativa por presentar un coeficiente de determinación > 0.05 , los demás parámetros no presentan correlación significativa con la VPP.

La comparación del desempeño predictivo del modelo de Devine con el modelo de la RNA realizada mediante indicadores estadísticos como coeficiente de determinación (R^2) y error cuadrático medio (RMSE) para los 23 datos del grupo de prueba, evidenció que el modelo de Devine presenta un mejor desempeño y esto se debe principalmente al número limitado de datos en la capa de entrada de la red neuronal a más datos mejorará los indicadores estadísticos del modelo Heurístico.

Con los modelos de predicción de vibraciones y con el ábaco desarrollado producto de la predicción de VPP, permite estimar previamente los niveles de vibración a límites de normas internacionales y por ende ajustar las variables operativas de una voladura, lo cual contribuye a la reducción de vibraciones minimizando los daños a estructuras dentro de la unidad minera y mitigando los posibles conflictos sociales de comunidades aledañas por daños a sus propiedades.

5.2. RECOMENDACIONES.

Se sugiere usar el modelo de Devine & Duval para medir la VPP en campo lejano, pero con mayor cantidad de datos para diferentes tipo de rocas y determinar el registro de onda elemental para que se complementen con el modelo de campo cercano (Holmberg and Pearson) para que la predicción sea más efectiva.

Se Recomienda realizar la correlación de otras variables operativas como, densidad del explosivo, tipo de roca, burden, espaciamiento, entre otros con la VPP y analizar si alguna de esas variables influye en las vibraciones.

En investigaciones futuras si se va hacer uso del modelo de Redes Neuronales Artificiales (RNA) se recomienda introducir más datos operativos de la voladura en su capa de entrada como: el tipo de roca, la cantidad de taladros, densidad del explosivo, tipo de explosivo entre otros, para que así el modelo sea más representativo y tengo menos margen de error que el modelo de Devine.

Para el diseño de malla de perforación, se sugiere utilizar el ábaco propuesto solamente para predecir las vibraciones en campo lejano, no hacerlo en campo cercano porque se estará incurriendo en errores altos y tomando decisiones equivocadas en el área de planeamiento, por tal motivo también se recomienda hacer registros más cercanos, realizar su propio modelo y otro ábaco de vibraciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Bernaola, J; Castilla, A; Herrera J. 2013. Perforación y voladura de rocas en minería. DOI: 10.20868/UPM.book.21848 Archivo Digital de UPM: <http://oa.upm.es/21848/>
- Cánovas, M; Arzúa J; Maleki M. 2021. Una revisión de los factores que afectan a la generación de vibraciones y modelos predictivos empíricos. <https://pdfs.semanticscholar.org/9d3a/df9dd20b9bf9247ba1833ba0739a2f341d49.pdf>
- Cáceres, M. 2023. 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. Tesis de pregrado. Cusco, Perú, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Chiappetta, F. 2014. New innovative blasting techniques to improve fragmentation, final highwalls and plant throughput. Pennsylvania, U.S.A.
- CINTEX (Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex) 2005. Manual de monitoreo de vibraciones generadas por voladuras, análisis y modelamiento. Chile.
- Contreras, W. 2009. Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones. Tesis de pregrado. Lima, Perú, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Córdova, D. 2010. Control de vibraciones por efecto de voladura. Lima, Perú.
- Cornejo, P; Huamán, P. 2020. Estimación de un modelo predictivo de vibraciones inducidas por voladura en campo medio y lejano para el cuidado de estructuras en una mina superficial en proceso de cierre. Tesis de pregrado. Lima, Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Cospedal, J. 2019. Utilización de la medida de vibraciones en voladuras para el conocimiento de los daños al macizo de roca ornamental. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10317/7809>
- Daza, A. 2016. Data Mining: Minería de datos. 1 ed. Lima, Perú, Macro.
- Delgado, R. 2017. Determinación del factor de carga mediante parámetros operativos y geomecánicos para el proceso de voladura de rocas – Minera Yanacocha. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero de Minas. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.

- Devine, J; Richard, H; Beek, H; Meyer, A; Duvall, W. 1966. Effect of charge weight on vibration levels from quarry blasting. Report of Investigation 6774. United States Bureau of Mines.
- Díaz, R. 2024. Predicción de vibraciones producidas por tronaduras mediante redes neuronales artificiales. Tesis de pregrado. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Dick, R A; Fletcher, L R; D'Andrea, D V. 1982. Explosives and blasting procedures manual. Washington, DC, United States Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Dueñas, J. 2018. Reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras en el Bypass 179. Tesis de Ingeniero de Minas. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú. Disponible en: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/8287>
- Exsa. 2019. Manual práctico de voladura. 5 ed. Lima, Perú, EXSA S.A.
- Falcón, J; Herrera, R. 2005. Análisis del dato estadístico. Universidad Bolivariana de Venezuela
- Guerrero, Y. 2022. Modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano para inferir vibraciones en voladuras masivas cerca a estructuras de concreto. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Herrera Yupanqui, R. 2020. Análisis y monitoreo de las vibraciones producidas por voladura para reducir daños al macizo rocoso en el TJ 753E de la UEA San Cristóbal – Minera Bateas S.A.C., Arequipa – 2020. Tesis. Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNMB_ae6359eec2d51f73e67c76c2b96ce5b2
- Hernández, R; Fernández, C; Baptista, M. 2014. Metodología de la investigación. 6 ed. México D.F., México, McGraw-Hill Education
- Hoek, E; Carranza, C. 2002. El criterio de rotura de Hoek-Brown. Canadá, Ingeniero consultor.
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España). 1985. Confección de una normativa sobre efectos dinámicos ocasionados por voladuras en rocas volcánicas en Tenerife. Madrid, España.
- ISSE (International Society of Explosives Engineers). 2008. Manual del especialista en voladura. 17 ed. USA, International Society of Explosives Engineers.
- Jiménez Paneque, R. 1998. Metodología de la investigación. Elementos básicos para la investigación clínica. La Habana, Cuba, Ciencias Médicas.
- López, C; López, E; García, P. 2003. Manual de perforación y voladura de rocas. 2 ed. Madrid, España.

- Martínez, R. 2020. El secreto detrás de una tesis. 1 ed. Lima, Perú.
- McKenzie, C. 1993. Methods of improving blasting operations. En: Hudson, J. Comprehensive rock engineering. Vol. 4. Oxford, England, Pergamon Press Ltd., p. 71–94.
- Oyanguren, P; Monge, L. 2004. Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes. Madrid, España, ETSI Minas.
- Persson, A; Holmberg, R; Lee, J. 1977. Rock blasting and explosives engineering. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press.
- Ruiz, A; Suárez, F. 2021. Diseño del modelo predictivo de vibraciones por voladura en una mina de oro a tajo abierto en Cajamarca, 2021. Tesis. Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11537/28248>
- Sabino, C. (1992). Planteamiento de la investigación. Que hacer Científico II, 23.
- Scherpenisse, C; Adamson, W; Díaz, J. 2000. Monitoreo y modelamiento de vibraciones para la evaluación y optimización de las voladuras de desarrollo horizontal. En: 4º Seminario Internacional de Seguridad Minera.
- Scherpenisse, C; Adamson, W; Díaz, J. 2006. Monitoreo y modelamiento de vibraciones para el control y evaluación del daño por voladuras. ASP Blastronics S.A.
- Singh, T N; Singh, V. 2005. Un enfoque inteligente para la predicción y el control de la vibración del suelo en minas. Ingeniería geotécnica y geológica 23(3):249–262
- Uysal, Ö; Arpaz, E; Berber, M. 2007. Studies on the effect of burden width on blast-induced vibration in open-pit mines. Environmental geology 53(3):643–650.
- Valdivia, R. 2022. Comparación de modelos empíricos tradicionales contra modelos predictivos de machine learning para la estimación de velocidad pico partícula en voladuras de cielo abierto. Tesis. Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú. Disponible en: <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/39e95d20-e3f3-4ef9-9577-3eaa4cb60d8f>
- Vásquez, N. 2013. Predicción de la ley de atenuación, frecuencia dominante y espectro de respuesta en vibraciones producidas por voladuras a cielo abierto. Tesis. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Disponible en: <https://oa.upm.es/14183/>

ANEXOS.

1. PROGRAMACIÓN EN PYTHON DEL MODELO DE RED NEURONAL PARA GRAFICAR LOS VALORES DEL GRUPO DE DATOS DE ENTRENAMIENTO Y CALCULAR EL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN

```
# Subir el archivo CSV al Google Colab
from google.colab import files
uploaded = files.upload()
import os
os.listdir()

# =====
# RED NEURONAL ARTIFICIAL - VPP
# =====

# 1. Descarga de Librerías
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score
from sklearn.neural_network import MLPRegressor

# 2. Cargar datos
data = pd.read_csv("datos_vpp.csv")

# Entradas: Distancia al punto y Carga por retardo
# Salida: VPP
X = data.iloc[:, 0:2].values
y = data.iloc[:, 2].values

# 3. Normalización de datos
scaler = StandardScaler()
X_scaled = scaler.fit_transform(X)

# 4. División de datos para red neuronal
# 70% entrenamiento, 15% validación, 15% prueba
X_train, X_temp, y_train, y_temp = train_test_split(
    X_scaled, y, test_size=0.30, random_state=42
)
X_val, X_test, y_val, y_test = train_test_split(
    X_temp, y_temp, test_size=0.50, random_state=42
)

# 5. Definición de la red neuronal
model = MLPRegressor(
    hidden_layer_sizes=(10, 8),
```

```

        activation='relu',
        solver='adam',
        max_iter=2000,
        random_state=42
    )
# 6. Entrenamiento de la red neuronal
model.fit(X_train, y_train)

# 7. Predicción (datos de prueba)
y_pred = model.predict(X_test)

# 8. Métricas de desempeño del modelo
rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred))
r2 = r2_score(y_test, y_pred)

print("RMSE:", rmse)
print("R²:", r2)

# 9. Gráfica VPP medida vs VPP predicha
plt.figure()
plt.scatter(y_test, y_pred)
plt.plot([y_test.min(), y_test.max()],
         [y_test.min(), y_test.max()])
plt.xlabel("VPP medida (mm/s)")
plt.ylabel("VPP predicha (mm/s)")
plt.title("VPP medida vs VPP predicha - Red Neuronal")
plt.grid(True)
plt.show()

# 10. Erchivo Excel
X_test_original = scaler.inverse_transform(X_test)

df_resultados = pd.DataFrame({
    "Distancia": X_test_original[:, 0],
    "Carga_por_retardo": X_test_original[:, 1],
    "VPP_real": y_test,
    "VPP_predicha": y_pred,
    "Error": y_test - y_pred
})

df_resultados.to_excel("resultados_prueba_RNA.xlsx", index=False)

print("Archivo Excel generado: resultados_prueba_RNA.xlsx")

# Predicción con datos de entrenamiento
y_train_pred = model.predict(X_train)
r2_train = r2_score(y_train, y_train_pred)

print("R² entrenamiento:", r2_train)

```

```
# Gráfica para el grupo de entrenamiento

plt.figure()
plt.scatter(y_train, y_train_pred)
plt.plot([y_train.min(), y_train.max()],
         [y_train.min(), y_train.max()])
plt.xlabel("VPP medida (entrenamiento)")
plt.ylabel("VPP predicha")
plt.title("Ajuste del modelo - Datos de entrenamiento")
plt.grid(True)
plt.show()
```

2. REGISTROS DE LA VPP EN LA POZA YENI

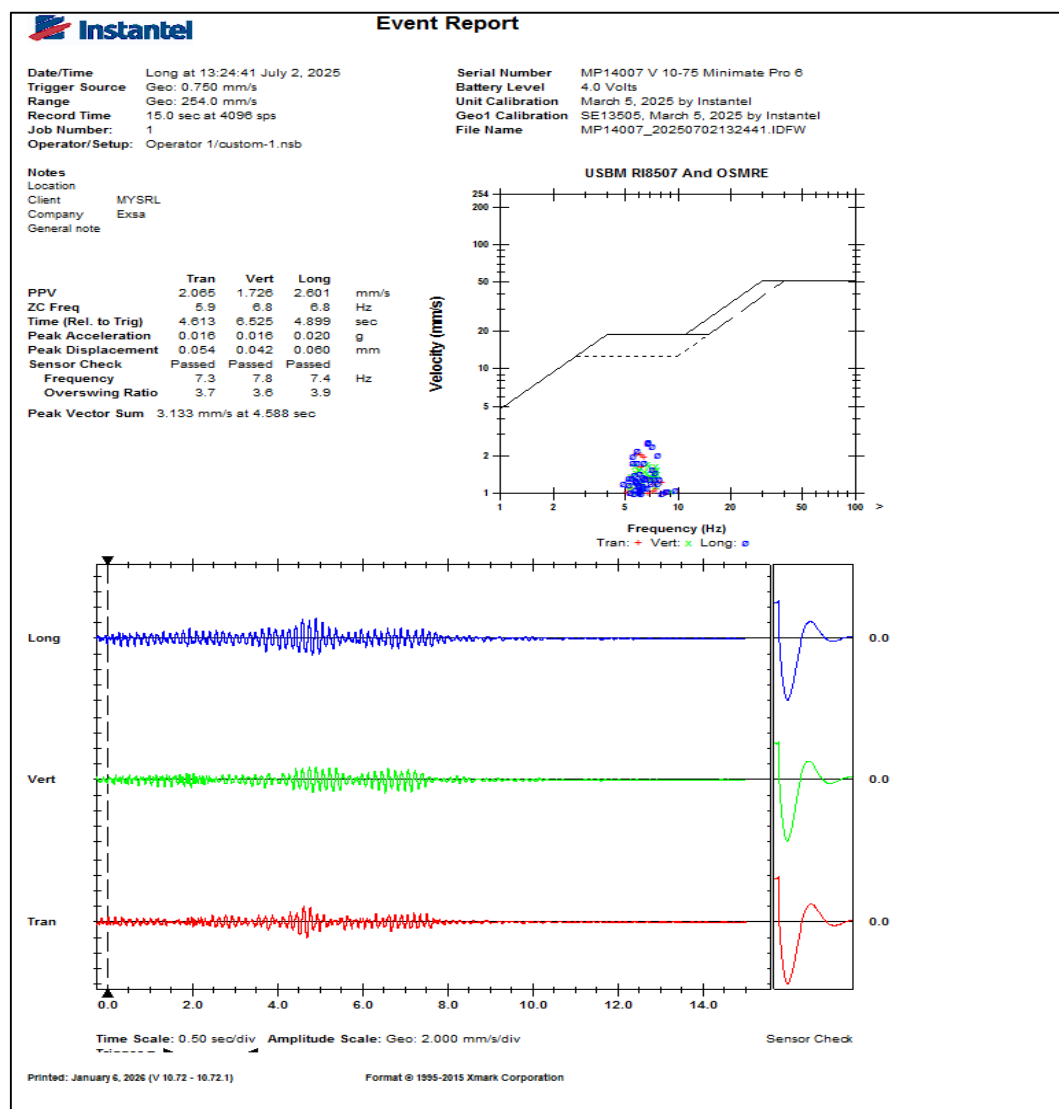


Figura 57 Registro de las vibraciones del 02/07/2025

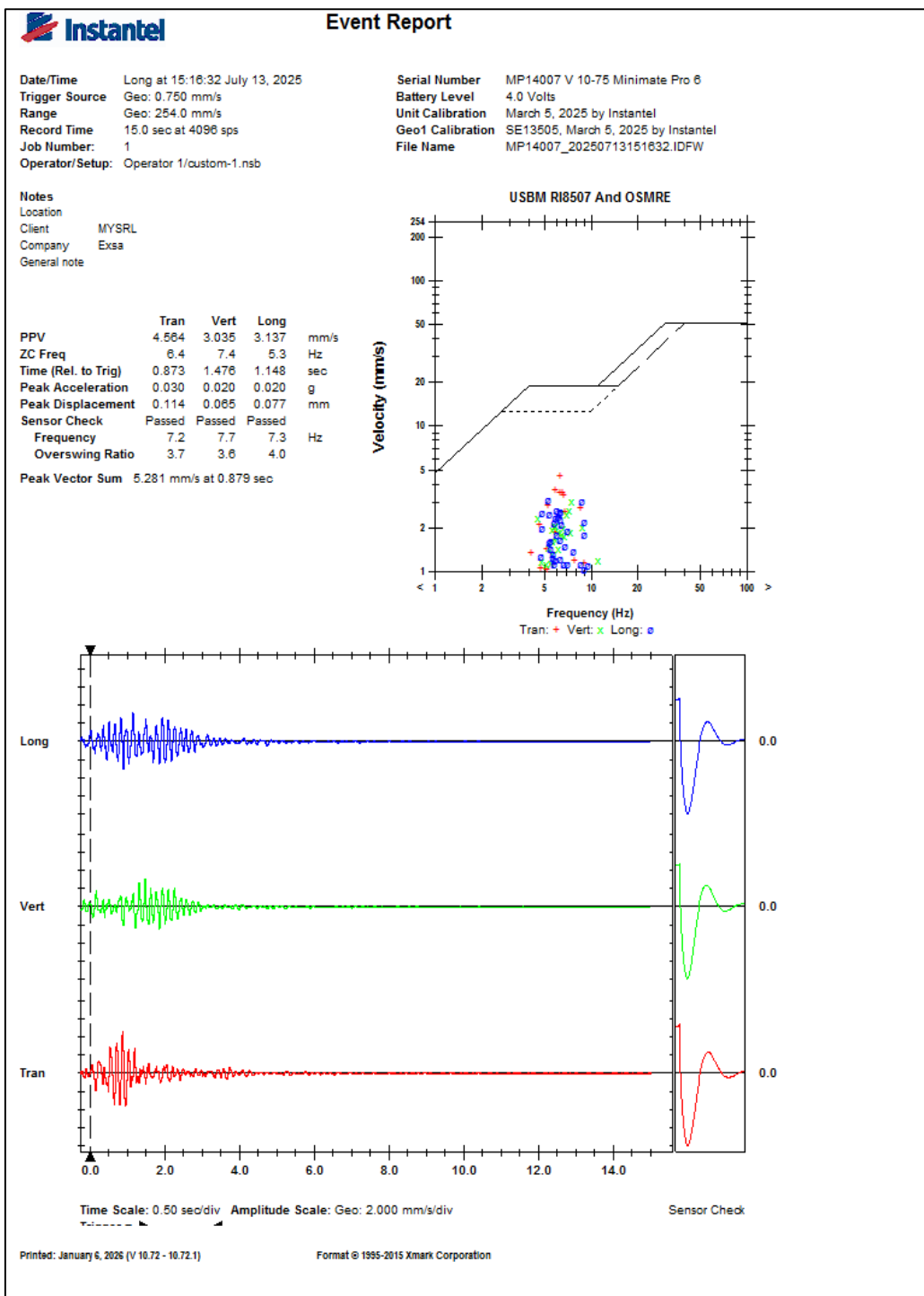


Figura 58 Registro de la VPP del 13/07/2025

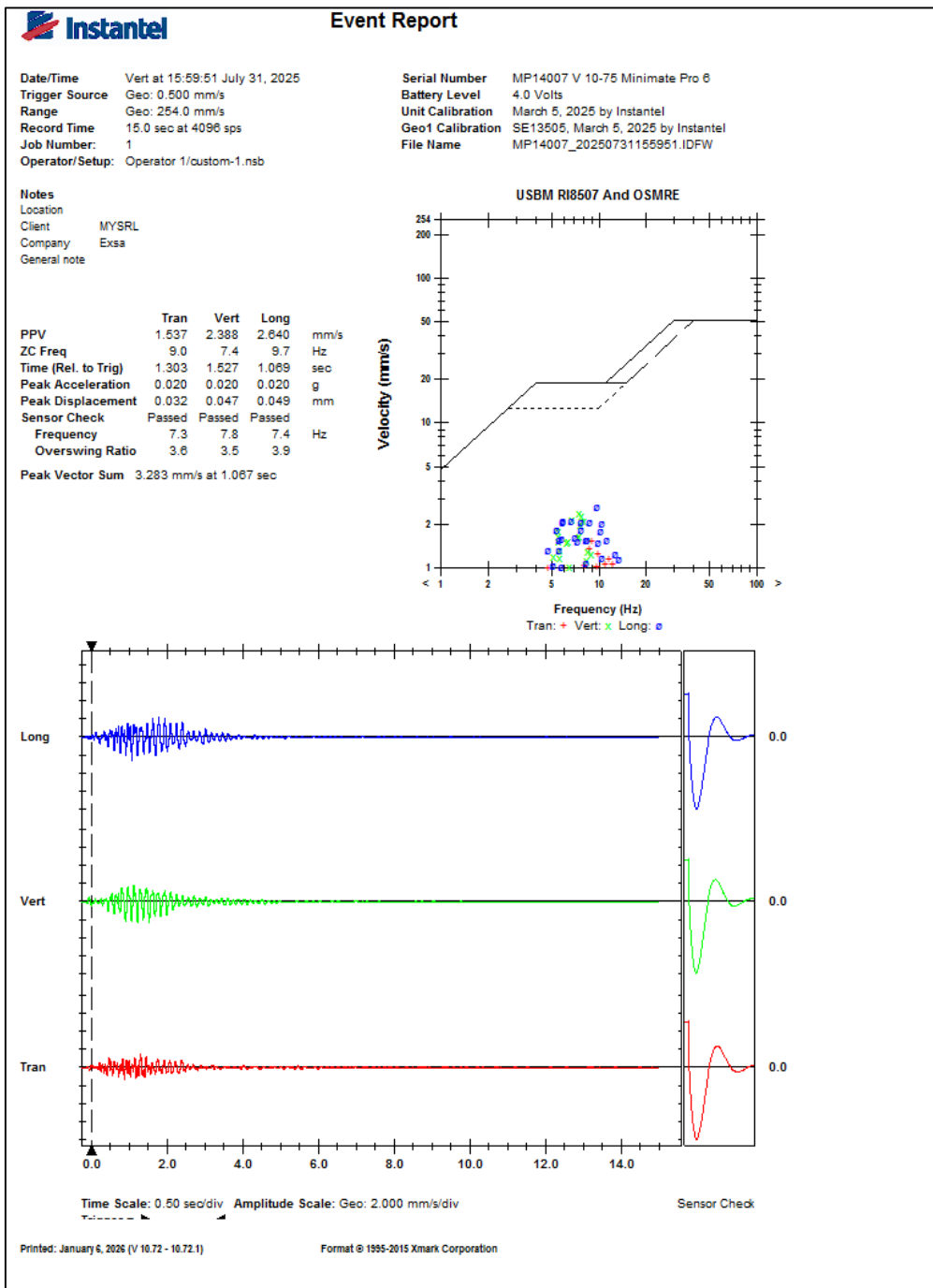


Figura 59 Registro de VPP del 31/07/2025



Event Report

Date/Time Vert at 15:48:44 August 8, 2025
Trigger Source Geo: 0.510 mm/s, Mic: 69.00 pa.(L)
Range Geo: 254.0 mm/s
Record Time 9.0 sec at 1024 sps
Job Number: 1

Serial Number BE21139 V 10.72-8.17 MiniMate Plus
Battery Level 6.3 Volts
Unit Calibration July 9, 2025 by Geoteknik
File Name W139L6UB.X80

Notes

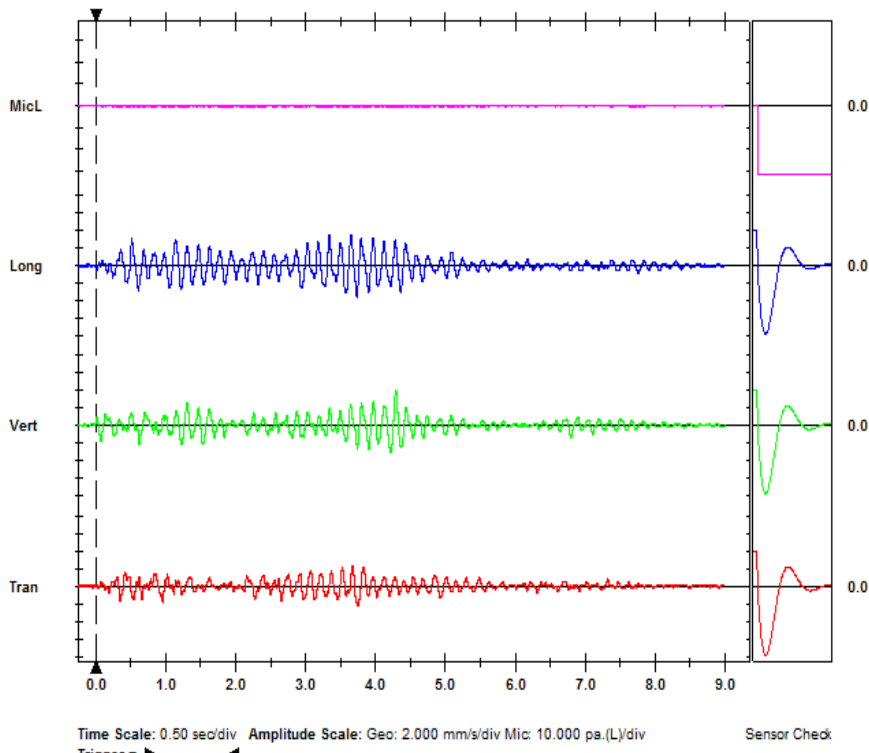
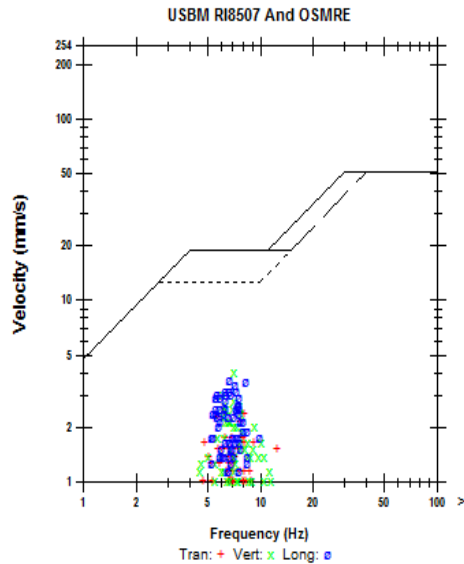
Location:
Client:
User Name:
General:

Extended Notes

Microphone Linear Weighting
PSPL 0.500 pa.(L) at -0.238 sec
ZC Freq >100 Hz
Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	2.413	4.064	3.683	mm/s
ZC Freq	8.1	7.0	6.6	Hz
Time (Rel. to Trig)	3.670	4.285	3.730	sec
Peak Acceleration	0.027	0.027	0.027	g
Peak Displacement	0.065	0.088	0.089	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.4	7.3	Hz
Overswing Ratio	3.7	3.8	4.0	

Peak Vector Sum 5.011 mm/s at 4.285 sec



Printed: January 6, 2026 (V 10.72 - 10.72.1)

Format © 1995-2015 Xmark Corporation

Figura 60 Registro de la VPP del 08/08/2025

3. MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 21. Matriz de Operacionalización de variables

	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADOR	UNID. DEL INDICADOR
VARIABLE DEPENDIENTE				
Velocidad pico de partícula (VPP)	Es un parámetro numérico obtenido del registro de un sismógrafo instalado a una distancia de la voladura y corresponde al valor registrado por cada voladura	La magnitud de la vibración en sus 3 ejes (longitudinal, transversal y vertical), el vector resultante	Valor máximo de la velocidad registrada	mm/s o pie/s
VARIABLE INDEPENDIENTE				
Carga por retardo (W)	Es la cantidad de recarga que se utiliza en 7 ms, determinado a partir del diseño de voladura	Tipo de explosivo empleado y cantidad de explosivo por retardo	Peso del explosivo por retado	Kg o lb
Distancia al punto de monitoreo (R)	Es el recorrido que hace la onda desde la malla de perforación hasta el punto de monitoreo	Distancia horizontal al punto de medición	Dirección de la propagación de onda Distancia al punto de monitoreo	m o km
Tipo de roca	Se identifica mediante observación geológica y pruebas geomecánicas	Propiedades geológicas	Tipo de roca	Suave media y dura
Modelo de vibraciones	Se desarrolla basado en las redes neuronales o aplicaciones matemáticas	Modelo Heurísticos Modelo empíricos	Parámetros de K y alfa Coeficiente de relación	Adimensional alto, bajo porcentaje

4. CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL SISMÓGRAFO



Calibration Certificate

Part Number: 716A0403
Description: MINIMATE PLUS W/EXT. GEO
Serial Number: BE18028
Calibration Date: January 17, 2025
Calibration Reference Equipment: 718A1501

Instantel certifies that the above product was calibrated in accordance with the applicable Instantel procedures. These procedures are part of a quality system that is designed to assure that the product listed above meets or exceeds Instantel specifications.

Instantel further certifies that the measurement instruments used during the calibration of this product are traceable to the National Institute of Standards and Technology; or National Research Council of Canada. Evidence of traceability is on file at Instantel and is available upon request.

The environment in which this product was calibrated is maintained within the operating specifications of the instrument.

Please note that the sensor check function is intended to check that the sensors are connected to the unit, installed in the proper orientation and sufficiently level to operate properly. This function should not be confused with a formal calibration, which requires the sensors be checked against a reference that is traceable to a known standard. Instantel recommends that products be returned to Instantel or an authorized service and calibration facility for annual calibration.

Calibrated By: Yaksh Patel
Yaksh Patel

Instantel 309 Legget Drive, Ottawa, Ontario, K2K 3A3, (613) 592-4642

© 2023 Xmark Corporation. Instantel and Instantel logo are trademarks of Xmark Corporation or its affiliates. 71405201 Rev 24

Calibration Certificate

Part Number: 714A9701

Description: TRIAXIAL GEOPHONE (ISEE)

Serial Number: BG17067

Calibration Date: January 21, 2025

Calibration Reference Equipment: 714J7403

Instantel certifies that the above product was calibrated in accordance with the applicable Instantel procedures. These procedures are part of a quality system that is designed to assure that the product listed above meets or exceeds Instantel specifications.

Instantel further certifies that the measurement instruments used during the calibration of this product are traceable to the National Institute of Standards and Technology; or National Research Council of Canada. Evidence of traceability is on file at Instantel and is available upon request.

The environment in which this product was calibrated is maintained within the operating specifications of the instrument.

Please note that the sensor check function is intended to check that the sensors are connected to the unit, installed in the proper orientation and sufficiently level to operate properly. This function should not be confused with a formal calibration, which requires the sensors be checked against a reference that is traceable to a known standard. Instantel recommends that products be returned to Instantel or an authorized service and calibration facility for annual calibration.

Calibrated By: 

Yuri Frenkel



Instantel

309 Legget Drive, Ottawa, Ontario, K2K 3A3, (613) 592-4642

5. PANEL DE FOTOS



Foto 1 Colocación del Booster



Foto 2 Medición de la cantidad de carga por taladro

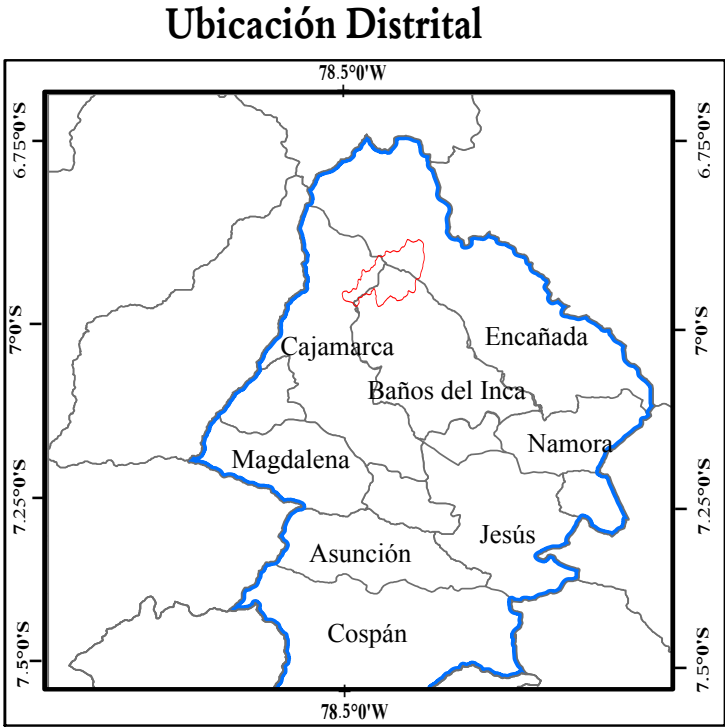
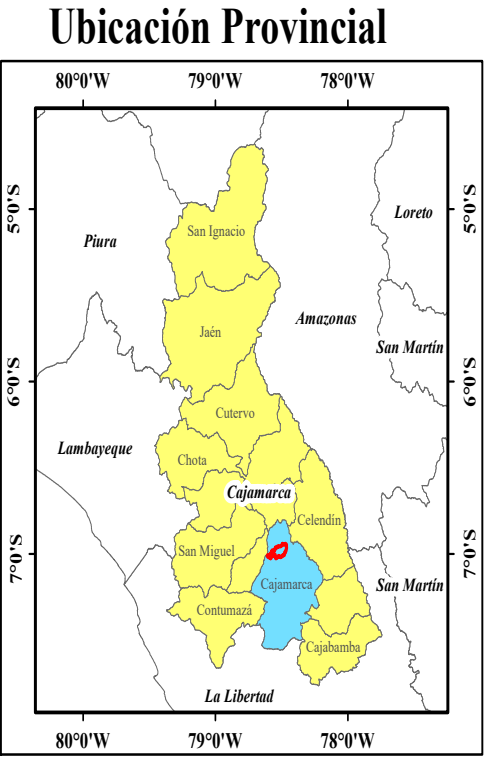
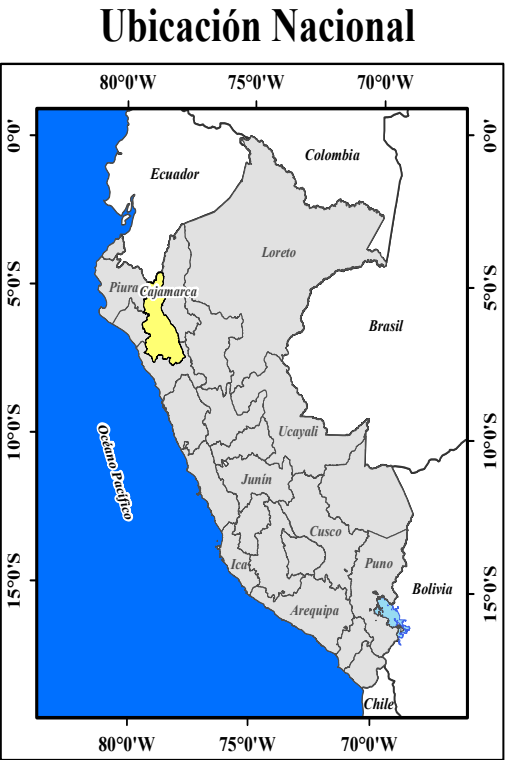
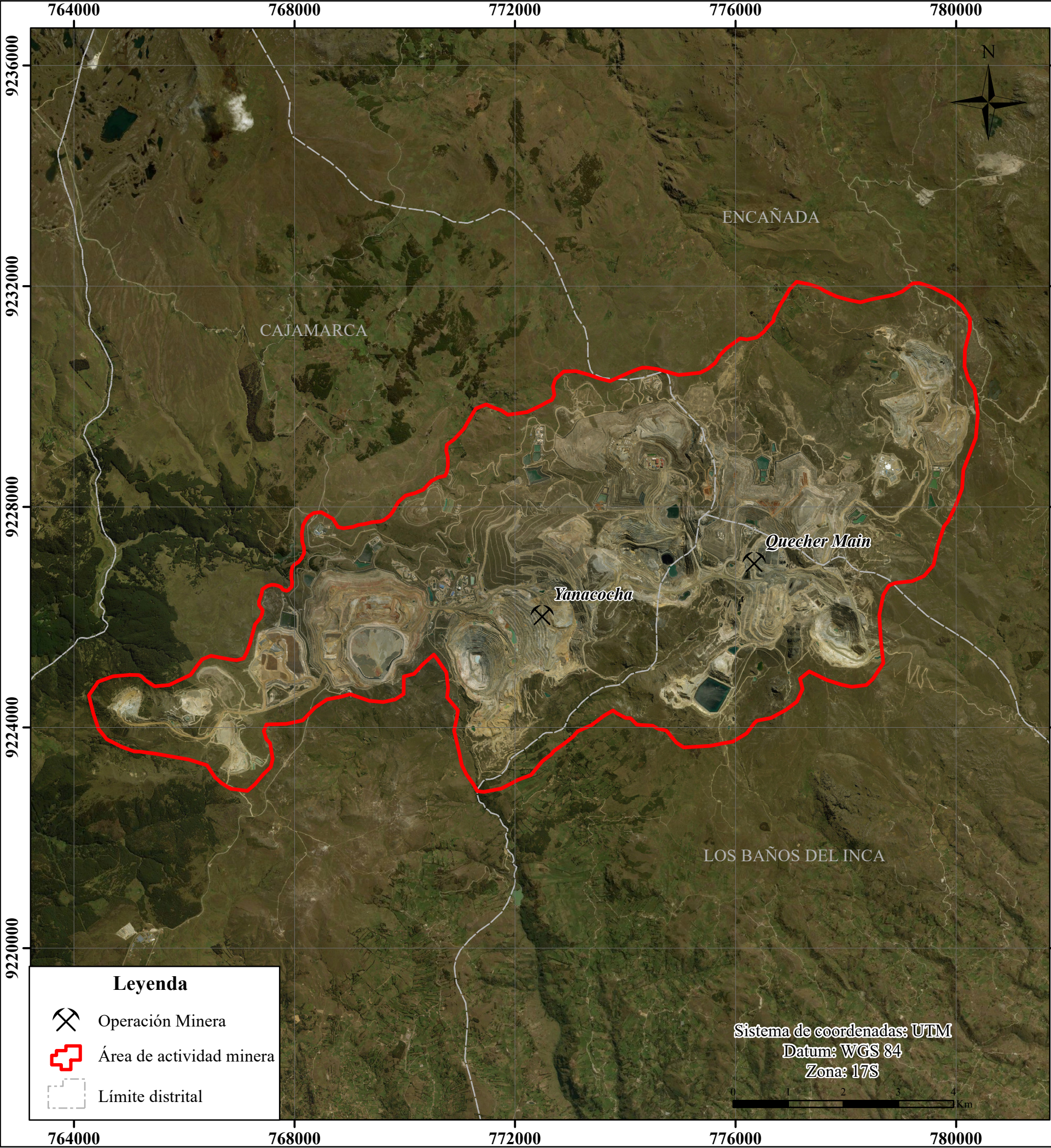


Foto 3 Instalación de sismógrafo.



Foto 4 Al geófono se le coloca un peso para mejor registro

6. PLANO DE UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y PLANO DE UBICACIÓN DEL SISMÓGRAFO



Leyenda

- Operación Minera
- Área de actividad minera
- Límite distrital

Sistema de coordenadas: UTM
Datum: WGS 84
Zona: 17S

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS				P 01
TESIS: PREDICCIÓN DE VIBRACIONES EN CAMPO LEJANO PARA ESTIMAR LA VPP EN UNA MINA TAJO ABIERTO				
PLANO: UBICACIÓN DE LA MINA EN ESTUDIO				
TESISTA: HANSELL YANINI COTRINA ANGULO				
ASESOR: M. CS. ING. ELMER OVIDIO LUQUE LUQUE				
ESCALA: 1:75 000	DATUM: WGS84 - UTM ZONA 17 S	FECHA: ENERO, 2025		

