

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“DISEÑO DEL MODELO PREDICTIVO DE VIBRACIONES
POR VOLADURA EN UNA MINA DE ORO A TAJO ABIERTO
EN CAJAMARCA, 2021”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas



Autores:

Alexis Armando Ruiz Altamirano
Fresia Marina Suarez Arrivasplata

Asesor:

Ing. Víctor Eduardo Alvarez León

Cajamarca - Perú

2021

DEDICATORIA

Eres la mujer que simplemente me llena de orgullo, la más amada y respetada por mi persona, ya que desde que mi padre partió al cielo, tú has sido una mujer digna de admirar por el esfuerzo y sacrificio que haces día a día para sacarme adelante, te amo y no hay manera de devolverte todo lo que me has brindado. De no ser por ti no sería ni la mitad de lo que soy ahora, gracias madre por creer y confiar en mí, gracias Dios por la vida de mi madre, y gracias a la vida por permitirme verla y disfrutar cada día a su lado. Este y todos mis logros van dedicados para ti y para mi padre que nos ilumina desde el cielo, les doy mis infinitas gracias, por haberme traído a este mundo.

Alexis.

Le doy gracias a Dios por darme la dicha de tener dos valiosos tesoros que son todo en mi vida mi Padre y mi Madre, por sacarme adelante con mucho esfuerzo, les debo todo lo que soy, y todos mis logros van dedicados para ustedes que nunca me dejaron sola.

Fresia.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por brindarme la vida y la salud, en segundo lugar, a mi madre por apoyarme día a día y a mi padre por su bendición desde el cielo, en tercer lugar, a mi enamorada que siempre está a mi lado y me ayuda a ser mejor persona cada día, a mis amigos por estar siempre a mi lado en los buenos y malos momentos, por darme fuerza y apoyo incondicional, todos ellos me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora. Les doy las gracias de todo corazón.

Alexis.

En primer lugar, a Dios por guiar mis pasos cada día y en cada momento y por fortalecer los sueños y ansias en ser una gran profesional, a mis padres, a mi hermana y mi enamorado por el apoyo incondicional y por creer en mí, a los docentes por brindarme sus conocimientos, gracias a todos por hacer posible la realización de este trabajo.

Fresia.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
RESUMEN	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	23
2.1. Tipo de investigación	23
2.2. Población y muestra	24
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	29
2.4. Procedimiento	34
CAPÍTULO III. RESULTADOS	35
3.1. Resultados de las mediciones en campo lejano de las vibraciones por voladura para análisis de regresión	26
3.2. Modelo predictivo de las vibraciones por voladura en campo lejano	32
3.3. Comparación de los resultados de las VPP con las VPP predictiva	32
3.4. Comparación de las VPP con las Normas USBM y MINEM	32
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	49
REFERENCIAS	54
ANEXOS	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterio United States Bureau of Mines (USBM)	12
Tabla 2. Límites de vibración máxima de tierra (MINEM)	13
Tabla 3. Relación de datos registrados en 13 pruebas de voladura.....	32
Tabla 4. Recursos utilizados para el monitoreo de vibraciones	35
Tabla 5. Resultados en campo lejano de las vibraciones por voladura para análisis de regresión.....	39
Tabla 6. Mediciones en campo lejano de las vibraciones por voladura durante el año 2019.....	41
Tabla 7. Mediciones en campo lejano de las vibraciones por voladura durante el año 2020.....	42
Tabla 8. Resultados de las VPP con el VPP predictivo	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Propagación de las vibraciones por voladura de un movimiento ondulatorio en un medio.....	21
Figura 2. Representación gráfica de la onda P.....	22
Figura 3. Representación gráfica de la onda S.....	22
Figura 4. Representación gráfica de la onda R.	22
Figura 5. Velocidad Pico Partícula vs Escalador.....	33
Figura 6. Datos de campo sin outlier y Modelo Predictivo.....	34
Figura 7. Configuración triaxial del Geófono	36
Figura 8. Instalación del Sismógrafo White.....	36
Figura 9. Configuración espacial del geofono dentro del taladro	37
Figura 10. Representación gráfica del modelo matemático de las vibraciones por voladura durante el año 2019 y 2020.....	44
Figura 11. Representación gráfica del modelo matemático de las vibraciones por voladura durante el año 2019.....	45
Figura 12. Representación gráfica del modelo matemático de las vibraciones por voladura durante el año 2020	45
Figura 13. Comparación de VPP con las Normas USBM y MINEM	48

RESUMEN

El objetivo general de la investigación fue diseñar un modelo predictivo de vibraciones por voladura en una mina de oro a tajo abierto en Cajamarca. En la empresa minera estudio se vienen desarrollando operaciones a tajo abierto, el cual involucra realizar voladuras cercanas a la población, por ello con la finalidad de minimizar el nivel de vibraciones para evitar riesgos a la población cercana y ante la falta de un modelo, se realizó un diseño de modelo predictivo de vibración mediante ensayos reales en zonas críticas, para que los resultados de las vibraciones puedan ayudarnos a obtener un modelo predictivo en base al campo lejano de Devine, para así poder predecir los niveles de vibraciones con el fin de optimizar factores que incidan en el nivel de vibraciones, entre ellos los más importantes, carga por retardo, la distancia, etc. El diseño de modelo predictivo de vibración de voladuras fue desarrollado a diferentes distancias y con diferentes cargas por retardo. Se realizaron monitoreos de vibraciones en 67 proyectos de voladura para contrastar la simulación recopilando los resultados obtenidos en cada una de ellas. Las mediciones de la velocidad pico partícula (VVP) tienen un valor mínimo de 20.97 mm/s, valor máximo de 22.16 mm/s, valor promedio de 21.70 mm/s, el coeficiente de regresión R^2 es 1 y el CV de la VVP es 0.92%, el cual indica que todas las mediciones del VVP son homogéneas (menor al 5% de aceptación) indicando que el promedio de las VVP representa en forma adecuada al conjunto de las 67 mediciones de vibraciones realizadas. Dichos resultados nos dieron parámetros que fueron ordenados en una base de datos y analizados se logró obtener el modelo predictivo de vibración a campo lejano para la mina a tajo abierto en Cajamarca definido como $VVP = 22.292\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{-0.015}$, a un nivel de confianza del 95%, para poder obtener las simulaciones cuando se trabaja en una roca con dureza promedio con un RMR entre 22 – 55 con un valor promedio de 43, Clasificación de roca III).

Palabras clave: Modelo predictivo, Velocidad pico partícula (VVP), vibraciones, voladura.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El presente estudio responde a la necesidad de la Empresa Minera en Cajamarca de generar un Modelo de Vibraciones por voladura en el tajo que prediga las diferentes intensidades de vibración de acuerdo a la zona y distancia respecto a las casas aledañas de la zona a explotar y de esta manera ajustar las cargas explosivas y retardo de acuerdo al modelo matemático, que brinde una seguridad para minimizar los daños en las estructuras cercanas a la zona.

Al conocer la magnitud de daño producido por la voladura, permitirá a la empresa minera controlar los niveles de vibraciones de ciertas voladuras que superen a los límites establecidos y también el de evitar los problemas sociales generados por el malestar de la gente de la comunidad que tienen sus casas cerca de la operación minera, las cuales pueden causar fallas en sus estructuras. Para esto el área de Geotecnia de la Empresa Minera en estudio, estableció el monitoreo de vibraciones generadas por las voladuras como la herramienta de análisis y evaluación para generar un modelo confiable.

En el mercado se comercializan explosivos, mezclas explosivas y accesorios de voladura que las empresas mineras los utilizan para extraer los minerales de la corteza terrestre, los cuáles al ser iniciados inducen las vibraciones que, si estas no son controladas, monitoreadas, mitigadas y/o evitadas, traen consigo consecuencias fatales y pérdidas económicas elevadas (Miranda A. y Diaz E., 2015).

Por otro lado la naturaleza de por sí irregular de los terrenos (presencia de distintos tipos de materiales, presencia de grietas y fisuras naturales con o sin relleno, con o sin agua) así como por la variabilidad en la cantidad de energía empleada en generar vibraciones en las voladuras, la obtención de estas expresiones matemáticas se hace

mediante ensayos, que constituyen lo que se llama un estudio de vibraciones (Miranda A. y Diaz E., 2015).

Las vibraciones en voladura, representan un estado de esfuerzos inducidos en el macizo rocoso, producido por la detonación del explosivo en los taladros de perforación, resultando en la fragmentación de la roca, pero también en daño al macizo rocoso adyacente, incluyendo las paredes del tajo (Cameron y Arriagada, 2006).

Se entiende por vibraciones los fenómenos de transmisión de energía mediante la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio. El fenómeno de vibraciones queda caracterizado por una fuente o emisor, esto es, un generador de vibraciones, y por un objeto o receptor de las mismas. El fenómeno de las vibraciones se manifiesta mediante un movimiento ondulatorio (Bernaola J. et al, 2013).

La velocidad vibracional de partículas se relaciona frecuentemente con la habilidad para inducir fracturas frescas, a través de la relación entre la velocidad de partículas y la deformación de la partícula, y está muy relacionada con la masa rocosa en la vecindad inmediata de los hoyos, donde el impacto de la tronadura es más pronunciado. Debido a su relación con la deformación inducida, el análisis de la velocidad de partícula tiene la habilidad de tratar métodos para controlar el grado y extensión de las fracturas inducidas por la voladura, sugiriendo un método de prevención más que correctivo.

La intensidad de las vibraciones terrestres y onda aérea en un punto determinado, pueden causar algún tipo de molestias en las viviendas más cercanas al punto de la voladura, la cual varía de acuerdo a la carga del explosivo que es detonado y a la distancia de dicho punto al lugar de la voladura (Peralta y Mojica, 2012).

Antes de iniciar la explotación minera es necesario realizar una evaluación previa de las consecuencias de las vibraciones sobre las construcciones y la molestia de los pobladores en torno al área de influencia de la voladura. Para ello es necesario prever los niveles de vibración a diferentes distancias del lugar de detonación. Eso es hoy posible gracias a las investigaciones que se han desarrollado a partir de los años 30. Desde esa época se trabaja en la búsqueda de una relación empírica entre alguna medida de la energía de la vibración y la probabilidad de daños a construcciones habitacionales y otras estructuras de las cercanías; de una relación empírica entre la carga detonada y la energía de la vibración, en función de la distancia; de equipos capaces de captar las vibraciones de manera precisa, fiable y reproducible; de los límites máximos admisibles de vibración; y de las medidas económicamente viables a ser tomadas para evitar que las vibraciones sobrepasen esos límites máximos (Enrique, 2012).

Si la propagación de las ondas de choque por el macizo rocoso pudo luego ser comprendida satisfactoriamente, el comportamiento de estructuras sometidas a vibraciones transitorias demoró más a ser modelado. En efecto, se midió y se previno los niveles de vibraciones transmitidas por el macizo rocoso y por la capa de suelo a la altura de las fundaciones de esas estructuras, pero su comportamiento dinámico y la forma como transmiten y amortiguan las vibraciones que les llegan a partir de las fundaciones fueron incorporaciones más recientes a la investigación (Enrique, 2012).

Una de las primeras investigaciones respecto de las vibraciones producidas por el desmonte de rocas con explosivos y sus efectos sobre estructuras se deben a U.S.

En la mayoría de países desarrollados se ha diseñado normas aplicadas a su realidad por el tipo de estructuras, las cuales les brinda la posibilidad a las empresas mineras de tener pautas para saber si sus voladuras realizadas en sus tajos, pueden generar

daño a las estructuras cercanas; así de esta manera sus valores pueden controlar las vibraciones generadas proponiendo criterios de limitación a las minas.

En estos países los límites que se establecen, equivalen a patrones de orden ambiental, los cuáles son respetados por las empresas mineras. Los países que no han generado estos límites permisibles para los tipos de estructuras localizadas en sus terrenos, generalmente utilizan las normas utilizadas por estos países, lo cual no representa que la medida no es correcta sino aproximada porque difieren en los tipos de estructuras que se tienen. Por consiguiente, se recomienda que cada país genere sus propias normas con respecto a estos temas para evitar los problemas existentes entre las diferentes realidades que hay entre las estructuras de los países desarrollados en comparación con las estructuras de los países en vía de desarrollo.

Las normas internacionales más destacadas en los países del entorno europeo son las siguientes: Alemania (DIN 4150), Francia (GFEE), Gran Bretaña (BS 7385), Suecia (SS460 48 66), Portugal (NP-2074), Internacional (ISO 2631), Estados Unidos: (USBM RI 8507), Norma Unión Europea y otras (Pampacata, 2015).

En la mayor parte de estas normas, existen criterios generales de limitación de vibraciones, los cuáles son bastante parecidos. Entre estos criterios tenemos:

- a) La Variación de la velocidad pico partícula (VPP) con la frecuencia, es de forma directamente proporcional a la misma.
- b) Consideración de varios tipos de estructuras generales distintas (según el nivel de resistencia adherido en el momento de su construcción) y exclusión de ciertas estructuras especiales como lo son túneles, puentes, represas, entre otros.
- c) Establecimiento de unos criterios de cálculo de la frecuencia predominante basados en hallar el espectro de frecuencias mediante un análisis FFT de los registros de vibraciones.

Aun cuando existen similitudes de los criterios utilizados para la determinación de los diferentes límites, cada norma tiene un rasgo que la hace propia y que, de la misma manera, suele representar alguna circunstancia particular del país o zona de origen. Por ejemplo, podríamos mencionar algunos casos como: la consideración especial de las varias casas de madera existentes en Estados Unidos, la alta frecuencia del número de voladuras en Suecia, la ponderación por factores socioculturales en Gran Bretaña, entre otros.

El USBM (United States Bureau of Mines), es una organización líder en el campo de la investigación de los efectos de una voladura, analizando desde hace varias décadas la generación de vibraciones, su propagación y el impacto que tienen en las diferentes estructuras que existen. Esta Organización menciona que, la capacidad de una onda para generar daño a una estructura se debe a dos variables críticas: la velocidad pico partícula (VPP) y la frecuencia. Como resultado han generado a partir de gran cantidad de información una serie de análisis para poder controlar los efectos negativos de las vibraciones en estructuras, creando una tabla de control de vibraciones, que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Criterio United States Bureau of Mines (USBM)

Distancia al area de voladura	VPP (mm/s)
0 a 90 m	32
90 a 1500 m	25
> 1500 m	19

Referencia: Pampacata (2015)

En el Perú, la Normatividad Peruana para poder controlar los efectos negativos de las vibraciones en estructuras, se referencia a la Guía Ambiental para Perforación y Voladura en Operaciones Mineras - Sub Sector de Minería – Dirección General de Asuntos Ambientales, que fue promulgada en setiembre 1995.

Tabla 2

Límites de vibración máxima de tierra en la Normatividad Peruana

Distancia desde el area de voladura	Velocidad de partícula pico máxima permitida($V_{m\acute{a}x}$) para vibración de tierra
0 a 91 m	31.75
92 a 1524 m	25.40
> 1525 m	19.05

Referencia: *Guía Ambiental para la Perforación y Voladura en Operaciones Mineras – MINEM, 1995*

En la norma peruana, la vibración máxima de tierra no deberá exceder los límites en donde se encuentre cualquier vivienda, edificio público, colegio, iglesia, o edificios comunal o institucional fuera del área de voladura. La vibración de tierra se medirá como velocidad de partícula. La velocidad de partícula deberá registrarse en tres direcciones recíprocamente perpendiculares. La velocidad de partícula pico máxima permitida se deberá aplicar a cada una de lastres mediciones. Aplicable a la ecuación de distancia a escala.

Diversos autores indican que hay una relación directa entre la velocidad máxima de vibración y los daños de estructuras, en función de altas tensiones dinámicas que pueden alcanzar. La mayoría de criterios de daños tienen en cuenta la frecuencia característica de las vibraciones. Esta circunstancia se debe a la prevención de efectos en edificios que se atribuyen a vibraciones con frecuencias próximas a la frecuencia natural de este denominado fenómeno de resonancia. Los datos de observación

demuestran que, a una cierta distancia de la fuente de vibraciones o movimiento del terreno, posee un pequeño intervalo de frecuencias, que es debido al efecto de filtración del propio terreno. El criterio de prevención más exigente en lo que respecta a normativas internacionales para control de vibraciones, es la norma alemana DIN 4150, con una velocidad máxima de partícula de 3 mm/s, para viviendas particularmente delicadas. Para tipos de estructuras habitacionales e industriales este valor no debe pasar los 5 mm/s y 20 mm/s, respectivamente (Peralta y Mojica, 2012). Un elemento importante en el proceso de evaluación y optimización de la operación de voladura, es poder predecir a través de un modelo, las consecuencias y beneficios al introducir cambios en los parámetros más relevantes de una voladura, sin que ello deba necesariamente tener que realizarse a escala real. Se pueden distinguir diferentes enfoques asociados al modelamiento de vibraciones, los cuales tienen como objetivo final predecir los niveles de vibración (velocidad de partículas), en un punto específico de acuerdo a un diseño de voladura dado.

(Rouse, 2015) en su trabajo de investigación para la Universidad de Ciencia y Tecnología, Missouri, Estados Unidos, en el año 2015, hace mención que con el paso de los años los ingenieros se han esforzado por comprender y minimizar los efectos potencialmente negativos de las vibraciones producidas por voladura los cuales hacen uso de diferentes métodos para dicha evaluación, estos varían desde simples cálculos de campo hasta complejas simulaciones por computadora, plantean también, que existen herramientas empíricas actuales que evalúan los efectos de las vibraciones de una voladura presentes en un enfoque estadístico que se utiliza para analizar el efecto relativo de cada variable en la amplitud, frecuencia y duración de una forma de onda de vibración presentes en una voladura utilizando datos de una

colección de pruebas las cuales identifican las variables estadísticamente significativas que afectan las vibraciones de una voladura ayudando a reducir los efectos ambientales de las vibraciones en las estructuras.

(Kahriman, 2010) de Turquía, en su investigación plantea que los problemas ambientales como la vibración a menudo se enfrentan y discuten en las operaciones de minería, canteras, construcción civil, túneles, tuberías y presas, donde las voladuras son inevitables. Las vibraciones que surgen de la excavación con voladura es uno de los problemas fundamentales en la industria minera. Por lo tanto, las predicciones de los componentes de vibraciones juegan un papel importante en la minimización de las quejas ambientales. En este estudio, durante el análisis estadístico de los datos recopilados. Finalmente, se estableció y propuso una norma de criterio de daño basada en el análisis de riesgo utilizando estos datos recopilados. A la luz de la norma que se obtenga de los datos que fueron recolectados en la investigación, conducirá a que los trabajos de excavación en nuestro país se realicen de tal manera que sean más efectivos y causen mínimos problemas ambientales.

(Scherpenisse, 2000) en el 4º Seminario Internacional de Seguridad Minera, indica que los efectos de vibración pueden dañar estructuras aledañas, que producen fracturas nuevas o extendiendo y dilatando fracturas existentes, teniendo el conocimiento sobre las vibraciones producidas por las voladuras permitirán estimar la probabilidad de perjuicios que pueden ocasionar. Indicando que el empleo adecuado del monitoreo de vibraciones producto de voladuras es un procedimiento

que nos ayudarán para poder examinar al detalle el proceso de la voladura construyendo una muy buena herramienta para el diagnóstico, ya que la adecuada interpretación del registro de vibraciones nos permitirá determinar el grado de interacción entre las variables de una voladura, también nos ayudará obtener los niveles de velocidad pico partícula absoluto.

(Orihuela y Dapello, 2009) en su investigación realizada en una mina escuela se a pocos metros de la ciudad de Idaho Springs en Estados Unidos, indican que el objetivo principal del proyecto fue desarrollar mediante el manejo de diferentes herramientas, un modelo predictivo que pueda ser usado como guía para futuras voladuras en la mina modelo; llegando a la siguiente conclusión: Los valores de VPP obtenidos por el modelo de Devine en las pruebas bajo las características y condiciones de la mina modelo, arrojaron como resultados $k = 1834$ y $b = 1.74$; los cuales son cercanos a los obtenidos por las fórmulas teóricas Australianas analizadas, observándose mayor correlación con el modelo donde el parámetro $K=1140$, que es cuando se trabaja en una roca con dureza promedio y con una cara libre (RMR* entre 41 – 60, Clasificación de roca: III).

(Ruiz, Otálora y Rodríguez, 2007) manifiestan que, teniendo en cuenta los resultados presentados se deberían desarrollar, para las condiciones propias de Colombia, límites de vibración ajustados a las condiciones locales. Las velocidades de partícula debidas a voladuras en minería que fueron registradas estuvieron entre 0.1 mm/s y 6 mm/s. dichas mediciones corresponden a un rango de $r/w^{1/2}$ (distancia escalada por la raíz de la máxima carga por unidad de retardo) entre 70 y 1300 ft/lb^{1/2}. De acuerdo con las mediciones de vibraciones efectuadas, si se diseñan las voladuras con el

parámetro de distancia escalada con la raíz cuadrada de la máxima carga por unidad de retardo superior a $100 \text{ ft/lb}^{1/2}$ se mantendrán las velocidades pico de partículas en niveles que minimizarían los danos en rocas.

(Valdivia, 2017), en su investigación realiza el diseño del modelo predictivo de vibración de voladuras con el software Seismograph Data Analysis, el cuál fue desarrollado a diferentes distancias y con diferentes cargas por retardo. Fue necesario realizar 50 pruebas de campo para contrastar la simulación recopilando los resultados obtenidos en cada una de ellas. Dichos resultados dieron parámetros que fueron ordenados en una base de datos y analizados logrando demostrar que para minimizar el nivel de vibraciones producidas por las voladuras de rocas areniscas y evitar los daños a la población cercana, se tenía que determinar un factor de carga óptimo; logrado con la normativa internacional U.S Bureau of Mines (USBM). El modelo diseñado permite predecir cualquiera de las siguientes variables en cuestión: distancia (R), carga (Q) y VPP; conociendo dos de ellas y basándose en el comportamiento de las ondas vibratorias generadas por una voladura en la Mina El Toro. Luego basándonos en el modelo diseñado se concluye que toda prueba de voladura, no generará vibraciones mayores al límite establecido por el Bureau of Mines (50.0 mm/s) y por ende no significarán una amenaza a las estructuras que se encuentran a su alrededor.

Pampacata (2015), en su investigación menciona que en el sismógrafo ubicado a 168.5 m, brindó un valor de VPP máximo de 12.24 mm/s, este resultado de acuerdo a los registros del camión proporcionado de Anfo fue influenciado principalmente por la carga (fue diseñada a 72 Kg. máximo por retardo, sin embargo, por problemas

de calibración del camión, en algunos taladros se cargó hasta 82 Kg.). Los resultados de vibración a 165.8 m, arrojó un nivel máximo de 12.2 mm/s, se puede observar algunos valores por encima de la curva de daño principalmente en la Onda Longitudinal; sin embargo, estos nuevos valores nos fueron útiles para ajustar el modelo y determinar la nueva carga /retardo 33 kg, para el caso de estudio, lo cual arrojó velocidades pico partículas muy aproximadas al modelo.

Teniendo una carga de 70 Kg por retardo, a una distancia de 165.8 m., se genera un nivel de vibración igual 4.55 mm/s. Teniendo una carga de 70 Kg por retardo, a una distancia de 837.9 m., se genera un nivel de vibración igual 0.21 mm/s. Con estos resultados el modelo predictivo de las vibraciones a campo lejano basados en el modelo de Devine es $VPP = 422 DS^{-1.15}$. De acuerdo a los resultados se aplicará el modelo y ejecución del disparo. La investigación concluye que se debe usar el método de la velocidad pico partícula (VPP), para evaluar y cuantificar las vibraciones inducidas por la voladura de rocas, porque este método ha demostrado dar resultados confiables, para evaluar los diferentes criterios de daños postulados por varios investigadores.

Corimanya (2014) en su investigación menciona que se analizó varios modelos matemáticos, seleccionando el modelo de campo lejano de Devine; se utilizó el software de simulación de vibraciones denominado “Shotplus” y un sismógrafo (Minimate Plus) con un geófono triaxial de superficie, la mezcla explosiva comercial ANF y las distancias al punto de monitoreo variaron entre 70 m. a 1550 m. Se monitorearon catorce voladuras primarias en bancos, con un promedio de 150 taladros (distribuidos en 10 filas de 15 taladros cada fila); efectuándose tres

monitoreos en la ciudad cercana a la mina, cuatro monitoreos en el tajo en dirección a la ciudad, tres monitoreos en la carretera cercana a la mina y cuatro monitoreos en el tajo en dirección a la carretera. Los resultados de monitoreo son adecuados, sin embargo, cada vez que se tenga un proceso de perforación y voladura más adecuado las vibraciones serán menos perceptibles para el hombre.

Por tanto, con esta investigación se mejoró considerablemente la seguridad con las comunidades aledañas al proyecto minero, en demostrar que, si se usa los modelos matemáticos respectivos en el diseño, carguío, conexiones, etc. se puede trabajar sin ocasionar ningún daño a los seres humanos y a las estructuras cercanas a las operaciones mineras.

La liberación súbita de cualquier forma de energía en el terreno desencadena la propagación (en todas las direcciones), de ondas volumétricas y superficiales que actúan sobre personas y estructuras próximas con amplitudes de vibración que dependen de varios factores: la cantidad de energía liberada por el fenómeno que la ocasiona, la distancia entre el origen y el punto donde se registran los eventos, la resistencia dinámica de las estructuras y sus componentes más frágiles, las propiedades trasmisoras o disipadoras de los terrenos involucrados.

(Peralta y Mojica, 2012), mencionan que el seguimiento de vibraciones se hace con la utilización de sismógrafos de ingeniería, especialmente contruidos para tal fin. Sus partes esenciales son un geófono, un amplificador y un registrador. El geófono es el aparato que capta las vibraciones mecánicas y las transforma en corriente eléctrica, transmitida por cable al amplificador que a su vez las registra en un rollo

de papel. Hoy en día los sismógrafos son acoplados a microprocesadores que pueden registrar los datos en la memoria y transmitirlos a un microcomputador.

Un modelo predictivo permite estimar cual es el comportamiento esperado de una zona determinada, que se realizan mediante el control y seguimiento de la vibración.

La importancia de tener un modelo predictivo de vibración es que nos permita planear y controlar nuestras voladuras utilizando ciencia e ingenio para llegar a los mejores resultados en calidad, costo y tiempo.

Orihuela y Dapello (2009) mencionan que, la predicción de los niveles de vibraciones, se aplica cuando se quiere controlar el daño a estructuras, producido por las vibraciones en voladuras. Este modelo de vibraciones que permite predecir el nivel de vibraciones a partir de mediciones de terreno. En el campo lejano se debe tener en cuenta:

- El nivel de vibraciones que genera la detonación de una carga de explosivo.
- La cantidad de explosivo que genera cierto nivel de vibraciones, y
- La distancia al punto a la cual se mide el nivel de vibraciones.

Aunque las ecuaciones clásicas de ondas elásticas son inadecuadas para describir el fenómeno de las vibraciones por efecto de una voladura, tal y como se manifiesta con sus problemas de atenuación, dispersión, cambio de longitud de onda y superposición de ondas, ha de considerarse que hasta la fecha es el mejor modelo simplificado de que se dispone para el análisis de este fenómeno. Se puede considerar que, a efectos de las vibraciones en voladuras, sólo nos interesa la propagación de ondas en la zona exterior o elástica en torno del taladro y que en ella las únicas ondas significativas

que se transmiten resultan ser ondas elásticas de baja energía. Básicamente se pueden agrupar los tipos de ondas elásticas en dos grupos:

- a) Las Ondas internas, que se propagan por el interior del sólido rocoso en nuestro caso y dentro de las cuales se encuentran: las ondas longitudinales, de compresión o principales P y las ondas transversales, de cizalladura o secundarias S.
- b) Las Ondas aéreas, que únicamente se transmiten por la superficie del material y entre las que se encuentran: las ondas Rayleigh R y las ondas Love L; son las principales, si bien ya se ha indicado que existen las llamadas ondas acopladas y ondas hidrodinámicas.

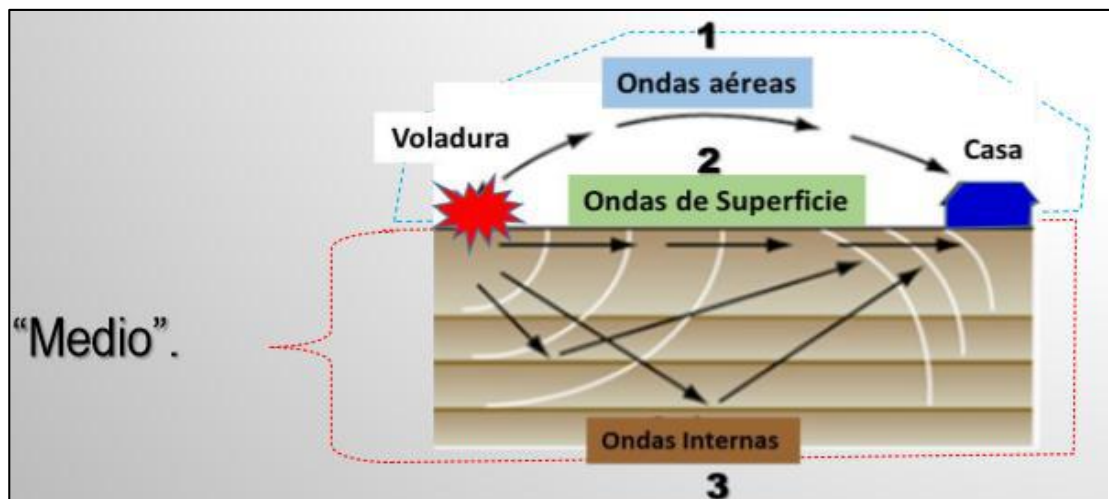


Figura 1. Propagación de las vibraciones por voladura de un movimiento ondulatorio en un medio.

Fuente: ISEE Blasters Handbook

Las Ondas de Compresión (P o Primaria), se propagan dentro del macizo rocoso produciendo una serie de movimientos de compresión y tensión en lo cual el movimiento de la oscilación de la partícula es en la misma dirección de propagación. Producen cambios de volumen, pero no de forma en el macizo rocoso.

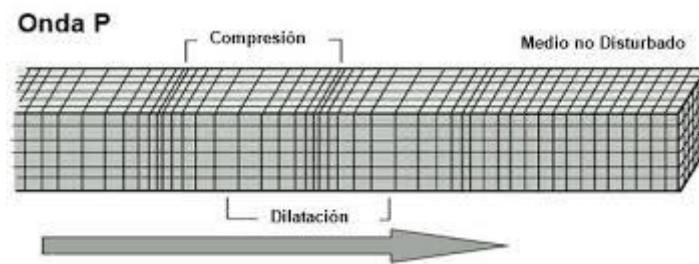


Figura 2. Representación gráfica de la Onda P

Las Ondas Transversales (S o Secundaria), transversal o de corte, consisten en oscilaciones de la partícula en forma transversal (perpendicular) a la dirección de propagación de la onda. Experimentan cambio de forma, pero no de volumen del macizo rocoso.

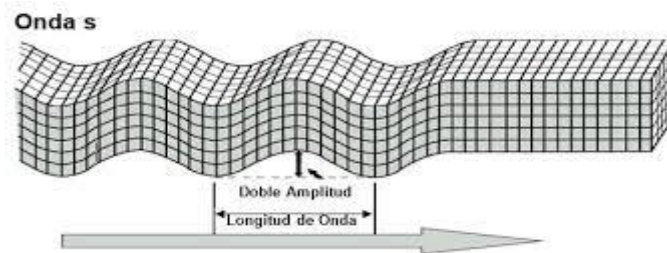


Figura 3. Representación gráfica de la Onda S

Las Ondas Rayleigh (R o superficial), son generadas en superficies producto de voladuras en respuesta a la interacción de las Ondas Body con la superficie. Alguna semejanza tienen con las ondas del océano, en las cuales el movimiento de la partícula es elíptico mientras su energía se propaga a lo largo de la superficie.



Figura 4. Representación gráfica de la Onda R

La instrumentación y equipamiento es fundamental ya que tiene por objetivo principal obtener una buena información representativa y consistente y sobre todo confiable. Para lo cual, se deben manejar ciertos conocimientos de las ondas sísmicas generadas por la voladura llevada a cabo en los taladros de producción; así por ejemplo se sabe que la transmisión es ortogonal y su descomposición se convierte en ondas del tipo P, S, V, R, etc. Dichas ondas se encargarán de transmitir la energía vibracional. Por lo tanto, se debe tener presente que sus implicancias que dependerán de la geometría, posición de la voladura y el respectivo sistema estructural; así por ejemplo, se tiene que las ondas superficiales son de menor amplitud, y viaja una mayor distancia. Por lo tanto, es importante su monitoreo en campo lejano; por el contrario, las ondas: P, S, V que son de mayor importancia en campo cercano. La instrumentación necesaria y suficiente para monitorear las vibraciones inducidas por la voladura de rocas es la siguiente:

- Transductores (geófono o acelerómetros) que deben ser instalados adecuadamente
- Un sistema de cables que se encargan de llevar la señal captada por los transductores al correspondiente equipo de monitoreo.
- Un equipo de adquisición, el cual se encarga de recibir la señal y la guarda en la memoria.
- Una computadora, la cual tiene incorporado el software necesario para el traspaso de la información desde el equipo de monitoreo para su posterior análisis.

Los diversos investigadores en esta materia han clasificado a los modelos matemáticos desarrollados para campo lejano cuando la distancia entre el área del disparo y el lugar de monitoreo es mayor a 50 metros. El modelo matemático postulado por Devine es uno de los más usados cuando se trata de monitorear, cuantificar y aplicar los resultados de un estudio de vibraciones inducidos por la voladura de rocas. Según varias opiniones el criterio de Devine es el que mejor representa el comportamiento de las vibraciones para campo lejano. El modelo matemático de Devine es expresado de la siguiente manera:

$$VPP = Kv \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-Bv} \dots\dots \text{Ecuación 1}$$

Donde:

VPP, es la velocidad pico partícula expresada en mm/s.

R, es la distancia entre el punto de disparo y el punto de monitoreo expresada en metros.

Q, es la carga de explosivo por retardo expresada en Kg.

Kv y -Bv, son constantes que dependen de las propiedades del lugar y de la roca.

Para realizar el modelamiento de vibraciones, se tienen los modelos a campo lejano y a campo cercano. El modelo de campo lejano (modelo matemático de Devine), considera a las vibraciones que afectan directamente a las estructuras fuera del tajo, viviendas cercanas al proyecto, es decir se aplica principalmente para medir el nivel de vibraciones para que no afecten la estabilidad de las estructuras. Este modelo de vibraciones nos permite predecir el nivel de vibraciones a partir de mediciones en campo (Cintex, 2006).

De estas mediciones se deben obtener principalmente tres antecedentes, a saber: el nivel de vibraciones que genera la detonación de una carga de explosivo, la cantidad de explosivo que genera cierto nivel de vibraciones, la distancia de la carga al punto a la cual se mide el nivel de vibraciones. Teóricamente, el criterio que mejor representa el comportamiento de las vibraciones generadas por el tipo de cargas explosivas usadas en voladuras de tajo abierto, es el de Devine puesto que, al utilizar cargas explosivas con geometría cilíndricas, se tiene que las distancias deben ser corregidas por la raíz cuadrada de la carga (Cintex, 2006).

El modelo matemático para campo cercano se aplica cuando la distancia entre la zona del disparo primario y el punto de monitoreo es menor a 50 metros. El modelo fue postulado por Holmberg & Persson, toma en cuenta la forma alargada y cilíndrica de la mezcla explosiva comercial (Cintex, 2006).

El Coeficiente de Variación (CV) es una medida de dispersión que describe la cantidad de variabilidad en relación con la media. Puesto que el coeficiente de variación no se basa en unidades, se puede utilizar en lugar de la desviación estándar para comparar la dispersión de los conjuntos de datos que tienen diferentes unidades o diferentes medias. (Walpole y Myers, 2007).

La Media Aritmética o Promedio es aquella medida que se obtiene al dividir la suma de todos los valores de una variable por la frecuencia total. En palabras más simples, corresponde a la suma de un conjunto de datos dividida por el número total de dichos datos. Devore (2008)

1.2. Formulación del problema

¿Por qué diseñar un modelo predictivo de vibraciones por voladura en una mina de oro a tajo abierto?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un modelo predictivo de vibraciones por voladura en una mina de oro a tajo abierto en Cajamarca.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las mediciones en campo lejano de las vibraciones por voladura para análisis de regresión.
- Diseñar el Modelo predictivo de las vibraciones por voladura en campo lejano.
- Comparar los resultados de las VPP con las VPP predictivo.
- Comparar los resultados de las VPP con las Normas USBM y MINEM.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

Para minimizar el nivel de vibraciones para evitar riesgos a la población cercana y ante la falta de un modelo, el modelo predictivo de vibraciones en base al campo lejano de Devine, predice los niveles de vibraciones con el fin de optimizar factores que incidan en el nivel de vibraciones, entre ellos los más importantes, carga por retardo, la distancia, la velocidad pico partícula (VPP) inducidos por la voladura de rocas en una mina de oro a tajo abierto en Cajamarca.

1.4.2. Hipótesis específicas

- Midiendo las vibraciones por voladura en campo lejano se estimará el análisis de regresión.
- Analizando las vibraciones por voladura en campo lejano, se estimará el Modelo predictivo de las vibraciones.
- Al comparar los resultados de las VPP con las VPP predictivo, se determinará el margen de error del modelo.
- Al comparar los resultados de las VPP con las Normas USBM y MINEM, se verificará si las vibraciones por voladura superan los valores críticos de estas Normas.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La investigación fue del tipo Aplicada. Asimismo, el diseño de investigación corresponde al tipo No experimental, Descriptivo, Longitudinal.

Este tipo de investigaciones es Aplicada, porque está orientada a mejorar, perfeccionar u optimizar el funcionamiento de los sistemas, los procedimientos, normas, reglas tecnológicas actuales a la luz de los avances de la ciencia y la tecnología; por tanto, este tipo de investigación no se presta a la calificación de verdadero, falso o probable sino a la de eficiente, deficiente, ineficiente, eficaz o ineficaz (Ñaupas H. M., 2013).

Hernández, Fernández y Baptista (2010) plantean que, en diseños de investigaciones de tipo no experimental- descriptivo, “las inferencias sobre las relaciones entre variables se realizan sin intervención o influencia directa, y dichas relaciones se observan tal como se han dado en su contexto natural”. El diseño es No experimental – Descriptivo, pues tiene como objetivo efectuar mediciones y recolectarlas para determinar valores confiables de las variables que intervienen en la aplicación del modelo predictivo de vibraciones en campo lejano.

Los resultados del modelamiento y monitoreo de las vibraciones inducidas por la voladura, se usarán para compararlos con los diferentes criterios de daño postulados a la fecha, y de esta manera estar en condiciones de minimizar, mitigar y/o evitar los daños producidos por las vibraciones inducidos por la voladura de rocas.

Los diseños longitudinales o evolutivos, son estudios que recogen datos en diferentes momentos del tiempo y pueden orientarse hacia los siguientes propósitos: estudiar cómo evolucionan una o más variables o las relaciones entre ellas, y/o analizar los

cambios a través del tiempo de un evento, una comunidad, un fenómeno, una situación o un contexto. (Hernández, Fernández y Baptista, 2010).

2.2. Población y muestra

Población

Todos los proyectos de voladura de los años 2019 y 2020

Muestra

Según (Niño, 2011) cuando se trata de una población no cuantificable, se determina la muestra por conveniencia para poblaciones desconocidas, por lo tanto, se utiliza un muestreo no probabilístico usando la técnica por conveniencia de tomar las zonas de criticidad en el proceso de voladura, es por lo cual el criterio de exclusión será los lugares de voladura normal.

La muestra para la investigación consiste en los 67 proyectos de voladura de los años 2019 y 2020.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.

2.3.1 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Análisis documental

Se recopiló información primaria y secundaria. La primera información consistió en los reportes de los proyectos de voladura, con los datos registrados en físico que describían la fecha de la voladura, banco y proyecto, monitoreo a campo lejano, densidad y tipo de explosivo, tipo de material, densidad de la roca, RMR, GSI, Resistencia a la roca intacta, resistencia a la tracción del macizo rocoso, distancia escalar, peso máximo /retardo, distancia entre la carga explosiva y el punto de medición, VPP.

La información secundaria consistió en trabajos de investigaciones, tesis, disertaciones, artículos de revistas, etc. la cuál fue recopilada y transcrita en alguno de los casos de muchos autores reconocidos.

Tanto para la información primaria y secundaria se utilizó como instrumentos de recolección de datos las fichas bibliográficas y de resumen.

Trabajo de campo

Se realizaron mediciones puntuales de las vibraciones en zonas de criticidad en el proceso de voladura, con el fin de poder comparar los niveles medidos con los límites definidos por la normativa; para así poder efectuar correcciones de la carga operante, en el caso que fuera necesario. Para poder conseguir dichas medidas, decidimos diseñar la evaluación práctica del presente proyecto de la siguiente manera:

- Primero se realizaron las mediciones de las VPP cambiando las posiciones de los equipos medidores, pero manteniendo en todo momento la carga de explosivo inicial.
- Segundo, se realizaron las mediciones de las VPP cambiando la cantidad de carga de explosivo sin variar en ningún momento las distancias entre los equipos medidores y la posición de disparo.

2.3.2 Técnicas e instrumentos de Análisis de datos

Luego de recolectar toda la información de campo, se realizó un análisis de data para la elaboración del modelo predictivo, principal objetivo de la investigación.

El análisis inició identificando a la ecuación de la velocidad pico partícula para realizar la tabulación de datos:

$$VPP = Kv \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-Bv} \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

Donde:

VPP, es la velocidad pico partícula expresada en mm/s.

R, es la distancia entre el punto de disparo y el punto de monitoreo expresada en metros.

Q, es la carga de explosivo por retardo expresada en Kg.

Kv y -Bv, son constantes que dependen de las propiedades del lugar y de la roca.

Luego se cuantifico la influencia de las dos variables independientes (Q y R) que forman parte del escalador respecto a la VPP.

Una vez definido el escalador y su relación con la velocidad pico partícula (VPP) se procedió a generar el modelo predictivo. Para ello se transformó los datos de carga explosiva y distancia a una sola variable. La tabla 3, presenta un ejemplo de la tabulación de los valores de VPP y escalador.

Tabla 3

Relación de datos registrados en 13 pruebas de voladura

VPP	Escalador
40.8	0.1178
52.8	0.1178
12.9	0.0635
16.1	0.0635
14.2	0.0778
16.9	0.0778
13.6	0.0778
15.3	0.0778
15.7	0.0356
40.9	0.0544
24.4	0.0698
27.9	0.0639
1.65	0.0190

Referencia: Orihuela y Dapello (2009)

Luego se plasmó dicha información en una gráfica en donde el eje vertical es la variable dependiente (VPP) y el eje horizontal es la independiente (escalador). Como se puede apreciar de la figura 1, la mayoría de pares coordenados están dentro de una tendencia, a excepción del par (0.0544, 40.9) que se muestra en color rojo. Por esta razón, este par fue descartado durante el análisis del modelo predictivo.

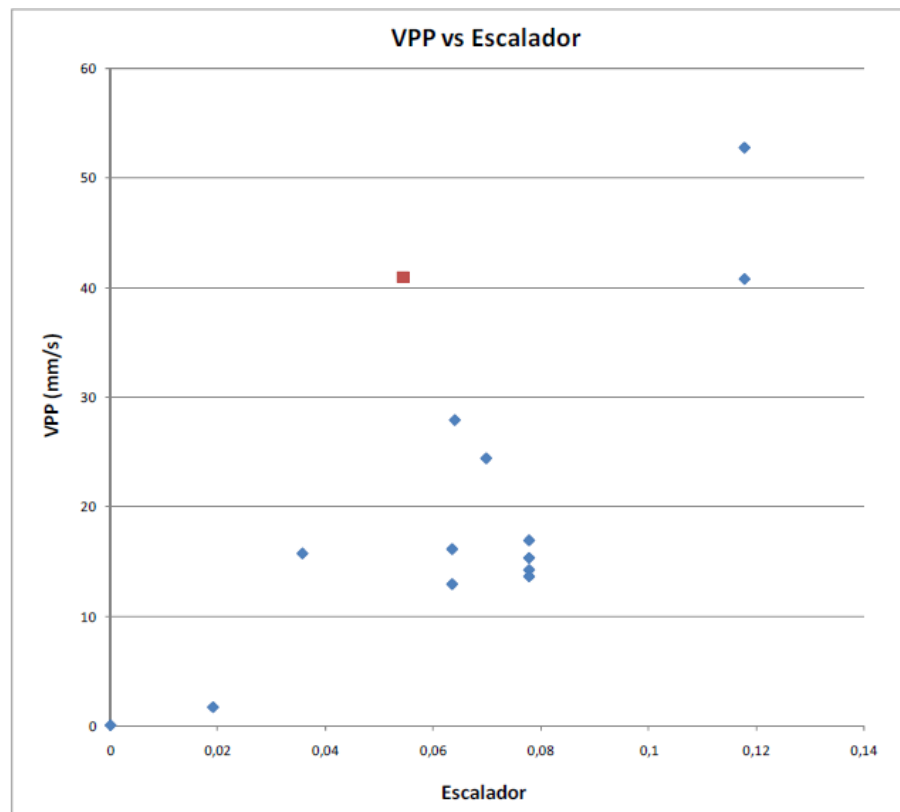


Figura 5. Velocidad Pico Partícula vs Escalador

Fuente: Orihuela y Dapello (2009)

Por lo que las constantes que se deben encontrar para poder definirlo son “k” y “b”. Para hallar dichas constantes es necesario hacer una regresión no lineal y por razones de eficiencia y rapidez se decide utilizar grafico de dispersión en el Excel. Tras correr el programa con la información de la tabla se obtuvieron las constantes del modelo que se muestran a continuación:

$$K= 1834.56 \quad ; \quad B= 1.74$$

Finalmente, el modelo predictivo para el lugar de pruebas se definió como:

$$PPV = 1834.56 \left(\frac{\sqrt{Q}}{D}\right)^{1.74} \dots\dots \text{Ecuación 3}$$

Si se grafica dicha ecuación junto con los pares coordenados de las pruebas (sin incluir el outlier) tenemos lo que se muestra en la figura 2, a continuación:

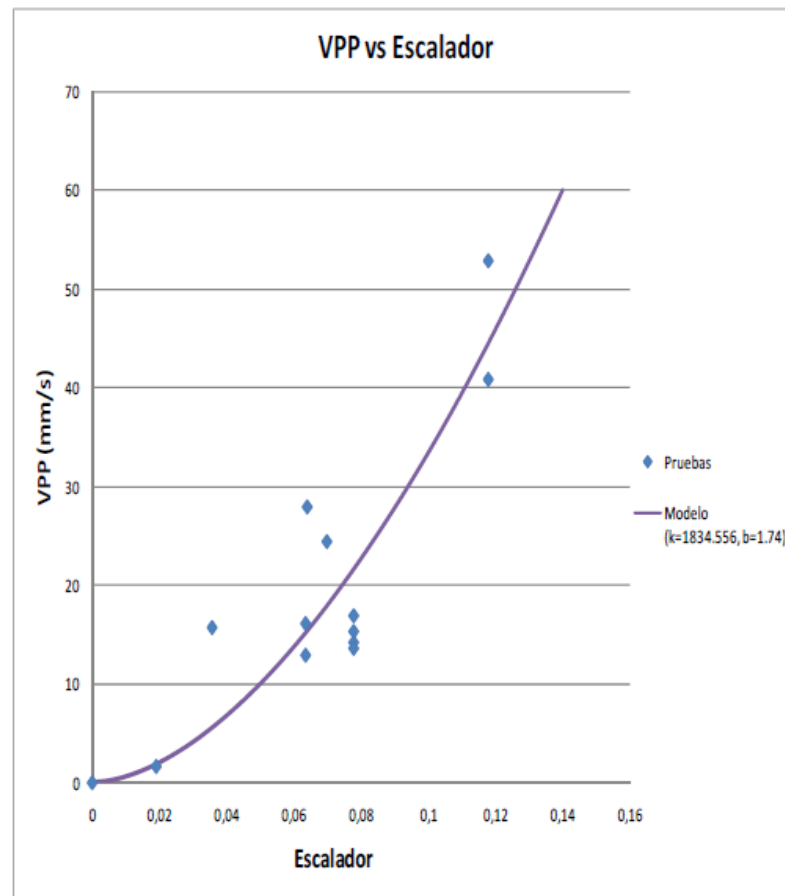


Figura 6. Datos de campo sin outlier y Modelo Predictivo
Fuente: Orihuela y Dapello (2009)

Para el análisis y resumen de datos cuantitativos, se utilizaron medidas de Tendencia Central y Variabilidad; tales como el promedio aritmético, Desviación Estándar, Coeficiente de Variación, que fueron calculadas con el Excel.

El coeficiente de variación (CV) o coeficiente de variación de Spearman es una medida aplicada en la ciencia de las estadísticas, que relaciona la desviación estándar y la media aritmética de un conjunto de datos definiendo la dispersión relativa de la muestra en estudio, es decir este indicador permite comparar la variabilidad de un conjunto de datos. Así por ejemplo CV menores al 5% indican por lo general gran homogeneidad, CV menor del 20% corresponden

por lo general a una homogeneidad moderada, mientras que CV mayores al 20% indican gran heterogeneidad (Rustom, 2012).

Nivel de aceptación: $C.V. \leq 5\%$

CV es igual a la desviación estándar *100/ media aritmética.

2.4. Procedimiento.

a) Preparación de los equipos

Para el monitoreo de vibraciones y cumplimiento del plan de trabajo asignado, se contó con los siguientes equipos y herramientas de trabajo.

Tabla 4

Recursos utilizados para el monitoreo de vibraciones

Descripción	Marca	Cantidad
Sismógrafo	White	1
Cámara fotográfica	Sony	1
Laptop	Lenovo	1

Para el registro del nivel de las vibraciones se hizo uso del sismógrafo White modelo Mini-seis II. Este equipo cuenta con 01 geófono (Triaxial), el cual mide la velocidad pico partícula (VPP) en los tres ejes (Longitudinal, Vertical y Transversal) generadas producto de la voladura.

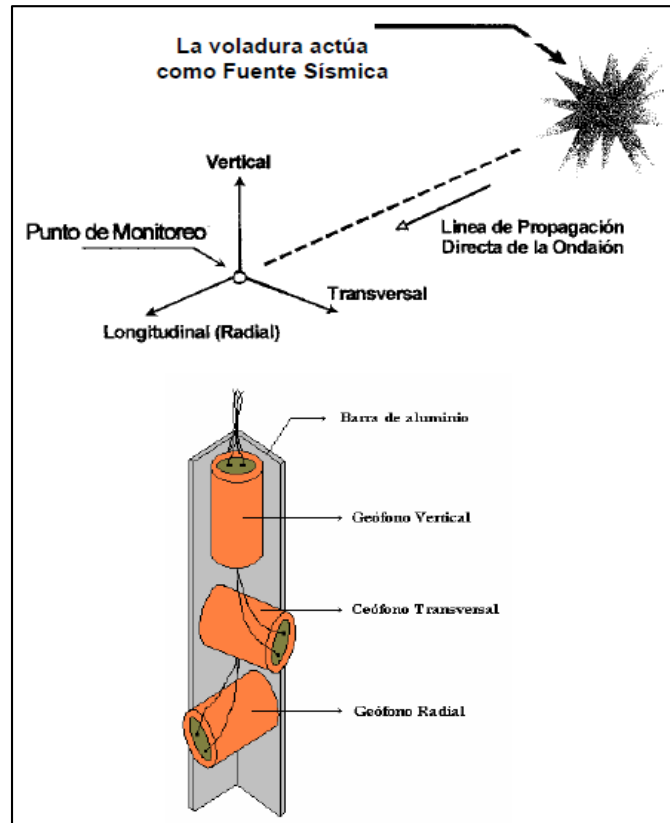


Figura 7. Configuración triaxial de Geófono

La información es registrada por los geófonos que transmite dicha información al equipo sismógrafo mediante archivos digitales, los cuales son almacenados y posteriormente analizados para determinar diferentes aspectos de la señal.



Figura 8. Instalación del Sismógrafo White

b) Instalación del geófono en el taladro de perforación

En campo se procede a introducir el geófono en el fondo del taladro y se rellena con concreto y detritus en la parte superior del taladro, se deberá esperar al menos 1 día para que el concreto fragüe completamente; además durante este periodo de tiempo no deberá realizarse voladuras cercanas ya que pueden producir rajaduras en el concreto y el geófono no quede totalmente empotrado al macizo rocoso donde se realizaran las mediciones de vibraciones. Momentos antes de producirse la voladura destinada a monitorear se deberá configurar el equipo según las necesidades del registro a tomarse. Además, este equipo cuenta con software de análisis el cual es imprescindible para poder realizar la determinar de las fuentes sísmicas en este caso taladro al momento de detonar y su magnitud en velocidad. En la siguiente figura se muestra la disposición espacial del geófono instalado en el taladro de perforación.

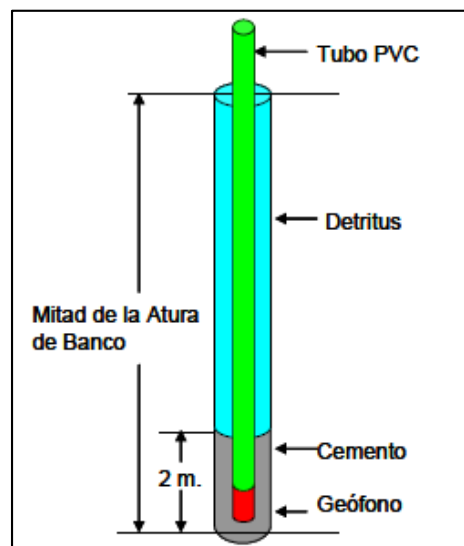


Figura 9. Configuración espacial del geófono dentro del taladro.

c) Monitoreo de Vibraciones

Esta actividad se realizó desde el año 2019 al 2020 con un monitoreo en 67 proyectos de voladura en 17 bancos del mismo tajo: 4000, 4008, 4016, 4024, 4032, 4040, 4048, 4056, 4064, 4072, 4080, 4088, 4096, 4104, 4112, 4116 y 4128. Los taladros se diseñaron para diámetro de perforación 12 ¼”

Cuando se culminó cada una de las pruebas correspondientes al monitoreo de vibraciones de cada proyecto de voladura, se realizó un análisis de data para poder determinar cuáles de los datos habían sido correctamente medidos y podían ser utilizados para la elaboración del modelo predictivo.

El criterio de prevención de daño utilizado en nuestro análisis de campo lejano fueron las normas USBM (United States Bureau of Mines) y la Guía Ambiental para Perforación y Voladura en Operaciones Mineras (MINEM - Perú).

d) Procesamiento y documentación de la información utilizando MS Office.

e) Redactar la investigación

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1 Resultados de las mediciones en campo lejano de las vibraciones por voladura para análisis de regresión

Tabla 5

Mediciones en campo lejano de las vibraciones por voladura durante el año 2019 y 2020

Item	Fecha	Proyecto	Monitoreo	Densidad explosivo	Tipo de Explosivo	Distancia escalar(d)	RMR	GSI	Vpp	Resist. Roca intacta (Mpa)	Resist. Traccion (Mpa)	Velocidad de propagacion de onda P (Vp) m/s	Tipo de Material	Densidad de la roca gr/cm ³	W (Kg) (Peso max/retardo)	R Distancia entre la carga explosiva y el punto de medicion	Vpp (mm/s)			Vps (mm/s)
																	Trans	Vert	Long	
1	19/09/2019	NV 4072 PY01	CL	0.82 gr/cm ³	ANFO	58.93	22	17	20.97	28	2.24	2454.24	Suelo Residual	1.66	72.00	500.00	5.54	2.09	3.41	6.83
2	22/09/2019	NV 4080 PY01	CL	0.95 gr/cm ³	HA28	18.52	22	17	21.34	28	2.24	2454.24	Suelo Residual	1.66	147.00	224.56	5.35	5.26	7.21	10.41
3	24/09/2019	NV 4072 PY02	CL	0.82 gr/cm ³	ANFO	41.42	23	18	21.08	29	2.32	2500.00	Suelo Residual	1.66	92.00	397.30	10.50	13.90	14.50	22.67
4	26/09/2019	NV 4064 PY01	CL	1.02 gr/cm ³ ; 0.95 gr/cm ³	HA37, HA28	7.08	24	19	21.65	30	2.40	2455.24	Suelo Residual	1.66	650.00	180.60	13.30	19.20	36.40	43.25
5	29/09/2019	NV 4072 PY02	CL	0.95 gr/cm ³ ; 0.82 gr/cm ³	HA28, ANFO	12.84	25	20	21.45	31	2.48	2579.18	Suelo Residual	1.66	281.00	215.30	11.20	13.60	24.60	30.26
6	05/10/2019	NV 4064 PY02	CL	0.95 gr/cm ³ ; 0.82 gr/cm ³	HA28, ANFO	6.61	39	34	21.67	45	3.60	2456.24	Roca Fracturada	1.84	742.00	180.00	11.40	14.20	37.30	41.51
7	07/10/2019	NV 4056 PY02	CL	0.95 gr/cm ³	HA28	8.22	43	38	21.60	49	3.92	3449.39	Roca Fracturada	1.84	1153.00	279.00	13.30	8.35	17.40	23.44
8	10/10/2019	NV 4056 PY03	CL	0.94 gr/cm ³	HA28	5.59	42	37	21.72	52	4.16	2457.24	Roca Fracturada	1.84	714.00	149.50	9.46	11.70	16.30	22.18
9	12/10/2019	NV 4048 PY01	CL	0.95 gr/cm ³	HA28	3.60	46	41	21.87	56	4.48	3596.91	Roca Fracturada	1.84	1041.00	116.20	21.20	13.60	19.90	32.10
10	13/10/2019	NV 4048 PY02	CL	1.02 gr/cm ³ ; 0.95 gr/cm ³	HA37, HA28	8.29	48	43	21.60	58	4.64	2458.24	Roca Fracturada	1.84	917.00	250.90	13.00	21.60	26.70	36.72
11	01/10/2019	NV 4056 PY01	CL	1.02 gr/cm ³ ; 0.95 gr/cm ³ ; 0.82 gr/cm ³	HA37, HA28, ANFO	18.28	24	19	21.34	30	2.40	2541.39	Suelo Residual	1.66	480.00	400.60	9.77	1.71	6.26	11.73
12	16/10/2019	NV 4048 PY03	CL	0.954 gr/cm ³ ; 1.059 gr/cm ³	HA28, HA 37	3.75	39	34	21.85	45	3.60	2459.24	Roca Fracturada	1.90	1232.00	131.60	16.60	10.90	15.40	25.13
13	20/10/2019	NV 4040 PY01	CL	0.942 g/cm ³ ; 1.061 g/cm ³	HA28, HA37	6.38	43	38	21.68	49	3.92	3449.39	Roca Fracturada	1.92	1872.00	276.00	5.35	3.45	4.76	7.95
14	22/10/2019	NV 4048 PY04	CL	0.82 gr/cm ³ ; 0.96 gr/cm ³ ; 1.05 gr/cm ³	ANFO; HA28; HA37	7.56	39	34	21.63	45	3.60	2460.24	Suelo Residual	1.83	816.00	216.00	5.35	1.38	2.34	6.00
15	25/10/2019	NV 4040 PY02	CL	0.82 gr/cm ³ ; 1.05 gr/cm ³	ANFO; HA37	3.06	43	38	21.92	49	3.92	3449.39	Roca Fracturada	1.94	1360.00	113.00	17.80	15.40	23.40	33.19
16	27/10/2019	NV 4040 PY03	CL	0.82 gr/cm ³ ; 1.05 gr/cm ³	ANFO; HA37	8.26	51	46	21.60	57	4.56	2461.24	Roca Moderadamente Fracturada	2.00	1015.00	263.00	2.60	4.02	5.07	6.97
17	31/10/2019	NV 4032 PY01	CL	1.02 gr/cm ³ ; 1.19 gr/cm ³	HA37, HA46	4.42	54	49	21.80	60	4.80	3982.87	Roca Moderadamente Fracturada	2.05	1586.00	176.00	4.10	4.96	5.48	8.45
18	01/11/2019	NV 4112 PY01	CL	0.95 gr/cm ³	HA28	16.24	42	37	21.38	48	3.84	2462.24	Roca Fracturada	1.98	107.00	168.00	12.00	5.67	6.68	14.86
19	04/11/2019	NV 4032 PY02	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	4.08	49	44	21.83	55	4.40	3740.55	Roca Moderadamente Fracturada	1.98	1175.00	140.00	20.40	14.50	18.60	31.18
20	09/11/2019	NV 4088 PY01	CL	0.95 gr/cm ³	HA28	10.47	49	44	21.52	55	4.40	2463.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.90	491.00	232.00	12.00	5.76	6.68	14.89
21	10/11/2019	NV 4024 PY01	CL	0.95 gr/cm ³ ; 1.05 gr/cm ³ ; 1.21 gr/cm ³	HA28, HA 37, HA 46	5.29	52	47	21.74	58	4.64	3885.61	Roca Moderadamente Fracturada	1.98	792.00	149.00	20.40	14.52	18.60	31.19
22	11/11/2019	NV 4024 PY02	CL	1.21 gr/cm ³ ; 1.26 gr/cm ³	HA 46; HA 45/55	6.98	55	50	21.65	61	4.88	2464.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.99	870.00	206.00	3.27	10.80	5.16	12.41
23	24/11/2019	NV 4016 PY01	CL	1.02 gr/cm ³ ; 1.19 gr/cm ³	HA37 - HA46	6.24	49	44	21.69	55	4.40	3740.55	Roca Moderadamente Fracturada	1.98	700.00	165.00	19.20	14.73	17.40	29.81
24	24/11/2019	NV 4080 PY03	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	9.30	39	34	21.56	45	3.60	2465.24	Roca Fracturada	1.90	912.00	281.00	9.46	11.70	16.30	22.18
25	27/11/2019	NV 4116 PY04	CL	1.19 gr/cm ³	HA46	4.01	43	38	21.83	49	3.92	3449.39	Roca Moderadamente Fracturada	1.90	737.00	108.80	15.50	9.71	12.90	22.38
26	27/11/2019	NV 4104 PY02	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	8.37	39	34	21.59	45	3.60	2466.24	Roca Fracturada	1.89	735.00	226.90	6.99	14.10	16.10	22.51
27	29/11/2019	NV 4072 PY03	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	7.08	38	33	21.65	44	3.52	3207.57	Roca Fracturada	1.89	888.00	211.00	13.20	11.80	33.70	38.07
28	02/12/2019	NV 4072 PY04	CL	1.028 g/cm ³	HA37	4.61	41	36	21.79	47	3.76	2467.24	Roca Fracturada	1.89	2051.00	209.00	34.40	27.20	16.90	47.00
29	05/12/2019	NV 4008 PY01	CL	1.20 gr/cm ³	HA46	4.61	48	43	21.79	54	4.32	3693.12	Roca Moderadamente Fracturada	2.89	1426.00	174.10	14.80	12.00	14.40	23.88
30	08/12/2019	NV 4064 PY03	CL	0.95 gr/cm ³	HA37	7.03	42	37	21.65	48	3.84	2468.24	Roca Fracturada	1.89	1031.00	225.70	11.40	4.65	7.07	14.20
31	11/12/2019	NV 4064 PY04	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	4.27	44	39	21.81	50	4.00	3500.00	Roca Fracturada	1.89	1016.00	136.10	36.20	33.50	38.20	62.39
32	14/12/2019	NV 4064 PY05	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	4.50	43	38	21.79	49	3.92	2469.24	Roca Fracturada	1.88	1012.00	143.20	29.80	25.30	26.30	47.11
33	16/12/2019	NV 4056 PY04	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	4.21	45	40	21.82	51	4.08	3549.22	Roca Fracturada	1.90	824.00	120.90	16.50	18.90	29.30	38.57
34	18/12/2019	NV 4000 PY01	CL	1.20 gr/cm ³	HA46	10.03	52	47	21.53	58	4.64	2470.24	Roca Fracturada	1.92	782.00	280.40	5.66	4.84	12.60	14.64
35	21/12/2019	NV 4056 PY05	CL	1.08 gr/cm ³	HA37	4.87	48	43	21.77	54	4.32	3693.12	Roca Fracturada	1.90	1308.00	176.00	41.00	28.30	44.30	66.67

36	23/12/2019	NV 4056 PY06	CL	1.08 gr/cm ³	HA37	10.39	51	46	21.52	57	4.56	2471.24	Roca Fracturada	1.98	795.00	293.00	10.10	12.10	16.00	22.46
37	25/12/2019	NV 4096 PY02	CL	1.08 gr/cm ³	HA37	4.50	39	34	21.79	45	3.60	3255.87	Suelo Residual	1.75	996.00	142.00	53.90	53.90	56.00	94.59
38	30/12/2019	NV 4048 PY05	CL	0.95 gr/cm ³	HA28	6.63	38	33	21.67	44	3.52	2472.24	Roca Fracturada	1.85	1450.00	252.60	6.66	7.24	5.38	11.21
39	01/01/2020	NV 4048 PY07	CL	1.02 gr/cm ³ , 1.01 gr/cm ³	HA37, SANG	6.14	38	33	21.69	44	3.52	3207.57	Roca Fracturada	1.85	1155.00	208.70	11.20	13.80	19.40	26.31
40	07/01/2020	NV 4040 PY05	CL	1.34 gr/cm ³	SANG	4.23	42	37	21.82	48	3.84	2473.24	Roca Fracturada	1.88	1697.00	174.20	5.20	10.10	15.70	19.38
41	11/01/2020	NV 4040 PY06	CL	0.803 gr/cm ³ , 1.023 gr/cm ³	ANFO, HA 37	2.48	43	38	21.99	49	3.92	3449.39	Roca Fracturada	1.88	1930.00	109.10	44.60	24.70	38.60	63.95
42	15/01/2020	NV 4040 PY04	CL	0.805 gr/cm ³ , 0.949 gr/cm ³	ANFO, HA28	2.17	48	43	22.03	54	4.32	2474.24	Roca Fracturada	1.95	1229.00	76.00	46.50	43.50	76.10	99.23
43	21/01/2020	NV 4032 PY03	CL	0.94 gr/cm ³ , 1.02 gr/cm ³	ANFO, HA 28	3.46	46	41	21.88	52	4.16	3596.91		1.95	1228.00	121.40	16.85	17.40	31.40	39.66
44	23/01/2020	NV 4032 PY04	CL	0.94 gr/cm ³ , 1.05 gr/cm ³	ANFO, HA 37	3.15	46	41	21.91	52	4.16	2475.24	Roca Fracturada	1.92	1373.00	116.90	37.80	19.40	33.30	53.98
45	26/01/2020	NV 4088 PY03	CL	0.80 gr/cm ³	ANFO	3.76	38	33	21.85	44	3.52	3207.57	Roca Fracturada	1.85	1169.00	128.70	95.90	55.80	96.70	147.18
46	05/02/2020	NV 4024 PY03	CL	0.805 g/cm ³ , 0.949 g/cm ³	ANFO, HA28	5.10	41	36	21.75	47	3.76	2476.24	Roca Fracturada	1.89	974.00	159.30	6.95	10.00	14.00	18.56
47	05/02/2020	NV 4024 PY06	CL	0.804 g/cm ³	ANFO	17.19	47	42	21.36	53	4.24	3646.13	Roca Moderadamente Fracturada	1.93	284.00	289.70	6.95	10.00	14.00	18.56
48	09/02/2020	NV 4080 PY04	CL	0.801 g/cm ³	ANFO	6.44	39	34	21.68	45	3.60	2477.24	Roca Fracturada	1.91	1442.00	244.40	7.40	10.20	5.82	13.88
49	11/02/2020	NV 4024 PY04	CL	0.805 g/cm ³	ANFO	2.91	50	45	21.94	56	4.48	3790.03	Roca Moderadamente Fracturada	1.98	1779.00	122.60	29.20	18.50	32.00	47.11
50	14/02/2020	NV 4024 PY05	CL	0.809 gr/cm ³	ANFO	4.28	49	44	21.81	55	4.40	2478.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.98	1349.00	157.20	8.45	7.05	7.41	13.27
51	18/02/2020	NV 4072 PY05	CL	0.804gr/cm ³ ;1.022gr/cm ³	ANFO,SANG	5.29	40	35	21.74	47	3.76	3306.18	Roca Fracturada	1.86	1692.00	217.70	21.10	39.50	22.70	50.21
52	22/02/2020	NV 4016 PY03	CL	1.10 gr/cm ³ ;1.02 gr/cm ³ ;0.80 gr/cm ³	SAN G, HA 37, ANFO	6.34	47	42	21.68	53	4.24	2479.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.95	1686.00	260.40	9.60	6.24	10.60	15.60
53	22/02/2020	NV 4072 PY06	CL	1.10 gr/cm ³ ; 1.02 gr/cm ³ ; 0.80 gr/cm ³	SAN G, HA 37, ANFO	5.01	46	41	21.76	52	4.16	3596.91	Roca Fracturada	1.89	1955.00	221.30	12.20	14.90	18.20	26.50
54	28/02/2020	NV 4016 PY04	CL	1.022 gr/cm ³ ; 1.202 gr/cm ³	HA37; HA46	3.84	53	48	21.85	59	4.72	2480.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.98	2084.00	175.30	33.40	22.80	34.80	53.35
55	28/02/2020	NV 4064 PY07	CL	0.804 gr/cm ³	ANFO	5.42	44	39	21.73	50	4.00	3500.00	Roca Moderadamente Fracturada	1.89	794.00	152.70	33.40	22.80	34.80	53.35
56	08/03/2020	NV 4016 PY05	CL	1.18 gr/cm ³	HA46	4.86	51	46	21.77	57	4.56	2481.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.89	2043.00	219.50	7.73	12.80	16.80	22.49
57	10/03/2020	NV 4112 PY02	CL	0.8 gr/cm ³	ANFO	5.37	36	31	21.74	42	3.36	3112.78	Roca Fracturada	1.73	723.00	144.50	10.30	7.43	9.60	15.92
58	13/03/2020	NV 4056 PY09	CL	0.8 gr/cm ³ , 1.02 gr/cm ³	ANFO, HA37	5.97	47	42	21.70	53	4.24	2482.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.89	790.00	167.80	9.12	17.80	26.50	33.20
59	14/03/2020	NV 4048 PY08	CL	0.8 gr/cm ³	ANFO	4.28	49	44	21.81	55	4.40	3740.55	Roca Moderadamente Fracturada	1.89	664.00	110.40	33.40	24.10	36.10	54.77
60	13/04/2020	NV 4048 PY10	CL	1.02 gr/cm ³ , 0.95gr/cm ³ , 0.8 gr/cm ³	HA37, HA28, ANFO	6.10	46	41	21.70	52	4.16	2483.24	Roca Fracturada	1.89	1088.00	201.30	52.10	35.00	44.60	77.00
61	23/04/2020	NV 4000 PY02	CL	1.26 gr/cm ³ , 1.2gr/cm ³	HA45-55, HA 46	3.70	54	49	21.86	60	4.80	3982.87	Roca Fracturada	1.89	1470.00	141.80	10.90	9.93	20.90	25.58
62	25/04/2020	NV 4048 PY11	CL	1.02 gr/cm ³ , 0.95gr/cm ³ , 0.8 gr/cm ³	HA37, HA28, ANFO	5.81	48	43	21.71	54	4.32	2484.24	Roca Fracturada	1.89	1088.00	191.60	21.40	11.70	16.50	29.45
63	27/07/2020	NV 4016 PY07	CL	1.022 gr/cm ³	HA37	3.23	42	37	21.90	43.1	3.45	3403.09	Roca Fracturada	1.84	1508.00	125.30	27.70	27.90	21.40	44.76
64	06/08/2020	NV 4016 PY08	CL	1.022	HA37	1.48	46	41	22.16	46	3.68	2485.24	Roca Fracturada	1.89	2459.00	73.28	5.96	5.84	8.85	12.16
65	09/08/2020	NV 4072 PY07	CL	1.022-0.804 gr/cm ³	HA37 - ANFO	4.06	49	44	21.83	49	3.92	3740.55	Roca Fracturada	1.91	517.00	92.40	42.00	21.30	26.80	54.18
66	13/08/2020	NV 4072 PY08	CL	1.022 - 0.804 gr/cm ³	HA37 - ANFO	6.86	47	42	21.66	49	3.92	2486.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.91	1329.00	250.00	8.69	6.91	14.60	18.34
67	13/08/2020	NV 4128 PY01	CL	0.949 gr/cm ³	HA28	15.12	46	41	21.40	48	3.84	3596.91	Roca Fracturada	1.91	290.00	257.40	8.69	6.91	14.60	18.34
Valor mínimo						1.48	22	17	20.97	28	2.24	2454.24		1.66	72.00	73.28	2.60	1.38	2.34	6.00
Valor máximo						58.93	55	50	22.16	61	4.88	3982.87		2.89	2459.00	500.00	95.90	55.80	96.70	147.18
Moda						#N/A	39	34	#N/A	49	3.92	3449.39		1.89	1088.00	176.00	5.35	11.70	17.40	22.18
Valor promedio						7.77	43	38	21.70	49	3.92	2956.91		1.90	1075.48	194.35	18.41	15.54	21.61	33.09
Desviación estándar						8.50	8	8	0.20	8	0.63	559.87		0.15	529.42	77.48	16.03	11.35	16.48	24.67
Coefficiente de variación %						109.38	18	20	0.92	16	15.99	18.93		8.00	49.23	39.87	87.06	73.09	76.26	74.54

Fuente: Datos tomados en campo

Tabla 6

Mediciones en campo lejano de las vibraciones por voladura durante el año 2019

Item	Fecha	Proyecto	Monitoreo	Densidad explosivo	Tipo de Explosivo	Distancia escalar(d)	RMR	GSI	Vpp	Resist. Roca intacta (Mpa)	Resist. Tracción (Mpa)	Velocidad de propagación de onda P (Vp) m/s	Tipo de Material	Densidad de la roca gr/cm ³	W (Kg) (Peso max/retardo)	R Distancia entre la carga explosiva y el punto de medición	Vpp (mm/s)			Vps (mm/s)
																	Trans	Vert	Long	
1	19/09/2019	NV 4072 PY01	CL	0.82 gr/cm ³	ANFO	58.93	22	17	20.97	28	2.24	2454.24	Suelo Residual	1.66	72.00	500.00	5.54	2.09	3.41	6.83
2	22/09/2019	NV 4080 PY01	CL	0.95 gr/cm ³	HA28	18.52	22	17	21.34	28	2.24	2454.24	Suelo Residual	1.66	147.00	224.56	5.35	5.26	7.21	10.41
3	24/09/2019	NV 4072 PY02	CL	0.82 gr/cm ³	ANFO	41.42	23	18	21.08	29	2.32	2500.00	Suelo Residual	1.66	92.00	397.30	10.50	13.90	14.50	22.67
4	26/09/2019	NV 4064 PY01	CL	1.02 gr/cm ³ ; 0.95 gr/cm ³	HA37, HA28	7.08	24	19	21.65	30	2.40	2455.24	Suelo Residual	1.66	650.00	180.60	13.30	19.20	36.40	43.25
5	29/09/2019	NV 4072 PY02	CL	0.95 gr/cm ³ ; 0.82 gr/cm ³	HA28, ANFO	12.84	25	20	21.45	31	2.48	2579.18	Suelo Residual	1.66	281.00	215.30	11.20	13.60	24.60	30.26
6	05/10/2019	NV 4064 PY02	CL	0.95 gr/cm ³ ; 0.82 gr/cm ³	HA28, ANFO	6.61	39	34	21.67	45	3.60	2456.24	Roca Fracturada	1.84	742.00	180.00	11.40	14.20	37.30	41.51
7	07/10/2019	NV 4056 PY02	CL	0.95 gr/cm ³	HA28	8.22	43	38	21.60	49	3.92	3449.39	Roca Fracturada	1.84	1153.00	279.00	13.30	8.35	17.40	23.44
8	10/10/2019	NV 4056 PY03	CL	0.94 gr/cm ³	HA28	5.59	42	37	21.72	52	4.16	2457.24	Roca Fracturada	1.84	714.00	149.50	9.46	11.70	16.30	22.18
9	12/10/2019	NV 4048 PY01	CL	0.95 gr/cm ³	HA28	3.60	46	41	21.87	56	4.48	3596.91	Roca Fracturada	1.84	1041.00	116.20	21.20	13.60	19.90	32.10
10	13/10/2019	NV 4048 PY02	CL	1.02 gr/cm ³ ; 0.95 gr/cm ³	HA37, HA28	8.29	48	43	21.60	58	4.64	2458.24	Roca Fracturada	1.84	917.00	250.90	13.00	21.60	26.70	36.72
11	01/10/2019	NV 4056 PY01	CL	1.02 gr/cm ³ ; 0.95 gr/cm ³ ; 0.82 gr/cm ³	HA37, HA28, ANFO	18.28	24	19	21.34	30	2.40	2541.39	Suelo Residual	1.66	480.00	400.60	9.77	1.71	6.26	11.73
12	16/10/2019	NV 4048 PY03	CL	0.954 gr/cm ³ ; 1.059 gr/cm ³	HA28, HA 37	3.75	39	34	21.85	45	3.60	2459.24	Roca Fracturada	1.90	1232.00	131.60	16.60	10.90	15.40	25.13
13	20/10/2019	NV 4040 PY01	CL	0.942 g/cm ³ ; 1.061 g/cm ³	HA28, HA37	6.38	43	38	21.68	49	3.92	3449.39	Roca Fracturada	1.92	1872.00	276.00	5.35	3.45	4.76	7.95
14	22/10/2019	NV 4048 PY04	CL	0.82 gr/cm ³ ; 0.96 gr/cm ³ ; 1.05 gr/cm ³	ANFO; HA28; HA37	7.56	39	34	21.63	45	3.60	2460.24	Suelo Residual	1.83	816.00	216.00	5.35	1.38	2.34	6.00
15	25/10/2019	NV 4040 PY02	CL	0.82 gr/cm ³ ; 1.05 gr/cm ³	ANFO;HA37	3.06	43	38	21.92	49	3.92	3449.39	Roca Fracturada	1.94	1360.00	113.00	17.80	15.40	23.40	33.19
16	27/10/2019	NV 4040 PY03	CL	0.82 gr/cm ³ ; 1.05 gr/cm ³	ANFO;HA37	8.26	51	46	21.60	57	4.56	2461.24	Roca Moderadamente Fracturada	2.00	1015.00	263.00	2.60	4.02	5.07	6.97
17	31/10/2019	NV 4032 PY01	CL	1.02 gr/cm ³ ; 1.19 gr/cm ³	HA37, HA46	4.42	54	49	21.80	60	4.80	3982.87	Roca Moderadamente Fracturada	2.05	1586.00	176.00	4.10	4.96	5.48	8.45
18	01/11/2019	NV 4112 PY01	CL	0.95 gr/cm ³	HA28	16.24	42	37	21.38	48	3.84	2462.24	Roca Fracturada	1.98	107.00	168.00	12.00	5.67	6.68	14.86
19	04/11/2019	NV 4032 PY02	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	4.08	49	44	21.83	55	4.40	3740.55	Roca Moderadamente Fracturada	1.98	1175.00	140.00	20.40	14.50	18.60	31.18
20	09/11/2019	NV 4088 PY01	CL	0.95 gr/cm ³	HA28	10.47	49	44	21.52	55	4.40	2463.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.90	491.00	232.00	12.00	5.76	6.68	14.89
21	10/11/2019	NV 4024 PY01	CL	0.95 gr/cm ³ ; 1.05 gr/cm ³ ; 1.21 gr/cm ³	HA28, HA 37, HA 46	5.29	52	47	21.74	58	4.64	3885.61	Roca Moderadamente Fracturada	1.98	792.00	149.00	20.40	14.52	18.60	31.19
22	11/11/2019	NV 4024 PY02	CL	1.21 gr/cm ³ ; 1.26 gr/cm ³	HA 46; HA 45/55	6.98	55	50	21.65	61	4.88	2464.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.99	870.00	206.00	3.27	10.80	5.16	12.41
23	24/11/2019	NV 4016 PY01	CL	1.02 gr/cm ³ ; 1.19 gr/cm ³	HA37 - HA46	6.24	49	44	21.69	55	4.40	3740.55	Roca Moderadamente Fracturada	1.98	700.00	165.00	19.20	14.73	17.40	29.81
24	24/11/2019	NV 4080 PY03	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	9.30	39	34	21.56	45	3.60	2465.24	Roca Fracturada	1.90	912.00	281.00	9.46	11.70	16.30	22.18
25	27/11/2019	NV 4116 PY04	CL	1.19 gr/cm ³	HA46	4.01	43	38	21.83	49	3.92	3449.39	Roca Moderadamente Fracturada	1.90	737.00	108.80	15.50	9.71	12.90	22.38
26	27/11/2019	NV 4104 PY02	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	8.37	39	34	21.59	45	3.60	2466.24	Roca Fracturada	1.89	735.00	226.90	6.99	14.10	16.10	22.51
27	29/11/2019	NV 4072 PY03	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	7.08	38	33	21.65	44	3.52	3207.57	Roca Fracturada	1.89	888.00	211.00	13.20	11.80	33.70	38.07
28	02/12/2019	NV 4072 PY04	CL	1.028 g/cm ³	HA37	4.61	41	36	21.79	47	3.76	2467.24	Roca Fracturada	1.89	2051.00	209.00	34.40	27.20	16.90	47.00
29	05/12/2019	NV 4008 PY01	CL	1.20 gr/cm ³	HA46	4.61	48	43	21.79	54	4.32	3693.12	Roca Moderadamente Fracturada	2.89	1426.00	174.10	14.80	12.00	14.40	23.88
30	08/12/2019	NV 4064 PY03	CL	0.95 gr/cm ³	HA37	7.03	42	37	21.65	48	3.84	2468.24	Roca Fracturada	1.89	1031.00	225.70	11.40	4.65	7.07	14.20
31	11/12/2019	NV 4064 PY04	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	4.27	44	39	21.81	50	4.00	3500.00	Roca Fracturada	1.89	1016.00	136.10	36.20	33.50	38.20	62.39
32	14/12/2019	NV 4064 PY05	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	4.50	43	38	21.79	49	3.92	2469.24	Roca Fracturada	1.88	1012.00	143.20	29.80	25.30	26.30	47.11
33	16/12/2019	NV 4056 PY04	CL	1.02 gr/cm ³	HA37	4.21	45	40	21.82	51	4.08	3549.22	Roca Fracturada	1.90	824.00	120.90	16.50	18.90	29.30	38.57
34	18/12/2019	NV 4000 PY01	CL	1.20 gr/cm ³	HA46	10.03	52	47	21.53	58	4.64	2470.24	Roca Fracturada	1.92	782.00	280.40	5.66	4.84	12.60	14.64
35	21/12/2019	NV 4056 PY05	CL	1.08 gr/cm ³	HA37	4.87	48	43	21.77	54	4.32	3693.12	Roca Fracturada	1.90	1308.00	176.00	41.00	28.30	44.30	66.67
36	23/12/2019	NV 4056 PY06	CL	1.08 gr/cm ³	HA37	10.39	51	46	21.52	57	4.56	2471.24	Roca Fracturada	1.98	795.00	293.00	10.10	12.10	16.00	22.46
37	25/12/2019	NV 4096 PY02	CL	1.08 gr/cm ³	HA37	4.50	39	34	21.79	45	3.60	3255.87	Suelo Residual	1.75	996.00	142.00	53.90	53.90	56.00	94.59
38	30/12/2019	NV 4048 PY05	CL	0.95 gr/cm ³	HA28	6.63	38	33	21.67	44	3.52	2472.24	Roca Fracturada	1.85	1450.00	252.60	6.66	7.24	5.38	11.21
Valor mínimo						3.06	22	17	20.97	28	2.24	2454.24		1.66	72.00	108.8	2.60	1.38	2.34	6.00
Valor máximo						58.93	55	50	21.92	61	4.88	3982.87		2.89	2051.00	500.00	53.90	53.90	56.00	94.59
Moda						#N/A	39	34	#N/A	45	3.60	3449.39		1.66	#N/A	176.00	5.35	13.60	17.40	22.18
Valor promedio						9.65	41	36	21.64	48	3.82	2908.40		1.89	901.79	213.43	14.96	13.33	18.03	27.66
Desviación estándar						10.59	9	9	0.21	9	0.75	562.89		0.20	452.04	84.98	11.11	10.19	12.59	18.61
Coefficiente de variación %						109.81	22	25	0.95	20	19.72	19.35		10.45	50.13	39.82	74.23	76.45	69.84	67.29

Fuente: Datos tomados en campo

Tabla 7

Mediciones en campo lejano de las vibraciones por voladura durante el año 2020

Item	Fecha	Proyecto	Monitoreo	Densidad explosivo	Tipo de Explosivo	Distancia escalar(d)	RMR	GSI	Vpp	Resist. Roca intacta (Mpa)	Resist. Tracción (Mpa)	Velocidad de propagación de onda P (Vp) m/s	Tipo de Material	Densidad de la roca gr/cm ³	W (Kg) (Peso max/retardo)	R Distancia entre la carga explosiva y el punto de medición (metros)			Vpp (mm/s)			Vps (mm/s)
																Trans	Vert	Long	Trans	Vert	Long	
39	01/01/2020	NV 4048 PY07	CL	1.02 gr/cm ³ , 1.01 gr/cm ³	HA37, SANG	6.14	38	33	21.69	44	3.52	3207.57	Roca Fracturada	1.85	1155.00	208.70	11.20	13.80	19.40	26.31		
40	07/01/2020	NV 4040 PY05	CL	1.34 gr/cm ³	SANG	4.23	42	37	21.82	48	3.84	2473.24	Roca Fracturada	1.88	1697.00	174.20	5.20	10.10	15.70	19.38		
41	11/01/2020	NV 4040 PY06	CL	0.803 gr/cm ³ , 1.023 gr/cm ³	ANFO, HA 37	2.48	43	38	21.99	49	3.92	3449.39	Roca Fracturada	1.88	1930.00	109.10	44.60	24.70	38.60	63.95		
42	15/01/2020	NV 4040 PY04	CL	0.805 gr/cm ³ , 0.949 gr/cm ³	ANFO, HA28	2.17	48	43	22.03	54	4.32	2474.24	Roca Fracturada	1.95	1229.00	76.00	46.50	43.50	76.10	99.23		
43	21/01/2020	NV 4032 PY03	CL	0.94 gr/cm ³ , 1.02 gr/cm ³	ANFO, HA 28	3.46	46	41	21.88	52	4.16	3596.91		1.95	1228.00	121.40	16.85	17.40	31.40	39.66		
44	23/01/2020	NV 4032 PY04	CL	0.94 gr/cm ³ , 1.05 gr/cm ³	ANFO, HA 37	3.15	46	41	21.91	52	4.16	2475.24	Roca Fracturada	1.92	1373.00	116.90	37.80	19.40	33.30	53.98		
45	26/01/2020	NV 4088 PY03	CL	0.80 gr/cm ³	ANFO	3.76	38	33	21.85	44	3.52	3207.57	Roca Fracturada	1.85	1169.00	128.70	95.90	55.80	96.70	147.18		
46	05/02/2020	NV 4024 PY03	CL	0.805 g/cm ³ , 0.949 g/cm ³	ANFO, HA28	5.10	41	36	21.75	47	3.76	2476.24	Roca Fracturada	1.89	974.00	159.30	6.95	10.00	14.00	18.56		
47	05/02/2020	NV 4024 PY06	CL	0.804 g/cm ³	ANFO	17.19	47	42	21.36	53	4.24	3646.13	Roca Moderadamente Fracturada	1.93	284.00	289.70	6.95	10.00	14.00	18.56		
48	09/02/2020	NV 4080 PY04	CL	0.801 g/cm ³	ANFO	6.44	39	34	21.68	45	3.60	2477.24	Roca Fracturada	1.91	1442.00	244.40	7.40	10.20	5.82	13.88		
49	11/02/2020	NV 4024 PY04	CL	0.805 g/cm ³	ANFO	2.91	50	45	21.94	56	4.48	3790.03	Roca Moderadamente Fracturada	1.98	1779.00	122.60	29.20	18.50	32.00	47.11		
50	14/02/2020	NV 4024 PY05	CL	0.809 gr/cm ³	ANFO	4.28	49	44	21.81	55	4.40	2478.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.98	1349.00	157.20	8.45	7.05	7.41	13.27		
51	18/02/2020	NV 4072 PY05	CL	0.804gr/cm ³ ;1.022gr/cm ³	ANFO;SANG	5.29	40	35	21.74	47	3.76	3306.18	Roca Fracturada	1.86	1692.00	217.70	21.10	39.50	22.70	50.21		
52	22/02/2020	NV 4016 PY03	CL	1.10 gr/cm ³ ;1.02 gr/cm ³ ;0.80 gr/cm ³	SAN G, HA 37, ANFO	6.34	47	42	21.68	53	4.24	2479.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.95	1686.00	260.40	9.60	6.24	10.60	15.60		
53	22/02/2020	NV 4072 PY06	CL	1.10 gr/cm ³ ; 1.02 gr/cm ³ ; 0.80 gr/cm ³	SAN G, HA 37, ANFO	5.01	46	41	21.76	52	4.16	3596.91	Roca Fracturada	1.89	1955.00	221.30	12.20	14.90	18.20	26.50		
54	28/02/2020	NV 4016 PY04	CL	1.022 gr/cm ³ ; 1.202 gr/cm ³	HA37; HA46	3.84	53	48	21.85	59	4.72	2480.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.98	2084.00	175.30	33.40	22.80	34.80	53.35		
55	28/02/2020	NV 4064 PY07	CL	0.804 gr/cm ³	ANFO	5.42	44	39	21.73	50	4.00	3500.00	Roca Moderadamente Fracturada	1.89	794.00	152.70	33.40	22.80	34.80	53.35		
56	08/03/2020	NV 4016 PY05	CL	1.18 gr/cm ³	HA46	4.86	51	46	21.77	57	4.56	2481.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.89	2043.00	219.50	7.73	12.80	16.80	22.49		
57	10/03/2020	NV 4112 PY02	CL	0.8 gr/cm ³	ANFO	5.37	36	31	21.74	42	3.36	3112.78	Roca Fracturada	1.73	723.00	144.50	10.30	7.43	9.60	15.92		
58	13/03/2020	NV 4056 PY09	CL	0.8 gr/cm ³ , 1.02 gr/cm ³	ANFO, HA37	5.97	47	42	21.70	53	4.24	2482.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.89	790.00	167.80	9.12	17.80	26.50	33.20		
59	14/03/2020	NV 4048 PY08	CL	0.8 gr/cm ³	ANFO	4.28	49	44	21.81	55	4.40	3740.55	Roca Moderadamente Fracturada	1.89	664.00	110.40	33.40	24.10	36.10	54.77		
60	13/04/2020	NV 4048 PY10	CL	1.02 gr/cm ³ , 0.95gr/cm ³ , 0.8 gr/cm ³	HA37, HA28, ANFO	6.10	46	41	21.70	52	4.16	2483.24	Roca Fracturada	1.89	1088.00	201.30	52.10	35.00	44.60	77.00		
61	23/04/2020	NV 4000 PY02	CL	1.26 gr/cm ³ , 1.2gr/cm ³	HA45-55, HA 46	3.70	54	49	21.86	60	4.80	3982.87	Roca Fracturada	1.89	1470.00	141.80	10.90	9.93	20.90	25.58		
62	25/04/2020	NV 4048 PY11	CL	1.02 gr/cm ³ , 0.95gr/cm ³ , 0.8 gr/cm ³	HA37, HA28, ANFO	5.81	48	43	21.71	54	4.32	2484.24	Roca Fracturada	1.89	1088.00	191.60	21.40	11.70	16.50	29.45		
63	27/07/2020	NV 4016 PY07	CL	1.022 gr/cm ³	HA37	3.23	42	37	21.90	43.1	3.45	3403.09	Roca Fracturada	1.84	1508.00	125.30	27.70	27.90	21.40	44.76		
64	06/08/2020	NV 4016 PY08	CL	1.022	HA37	1.48	46	41	22.16	46	3.68	2485.24	Roca Fracturada	1.89	2459.00	73.28	5.96	5.84	8.85	12.16		
65	09/08/2020	NV 4072 PY07	CL	1.022-0.804 gr/cm ³	HA37 - ANFO	4.06	49	44	21.83	49	3.92	3740.55	Roca Fracturada	1.91	517.00	92.40	42.00	21.30	26.80	54.18		
66	13/08/2020	NV 4072 PY08	CL	1.022 - 0.804 gr/cm ³	HA37 - ANFO	6.86	47	42	21.66	49	3.92	2486.24	Roca Moderadamente Fracturada	1.91	1329.00	250.00	8.69	6.91	14.60	18.34		
67	13/08/2020	NV 4128 PY01	CL	0.949 gr/cm ³	HA28	15.12	46	41	21.40	48	3.84	3596.91	Roca Fracturada	1.91	290.00	257.40	8.69	6.91	14.60	18.34		
Valor mínimo						1.48	36	31	21.36	42	3.36	2473.24		1.73	284.00	73.28	5.20	5.84	5.82	12.16		
Valor máximo						17.19	54	49	22.16	60	4.80	3982.87		1.98	2459.00	289.70	95.90	55.80	96.70	147.18		
Moda						#N/A	46	41	#N/A	52	4.16	3596.91		1.89	1088.00	#N/A	33.40	10.00	14.00	18.56		
Valor promedio						5.31	45	40	21.78	51	4.05	3020.48		1.90	1303.07	169.34	22.92	18.42	26.30	40.22		
Desviación estándar						3.31	5	5	0.16	5	0.38	559.27		0.05	544.12	58.87	20.13	12.30	19.76	29.73		
Coefficiente de variación %						62.34	10	11	0.74	9	9.39	18.52		2.62	41.76	34.76	87.82	66.78	75.12	73.94		

Fuente: Datos tomados en campo

En la tabla 5 se puede observar que, en los 67 proyectos de voladura registrados en los años 2019 y 2020, se han utilizado una gran variedad de explosivos del tipo Anfo, Heavy Anfo y emulsión gasificada SAN G, lo cual indica que la empresa minera en estudio siempre está probando mezclas explosivas para sus operaciones de voladura. También se muestra a detalle las propiedades del macizo rocoso como RMR, GSI, Resistencia a la roca intacta, resistencia a la tracción y densidad de la roca; con un Coeficiente de variación (CV) menor al 20%, es decir mayor al 5% que indica variabilidad en sus resultados; pero las mediciones la velocidad pico partícula (VVP) tiene un valor mínimo de 20.97 mm/s, valor máximo de 22.16 mm/s, valor promedio de 21.70 mm/s, su coeficiente de regresión es 1 y el CV de la Velocidad pico partícula (VPP) es 0.92%, el cual indica que todas las mediciones del VPP son homogéneas (menor al 5% de aceptación) indicando que el promedio de las VPP representan en forma adecuada al conjunto de las 67 mediciones de vibraciones realizadas. Asimismo, se puede observar en la tabla 5, que durante el periodo del año 2019 al 2020, las distancias entre la carga explosiva y el punto de medición (R), la distancia mínima fue de 73.28 m, una distancia máxima de 500 m, una distancia promedio de 194.35 m además y el CV de la distancia fue de 38.97% %, es decir mayor al 5% que indica variabilidad en sus resultados.

La Velocidad de propagación de onda P (V_p) tiene un valor mínimo de 2454.24 m/s, valor máximo de 3982.87 m/s, valor promedio de 2956.91 m/s y el CV de V_p es de 18.93%, es decir mayor al 5% que indica variabilidad en sus resultados.

En la tabla 6, de los 38 proyectos de voladura registrados en el año 2019, el CV de la Velocidad pico partícula (VPP) es 0.95%, el cual indica que sus valores homogéneos (menor al 5% de aceptación).

En la tabla 7, de los 29 proyectos de voladura registrados en el año 2020, el CV de la Velocidad pico partícula (VPP) es 0.74%, el cual indica que sus valores homogéneos (menor al 5% de aceptación).

3.2 Modelo predictivo de las vibraciones por voladura en campo lejano

Con los datos de la tabla 5, se realizó el análisis de regresión para obtener el modelo matemático de las vibraciones y estimar las constantes K_v y B_v .

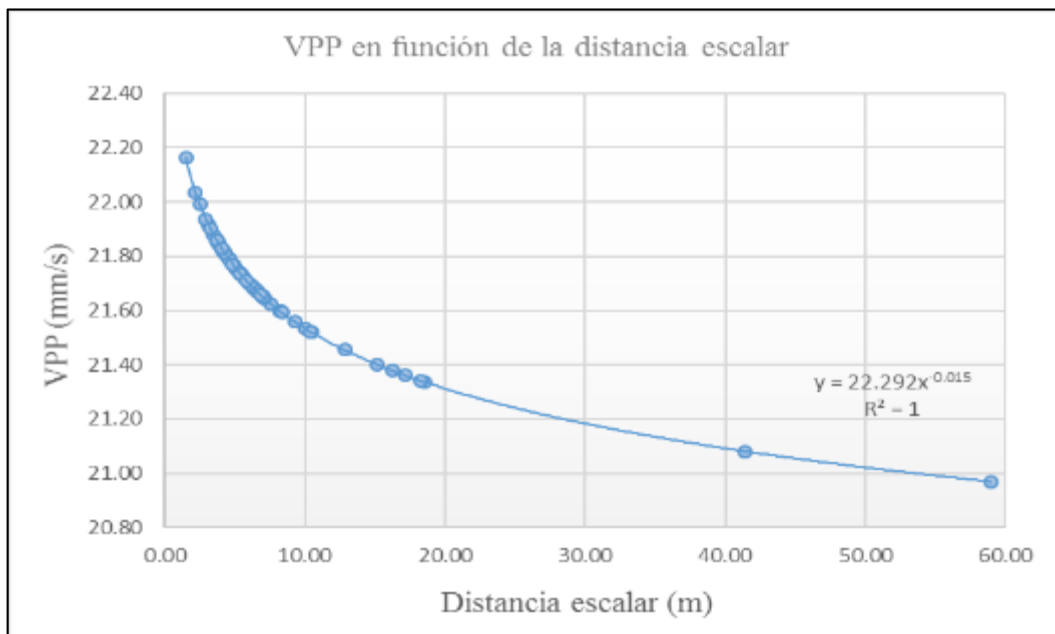


Figura 10. Representación gráfica del modelo matemático de las vibraciones por voladura durante el año 2019 y 2020

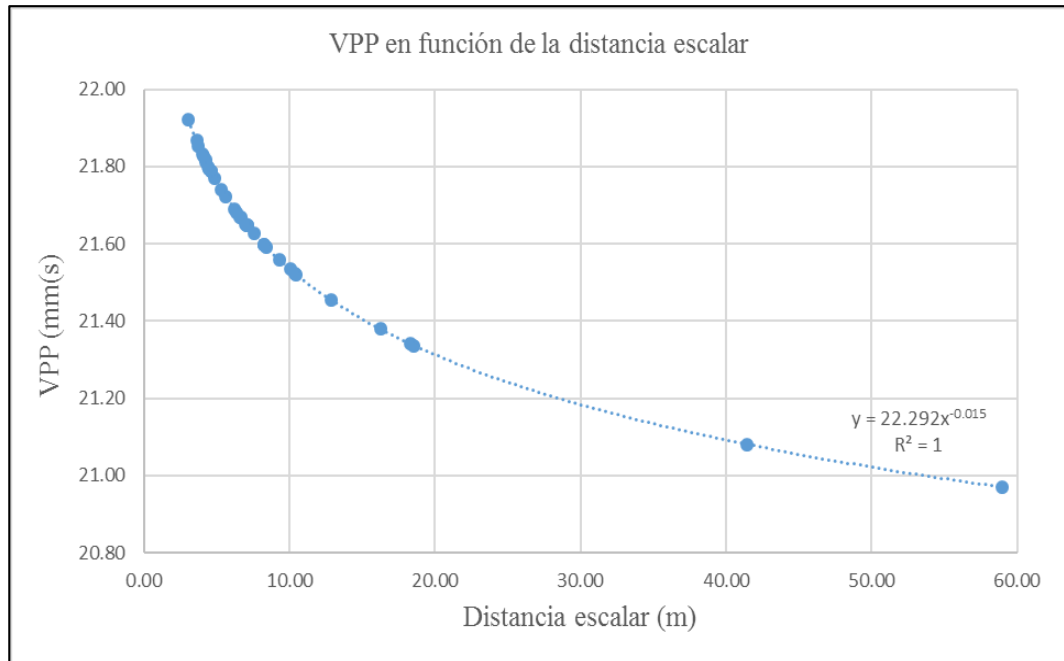


Figura 11. Representación gráfica del modelo matemático de las vibraciones por voladura durante el año 2019

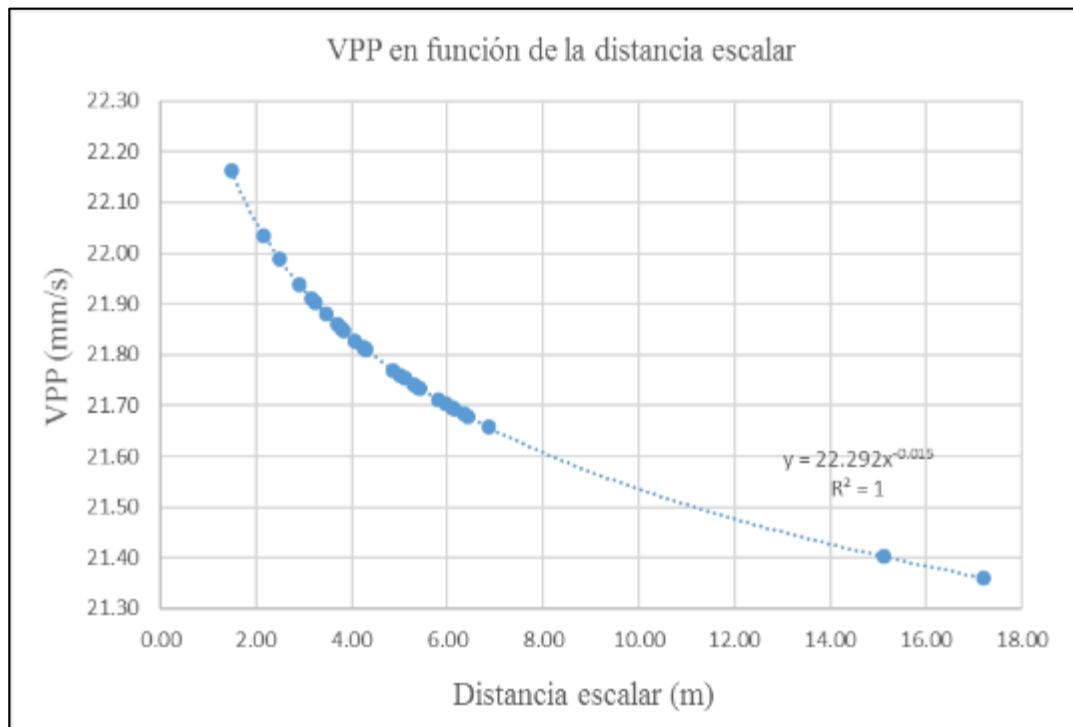


Figura 12. Representación gráfica del modelo matemático de las vibraciones por voladura durante el año 2020

Como se puede apreciar en las figuras 10, 11 y 12; el modelo matemático es idéntico para los años 2019 y 2020. El coeficiente de determinación $R^2=1$, indica que el 100 % de los datos se ajustan a una línea de tendencia potencial con un modelo de ecuación:

$$y = 22.292x^{-0.015} \quad \dots\dots\text{Ecuación 4}$$

Comparándolo con el modelo matemático de Devine:

$$PPV = K_v \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-B_v} \quad \dots\dots\text{Ecuación 5}$$

Donde obtenemos los constantes K_v y B_v :

$K_v= 22.292$ y $B_v= - 0.015$

K_v y B_v son datos obtenidos de la regresión por lo tanto no varían (no se tocan)

Para determinar R y Q en el modelo de vibración y teniendo la formula desglosamos sus parámetros de la siguiente manera:

R y Q son datos ingresados de acuerdo al diseño a la voladura.

R es la distancia del punto de interés en metros (m) y

Q es la carga por retardo en kilogramos (kg).

Por lo tanto, el modelo predictivo de vibración a campo lejano para la mina a tajo abierto en Cajamarca se define como:

$$PPV = 22.292 \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-0.015} \quad \dots\dots\text{Ecuación 6}$$

3.3 Comparación de resultados de las VPP con las VPP predictivo

Considerando una distancia entre la carga explosiva y el punto de medición “R” y la Carga Máxima Instantánea o Carga por Retardo “Q” en “kg”; se tiene la siguiente tabla después de utilizar el modelo predictivo de vibración:

Tabla 8

Resultados de las VPP con el VPP predictivo

Item	Fecha	Proyecto	Monitoreo	Vpp	Q (Kg) (Peso max/retardo)	R Distancia entre la carga explosiva y el punto de medición	Vpp (predictivo)
1	19/09/2019	NV 4072 PY01	CL	20.97	72.00	500.00	20.970
2	22/09/2019	NV 4080 PY01	CL	21.34	147.00	224.56	21.337
3	24/09/2019	NV 4072 PY02	CL	21.08	92.00	397.30	21.081
4	26/09/2019	NV 4064 PY01	CL	21.65	650.00	180.60	21.647
5	29/09/2019	NV 4072 PY02	CL	21.45	281.00	215.30	21.455
6	05/10/2019	NV 4064 PY02	CL	21.67	742.00	180.00	21.669
7	07/10/2019	NV 4056 PY02	CL	21.60	1153.00	279.00	21.599
8	10/10/2019	NV 4056 PY03	CL	21.72	714.00	149.50	21.724
9	12/10/2019	NV 4048 PY01	CL	21.87	1041.00	116.20	21.868
10	13/10/2019	NV 4048 PY02	CL	21.60	917.00	250.90	21.596
11	01/10/2019	NV 4056 PY01	CL	21.34	480.00	400.60	21.341
12	16/10/2019	NV 4048 PY03	CL	21.85	1232.00	131.60	21.854
13	20/10/2019	NV 4040 PY01	CL	21.68	1872.00	276.00	21.681
14	22/10/2019	NV 4048 PY04	CL	21.63	816.00	216.00	21.626
15	25/10/2019	NV 4040 PY02	CL	21.92	1360.00	113.00	21.921
16	27/10/2019	NV 4040 PY03	CL	21.60	1015.00	263.00	21.597
17	31/10/2019	NV 4032 PY01	CL	21.80	1586.00	176.00	21.801
18	01/11/2019	NV 4112 PY01	CL	21.38	107.00	168.00	21.379
19	04/11/2019	NV 4032 PY02	CL	21.83	1175.00	140.00	21.826
20	09/11/2019	NV 4088 PY01	CL	21.52	491.00	232.00	21.520
21	10/11/2019	NV 4024 PY01	CL	21.74	792.00	149.00	21.742
22	11/11/2019	NV 4024 PY02	CL	21.65	870.00	206.00	21.651
23	24/11/2019	NV 4016 PY01	CL	21.69	700.00	165.00	21.688
24	24/11/2019	NV 4080 PY03	CL	21.56	912.00	281.00	21.558
25	27/11/2019	NV 4116 PY04	CL	21.83	737.00	108.80	21.833
26	27/11/2019	NV 4104 PY02	CL	21.59	735.00	226.90	21.593
27	29/11/2019	NV 4072 PY03	CL	21.65	888.00	211.00	21.647
28	02/12/2019	NV 4072 PY04	CL	21.79	2051.00	209.00	21.786
29	05/12/2019	NV 4008 PY01	CL	21.79	1426.00	174.10	21.787
30	08/12/2019	NV 4064 PY03	CL	21.65	1031.00	225.70	21.649
31	11/12/2019	NV 4064 PY04	CL	21.81	1016.00	136.10	21.812
32	14/12/2019	NV 4064 PY05	CL	21.79	1012.00	143.20	21.795
33	16/12/2019	NV 4056 PY04	CL	21.82	824.00	120.90	21.816
34	18/12/2019	NV 4000 PY01	CL	21.53	782.00	280.40	21.534
35	21/12/2019	NV 4056 PY05	CL	21.77	1308.00	176.00	21.769
36	23/12/2019	NV 4056 PY06	CL	21.52	795.00	293.00	21.523
37	25/12/2019	NV 4096 PY02	CL	21.79	996.00	142.00	21.795
38	30/12/2019	NV 4048 PY05	CL	21.67	1450.00	252.60	21.668
39	01/01/2020	NV 4048 PY07	CL	21.69	1155.00	208.70	21.693
40	07/01/2020	NV 4040 PY05	CL	21.82	1697.00	174.20	21.815
41	11/01/2020	NV 4040 PY06	CL	21.99	1930.00	109.10	21.990
42	15/01/2020	NV 4040 PY04	CL	22.03	1229.00	76.00	22.035
43	21/01/2020	NV 4032 PY03	CL	21.88	1228.00	121.40	21.880
44	23/01/2020	NV 4032 PY04	CL	21.91	1373.00	116.90	21.911
45	26/01/2020	NV 4088 PY03	CL	21.85	1169.00	128.70	21.853
46	05/02/2020	NV 4024 PY03	CL	21.75	974.00	159.30	21.754
47	05/02/2020	NV 4024 PY06	CL	21.36	284.00	289.70	21.361
48	09/02/2020	NV 4080 PY04	CL	21.68	1442.00	244.40	21.678
49	11/02/2020	NV 4024 PY04	CL	21.94	1779.00	122.60	21.938
50	14/02/2020	NV 4024 PY05	CL	21.81	1349.00	157.20	21.811
51	18/02/2020	NV 4072 PY05	CL	21.74	1692.00	217.70	21.742
52	22/02/2020	NV 4016 PY03	CL	21.68	1686.00	260.40	21.683
53	22/02/2020	NV 4072 PY06	CL	21.76	1955.00	221.30	21.760
54	28/02/2020	NV 4016 PY04	CL	21.85	2084.00	175.30	21.847
55	28/02/2020	NV 4064 PY07	CL	21.73	794.00	152.70	21.734
56	08/03/2020	NV 4016 PY05	CL	21.77	2043.00	219.50	21.770
57	10/03/2020	NV 4112 PY02	CL	21.74	723.00	144.50	21.737
58	13/03/2020	NV 4056 PY09	CL	21.70	790.00	167.80	21.702
59	14/03/2020	NV 4048 PY08	CL	21.81	664.00	110.40	21.811
60	13/04/2020	NV 4048 PY10	CL	21.70	1088.00	201.30	21.695
61	23/04/2020	NV 4000 PY02	CL	21.86	1470.00	141.80	21.859
62	25/04/2020	NV 4048 PY11	CL	21.71	1088.00	191.60	21.711
63	27/07/2020	NV 4016 PY07	CL	21.90	1508.00	125.30	21.904
64	06/08/2020	NV 4016 PY08	CL	22.16	2459.00	73.28	22.162
65	09/08/2020	NV 4072 PY07	CL	21.83	517.00	92.40	21.828
66	13/08/2020	NV 4072 PY08	CL	21.66	1329.00	250.00	21.657
67	13/08/2020	NV 4128 PY01	CL	21.40	290.00	257.40	21.402

En la tabla 8 se puede observar que las mediciones del VPP coinciden con el VPP predictivo, por lo tanto, no hay error absoluto en el modelo predictivo.

3.4 Comparación de VPP con las Normas USBM y MINEM

Los 67 monitoreos de vibraciones por voladura realizados en la investigación, las cuales tuvieron lugar a distancias entre los 73.28 m y 500 m del proyecto disparado, tuvieron un valor VPP máximo de 22.16 mm/s, y un VPP mínimo de 20.97 mm/s, tal como se muestra en la figura 13.

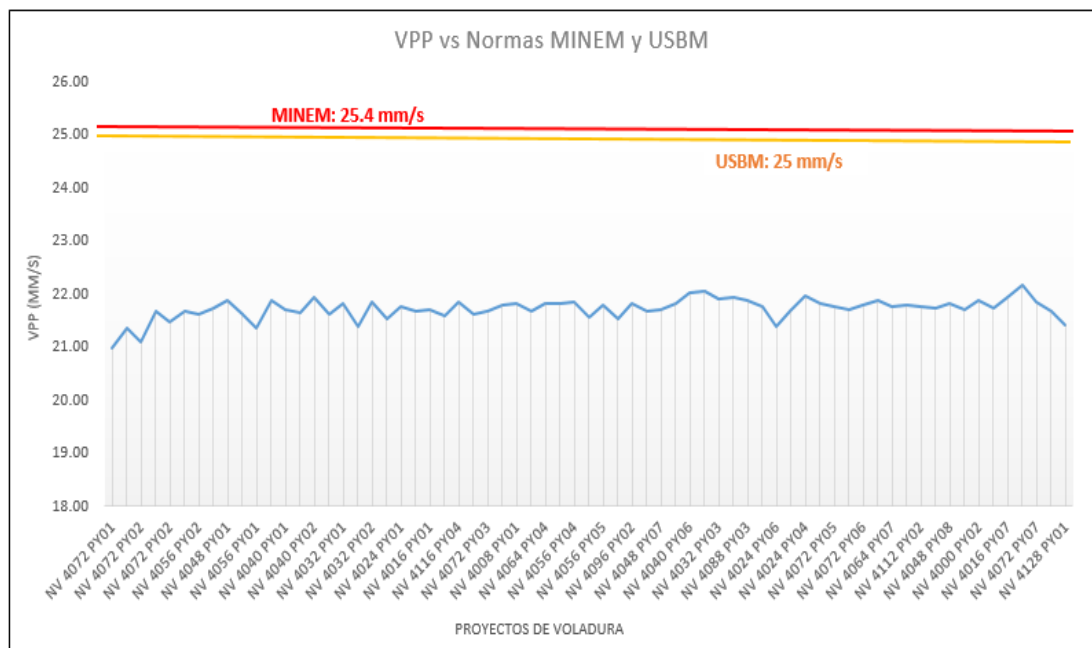


Figura 13. Comparación de VPP con las Normas USBM y MINEM

Las mediciones de la velocidad pico partícula (VPP) para los 67 proyectos de voladura registrados durante el año 2019 al 2010, se encuentran por debajo de los límites permisibles establecidos en la Norma Peruana del MINEM (25.4 mm/s de 92 a 1524 m), y de la Norma Americana USBM (25 mm/s de 90 a 1500m).

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

En la tabla 5 se puede observar que las mediciones de la velocidad pico partícula (VVP) tienen un valor mínimo de 20.97 mm/s, valor máximo de 22.16 mm/s, valor promedio de 21.70 mm/s, el coeficiente de regresión R^2 es 1 y el CV de la Velocidad pico partícula (VPP) es 0.92%, el cual indica que todas las mediciones del VPP son homogéneas (menor al 5% de aceptación) indicando que el promedio de las VPP representa en forma adecuada al conjunto de las 67 mediciones de vibraciones realizadas.

La ecuación a campo lejano de Devine que se aplica cuando la distancia entre el área del disparo y el lugar de monitoreo es mayor a 50 metros, permitió obtener el modelamiento de vibraciones en una mina de oro a tajo abierto en Cajamarca, mostrado en las Figuras 10, 11 y 12, obteniendo como valores de $K_v = 22.292$ y $B_v = -0.015$, a un nivel de confianza del 95%, para poder obtener las simulaciones cuando se trabaja en una roca con dureza promedio con un RMR entre 22 – 55 con un valor promedio de 43 , Clasificación de roca III). Nuestros resultados concuerdan con (Valdivia, 2017) quienes concluyen que, los valores de VPP obtenidos por el modelo de Devine en las pruebas bajo las características y condiciones de la mina El Toro, arrojaron como resultados $K_v = 585.7$ y $B_v = -0.7471$, a un nivel de confianza del 95%.

Nuestros resultados también confirman la investigación realizada por (Orihuela y Dapello, 2009), quienes concluyen que, los valores de VPP obtenidos por el modelo de Devine en las pruebas bajo las características y condiciones de la mina modelo, arrojaron como resultados $k = 1834$ y $b = 1.74$; los cuales son cercanos a los

obtenidos por las fórmulas teóricas australianas analizadas, en una roca con dureza promedio y con una cara libre (RMR* entre 41 – 60, Clasificación de roca: III).

En la figura 13 se puede observar que las mediciones de la velocidad pico partícula (VPP) para los 67 proyectos de voladura registrados durante el año 2019 al 2010, se encuentran por debajo de los límites permisibles establecidos en la Norma Peruana del MINEM (25.4 mm/s de 92 a 1524 m), y de la Norma Americana USBM (25 mm/s de 90 a 1500m). Nuestros resultados en relación con los antecedentes de la investigación (Cintex, 2006) indican que, “para realizar el modelamiento de vibraciones, se tienen los modelos a campo lejano y a campo cercano. El modelo de campo lejano (modelo matemático de Devine), considera a las vibraciones que afectan directamente a las estructuras fuera del tajo, viviendas cercanas al proyecto, es decir se aplica principalmente para medir el nivel de vibraciones para que no afecten la estabilidad de las estructuras. Este modelo de vibraciones nos permite predecir el nivel de vibraciones a partir de mediciones en campo”.

4.2 Conclusiones

De las mediciones registradas a las vibraciones por voladura a los 67 proyectos durante el año 2019 y 2020 se logró diseñar un modelo predictivo de vibraciones por voladura en una mina de oro a tajo abierto en Cajamarca mediante el modelo de Devine aplicado cuando la distancia entre el área del disparo y el lugar de monitoreo es mayor a 50 metros. Por lo tanto; esta conclusión valida la hipótesis general que indica “Al diseñar un modelo predictivo de vibraciones por voladura, se logrará la estimación de la velocidad pico partícula (VPP) máxima producido por voladura y de esta manera se estará en condiciones de minimizar, mitigar y/o evitar

los daños producidos por las vibraciones inducidos por la voladura de rocas en una mina de oro a tajo abierto en Cajamarca”.

Las mediciones la velocidad pico partícula (VPP) tiene un valor mínimo de 20.97 mm/s, valor máximo de 22.16 mm/s, valor promedio de 21.70 mm/s, su coeficiente de regresión R^2 es 1 y el CV de la Velocidad pico partícula (VPP) es 0.92%, el cual indica que todas las mediciones del VPP son homogéneas (menor al 5% de aceptación) indicando que el promedio de las VPP representa en forma adecuada al conjunto de las 67 mediciones de vibraciones realizadas. Por lo tanto; esta conclusión valida la primera hipótesis específica que indica “Midiendo las vibraciones por voladura en campo lejano se estimará el análisis de regresión”.

Se concluye que el modelo predictivo de vibración a campo lejano para la mina a tajo abierto en Cajamarca se define como $PPV = 22.292 \left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{-0.015}$, obteniendo como valores de $K_v = 22.292$ y $B_v = -0.015$, a un nivel de confianza del 95%, para poder obtener las simulaciones cuando se trabaja en una roca con dureza promedio con un RMR entre 22 – 55 con un valor promedio de 43, Clasificación de roca III). K_v y B_v son constantes que dependen de las características propias del lugar en estudio como geología, suelos, topografía, entre otros. “R” es la distancia al punto de medición y “Q” es el peso máx./retardo expresado en Kg.

Esta conclusión valida la segunda hipótesis específica que indica “analizando las vibraciones por voladura en campo lejano, se estimará el Modelo predictivo de las vibraciones”. Esta conclusión contesta a la pregunta de investigación ¿Por qué

diseñar un modelo predictivo de vibraciones por voladura en una mina de oro a tajo abierto? De esta manera con el modelo predictivo se estará en condiciones de minimizar, mitigar y/o evitar los daños producidos por las vibraciones inducidos por la voladura de rocas en una mina de oro a tajo abierto en Cajamarca

Se concluye que las mediciones del VPP coinciden con el VPP predictivo, el análisis estadístico muestra que no hay error absoluto en el modelo predictivo. Para poder generar un modelo matemático que predecirá la velocidad pico partícula en una voladura es importante definir las variables que intervendrán en este. Como se explicó anteriormente, la VPP depende de dos factores, la distancia en metros entre la carga explosiva y el punto de medición (D) y el peso de la carga explosiva en kilogramos (Q). Esta conclusión valida la tercera hipótesis específica que indica “al comparar los resultados de las VPP con las VPP predictivo, se determinará el margen de error del modelo”.

Se concluye que las mediciones de la velocidad pico partícula (VPP) para los 67 proyectos de voladura registrados durante el año 2019 al 2010, se encuentran por debajo de los límites permisibles establecidos en la Norma Peruana del MINEM (25.4 mm/s de 92 a 1524 m), y de la Norma Americana USBM (25 mm/s de 90 a 1500m). Esta conclusión valida la cuarta hipótesis específica que indica “al comparar los resultados de las VPP con las Normas USBM y MINEM, se verificará si las vibraciones por voladura superan los valores críticos de estas Normas”.

Una limitación al estudio fue, el no utilizar equipos como estaciones totales o GPS en el momento de medir distancias ya que al utilizar cintas métricas se incurre en errores, ya sean del instrumento en sí, humanos o los originados por la dificultad del terreno, aumentando así el error total de medición.

Por otro lado, debido a que las pruebas de voladura fueron realizadas en superficie, se recomienda realizar el diseño de un modelo predictivo para el comportamiento del airblast, producto de las voladuras; ya que la mayor parte de energía en este caso se libera en forma de airblast y no en vibraciones.

De los resultados experimentales se concluyó que las vibraciones generadas por las voladuras a campo lejano en la mina en estudio, se encuentran por debajo de los límites permisibles establecidos en la Norma Peruana del MINEM y la Norma Americana USBM, pero también es importante considerar dentro de los efectos negativos de dichas voladuras la respuesta humana frente a estas vibraciones; ya que estas variables dependerán de la percepción de las personas involucradas, y para esto es necesario realizar estudios más precisos que escapen de un análisis de ingeniería.

REFERENCIAS

- Bejui, H. (1982). *Les appareils de mesures des vibrations. Tendances et évolution. Tunnels et Ouvrages Souterrains*, Novembre (n.spécial).
- Bernaola J., Castilla J., Herrera J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Departamento de explotación de recursos minerales y obras subterráneas. Universidad Politécnica de Madrid.
- Cameron Mc Kenzie, José Arriagada V., Iván Villalba M. (2006). *Curso Vibraciones*. Enaex.
- Cintex, (2006). *Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento*. Chile.
- Corimanya Mauricio J. (2014). *Modelamiento, monitoreo y control de las vibraciones para evitar daños inducidos por la voladura de rocas de una operación minera superficial*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero de Minas. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú.
- Chapot, P. (1981). *Étude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport de Recherche 105: 1-56.
- Devore, Jay (2008). *“Probabilidad y Estadística, para Ingeniería y Ciencias”*, International Thomson Editores Séptima Edición. México.
- Enrique Sánchez L. (2012). *Control de Vibraciones*. II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental, Capítulo 18. Sao Paulo, Brasil.
- Hernández Sampieri, R, Fernández, C & Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación*. (Quinta Edición). México D.F, México: McGraw-Hill.

- Kahriman, O. K. (2010). *The analysis of blast-induced ground vibration at can open-pit lignite mine in turkey*. Turky .
- Miranda A. y Díaz E. (2015). *Instrumentation en voladuras, octava sesión*. Centro Tecnológico Minero CETEMIN. Cajamarca, Perú.
- Niño Rojas, V. (2011). *Metodología de la investigación, diseño y ejecución*. Ediciones de la U. Bogotá, Colombia.
- Ñaupas, H. M. (2013). *Metodología de la investigación científica y elaboración de tesis*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.
- Orihuela S. y Dapello J. (2009). *Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de vibraciones en una voladura en una Mina modelo*. Tesis para obtener el título de Ingeniero de Minas de la Pontifica Universidad Católica del Perú. Lima-Perú.
- Pampacata Holgado L. (2015). *Análisis de vibraciones inducidas por la voladura de rocas en cantera Atocongo en zonas cercanas a poblaciones*. Tesis para obtener el título de Ingeniero de Minas de la Universidad Nacional de Ingeniería. Lima-Perú.
- Peralta Herrera G., Mojica Villamizar R. (2012). *Características y control de las vibraciones producidas por acción de las voladuras en minas a cielo abierto*. Escuela de Ingeniería de Minas, UPTC.
- Rouse, N. T. (2015). *The relative effect of charge dimensions on elastic vibration attenuation and blast-induced seismic energy concepts*. Missouri, Estados Unidos: Universidad de Cienacia y Tecnología.

Rustom, Antonio (2012), “*Estadística Descriptiva, Probabilidad e Inferencia. Una Visión Conceptual y Aplicada*”, Facultad de Ciencias Agronómicas - Universidad de Chile.

Ruiz Valencia D., Otálora Sánchez C. & Rodríguez Ordóñez J. (2007). *Efecto de las vibraciones generadas por voladura en minas sobre rocas*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Scherpenisse, C. R. (2007). *Daño por voladura y técnicas de evaluación*. PERU: ASP BLASTRONICS.

Walpole y Myers (2007). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*” PRENTICE HALL, INC. Octava Edición. México.

Walker, S.; Young, P. A.; Davey, P. M. (1982). *Development of response spectra techniques for prediction of structural damage from open-pit blasting vibrations*. Mining Industry 91(4): A55-A62.

Whitby-Cotescu, L.; Shillaber, J.; Coates, D. F. 1971. Pit slope manual, chap. 10: Environmental planning. CANMET rep. 77-1, Ottawa, 93p.

ANEXOS

