

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**“ESTUDIO DE SISMICIDAD INDUCIDA PARA SOLUCIONAR  
PROBLEMAS DE INESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO DEL SECTOR  
AYALA INFERIOR MINA SAN VICENTE 2022”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR EL BACHILLER: ROGER IVAN BARRIENTOS HUAMAN

ASESOR: JOHNNY HENRRY CCATAMAYO BARRIOS

AYACUCHO-PERÚ

2022

## **DEDICATORIA**

Quiero expresar mi gratitud a Dios, a mi familia, por su apoyo emocional y económico en todo momento. Asimismo, por ser mi fuente de inspiración para lograr esta meta.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis queridos docentes de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH), quienes me brindaron los conocimientos y criterios necesarios para realizar trabajos en la industria minera.

A la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la UNSCH por haberme transmitido los conocimientos, experiencias y orientación vocacional para mi formación profesional como Ingeniero de Minas.

A la compañía minera San Ignacio de Morococha SAA. por haberme permitido realizar dentro de sus ambientes este trabajo de investigación.

## **RESUMEN**

El presente trabajo de investigación denominado “**ESTUDIO DE SISMICIDAD INDUCIDA PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS DE INESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO DEL SECTOR AYALA INFERIOR MINA SAN VICENTE 2022**”, tuvo por objetivo Explicar de qué manera influye el estudio de monitoreo microsísmico en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022. Para ello, se empleó una metodología aplicada de nivel explicativo, con un diseño descriptivo. La población estuvo constituida por el macizo rocoso de la mina San Vicente, la muestra de la presente investigación corresponde a el macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente. Se concluye que el análisis del monitoreo microsísmico en el comportamiento del macizo rocoso permite implementar un sistema de alerta temprana que se acomode a las características y necesidades de la mina, para el reconocimiento de las zonas vulnerables y así poder tomar medidas preventivas correspondientes.

**Palabras claves:** sismicidad, estabilidad, monitoreo

## **ABSTRAC**

The present research work called "MICROSISMIC MONITORING AND ITS INFLUENCE ON THE STABILITY OF THE ROCK MASSIF OF THE SECTOR AYALA INFERIOR MINA SAN VICENTE 2022", had the objective of explaining how the microseismic monitoring study influences the stability of the rock massif of the sector Ayala inferior mine San Vicente 2022. For this purpose, an explanatory level applied methodology was used, with a descriptive design. The population was constituted by the rock massif of the San Vicente mine, the sample of the present investigation corresponds to the rock massif of the lower Ayala sector of the San Vicente mine. It is concluded that the analysis of the microseismic monitoring in the behavior of the rock massif allows the implementation of an early warning system that suits the characteristics and needs of the mine, for the recognition of vulnerable areas and thus be able to take preventive measures.

**Key words:** seismicity, stability, monitoring.

# Índice

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRAC.....	v
Índice de tablas .....	x
Índice de figuras .....	xi
Introducción.....	1
Capítulo I.....	3
Planteamiento del Problema .....	3
1.1. Descripción de la realidad problemática .....	3
1.2. Formulación del problema .....	4
1.2.1. Problema General .....	4
1.2.2. Problemas Específicos .....	4
1.3. Objetivos .....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos .....	4
1.4. Justificación.....	5
1.5. Importancia.....	6
1.6. Hipótesis.....	6
1.6.1. Hipótesis General.....	6
1.6.2. Hipótesis Específico .....	6
1.7. Variables e Indicadores .....	7
1.7.1. Variable Dependiente .....	7
1.7.2. Variable Independiente .....	7
1.8. MATRIZ DE CONSISTENCIA .....	8
1.9. Carta Gant .....	9
Capítulo II.....	10
Marco Teórico .....	10
2.1. Datos de la Unidad Minera.....	10
2.1.1. Ubicación y Acceso .....	10
2.1.2. Marco Geológico .....	11

2.1.3.	Métodos de explotación.....	14
2.1.3.1.	Método de minado de cámaras y pilares.....	14
2.2.	Antecedentes de la investigación .....	15
2.3.	Bases Teóricas.....	18
2.3.1.	Vibraciones .....	18
2.3.2.	Tipos de Ondas .....	19
2.3.2.1.	Propiedades de las ondas de vibración .....	20
2.3.3.	Tipos de ondas .....	22
2.3.4.	Velocidad pico partícula crítica .....	24
2.3.5.	Instrumentación para monitoreo de vibraciones .....	26
2.3.6.	Software de análisis de registros de vibración.....	29
2.4.	Definiciones conceptuales.....	33
Capítulo III	.....	34
Metodología de la investigación.....		34
3.1.	Tipo de Investigación .....	34
3.2.	Nivel de Investigación.....	34
3.3.	Diseño.....	34
3.4.	Población.....	35
3.5.	Muestra.....	35
3.6.	Muestreo.....	35
3.7.	Metodología de trabajo.....	35
3.8.	Unidad de análisis .....	36
3.9.	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.....	36
3.10.	Trabajos realizados.....	37
Capítulo IV	.....	38
Recolección de datos y procedimiento experimental .....		38
4.1.	Aspectos técnicos .....	38
4.2.	Estudio de riesgo sísmico.....	38
Capítulo V	.....	41
Análisis de Resultados.....		41
5.1.	Evaluación de la resistencia de la roca.....	41
5.2.	Equipos de adquisición de datos .....	41

5.2.1.	Esquema general de operación del sistema microsísmico .....	42
5.3.	Estudio de sismicidad inducida.....	43
5.3.1.	Trabajos realizados.....	43
5.4.	Estudio de riesgo sísmico.....	44
5.5.	El Periodo de Retorno, .....	48
5.6.	Análisis y tratamiento de la información .....	48
5.6.1.	Funcionamiento del sistema microsísmico .....	49
5.6.1.1.	Sensores .....	49
5.6.1.2.	Gabinete .....	49
5.6.1.3.	Comunicación Ethernet.....	49
5.6.1.4.	Ordenador de procesamiento .....	49
5.6.2.	Monitoreo microsísmico .....	50
5.6.2.1.	Evento microsísmico.....	50
5.6.2.2.	¿Qué muestra el monitoreo microsísmico?.....	50
5.6.2.3.	Magnitud momento.....	51
5.6.2.4.	Ubicación de eventos microsísmicos .....	52
5.6.2.4.1.	Distancia .....	52
5.6.2.4.2.	Orientación.....	53
5.6.2.4.3.	Ubicación de eventos .....	53
5.7.	Análisis de la solución.....	53
5.7.1.	Sismicidad inducida y rangos del momento de magnitud.....	54
5.7.2.	Parámetros de monitoreo sísmico .....	54
5.7.2.1.	Magnitud.....	54
5.7.2.1.1.	Magnitud local (Ml).....	54
5.7.2.1.2.	Magnitud Nuttli (Mn) .....	54
5.7.2.1.3.	Magnitud momento (Mw).....	54
5.7.2.2.	Energía liberada .....	55
5.7.2.3.	Velocidad pico partícula (VPP) .....	55
5.7.2.4.	Relación de la magnitud, la VPP y la distancia del evento microsísmico	
	57	
5.7.3.	Peligro microsísmico.....	58
5.7.4.	Rango del momento de magnitud (Mw) .....	60
5.7.4.2.	Clasificación .....	60



5.7.4.2.1. Eventos microsísmicos mayores .....	60
5.7.4.2.2. Eventos microsísmicos menores .....	61
5.7.4.3. Tipos .....	61
5.7.4.3.1. Estallido de roca – “Strainburst” .....	61
5.7.4.3.2. Estallido del pilar “Pillar burst” .....	62
5.7.4.3.3. Estallido por desplazamiento de la falla “Fault – slip burst” .....	62
5.7.4.4. Correlación entre el momento magnitud y la distancia .....	62
5.7.4.5. Daño del evento microsísmico.....	63
5.8. Causas del estallido de roca .....	65
5.8.1. Factores geológicos .....	65
5.8.2. Factores geotécnicos .....	65
5.8.3. Factores de mina.....	66
5.8.4. Factores sísmicos.....	66
5.9. Controles aplicables frente a un evento microsísmico .....	67
5.9.1. Sistema de monitoreo microsísmico .....	67
5.9.2. Sostenimientos y relleno .....	67
5.9.3. Taladros de alivio .....	67
5.9.4. Voladura de pre acondicionamiento.....	67
5.10. Análisis de monitoreo microsísmico mediante el software Seis Vis .....	68
5.11. Análisis de la liberación de energía vs. Sostenimiento .....	70
5.12. Plan de contingencia según los niveles de riesgo.....	71
Conclusiones.....	76
Recomendaciones .....	77
Referencia bibliográfica .....	78

## Índice de tablas

Tabla 1.	Estimación velocidad de partícula crítica teórica en tipos de roca .....	25
Tabla 2.	Data sísmica registrada.....	37
Tabla 3.	Resistencia de la roca dolomita brechada mineralizada (DOL-BX-MIN41	
Tabla 4.	Valores de correlación entre la energía liberada y la VPP.....	56
Tabla 5.	Estimación del peligro sísmico, probabilidad de ocurrencia por día .....	59
Tabla 6.	Ocurrencias de eventos microsísmicos .....	60
Tabla 7.	Correlación entre el momento magnitud y la distancia.....	63
Tabla 8.	Análisis de la liberación de energía vs. Sostenimiento .....	71
Tabla 9.	Plan de contingencia según los niveles de riesgo (Mw).....	73
Tabla 10.	Rango de la magnitud según el grado de stress de la roca (Mw).....	75

## Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de la mina San Vicente .....	10
Figura 2. Estratigrafía.....	12
Figura 3. Mineralización tipo manto con cámaras y pilares.....	15
<b>Figura 4.</b> Comportamiento de la frecuencia y desplazamiento de las vibraciones..	21
<b>Figura 5.</b> Onda completa de vibración .....	22
<b>Figura 6.</b> Movimiento de las partículas dentro de la onda P .....	23
<b>Figura 7.</b> Movimiento de las partículas dentro de la onda S .....	24
<b>Figura 8.</b> Análisis de registros de vibración con Blastware con llave.....	31
<b>Figura 9.</b> Reporte de vibraciones con Seismograph Data Analysis .....	32
<b>Figura 10.</b> Distribución de Poisson y Campana de Gauss. Data del 10 de agosto del 2021 al 30 de mayo del 2022.....	39
<b>Figura 11.</b> Actividad sísmica mensual de Agosto del 2021 a mayo del 2022.....	39
<b>Figura 12.</b> Sector de Ayala vista en planta .....	40
<b>Figura 13.</b> Paladin® (datalogger), digitaliza las señales análogas transmitidas por los sensores. ....	42
<b>Figura 14.</b> Distribución de Poisson y Campana de Gauss. Data del 10 de agosto del 2021 al 30 de mayo del 2022.....	44
<b>Figura 15.</b> Relación Frecuencia-Magnitud y parámetros “a” y “b”. ....	46
<b>Figura 16.</b> Probabilidad de ocurrencia.....	47
<b>Figura 17.</b> Radios de ruptura según la magnitud del evento .....	47
<b>Figura 18.</b> Distribución de los eventos sísmicos y disparos en el día. ....	48
<b>Figura 19.</b> Correlación entre la energía sísmica liberada y la velocidad pico partícula. ....	56
<b>Figura 20.</b> Determinación de la velocidad pico partícula y la distancia.....	57
<b>Figura 21.</b> Representación del nivel de daño y la VPP con respecto a la magnitud del evento.....	58
<b>Figura 22.</b> Propagación del evento microsísmico a lo largo del macizo rocoso. ...	64
<b>Figura 23.</b> Etapas de las fracturas con respecto a los a esfuerzos axiales .....	65
<b>Figura 24.</b> Magnitud momento vs. Tiempo .....	69
<b>Figura 25.</b> Monitoreo microsísmico - Zona Baja Cuerpos.....	69
<b>Figura 26.</b> Número de eventos vs. Momento de magnitud.....	70
<b>Figura 27.</b> Energía vs. Momento sísmico .....	70

## **Introducción**

El daño a la masa rocosa después de la voladura en la minería subterránea, es de singular prevalencia, porque los trabajadores estarán expuesto a las labores ya realizadas por donde transitan de manera cotidiana al interior de la mina. Muchos incidentes y accidentes mortales por caída de rocas son el resultado del mal diseño de las mallas de perforación y voladura, principalmente por la falta de un estudio adecuado de la geomecánica de la zona y el uso de explosivos de muy alta energía. Por lo que en este trabajo se analizaran diferentes aspectos del comportamiento sísmico del macizo rocoso para ver su grado de inestabilidad, que se produce por la acción de la voladura.

El sector Ayala inferior Mina San Vicente, viene ejecutando un proyecto de implementación de sensores microsísmicos para el mejoramiento de los estándares operacionales y de seguridad, aplicando un monitoreo micro sísmico diario.

El presente estudio de investigación plantea que para el análisis del monitoreo microsísmico en el comportamiento del macizo rocoso del sector Ayala inferior se implemente un paladín adicional de 6 geófonos, 3 uniaxiales y 3 triaxiales, para poder tener más alcance a la profundización, para poder determinar parámetros en las zonas con mayor sismicidad inducida y tener un control en la detención de eventos con desencadenantes, y así no confundir un sonido o ruido eléctrico con un evento, de acuerdo a ello, cumplir con los umbrales designados para el plan de activación de respuesta y qué hacer en casos de eventos microsísmicos bajos y altos según los niveles de riesgo.

Es así, que el trabajo para un adecuado estudio y presentación se ha estructurado en cinco capítulos que se describen a continuación:

El capítulo I se realiza la descripción problemática, se formulan los problemas generales y específicos, se plantean los objetivos y las justificaciones del proyecto.

El capítulo II hace una revisión literaria de los antecedentes referentes al tema a tratar, así mismo se detalla la conceptualización de los aspectos generales de los parámetros a utilizar en el desarrollo del proyecto.

El capítulo III explica los aspectos que involucran las metodologías utilizadas en el presente proyecto.

El capítulo IV muestran los procedimientos de cálculo para resolver las condiciones que requiere el proyecto.

El capítulo V muestra los resultados obtenidos.

Finalmente, en “Conclusiones y Recomendaciones” se reseñan las principales conclusiones y recomendaciones logradas en la presente tesis.

## Capítulo I

### Planteamiento del Problema

#### 1.1.Descripción de la realidad problemática

El proceso minero produce un cambio de tensiones del terreno tal que, eventualmente, éste alcanza la condición de rotura. En el caso de minería profunda en roca dura, la rotura de la roca es violenta y libera mucha energía en forma de ondas sísmicas que pueden producir accidentes al personal, daños en las labores subterráneas y detención de la producción. Típicamente, el nivel de demanda dinámica sobre el sistema de soporte se determina a partir de evaluar la velocidad de eyección de bloques de roca. Dicha velocidad es función de la máxima velocidad de partícula (PPV) en el contorno de la excavación. La evidencia empírica demuestra que la PPV en el borde puede ser varias veces mayor que el valor medido hacia el interior del macizo rocoso. En la presente investigación de estudio se pretende presentar un análisis de sismicidad inducida en la roca con el objetivo de evaluar la estabilidad del mismo. Además, se estudió la influencia de diversos parámetros del factor sísmico.

En el presente, la minería necesita llevar un control de monitoreo microsísmico en sus labores de preparación, desarrollo y explotación, debido a la ocurrencia de incidentes y accidentes en la mina, sin duda la minería es un trabajo de alto riesgo que el hombre realiza. Según los registros, alrededor del 37% de los accidentes mortales en la mediana y gran minería en Perú son la consecuencia del desprendimiento de rocas.

Por ese motivo, se realizó el trabajo de investigación en el sector Ayala inferior Mina San Vicente, con el propósito de disminuir estos accidentes y reducir las pérdidas por daños a la infraestructura minera, es necesario implementar un sistema de aviso que permite el reconocimiento de zonas frágiles para tomar medidas preventivas que corresponden. Un

equipo potente en este escenario es el monitoreo microsísmico que permite monitorear los eventos microsísmicos instantáneos de baja intensidad en el macizo rocoso, generando información en tiempo real de la magnitud, ubicación y extensión.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema General**

¿De qué manera influye el estudio de sismicidad inducida para solucionar problemas de inestabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

- ¿Cuáles son los alcances de la sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022?
- ¿Cuáles son los rangos del momento de magnitud de la sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022?
- ¿Cuáles son los controles aplicables en el análisis de sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Explicar de qué manera influye el estudio de monitoreo microsísmico en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar cuáles son los alcances de la sismicidad inducida para solucionar problemas de inestabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.

- Determinar cuáles son los rangos del momento de magnitud de la sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.
- Identificar cuáles son los controles aplicables en el análisis de sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.

#### **1.4. Justificación**

En nuestro país los departamentos geomecánicos solo consideran el diseño de soporte estático, debido a la falta de un laboratorio dinámico que determine las propiedades dinámicas de la roca, el desconocimiento de estas propiedades lleva a toma de decisiones equivocadas si se presentan altos esfuerzos. La mina San Vicente en la actualidad tiene aproximadamente 400 m de profundidad y la roca es bien competente. Las iniciales ocurrencias sobre estallidos datan de la década del 70, 80 e inicios de los 90 donde se presentó un incremento en la severidad y frecuencia de la producción de estallidos.

Esta investigación, se justifica porque en el país no se usan los métodos dinámicos aplicados al diseño de sostenimiento, la mayoría de las minas se basan en modelos estáticos.

Hacer un diseño de soporte dinámico en labores mineras con altos esfuerzos teniendo en cuenta las propiedades dinámicas de la roca, evitaría sucesos no deseados y elevaría la producción de la mina.



## **1.5.Importancia**

La importancia de esta investigación radica en que los resultados de estudio pueden traer beneficios a la sociedad en general, porque los estallidos de roca causan muertes, destrucción y grandes pérdidas económicas a la empresa minera, lo cual lleva a la baja en el valor de sus acciones en la bolsa de valores, el beneficio del estudio proporcionara seguridad a los trabajadores, protección de equipos y alta productividad.

## **1.6.Hipótesis**

### ***1.6.1. Hipótesis General***

El estudio de la sismicidad inducida influye positivamente en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.

### ***1.6.2. Hipótesis Específico***

- Los alcances de la sismicidad inducida son significativos en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.
- Los rangos del momento de magnitud de la sismicidad inducida son aceptables en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.
- Se identificarán los controles aplicables en el análisis de la sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.

## **1.7. Variables e Indicadores**

### **1.7.1. Variable Dependiente**

Estabilidad del macizo rocoso

#### **Indicadores**

- Caracterización Geomecánica
- Comportamiento geomecánico

### **1.7.2. Variable Independiente**

Sismicidad inducida

#### **Indicadores**

- Alcances del monitoreo microsísmico
- Zonas con mayor concentración de energía
- Medidas preventivas
- Los rangos del momento de magnitud

## 1.8.MATRIZ DE CONSISTENCIA

“ESTUDIO DE SISMICIDAD INDUCIDA PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS DE **INESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO** DEL SECTOR AYALA INFERIOR MINA SAN VICENTE 2022”

TÍTULO

:

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES
<b>PROBLEMA GENERAL</b>	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>HIPÓTESIS GENERAL</b>	<b>V. INDEPENDIENTE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Alcances del monitoreo microsísmico</li> <li>➤ Zonas con mayor concentración de energía</li> <li>➤ Medidas preventivas</li> <li>➤ Los rangos del momento de magnitud</li> </ul>
¿De qué manera influye el estudio de la sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022?	Explicar de qué manera influye el estudio de la sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.	El estudio de la sismicidad inducida influye positivamente en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.	<b>SISMICIDAD INDUCIDA</b>	
<b>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>HIPÓTESIS ESPECÍFICOS</b>	<b>V. DEPENDIENTE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ caracterización geomecánica</li> <li>➤ comportamiento geomecánico</li> </ul>
¿Cuáles son los alcances de la sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022?	Evaluar cuáles son los alcances de la sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.	Los alcances de la sismicidad inducida son significativos en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.	<b>ESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO</b>	
¿Cuáles son los rangos del momento de magnitud de la sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022?	Determinar cuáles son los rangos del momento de magnitud de la sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.	Los rangos del momento de magnitud de la sismicidad inducida son aceptables en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.		
¿Cuáles son los controles aplicables en el análisis de la sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022?	Identificar cuáles son los controles aplicables en el análisis de la sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.	Se identificarán los controles aplicables en el análisis de la la sismicidad inducida en la estabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.		

### 1.9. Carta Gant

ACTIVIDADES	2022															
	FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO			
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
<b>CAPITULO DE RESULTADOS</b>																
RECOLECCION DE DATOS IN SITU	█	█														
CARACTERIZACION DEL MACIZO ROCOSO	█	█	█	█												
DISEÑO DE SOSTENIMIENTO					█	█										
CARACTERIZACION DE MATERIALES					█	█	█									
ANALISIS SISMICO							█	█	█	█						
SIMULACIÓN							█	█	█	█						
<b>DISCUSION</b>																
RECOPIACION DE DATOS, ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS											█	█				
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES												█	█			
REVISION FINAL DE LA TESIS															█	
SUSTENTACION DE LA TESIS																█

## Capítulo II

### Marco Teórico

#### 2.1. Datos de la Unidad Minera

##### 2.1.1. Ubicación y Acceso

La Mina San Vicente se ubica en el Distrito de Vitoc, Provincia de Chanchamayo, Departamento de Junín. Tiene las siguientes coordenadas UTM (WGS84-18S): 458,200E, 8'758'200N y una altitud que varía entre los 1,400 y 2,000 msnm. Ver Figura 1.

**Figura 1.** Ubicación de la mina San Vicente



Fuente: COMPAÑÍA MINERA SAN IGNACIO DE MOROCOCHA S.A.A

El acceso es por la Carretera Central siguiendo la ruta Lima - La Oroya - Tarma - San Ramón hasta el Kilómetro 293 (antes de San Ramón), desde donde se sigue un desvío hacia el sur. Lima – La Oroya 188 km, La Oroya – San Ramón 105 km, San Ramón – Mina San Vicente 17 km. Total 310 km.

## **2.1.2. Marco Geológico**

### **2.1.2.1. Geomorfología**

“El área del proyecto se caracteriza por presentar un paisaje montañoso con relieves abruptos a terrenos bajos planos ondulados y con elevaciones desde 820 msnm hasta 3800 msnm. Se nota la presencia de quebradas pronunciadas que albergan y que muestran escarpes de fallas y planos de falla que dieron forma a estas”.

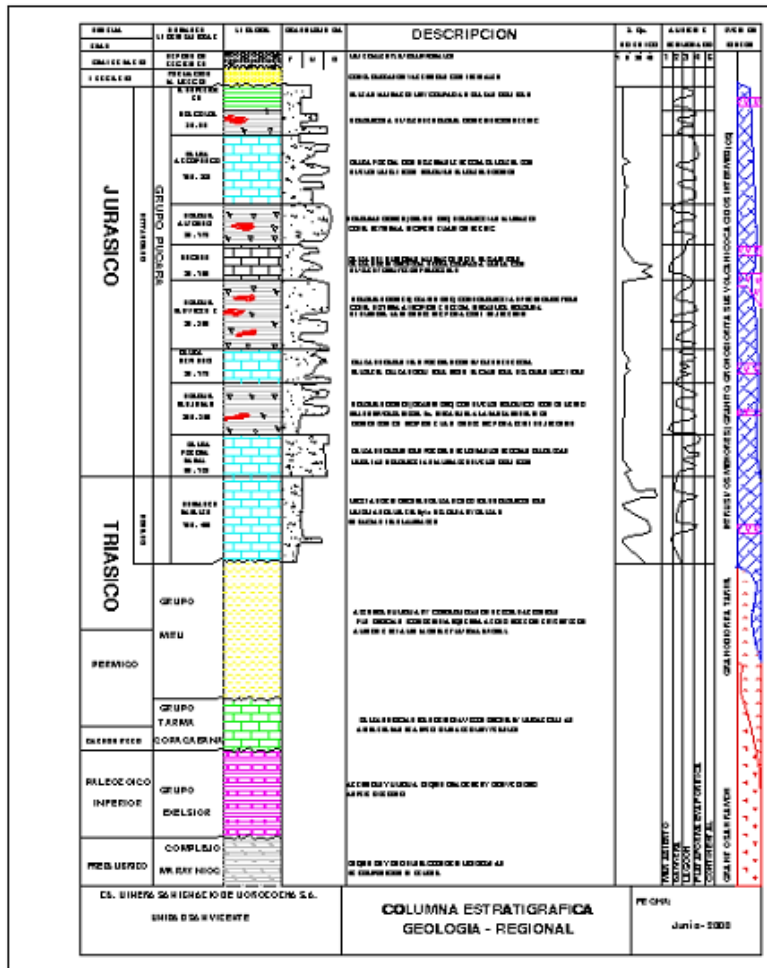
### **2.1.2.2. Geología Regional**

“Regionalmente se ha establecido que el basamento rocoso metamórfico e intrusivo Paleozoico controló el desarrollo de altos estructurales y posiblemente la formación de barras oolíticas. Afloran rocas intrusivas antiguas del Paleozoico superior, representadas por el granito San Ramón al E y la granodiorita Tarma al W. Sobre estos intrusivos descansa la secuencia detrítica y volcánica del Grupo Mitu, del Pérmico, y sobre ella los sedimentos calcáreos con horizontes de mineralización de zinc y plomo del Grupo Pucará, del Triásico Superior-Jurásico Inferior”.

### **2.1.2.3. Estratigrafía**

La secuencia estratigráfica en el área de estudio se describe a continuación desde la unidad inferior hacia las superiores (ver Figura 2).

**Figura 2.** Estratigrafía



Fuente: COMPAÑÍA MINERA SAN IGNACIO DE MOROCOCHA S.A.A

### 2.1.2.4. Geología Estructural

En el área del Proyecto se aprecian 4 sistemas de fallas y fracturas, en el caso de las fallas estas en su mayoría se presentan cerradas sin una considerable potencia o aureola de perturbación y mostrando espejo de falla. Tanto en interior mina como en superficie se han identificado los siguientes sistemas:

“Sistema N - S: Como ejemplos de este sistema se tiene la falla Alicia al este de la mina que controla la sedimentación entre la mina Norte y quebrada Vilcapoma y la falla Solitaria al oeste de la mina”.

“Sistema E - W: Presenta alto buzamiento hacia el Norte, sus desplazamientos son normal-dextral”.

“Sistema NE - SW: Generalmente buza hacia el NW y su movimiento es dextral normal ( $<20^\circ$ ). Este sistema pertenece al lineamiento Puntayacu que es un conjunto de fallas con un ancho de más de 400 m de alcance.

Sistema NW - SE: Presentan alto buzamiento al SW. Las fallas 860 y 1220 son ejemplos de este sistema en interior mina”.

#### **2.1.2.5. Geología Económica**

“San Vicente es un yacimiento del tipo Mississippi Valley estratoligado con mineralización de Zinc y Plomo. La mineralogía ganga está representada por dolomita (carbonato de calcio y magnesio) y en cantidades menores calcita”.

“El área mineralizada tiene una longitud de 11 Km. entre las zonas de San Vicente (Norte y Sur), Uncush Sur, Siete Jeringas y Chilpes, a lo largo de la cual se encuentran afloramientos a manera de lentes irregulares tanto en sentido horizontal como vertical. La mineralización se presenta en las siguientes formas”:

Tipo Cebra: Presenta textura bandeada conteniendo principalmente a la esfalerita de color marrón-gris- amarilla, etc., de cristalización fina no ferrífera (blenda rubia); la galena es errática, compacta a finamente cristalizada con disseminaciones de pirita fina. El ancho horizontal de los mantos mineralizados varía de 1 m a 20 m. La estructura 'Cebra' consiste



en venas paralelas de esfalerita y dolomita, generalmente es paralela a la secuencia sedimentaria.

Tipo Brecha: Presenta esfalerita masiva, esfalerita bandeada y dolomita como fragmentos angulosos, cementados con venas de calcita y/o dolomita.

Tipo Masivo: Presenta esfalerita de grano fino distribuida en pequeños lentes, compacto con dolomita gris clara recristalizada, este tipo de mineralización está ligada a mantos de gran potencia y con alto contenido de Zinc.

### ***2.1.3. Métodos de explotación***

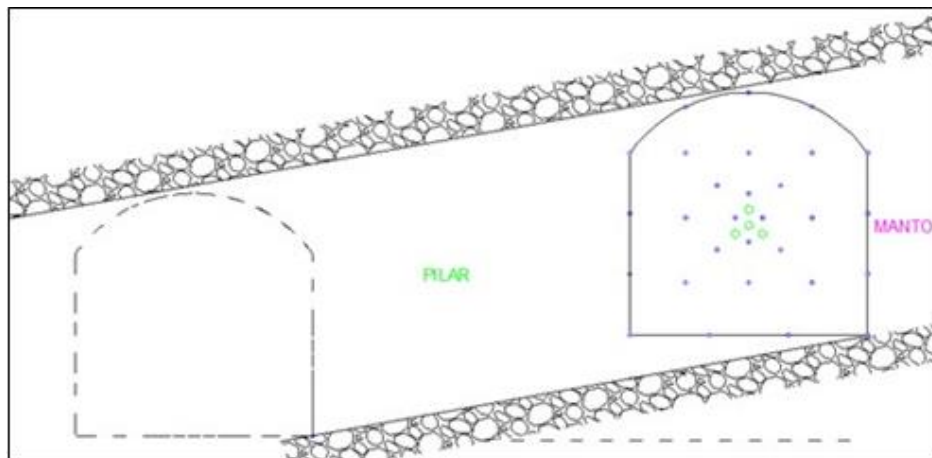
En Mina San Vicente se utilizan los métodos de minado corte y relleno ascendente y el método de minado cámaras y pilares. A continuación, una breve descripción del método de cámaras y pilares aplicado en el sector de estudio.

#### ***2.1.3.1. Método de minado de cámaras y pilares***

Este método de minado es aplicado en mantos con buzamiento de  $0^{\circ}$  a  $25^{\circ}$  y potencias de 2 a 10 m. Las dimensiones y distribución de las cámaras se hacen sobre la marcha de la explotación, dejando pilares en forma irregular obedeciendo a las características presentadas por el yacimiento, zonas de baja ley y/o estéril. En los mantos horizontales la perforación se compara a la perforación de las galerías en donde el ancho y el alto del tajo corresponde a las dimensiones donde opera un equipo electrohidráulico.

El ingreso se realiza por rampas y se intercepta el mineral por la caja techo de la estructura mineralizada con accesos negativos de 4.5 m x 4.0 m de sección, también se tiene accesos de 4.0 m x 3.5 m. Una vez interceptado el manto se desarrolla el frente siguiendo el rumbo de la estructura mineralizada hasta delimitarlo en sus extremos. Ver fig.3.

**Figura 3.** Mineralización tipo manto con cámaras y pilares



Fuente: COMPAÑÍA MINERA SAN IGNACIO DE MOROCOCHA S.A.A

## **2.2. Antecedentes de la investigación**

Wang, Sing H, y otros” (2018). En la tesis *“Diseño de sostenimiento dinámico para mitigar los estallidos de rocas”*, cuyo objetivo principal es “diseñar el sostenimiento dinámico para mitigar los estallidos de roca”. Se concluyó que “para poder mitigar los estallidos de roca se deberá conocer la probabilidad de riesgo de liberación de energía de la masa rocosa, mediante la teoría del PES.

Huanca, (2019). En la tesis *“Análisis de vibraciones producidas por voladura para reducir daños al macizo rocoso en BP. 1200 E – U. P. Andaychagua – Volcan Compañía Minera S. A. A.”*, cuyo objetivo principal es “determinar en qué medida las vibraciones producidas por la voladura permiten reducir los daños al macizo rocoso en el by pass 1200E – unidad de producción Andaychagua de Volcan Compañía Minera S. A. A”. Se concluyó que “en el análisis de las vibraciones producidas por la voladura permite reducir

significativamente los daños al macizo rocoso en el by pass 1200E – unidad de producción Andaychagua – Volcan Compañía Minera S. A. A. – 2018”.

Silva, (2016). En la tesis ***“Evaluación del potencial microsísmico asociada a una falla principal en minería por hundimiento”***, cuyo objetivo principal es “evaluar el potencial microsísmico ocasionado por la activación de una falla principal al entrar en contacto con la zona de abutment stress de una panel Caving mediante la implementación de un modelo numérico en 3DEC. Esto se desarrolla en el marco de un modelo conceptual”. Se concluyó que, “al desarrollar cualquier método de explotación minera ante la presencia de una falla principal, existe el riesgo de que esta última se active generando daños. Es por lo que tiene un peso importante al momento de realizar los desarrollos y planificar la estrategia de extracción. En minería por hundimiento con especial énfasis en el panel Caving, la redistribución de esfuerzos que se genera a partir de la propagación de la cavidad produce un efecto en la falla principal, provocando una activación según la distancia a la que esta última se encuentra”.

Estay, R. (2014) en su tesis ***“Metodología para la evaluación del desempeño de indicadores sísmicos en sismicidad inducida por la minería”*** tuvo como objetivo general “desarrollar y aplicar una metodología de análisis que permita evaluar de manera estándar el comportamiento y desempeño de indicadores sísmicos con la finalidad de minimizar las interferencias operacionales ocasionadas por la sismicidad inducida por la minería. En esta investigación se estudió el comportamiento y desempeño de cuatro indicadores sísmicos: frecuencia de eventos, tasa genérica de momento sísmico, probabilístico y aglomeramiento espacial. Para el cálculo de estos indicadores se utilizan datos de sismicidad inducida registrados en la Mina RENO, de la división El Teniente de Codelco, Rancagua, Chile para

el período 2007-2011 y de la Mina Creighton, ubicada en Sudbury, Ontario, Canadá, en el año 2008. Para cada una de las minas estudiadas, se utilizó un conjunto de los datos para calibrar los parámetros de cada indicador, optimizando su desempeño. El resto de los datos fueron utilizados para verificar los parámetros definidos en la calibración. El desempeño de los indicadores fue cuantificado mediante matrices de contingencia y gráficos ROC. Los resultados obtenidos para cada indicador son levemente superiores a un desempeño aleatorio. El mejor desempeño se obtuvo con el indicador probabilístico, alcanzando valores de PSS = 0,44 en el caso de RENO y 0,19 en el caso de Creighton, sin embargo, cada indicador posee sus ventajas, desventajas y limitaciones. Por consiguiente, la utilización de estos no es exclusiva de sólo uno, sino que pueden utilizarse de manera conjunta, entregando información adicional a la hora de decretar o no un estado de alarma. Realizar la evaluación del desempeño de los indicadores sísmicos a través de la metodología desarrollada, cuantifica la efectividad que estos poseen, permitiendo tomar líneas de acción en caso que su desempeño sea deficiente y así garantizar de mejor manera la seguridad de los trabajadores y del negocio minero”.

Akviña N. (2008) en su tesis “*Análisis numérico del comportamiento dinámico de túneles ante eventos sísmicos, caso de estallidos de roca en el Teniente*” El proceso minero produce un cambio de tensiones del terreno tal que, eventualmente, éste alcanza la condición de rotura. En el caso de minería profunda en roca dura, la rotura de la roca es violenta y libera mucha energía en forma de ondas sísmicas que pueden producir accidentes al personal, daños en las labores subterráneas y detención de la producción. Típicamente, el nivel de demanda dinámica sobre el sistema de soporte se determina a partir de evaluar la velocidad de eyección de bloques de roca. Dicha velocidad es función de la máxima velocidad de partícula (PPV)

en el contorno de la excavación. La evidencia empírica demuestra que la PPV en el borde puede ser varias veces mayor que el valor medido hacia el interior del macizo rocoso. En la presente investigación se estudió en forma numérica la respuesta dinámica de túneles en roca dura con el objetivo de evaluar el factor de amplificación de la PPV entre el borde y puntos alejados de una excavación subterránea. Además, se estudió la influencia de diversos parámetros en dicho factor de amplificación. Si bien la investigación no es específica para un sitio en particular, se apoya en características generales y antecedentes proporcionados por El Teniente, los que se incluyen en la tesis. Los resultados obtenidos indican que la máxima velocidad de partícula en las paredes de un túnel típico del Nivel de Producción, puede alcanzar unas 20 veces el valor que tendría en el mismo sitio si no se excava el túnel (valor de “campo libre”). Dicho efecto corresponde a la superposición de diversos factores que fueron estudiados por separado y que no necesariamente actúan simultáneamente. Conociendo la importancia relativa de cada factor se pueden planificar medidas para mitigar su efecto o para diseñar el sistema de soporte de acuerdo con la sollicitación prevista.

## **2.3.Bases Teóricas**

### **2.3.1. Vibraciones**

Las vibraciones son un fenómeno de la transmisión de energía que se refleja en la propagación de un movimiento ondulatorio a través de cualquier medio. La detonación de un explosivo contenido en un taladro genera de manera casi instantánea gran volumen de 10 gases a altas temperaturas (3500°K) y elevadas presiones (150 000 atm). La aplicación instantánea de estas presiones muy elevadas en las paredes del taladro simula un choque o golpe brusco, provocando en cada punto del macizo deformaciones axiales y tangenciales en

diferentes direcciones, produciendo la rotura del macizo en sus proximidades. Como es de esperarse el explosivo trabaja con una determinada eficiencia, lo cual indica que no el total de la energía explosiva es usada para provocar fragmentación, sino que un porcentaje de la misma es liberado en el ambiente propagándose hacia la masa rocosa, la napa freática y el aire; desplazándose a diferentes velocidades. La amplitud del movimiento ondulatorio se reduce a medida que dicho movimiento se aleja del punto principal de detonación. (Orihuela y Dapello, 2009, p.7).

### **2.3.2. Tipos de Ondas**

Respecto a las ondas generadas en las vibraciones se dice que: El fenómeno de las vibraciones por efecto de una voladura busca ser descrito por algunas ecuaciones clásicas de ondas elásticas, sin embargo, aunque hasta la fecha es el modelo simplificado que mejor se adecúa para el análisis de este fenómeno, estos cálculos no son totalmente confiables debido a ciertos problemas como atenuación, dispersión, superposición y cambio de longitud de onda que suelen manifestarse. Básicamente podemos separar en dos grupos los tipos de ondas elásticas. Ondas internas, las cuales se propagan por el interior del macizo. Dentro de este grupo encontramos a las ondas longitudinales, de compresión o principales P, aquellas que provocan la oscilación de las partículas en la misma dirección de la propagación de la onda; y las ondas transversales, de cizalladura o secundarias S, caracterizadas por provocar la oscilación de las partículas en una dirección transversal a la dirección de la propagación de la onda. Ondas de superficie, transmitidas únicamente por la superficie del macizo. Dentro de este grupo tenemos las ondas Rayleigh (R), las cuales originan oscilaciones elípticas en el plano donde se propagan y tienen como efecto la compresión, dilatación y cizalla; y las ondas Love (L), su velocidad es bastante similar a las ondas R y de la misma manera originan oscilaciones elípticas. Los frentes de cada una de las ondas tienen una forma diferente, las

ondas P se propagan por tracciones y compresiones sucesivas del medio, y en el momento que alcanzan una superficie libre o cambian del medio donde se encontraban, influidas por esta discontinuidad, sufren el fenómeno de reflexión y refracción originándose las ondas S. Un ejemplo bastante común de cambio de medio, sobre todo en el tema de la voladura en la minería, sería el de pasar de un estrato geológico a otro muy diferente. Estas ondas P y S se propagan en todas las direcciones, también son conocidas con el nombre de ondas de volumen. En las interfaces del terreno las ondas de volumen dan lugar a las ondas de superficie, las cuales se propagan en ese límite. Por lo tanto, estas ondas superficiales tienen dos orígenes, la propia detonación del explosivo y el rebote de las ondas internas al incidir sobre la superficie. Una característica principal de las ondas de superficie es que poseen frecuencias más bajas que las de volumen, siendo la onda R la más común y con mayor energía transportada, por lo que representa un mayor peligro para las estructuras. (Orihuela y Dapello, 2009, p.8).

#### ***2.3.2.1. Propiedades de las ondas de vibración***

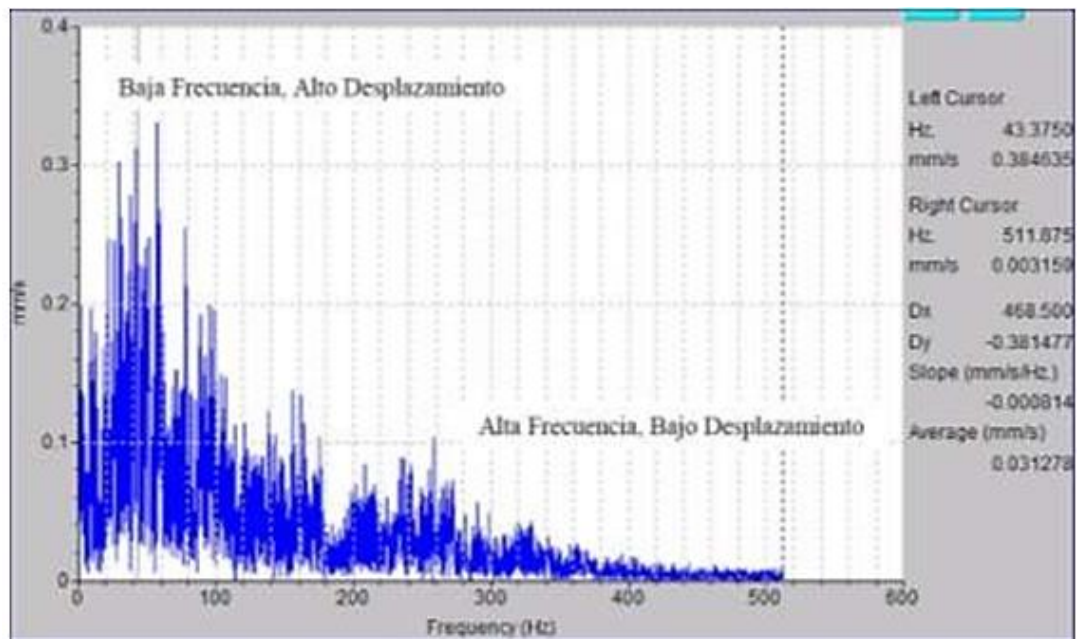
CINTEX (2005) señala las siguientes propiedades básicas de propagación de ondas de vibraciones:

- ❖ Frecuencia: cuantos ciclos de compresión y tensión se transmiten por segundo.
- ❖ Duración: el tiempo total que el medio está expuesto a la vibración.
- ❖ Longitud de Onda: distancia que viaja la onda en un ciclo completo de compresión y tensión.
- ❖ Velocidad de propagación: la velocidad con la cual la onda se mueve, distinta a la velocidad individual de movimiento de una partícula.

## Frecuencia de las vibraciones

La frecuencia de las vibraciones indica el número de veces por segundo que la onda de propagación pasa por un ciclo completo de compresión y tensión. El factor que tiene una gran influencia en esto son las dimensiones de las cargas, columnas grandes de carga tienden a producir bajas frecuencias. Sin embargo, otros importantes factores incluyen los módulos de la roca y la razón de carga producida por la detonación (es decir la velocidad de detonación). La frecuencia dominante es considerada generalmente como el inverso del tiempo del ciclo completo.

**Figura 4.** Comportamiento de la frecuencia y desplazamiento de las vibraciones.



Fuente: Contreras, P.W.J, 2009

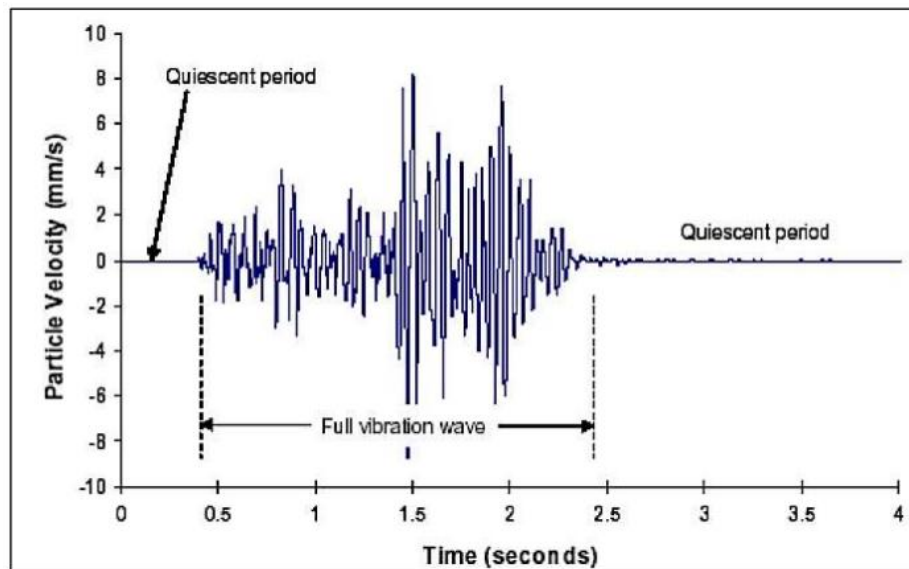
## Duración de las vibraciones

La duración de la vibración depende de dos factores principales: La duración de la voladura y la distancia del punto de monitoreo a la voladura. Para asegurar que el peak de velocidad de vibraciones (generado por una voladura) sea registrado y que la cantidad



máxima de información pueda ser extraída de un registro de vibración, es importante que se registre completamente la duración de las ondas. Un buen registro de vibración mostrará un tiempo quieto previo al comienzo del registro de vibraciones, un completo detalle de las ondas de vibraciones, y un tiempo después del paso de las ondas, cuando el terreno ha vuelto a su estado de reposo.

**Figura 5.** Onda completa de vibración



Fuente: CINTEX, 2005

### 2.3.3. Tipos de ondas

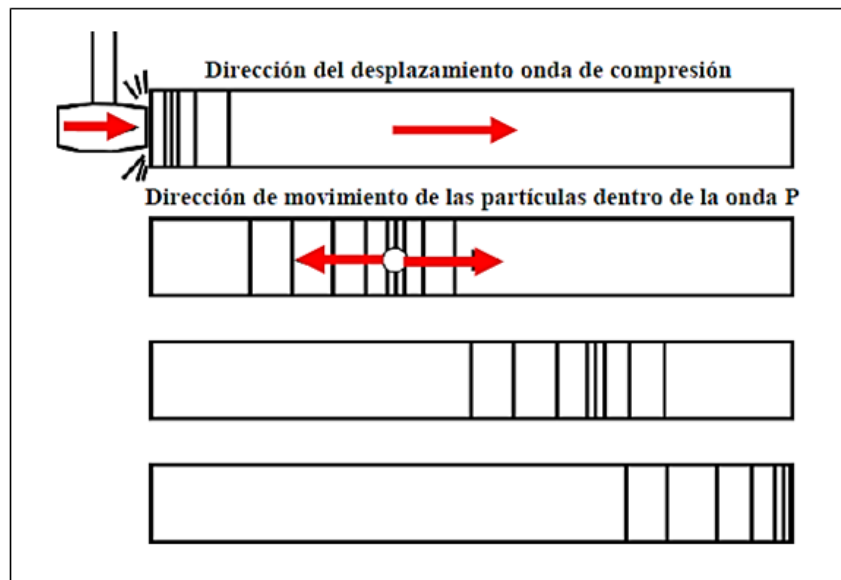
#### Ondas compresionales u ondas P

ISEE (2008) indica es la más rápida de estas y la primera en llegar es una onda compresional u onda P (en los inicios de la sismología, se llamaba “Primare” en latín, es decir, onda primaria). Se trata del mismo tipo de onda que transmite el sonido a través

del aire o del agua. En diferentes tipos de rocas viajan alrededor desde aproximadamente 1830m/s hasta alrededor 6100m/s. A menudo las ondas P tendrán la frecuencia más alta y el desplazamiento más corto.

Vásquez (2013) señala que la onda que viaja a mayor velocidad, deformando volumétricamente la roca en la dirección de su propagación. A manera de ilustrar el movimiento que experimenta las partículas dentro de la onda P, consideramos una varilla de acero la cual es golpeada en un extremo, dando lugar al movimiento de las partículas de la barra hacia adelante y atrás mientras que el pulso de compresión viaja a lo largo de la barra; es decir, las partículas de la onda se mueven en la misma dirección de la onda. El movimiento de la onda P se ilustra en la figura N° 6.

**Figura 6.** Movimiento de las partículas dentro de la onda P



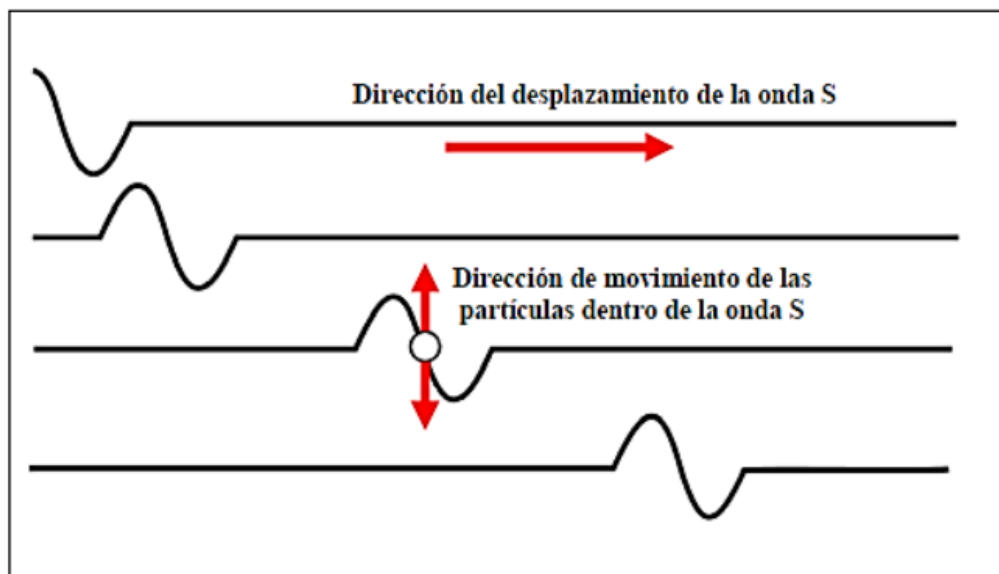
Fuente: Vásquez, S.N.Y. – 2013

### **Ondas transversales u ondas S**

ISEE (2008) asimismo indica que luego de las ondas P viene las ondas Transversales, u ondas S (en los inicios de la sismología, la S iba por “second” en latín, es decir, por llegadas secundarias) estas ondas se desplazan a aproximadamente  $3/5$  de la velocidad de las ondas P. Además de las ondas S generalmente tendrán frecuencias más bajas y desplazamientos más largos que las ondas P. 49 Vásquez (2013) precisa que tras la onda P, se propaga la onda S.

Esta onda provoca una deformación de la masa rocosa perpendicular (transversal) a la dirección de su propagación, sin modificar el volumen de los materiales a su paso. El movimiento de las partículas dentro de la onda S puede ser ilustrado mediante la agitación de una cuerda por un extremo, dando lugar al desplazamiento de la onda a lo largo de la cuerda, sin embargo, las partículas dentro de la onda se mueven perpendicularmente a la dirección de movimiento de la onda. El movimiento de la onda S se ilustra en la figura N° 7.

**Figura 7.** Movimiento de las partículas dentro de la onda S



Fuente: Vásquez, S.N.Y. – 2013

#### 2.3.4. *Velocidad pico partícula crítica*

Scherpenisse, Adamson y Diaz (2000) nos indican que de la ley de Hooke y asumiendo un comportamiento elástico de la roca, la Velocidad de Partícula Máxima (Crítica), PPV<sub>C</sub>, que puede ser soportada por la roca antes de que ocurra el fallamiento por tensión, es estimada conociendo la Resistencia a la Tracción ( $\sigma_t$ ), el Modulo de Young, E, y la velocidad de propagación de la Onda P, V<sub>p</sub>, usando la ecuación:

$$PPV_C = \frac{\sigma_t * V_P}{E}$$

En la tabla 2, se resumen los datos y el valor calculado para los tipos de roca analizados. En la última columna, se muestra el cálculo del PPVc, definido como el nivel sobre el cual se generará un daño produciendo nuevas fracturas a la roca.

**Tabla 1.** Estimación de velocidad de partícula crítica teórica en distintos tipos de roca

<b>Tipo de roca</b>	<b>Resistencia a la tracción (MPa)</b>	<b>Velocidad de onda P (m/s)</b>	<b>Modulo Young (GPa)</b>	<b>Velocidad de Partícula Crítica (mm/s)</b>
Cuarzo-1	14	5 102	55.5	1 286
Brecha-1	7.3	4 298	30.2	1 037
Milonita	1.9	2 940	14.6	380
Ox-1	6.7	4 373	35.2	836
Ox-2	7.2	4 804	44.4	774
Cuarzo-2	8.4	4 207	42.7	823
Brecha -2	3.9	4 041	39.3	401
Andesita - 1	14.9	4 975	67.3	1 100
Diorita	13.2	4 650	48.6	1 260
Brecha-3	11.3	4 650	58.3	900
Pórfido-1	6.7	3829	31.2	823
Pórfido-2	5.1	3 661	46.6	401

Fuente: Scherpenisse, Adamson y Diaz (2000)

Los valores de Velocidad de Partícula Crítica calculados en la Tabla 5, son producto de las características físicas de la roca, y la precisión en su estimación depende de la calidad y cantidad de los datos de ensayos ocupados en su cálculo, recordándose que sigue siendo una estimación y deben constantemente ajustarse con mediciones en terreno, que den cuenta cuantitativamente del daño y que permitan establecer con mayor precisión e in-situ, la capacidad de macizo rocoso para soportar niveles de vibración en el rango estimado.

Los niveles de Velocidad Partícula Crítica entregados en la tabla 5, pueden diferir de los mencionados habitualmente en la literatura técnica al respecto.

Estas diferencias reflejan la gran importancia que tiene establecer para cada tipo de macizo rocoso en particular los límites de daño, los que están directamente relacionados con sus propiedades geomecánicas y por tanto deben ser estimados en forma independiente no sólo en cada mina si no en cada dominio geomecánico de la misma.

El daño es causado principalmente por 3 mecanismos que son; La generación de nuevas grietas en la roca al superar un nivel crítico de velocidad partícula, extensión y apertura de fracturas existentes por la acción de una excesiva presión de gases, y finalmente, la desestabilización de bloques, cuñas, etc. debido a la alteración de las propiedades de las estructuras geológicas. De estos mecanismos, es importante reconocer que los dos primeros afectan al campo cercano (50 metros). La gran cantidad de variables que interactúan en una voladura, hace necesario el adaptar y desarrollar técnicas que permitan una óptima evaluación de este proceso, antes, durante y después de su ocurrencia, así como de una adecuada cuantificación y control del daño que ella puede producir.

### ***2.3.5. Instrumentación para monitoreo de vibraciones***

ASP BLASTRONICS (2006) indican que la instrumentación que se utiliza para medir las vibraciones de la roca inducidas por voladura, consta de los siguientes componentes:

- ❖ Transductores (geófonos o acelerómetros) que se instalan en forma solidaria a la roca.
- ❖ Un sistema de cables que llevan la señal captada por los transductores al equipo de monitoreo

- ❖ Un equipo de adquisición, el cual recibe la señal y la guarda en memoria
- ❖ Un computador, el cual tiene incorporado el software requerido para el traspaso de la información desde el equipo monitor, y su posterior análisis.

### **Número de sensores:**

CINTEX (2005) señalan que el número de transductores usados depende de la cantidad de información requerida. por lo tanto, existen arreglos de geófonos uniaxiales, los cuales miden la velocidad de partículas en un solo eje, arreglos biaxiales que consisten en dos geófonos orientados en dos ejes y arreglos triaxiales los que permiten registrar la velocidad de partículas en los tres ejes (x, y, z), lo que permite obtener el modulo del vector de velocidad de partículas.

Si el interés principal es confirmar la detonación de cada carga (o grupo de cargas en cada retardo), o la medición de la dispersión de los retardos, entonces se requerirá solo un transductor y su localización no será muy crítica.

Si se desea examinar la contribución de cada carga de la voladura, o si el interés es conocer la forma de la onda por cada componente, la fuente generadora de cada vibración debe ser conocida. Se requiere para esto una cuidadosa ubicación y selección del número de transductores a utilizar.

El uso de arreglos triaxiales a diferentes profundidades inmediatamente atrás de las voladuras, se utiliza particularmente en voladuras de minas subterráneas. La dirección de movimiento de la bobina móvil al paso de cada vibración determina si el primer arribo de la señal es positivo o negativo, de acuerdo a esto, la dirección de viaje de las ondas y puede ser determinada la localización relativa de la fuente emisora.

## **Tipos de sensores:**

CINTEX (2005) precisa que gran parte de las capacidades y ventajas de la técnica de monitoreo de vibraciones descansa en la habilidad para recolectar datos de vibración de buena calidad. La característica de estos datos tiene directa relación con el tipo de transductor utilizado, la técnica empleada para su instalación y orientación.

Los dos tipos básicos de transductores usados para medir las vibraciones del terreno son el acelerómetro y el geófono. En la práctica, la selección de los transductores es un compromiso entre la precisión, el costo y la relación señal ruido. En el presente trabajo de investigación se utilizó geófonos.

### **a. Acelerómetros**

Los acelerómetros del tipo piezo - eléctrico tienen una alta frecuencia natural y una respuesta lineal bajo su frecuencia resonante. La señal de salida es proporcional a la aceleración, la cual debe por lo general ser amplificada previamente a su grabación.

Los acelerómetros fácilmente reúnen los datos especificados, por lo general son livianos, robustos, pero caros. Son más complejos de usar ya que requieren equipamiento auxiliar tal como fuente de poder y pre amplificadores, los que además pueden inducir problemas de ruidos eléctricos significativos.

### **b. Geófonos**

Los geófonos dan una medición directa de la velocidad, y consisten por lo general de un sistema de bobina móvil soportadas por resorte, y un imán fijo. Al contrario que el acelerómetro, el geófono opera sobre su frecuencia natural. Cuando se miden frecuencias

muy bajas, la salida se ve influenciada por sus características de respuesta a la frecuencia, y la señal resultante en términos del nivel de vibración debe ser corregida adecuadamente.

### **2.3.6. *Software de análisis de registros de vibración***

ASP BLASTRONICS (2006) indican que el análisis de los datos requiere de un conjunto computador y software con capacidades para un manejo integral de la forma de onda, y donde las principales tareas que deben realizar, son las siguientes:

- ❖ Desplegar múltiples señales
- ❖ Amplificación de partes de la señal total (efecto zoom)
- ❖ Cursor móvil sobre la señal para un análisis acucioso de los tiempos y amplitudes
- ❖ Derivación e integración de las ondas
- ❖ Generar el vector suma de tres componentes ortogonales
- ❖ Despliegue de las señales en el dominio de la frecuencia
- ❖ Filtro de frecuencia

Para el análisis de los registros de vibración en el presente estudio se utilizó el software de Blastware para los sismógrafos Instantel y el Seismograph Data Analysis para los sismógrafos White Seismology.

#### **a. SOFTWARE BLASTWARE**

Instantel (2015) señala que el programa de software Blastware tiene dos módulos. El primero es el Módulo de Cumplimiento y viene de serie con cada Blastmate III, Minimate Plus, o Minimate Blaster, o un monitor Serie IV. Este módulo incluye todos los comandos para controlar las funciones básicas de cumplimiento de tu monitor. También puede usarlo



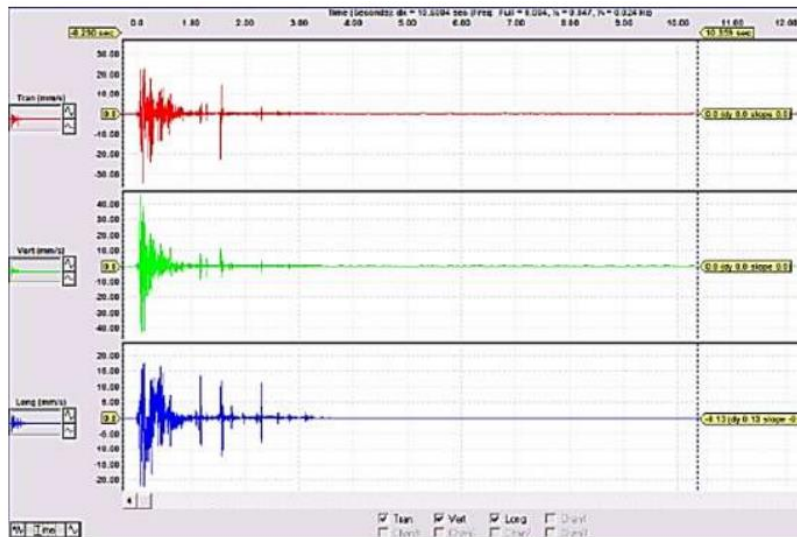
para transferir sus Eventos grabados a una computadora personal donde puede verlos, formatear Informes de Evento y FFT que su impresora puede producir, o producir un formato de archivo PDF que puede enviarse por correo electrónico.

El segundo módulo, el Módulo avanzado, proporciona funciones avanzadas para analizar los eventos grabados. Puede editar estándares nacionales de frecuencia, realizar FFT y análisis de línea de tiempo. También puede integrar, diferenciar, invertir, agregar, superposición lineal, filtrar y truncar formas de onda.

**- Reporte y análisis de eventos:**

Para un mejor análisis se usan las funciones avanzadas del Blastware III, las cuales se pueden usar con la llave de seguridad del software. Esta llave nos permite tener el botón Analysis en la ventana Event Manager (sin la llave este botón no aparece y el software solo puede emitir el reporte general). Al hacer Click en Analysis se tiene una vista de la pantalla con el juego de ondas en sus tres direcciones y que pueden ser vistas una separada de la otra seleccionando cual o cuales se desean visualizar como se ve en los gráficos siguientes:

**Figura 8.** Análisis de registros de vibración con Blastware con llave



Fuente: Manual de operador Blastware, 2015

## **b. SOFTWARE SEISMOGRAPH DATA ANALYSIS**

White Industrial Seismology (2008) indica que el software Seismograph Data Analysis es común que los siguientes dos procesos sean los más utilizados:

- **Descarga de registros:** Es lo más simple posible. Sin embargo, hay algunas decisiones que los usuarios debemos tomar. Ejemplo, ¿en qué carpeta (s) en el medio de almacenamiento (difícil unidad, disquete, etc.) se almacenarán los registros? ¿Cómo se nombrarán las carpetas para que los registros se puedan ubicar fácilmente (consulte Sugerencias para crear nuevas carpetas para almacenar registros)?

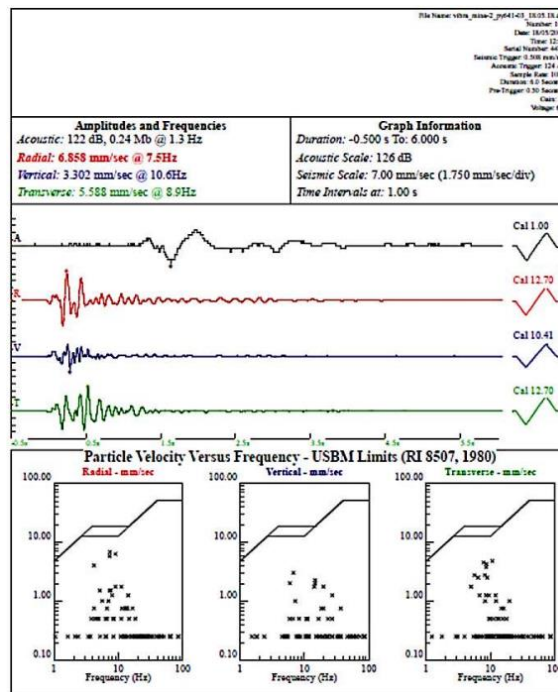
- **Imprimir registros:** Esto es muy fácil de hacer. Simplemente vamos a la carpeta donde están los registros almacenado, indicamos qué registros queremos imprimir y hacemos clic en la opción de impresión. Podemos suministrar un conjunto personalizado de encabezados de informes y, si lo deseamos, elija una de las dos funciones de análisis más

comunes. 107 - Reporte y análisis de eventos: Las capacidades de análisis del software son extensas, casi cualquier análisis significativo que necesita está disponible. Funciones básica de forma de onda y gráfico de barras - Desplazarse fácilmente de un registro seleccionado al siguiente.

- Cambiar la ventana de tiempo - Establecer las escalas de amplitud.
- Verifique qué canales mostrar.
- Muestre las amplitudes en cualquier punto de tiempo en la forma de onda usando la barra de localización.
- Especifique encabezados de informe.

Así mismo cuenta con funciones de análisis de forma de onda tales como: frecuencia FFT, movimiento de partículas análisis de velocidad, desplazamiento y aceleración, etc

**Figura 9.** Reporte de vibraciones con Seismograph Data Analysis



Fuente: Software Seismograph Data Analysis

## **2.4. Definiciones conceptuales**

### **Discontinuidad**

La discontinuidad es el cambio abrupto en las propiedades físicas de materiales adyacentes en el interior de la Tierra.

### **Perforación**

La perforación es la acción o proceso de elaborar un orificio circular con un taladro (perforadora) manual o mecánico (eléctrico o hidráulico)

### **Voladura**

Es la ignición de una carga masiva de explosivos. El proceso de voladura comprende el cargue de los huecos hechos en la perforación, con una sustancia explosiva, que al entrar en acción origina una onda de choque y, mediante una reacción, libera gases a una alta presión y temperatura de una forma substancialmente instantánea, para arrancar, fracturar o remover una cantidad de material según los parámetros de diseño de la voladura misma.

### **Bloque**

Son productos de explotación de una cantera. Son bloques de areniscas de gran tamaño utilizados para enchape y fachadas.

## **Capítulo III**

### **Metodología de la investigación**

#### **3.1. Tipo de Investigación**

Es tipo de investigación aplicativo que “tiene por objetivo la generación de conocimiento con aplicación directa y a mediano plazo en la sociedad o en el sector productivo” (Lozada, 2014, p. 35). Y presenta un gran valor agregado, ya que emplea el conocimiento obtenido en la investigación básica.

La presente investigación tiene un propósito aplicativo, ya que se analiza el monitoreo microsísmico, con el cual los ingenieros podrán ajustar el diseño en cada una de las zonas de influencia según su comportamiento del macizo rocoso, de esa forma lograr un control del sostenimiento adecuado.

#### **3.2. Nivel de Investigación**

El nivel de investigación es explicativo, ya que “intenta ir más allá de la investigación exploratoria y descriptiva para identificar las causas reales de un problema” (Abreu, 2012, p. 194). En ese sentido, el estudio es de alcance descriptivo, puesto que el propósito del presente proyecto de investigación es especificar la influencia de las vibraciones, los indicadores y tipos de onda del monitoreo microsísmico en el comportamiento del macizo rocoso.

#### **3.3. Diseño**

Es una investigación experimental de tipo cuasi experimental, que tiene como objetivo “poner a prueba una hipótesis causal manipulando (al menos) una variable independiente donde por razones logísticas o éticas no se puede asignar las unidades de

investigación aleatoriamente a los grupos” (Fernández et al., 2014, p. 756). El diseño de investigación es del tipo no experimental, el tipo de diseño que se utilizó es el diseño longitudinal, por la esencia de la investigación, debido a que este tipo de investigación se orienta a explicar fenómenos, situaciones y eventos detallando cómo son y en el modo en que se manifiestan para luego analizarlos.

### **3.4.Población**

La población de estudio “es un conjunto de casos, definido, limitado y accesible, que formará el referente para la elección de la muestra que cumple con una serie de criterios predeterminados” (Arias et al., 2016, p. 201). Siendo así, la población de esta investigación está conformada por el macizo rocoso de la mina San Vicente.

### **3.5.Muestra**

La muestra es “un subconjunto o parte del universo o población en que se llevará a cabo la investigación” (López, 2004, p. 69). Así, la muestra de la presente investigación corresponde a el macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente.

### **3.6.Muestreo**

El muestreo es “el método utilizado para seleccionar a los componentes de la muestra del total de la población” (López, 2004, p. 69). De esta manera, el muestreo empleado en esta investigación es no probabilístico de tipo intencional.

### **3.7.Metodología de trabajo**

El desarrollo del presente trabajo comprenderá dos etapas:

#### **a. Recopilación de Información Básica.**

Que comprende el levantamiento geotécnico de los tajeos de la mina, toma de muestras rocosas, otros datos relacionados al tema a desarrollarse.

#### **b. Trabajos de Gabinete.**

Simulación, procesamiento de datos obtenidos, elaboración de planos y cuadros geotécnicos por tajeo y finalmente la redacción de tesis.

### **3.8.Unidad de análisis**

Las unidades de análisis de la presente investigación son los registros microsismicos del macizo rocoso de la mina san Vicente.

### **3.9.Técnicas e Instrumentos de recolección de datos**

#### **Técnicas**

- Recopilación de datos de campo
- Observación e interpretación
- Análisis del monitoreo microsísmico
- Estación de registro de datos
- Revisión bibliográfica

#### **Instrumentos**

- Geófono uniaxial
- Geófono triaxial
- Paladines
- Brújula
- Software Seis Vis
- Laptop

- **Análisis de datos:** Se realiza el análisis de los datos para llevar a cabo la evaluación de la sismicidad inducida, utilizando para este propósito diversas herramientas entre las cuales destacan cartillas geomecánicas y software de simulación sísmica.

### 3.10. Trabajos realizados

Para el desarrollo de la investigación, se hizo seguimiento a la calidad de filtrado de 167 eventos sísmicos de la data del mes de marzo, con ayuda del personal geomecánico de la unidad minera San Vicente de Compañía Minera San Ignacio de Morococha S.A.A.

Los eventos registrados son del periodo del 01 al 30 de marzo del 2022. Se detectó data procesada de eventos sísmicos que presentaban errores mayores a 50, se dio las indicaciones para reprocesar los eventos. Se detectó también algunos registros de disparos como eventos sísmicos, se indicó y realizó la corrección pertinente.

Se hizo Seguimiento de la señal sísmica de los sismogramas registrados de cada sensor (geófono) en el software WereVis y se comprobó la rápida solución que se le dio a los sensores observados en el informe anterior. Se realizó la interpretación del comportamiento sísmico del periodo del 10 de agosto del 2021 al 30 de mayo del 2022, que comprende toda la data sísmica registrada.

**Tabla 2.**Data sísmica registrada

Eventos y disparos registrados por mes												
Mes	Unid.	Ago-21	Set-21	Oct-21	Nov-21	Dic-21	Ene-22	Feb-22	Mar-22	Abr-22	May-22	Total
Eventos	Unid.	148	179	235	331	235	98	87	167	136	196	1812
Disparos	Unid.	598	604	504	184	0	323	514	686	680	680	5108

Fuente: Elaboración propia



## **Capítulo IV**

### **Recolección de datos y procedimiento experimental**

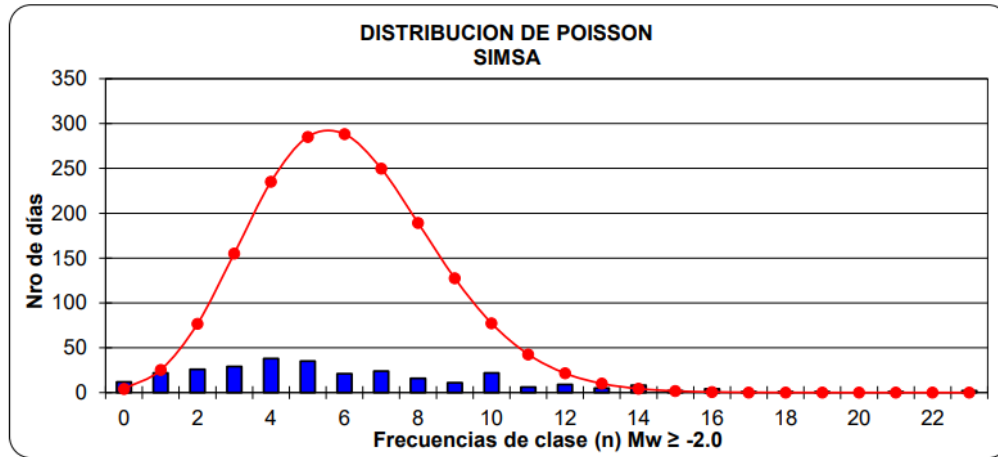
#### **4.1. Aspectos técnicos**

El alcance de la implementación del sistema micro sísmico cuenta con un sistema de Monitoreo en tiempo real de eventos microsismicos para la zona de interés ubicada en Unidad Minera San Vicente, identificando las zonas de riesgo, así como las afecciones al macizo rocoso, este equipo microsismico permitirá tomar acciones preventivas y de alerta. Basado en el volumen del área de interés de monitoreo solicitado por el cliente y sobre la distancia de cobertura entre sensores.

#### **4.2. Estudio de riesgo sísmico**

Desde el inicio de la instalación del sistema de monitoreo sísmico; del 10 de agosto del 2021 al 30 de mayo del 2022; se tiene un total de 1,812 eventos sísmicos registrados y procesados. Estos datos fueron procesados para su interpretación estadística por medio de la distribución de Poisson y la Campana de Gauss se utilizó de toda la data sísmica registrada.

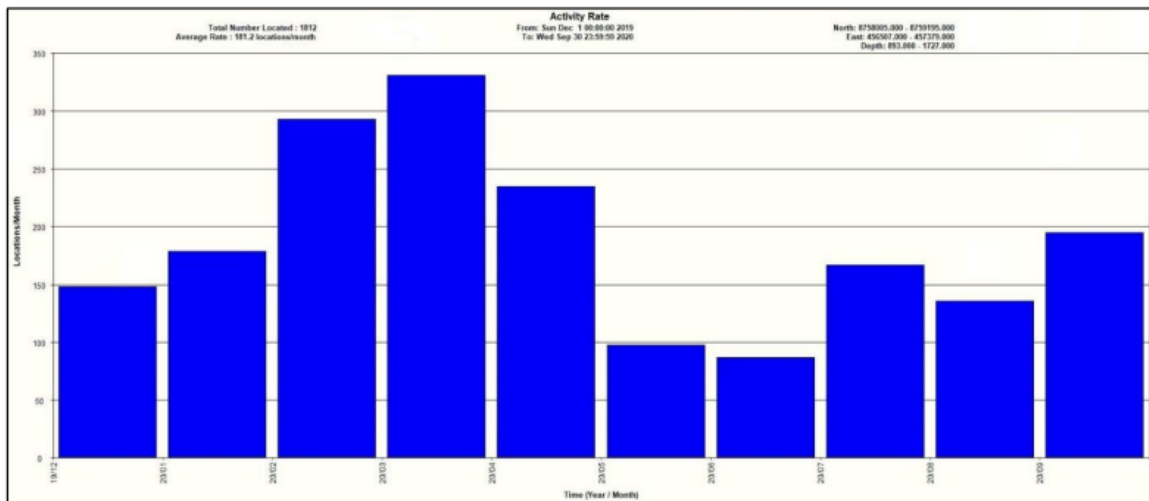
**Figura 10.** Distribución de Poisson y Campana de Gauss. Data del 10 de agosto del 2021 al 30 de mayo del 2022



Fuente: Elaboración propia

En la figura se observa una campana de Gauss bien formada, dando conformidad de una buena data sísmica para poder trabajar estadísticamente.

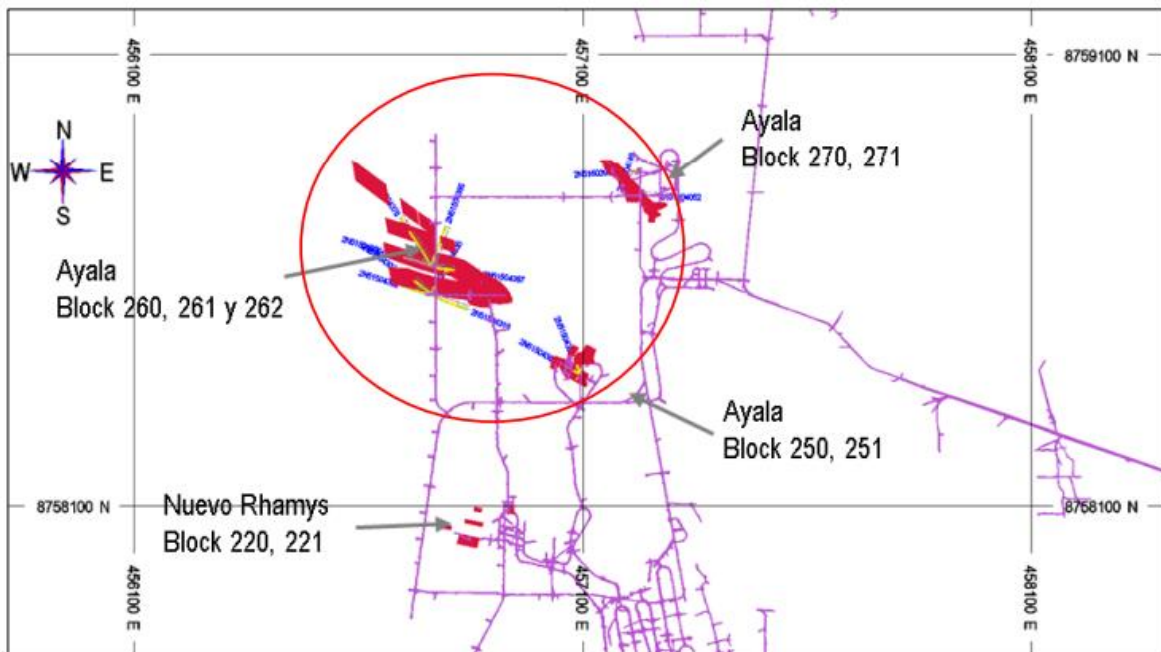
**Figura 11.** Actividad sísmica mensual de agosto del 2021 a mayo del 2022



Fuente: Elaboración propia

En un análisis de toda la data sísmica registrada, el mes de mayor actividad sísmica fue el mes de noviembre del 2021 y el de menor actividad fue en el mes de enero. Los eventos sísmicos se encuentran relacionado a los efectos de la cantidad de disparos realizados los meses anteriores. Los meses de mayor numero de disparos se realizaron los meses de setiembre y octubre y como efecto el mes de noviembre se dieron la mayor cantidad de eventos sísmicos. Los meses de menor cantidad de disparos fueron diciembre y enero y como efecto se registraron menos eventos sísmicos en febrero.

**Figura 12.** Sector de Ayala vista en planta



Fuente: COMPAÑÍA MINERA SAN IGNACIO DE MOROCOCHA S.A.A

## Capítulo V

### Análisis de Resultados

#### Enfoque del estudio

En una primera etapa, se orientaron los trabajos a la ejecución de investigaciones básicas, con el fin de obtener la información necesaria, que permita evaluar los factores principales de control de la sismicidad inducida y estimar así los parámetros sísmicos básicos. En una segunda etapa, se integrará la información obtenida durante las investigaciones básicas, con el fin de evaluar la sismicidad inducida por las excavaciones asociadas al minado.

#### 5.1. Evaluación de la resistencia de la roca

**Tabla 3.** Resistencia de la roca dolomita brechada mineralizada (DOL-BX-MIN)

Parámetros de resistencia de la masa rocosa – Blocks 260, 261, 262												
Litología	DE	GSI	P (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$m_i$	$E_i$ (Gpa)	MR	$m_b$	s	a	$E_{mr}$ (Gpa)	$\sigma_{cur}$ (MPa)
DOL- BX-MIN	IIIA	57	3.3	130	16	29	223	2.627	0.0049	0.504	8.856	9.0
	IIIB	49	3.3	110	16	27	245	1.877	0.0018	0.506	5.038	4.5
DOL-BX	IIIA	55	2.8	100	16	29	290	2.415	0.0039	0.504	7.891	6.1
	IIIB	47	2.8	90	16	27	300	1.726	0.0014	0.507	4.424	3.3
CLZ-NE	IIIB	41	2.6	70	14	24	343	1.174	0.0007	0.511	2.636	1.7

Litología (DOL-BX: dolomía brechada, DOL-BX-MIN: dolomía brechada mineralizada, CLZ-MA: caliza masiva, CLZ-NE: caliza negra).

Fuente: COMPAÑÍA MINERA SAN IGNACIO DE MOROCOCHA S.A.A.

#### 5.2. Equipos de adquisición de datos

Características del sistema de monitoreo microsísmico: - Monitoreo microsísmico en tiempo real - Registro de clasificación de eventos: evento real, voladuras y ruido - Registro de

localización y hora por evento registrado - Registrar datos que permita analizar la estabilidad de las zonas de interés donde están presentando mayor incidencia de eventos.

### 5.2.1. Esquema general de operación del sistema microsísmico

- ❖ Los sensores instalados detectan la energía liberada y transmiten señales análogas vécable de cobre hacia ESG Paladin® (datalogger), que está instalado en el gabinete sísmico
- ❖ ESG Paladin® (datalogger), instalado en el gabinete sísmico, digitaliza las señales análogas transmitidas por los sensores, cada equipo tiene un IP, lo que permite acceso remoto. Ver fig.13.

**Figura 13.** Paladin® (datalogger), digitaliza las señales análogas transmitidas por los sensores.



Fuente: COMPAÑÍA MINERA SAN IGNACIO DE MOROCOCHA S.A.A.

- ❖ Una vez que la señal ha sido digitalizada, los datos continuos son transmitidos a través de fibra óptica, y para la sincronización en tiempo real se utiliza el (protocolo PTP – Precision timing protocol) ambos tienen conexión al servidor de adquisición de datos instalado en superficie ubicada en oficinas.
- ❖ Servidor de adquisición de datos, configurado con el software ESG's Hyperion Network Acquisition Software (HNAS), el software registra la data digitalizada por el datalogger, mostrando la caracterización de las ondas
- ❖ Computador de procesamiento y análisis, con conexión al servidor de adquisición de datos se configurará con el software Hyperion Seismic Software (HSS).

### **5.3. Estudio de sismicidad inducida**

Esta primera fase de estudio tiene como objetivo reconocer las bondades del sistema de monitoreo sísmico de la empresa ESG, realizar el filtrado de la data sísmica acumulada desde la fecha de instalación a la actualidad, capacitar al personal del área de geomecánica en el filtrado de la data sísmica, análisis del comportamiento sísmico con la data actualizada, para que al final se pueda plantear soluciones a los problemas de inestabilidad del macizo rocoso por problemas inducidos por eventos sísmicos en la unidad minera.

#### **5.3.1. Trabajos realizados**

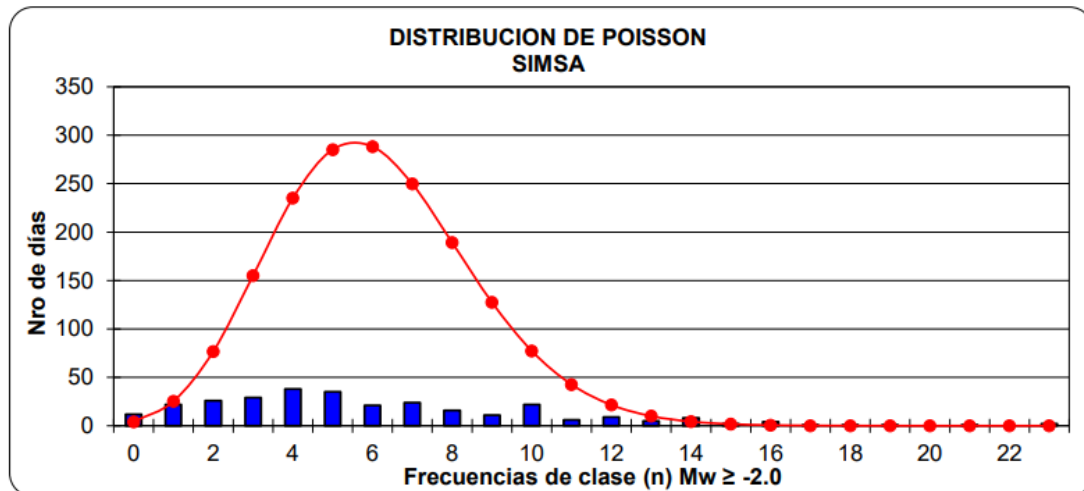
Se procesaron 730 eventos sísmicos registrados en el sistema de monitoreo entre ellos se encontraban registro de disparos, pulsos eléctricos, ruido y otras ondas. Al final se obtuvo una data limpia de 371 eventos sísmicos registros desde el 10 de agosto del 2021; fecha que inicia el sistema; al 10 de mayo del 2022. Con esta data se inicia el estudio de riesgo sísmico de la unidad minera San Ignacio de Morococha SA. Junto con el procesamiento de data sísmica, se capacito y entreno

al personal del área de geomecánica en esta tarea para mantener la data actualizada. Se capacito al personal de geomecánica en temas de monitoreo sísmico, comportamiento sísmico, sísmica regional y local. Se realizaron trabajos de reconocimiento en campo del macizo rocoso, método de minado, sostenimiento, reconocimiento de fallas principales, labores principales. No se pudo ingresar a la zona del ultimo estallido de roca donde amerita ser rehabilitada para análisis del caso.

#### 5.4. Estudio de riesgo sísmico

La distribución de Poisson y la Campana de Gauss, nos ayudan a determinar si nuestra data es correcta; o de lo contrario; realizar el filtrado correspondiente.

**Figura 14.** Distribución de Poisson y Campana de Gauss. Data del 10 de agosto del 2021 al 30 de mayo del 2022



Fuente: Elaboración propia

En la figura se observa una campana de Gauss bien formada, dando conformidad de una buena data sísmica para poder trabajar estadísticamente.

a. Coordenadas: en la data tenemos eventos muy alejados de nuestra zona de interés que se deben depurar.

b. Profundidad: los eventos lejanos a nuestros niveles de interés deben ser filtrados.

c. Magnitud: los eventos analizados fueron del rango de -1.4 a +1.6Mw (Magnitud momento).

d. Error: Se minimizo el error al máximo posible. En la figura # 1 se observa una campana de Gauss bien formada, dando conformidad de una buena data sísmica para poder trabajar estadísticamente.

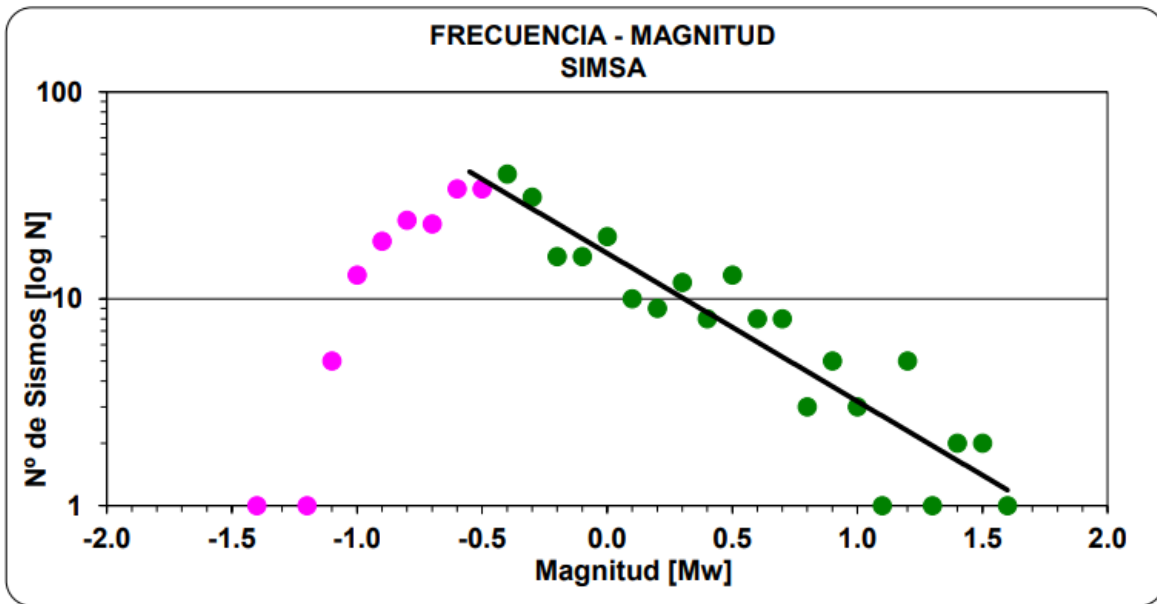
**La distribución de Gutenberg-Richter**, parámetro “b” nos ayuda a monitorear el riesgo ante un evento de mayor magnitud, nos da una idea de incremento de magnitudes de los eventos sísmicos. Para hallar los parámetros “a” y “b” se utilizó el método de mínimos cuadrados, cuya ecuación es la ecuación de la recta.

$$y = a + bx \quad \text{ó} \quad y = bx + a$$

La fórmula es la fórmula de la recta donde “a” al prolongarla al eje de la Y, donde se intercepta es el máximo evento que se puede producir. “b” es la pendiente de la recta, donde a mayor pendiente la magnitud esperada es menor y si la pendiente baja incrementa el peligro a un evento de mayor magnitud esperado.



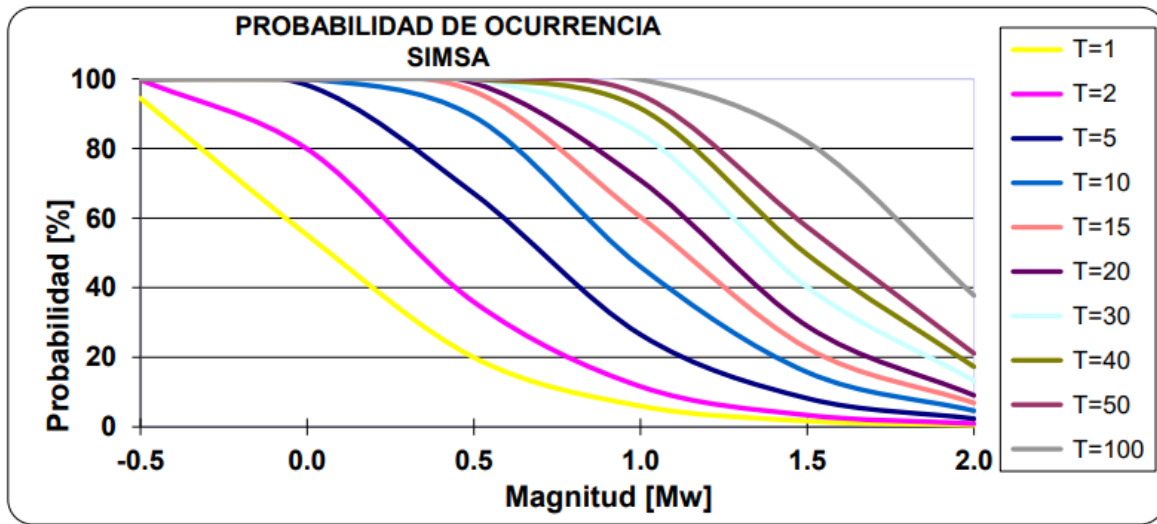
**Figura 15.** Relación Frecuencia-Magnitud y parámetros “a” y “b”.



Fuente: Elaboración propia

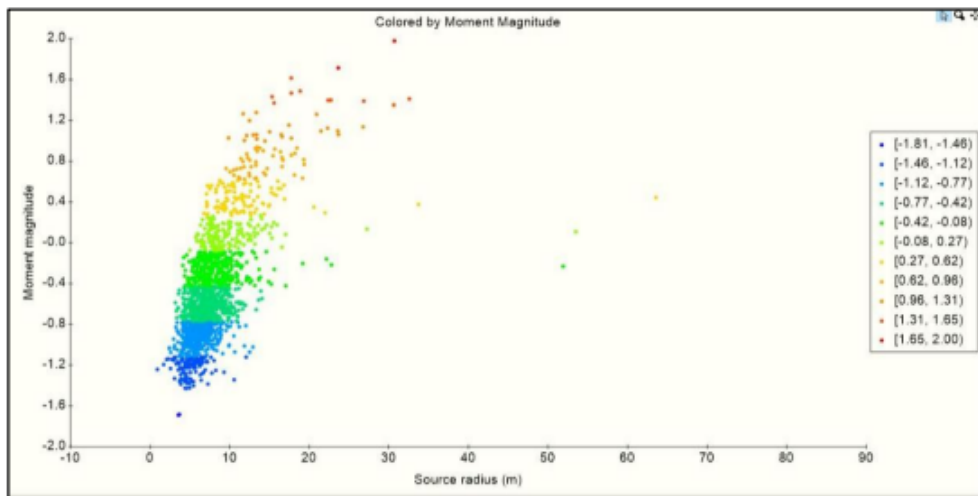
Donde “b” es la pendiente de la recta; en este caso el valor de “b” sería negativo; por una forma práctica se toma un valor positivo. Entre menor sea el valor de “b” mayor será el Riesgo Sísmico. Según la distribución de Gutenberg-Richter el máximo evento que se espera es de una magnitud 1.7Mw, el parámetro b esta con una pendiente de  $b = 1.11$ . Dicha pendiente es la que se tiene que controlar mes a mes, si la pendiente disminuye el peligro sísmico aumenta. El punto de susceptibilidad en el gráfico de FRECUENCIA-MAGNITUD se encuentra en la magnitud -0.4Mw. Esto nos indica que eventos sísmicos con magnitudes mayores a -0.4Mw causan deformación en el macizo rocoso.

**Figura 16.** Probabilidad de ocurrencia.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 17.** Radios de ruptura según la magnitud del evento

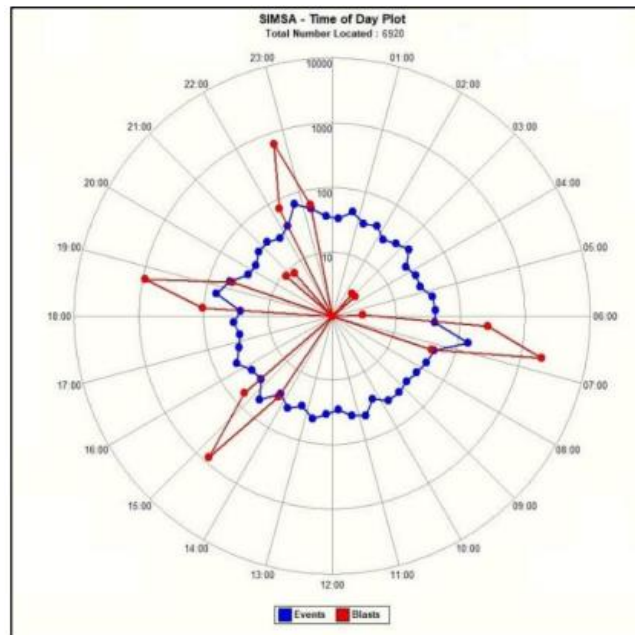


Fuente: Elaboración propia

De toda la data sísmica registrada podemos observar que los eventos de mayores magnitudes tienen Radios de ruptura que van de los 10 a los 30m.

De todo el tiempo que se viene monitoreando no se observa un patrón de comportamiento de eventos sísmicos en las 24 horas, en la figura 18 se observa los disparos a horas 07:00, 15:00, 19:00 y 23:00 hora.

**Figura 18.** Distribución de los eventos sísmicos y disparos en el día.



Fuente: Elaboración propia

### 5.5.El Periodo de Retorno,

Nos indica el tiempo que tardaría un evento microsísmico de una determinada magnitud ( $M_w$ ) en volver a ocurrir, desde el momento de ocurrido el evento. Se tiene solo 60 días de información sísmica como para poder realizar un análisis del Periodo de retorno de un evento sísmico. Se recomienda cumplir un periodo mínimo de 6 meses de data sísmica.

### 5.6.Análisis y tratamiento de la información

El estudio realizado puede manifestar cómo funciona un sistema microsísmico y el entendimiento del monitoreo microsísmico.

### **5.6.1. Funcionamiento del sistema microsísmico**

El sistema microsísmico está hecho de componentes únicos, tales como:

#### **5.6.1.1.Sensores**

Existen 2 tipos:

- Geófonos triaxiales
- Geófonos uniaxiales

#### **5.6.1.2.Gabinete**

Aloja un equipo esencial de adquisición y comunicaciones, incorpora el Paladín que sirve como pieza fundamental del sistema microsísmico.

#### **5.6.1.3.Comunicación Ethernet**

Fibra para transferencia de datos y de ondas.

#### **5.6.1.4.Ordenador de procesamiento**

Multinúcleo y procesador rápido, con una potente tarjeta de video.

Los eventos microsísmicos liberan energía sísmica, y estas son detectadas por los sensores sísmicos incluyendo geófonos. Los cables de cobre transmiten señales analógicas hacia el grabador sísmico digital Paladín dentro de una caja de conexiones.

Cada Paladín es un registrador sísmico digital habilitado en red, equipado con su propia dirección IP para ser identificado fácilmente, monitoreo remoto y calibración. Una vez que Paladín registra y digitaliza la señal, se trasmite a la computadora de adquisición a través de comunicación Ethernet u otras redes (es decir, fibra óptica, radio). En el caso de una mina subterránea, la computadora de adquisición generalmente se instala en una oficina en la superficie. El procesamiento puede incluir el reconocimiento de eventos, la evaluación de ubicación y la

magnitud, y el uso de módulos de pantalla interactiva 3D habilitados para ver la visualización de los parámetros de la fuente de una vista de 3D de la mina.

### **5.6.2. Monitoreo microsísmico**

Analiza los sismos de pequeña escala que ocurren bajo tierra debido a actividades humanas o la minería. La ciencia microsísmica se originó a partir de los terremotos ( $M_w < 0$ ). Estos eventos son demasiado bajos por lo que no se puede sentir en la superficie, pero estos eventos son detectados por los geófonos. A diferencia de las técnicas 3D tradicionales que miden los reflejos acústicos de las fuentes de energía, el monitoreo es un método pasivo, significando que se puede escuchar la liberación de energía que se ha producido bajo tierra. La sismicidad pasiva se denomina “Actividad Sísmica Inducida”.

#### **5.6.2.1. Evento microsísmico**

Los grandes eventos son causados por la liberación de energía debido a la rotura de roca en una falla. Por el contrario, en la minería cambian constantemente la distribución de esfuerzos y el volumen de la masa rocosa y se producirán eventos microsísmicos. Cuando la roca intenta redistribuir la tensión en el cuerpo, se deslizará o se cortará junto con áreas débiles preexistentes (como fallas o sistemas de fracturamientos).

#### **5.6.2.2. ¿Qué muestra el monitoreo microsísmico?**

El monitoreo tiene como objetivo responder 3 preguntas básicas:

- ❖ ¿Cuándo ocurrió?
- ❖ ¿Dónde ocurrió?
- ❖ ¿De qué magnitud fue?

El monitoreo microsísmico determina la magnitud del evento y ubicación. Cuando se observa actividad microsísmica a lo largo de los años, los encargados del monitoreo pueden comenzar a ver patrones de actividad sísmica relacionados con la actividad de producción.

El análisis microsísmico avanzado del monitoreo microsísmico revela información más detallada en cuanto a la microsismicidad en la zona y cómo responde a la roca, aumentando así la eficiencia y optimizando en el rendimiento. Esta pequeña falla hace que se libere energía en forma de ondas sísmicas, lo que se denomina evento microsísmico.

### **5.6.2.3. Magnitud momento**

Los resultados más frecuentes del monitoreo son la localización del evento y su magnitud.

La “magnitud de Richter”, se desarrolló en 1935 para explicar la intensidad de eventos de tamaño mediano (entre 3 y 7) en California. La escala Richter utiliza la amplitud de las ondas registradas por el sismómetro a una distancia conocida de la fuente para calcular la intensidad del evento. Desafortunadamente, la escala Richter y algunas otras escalas de magnitud que se han propuesto tienen algunas desventajas. La magnitud máxima de la escala Richter es de 7 o menos, lo cual significa que cualquier evento importante siempre tendrá una magnitud de 7 o menor. Adicionando, la escala Richter solo describe la amplitud máxima y no da ninguna información de la energía totalmente liberada por el evento.

Hanks y Kanamori introdujeron la magnitud del momento ( $M_w$ ) en 1979 y desde esa fecha se ha convertido en el parámetro más común para describir las dimensiones de las microestructuras. El tamaño del momento es una medida del tamaño del evento dependiendo de la energía que libera, la magnitud momento se refiere a la cantidad de movimientos de cada roca (es decir, a la distancia de la fractura o falla) y al área de la superficie de la falla o fractura. Dado que el momento en que

la amplitud puede describir las propiedades físicas del evento, el valor calculado se puede comparar fácilmente con los valores de amplitud de otros eventos. El tamaño de la magnitud momento es una escala más precisa para describir el tamaño del evento.

Dado que la escala de magnitud es logarítmica, un aumento en una escala de magnitud por una unidad de magnitud equivale al aumento de 10 veces la amplitud registrada por el geófono y un aumento de apropiadamente 30 veces la energía.

#### **5.6.2.4. Ubicación de eventos microsísmicos**

Cuando ocurre un evento microsísmico debido a actividades industriales como la minería, se puede decir que ha ocurrido un evento microsísmico. La ubicación exacta donde ocurren las nuevas grietas de la roca o desencadenan las grietas existentes se denomina ubicación o fuente del evento.

El tiempo requerido para la propagación de la onda P y la onda S desde la fuente del evento hasta el sensor depende de la velocidad y la distancia del medio a través del cual se propagan ( $t=d/v$ ). Utilizando registros de sonido, tiempos de llegada de explosiones, se estima la velocidad con la que la energía liberada por un evento emite a través de diferentes capas de roca y crea un modelo de velocidad para el área.

El lugar del evento es determinado por:

- ❖ La distancia entre el evento y el sensor es determinada por las ondas P y S.
- ❖ La orientación es determinada a partir del análisis de hodogramas.

##### **5.6.2.4.1. Distancia**

En un grupo de sensores, se conoce el espacio entre los sensores. La diferencia de tiempo entre la onda P y S que llega a cada sensor en la matriz se denomina tiempo de espera de distancia.

El tiempo de espera de distancia proporciona información sobre la distancia de eventos de la matriz de sensores. Los geofísicos también pueden usar el hecho de que las ondas P (primarias) viajan más rápido que las ondas S (secundarias) para ayudar a determinar la ubicación de los eventos. Un sensor lejos de la fuente sísmica tendrá una brecha mayor entre la llegada de las ondas P y S que un sensor más cercano a la fuente sísmica.

#### **5.6.2.4.2. Orientación**

Desde esta perspectiva, calcular la distancia a la ubicación del evento le permite definir el radio de la esfera donde se encuentra la fuente. Para perfeccionar la ubicación de este evento, es necesario su orientación azimut e inmersión. La información de dirección se puede sacar de un análisis de hodograma de señal.

#### **5.6.2.4.3. Ubicación de eventos**

La ubicación de eventos se realiza utilizando un potente y los geofísicos, geomecánicos, están capacitados para acoplar y determinar ubicaciones a lo largo del sismograma que representa la llegada de las ondas P y S.

- ❖ Para calcular la ubicación de un evento es importante:
- ❖ Realizar el monitoreo del lugar con un número adecuado de geófonos y tener una excelente cobertura del área.
- ❖ Conocer la ubicación y dirección exacta de todos los geófonos de monitoreo.
- ❖ Ratificar que todos los eventos estén sincronizados con el tiempo real.
- ❖ Tener una matriz de velocidad exacta.

### **5.7. Análisis de la solución**

El análisis de datos del monitoreo microsísmico manifiesta los rangos del momento de magnitud, para determinar los controles aplicables de los eventos microsísmicos.



### **5.7.1. Sismicidad inducida y rangos del momento de magnitud**

La sismicidad inducida son eventos microsísmicos que resultan de la actividad humana, también está adjunto a la fractura o al deslizamiento de la roca, que es afectado por la minería. En el Perú no se tiene normado cuándo una mina debe ser considerada mina profunda, los altos esfuerzos de roca por el minado profundo y los estallidos en las labores mineras que operan son un problema, un volumen alto de extracción donde se involucra la energía liberada en roca.

### **5.7.2. Parámetros de monitoreo sísmico**

#### **5.7.2.1. Magnitud**

El método más común utilizado para medir el tamaño de un evento microsísmico es la magnitud. Sin este parámetro de evento, es imposible evaluar el riesgo sísmico y el diseño del soporte. De igual forma, existen escalas como la magnitud del momento ( $M_w$ ), magnitud del local ( $M_l$ ) y la magnitud Nuttli ( $M_n$ ).

##### **5.7.2.1.1. Magnitud local ( $M_l$ )**

Se presenta en la medida de mayor extensión de onda señalado por el geófono, tomando una distancia aproximada de 100 kilómetros desde el foco donde ocurrió el evento (epicentro). La amplitud incrementa en una unidad y la amplitud aumenta 10 veces.

##### **5.7.2.1.2. Magnitud Nuttli ( $M_n$ )**

Utilizado principalmente en Canadá. La amplitud es una medida del movimiento más alto registrado en una distancia de frecuencia de 1 – 10 Hz. Este tipo de magnitud se puede convertir y relacionar con otras escalas.

##### **5.7.2.1.3. Magnitud momento ( $M_w$ )**

Recientemente ha sido desarrollado para resolver problemas de otras escalas, ya que puede registrar, movimientos a gran escala y está relacionado con momentos sísmicos, que son métodos que representan la energía radiante. En consecuencia, para representar correctamente el evento

microsísmico, es indispensable considerar otros métodos, como la caída estática. La correlación entre la magnitud del momento y el momento sísmico se muestra en la siguiente fórmula.

$$M_w = \frac{2}{3} \log(M_0) - 10.7$$

#### **5.7.2.2. Energía liberada**

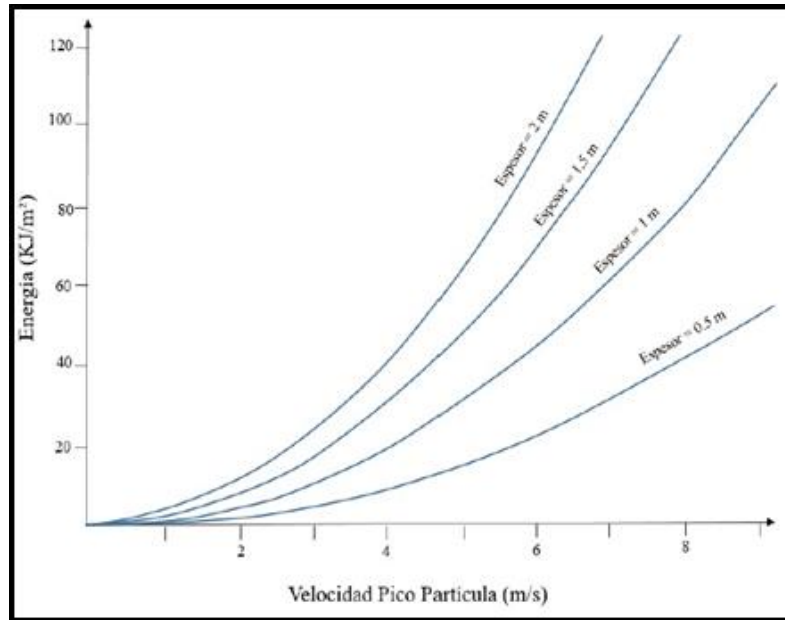
La energía liberada por un evento sísmico y detectada por un geófono de tres ejes. Puede expresarse de la siguiente manera.

#### **5.7.2.3. Velocidad pico partícula (VPP)**

La vibración de la velocidad máxima de las partículas se encuentra en la onda S. La medición del sensor de tres ejes muestra que la velocidad máxima de las partículas en la onda P es el 45% de la velocidad máxima de las partículas en la onda S. los parámetros del monitoreo sísmico dependen de la magnitud momento y la distancia al evento de origen.

De manera similar, en la figura 19, la relación entre la velocidad máxima de las partículas y la energía que libera se traza de distintos espesores de roca, que serán movidas o expulsadas en la dirección de excavación por el evento sísmico.

**Figura 19.** Correlación entre la energía sísmica liberada y la velocidad pico partícula.



Tomada del Software Seis Vis, Ortlepp

Para este caso, la energía que el sistema de soporte necesita absorber será equivalente a la magnitud momento esperado e inversamente equivalente a la distancia. Por esta razón, se aprecia razonablemente la localización de los proyectos afectados por estos eventos, como el trabajo de producción y desarrollo; así como la localización y el tamaño del evento microsísmico.

**Tabla 4.** Valores de correlación entre la energía liberada y la VPP

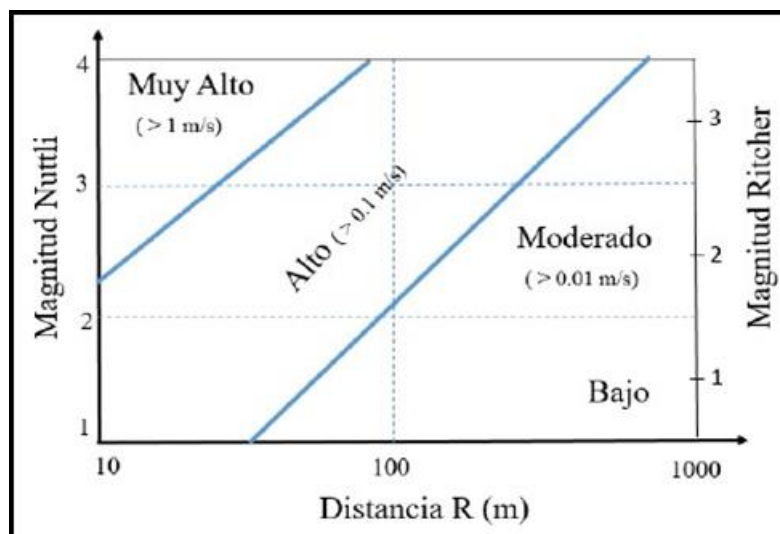
Mecanismo de origen	Roca sin proyección	Roca con proyección					
		Roca con proyección		Proyección de roca (transferencia de energía sísmica)			
Energía sísmica liberada (KJ/m²)	No crítico	No crítico	2 a 10	5 a 25	3 a 10	10 a 20	20 a 50
VPP (m/s)	< 1.5	1.5 - 3	1.5 - 3	> 3	> 3	> 3	> 3

Nota: tomada de Rockburst Support Handbook

#### 5.7.2.4. Relación de la magnitud, la VPP y la distancia del evento microsísmico

Esta relación es muy importante porque puede ayudar a determinar el grado de movimiento de los macizos rocosos, los cuales son afectados por las ondas microsísmicas, dependen de la distancia y la magnitud. De hecho, el desplazamiento de la roca en el foco donde ocurrió el evento será muy alto a diferencia de los lugares alejados del foco, se describe esta relación a través de la ley de proporcionalidad, según la experiencia de daño que se produce en las labores mineras. Luego de que se obtiene la ley de proporcionalidad en diversas minas, es posible predecir el desplazamiento de las rocas causado por la excavación a cierta distancia del origen del evento microsísmico. El desplazamiento de la roca se manifiesta en m/s o mm/s. La figura 20 muestra lo que se describe en este párrafo.

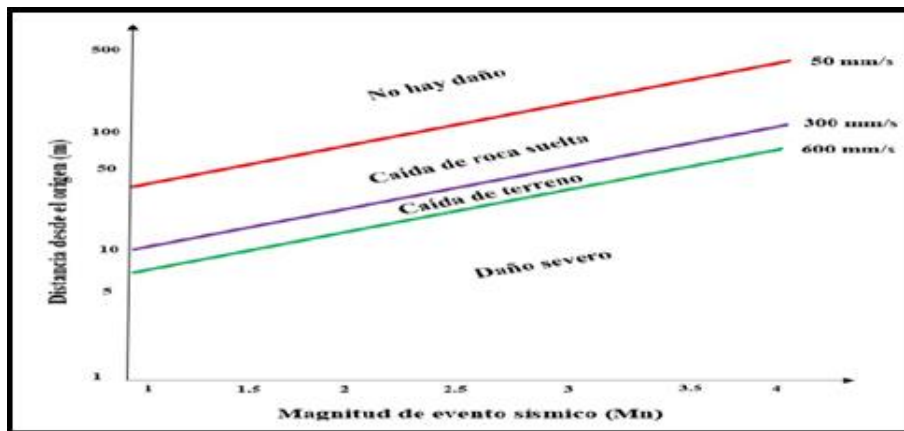
**Figura 20.** Determinación de la velocidad pico partícula y la distancia.



Tomada de Mining in burst – prone ground

De manera similar, considerando el historial sísmico de una mina determinada, se pueden almacenar miles de eventos microsísmicos para estudiar el impacto en la excavación, según el grado de evento. Las minas canadienses han registrados 400 eventos microsísmicos de  $M=2$  o más en un período de tiempo dado, y concluyeron que hay más eventos de pequeña magnitud allí. Por lo tanto, la amplitud y frecuencia de este evento se divide en 3 grupos: daño menor, daño moderado y daño severo.

**Figura 21.** Representación del nivel de daño y la VPP con respecto a la magnitud del evento.



Tomada del Control of rockburst damage, Hedley, 1992

### 5.7.3. Peligro microsísmico

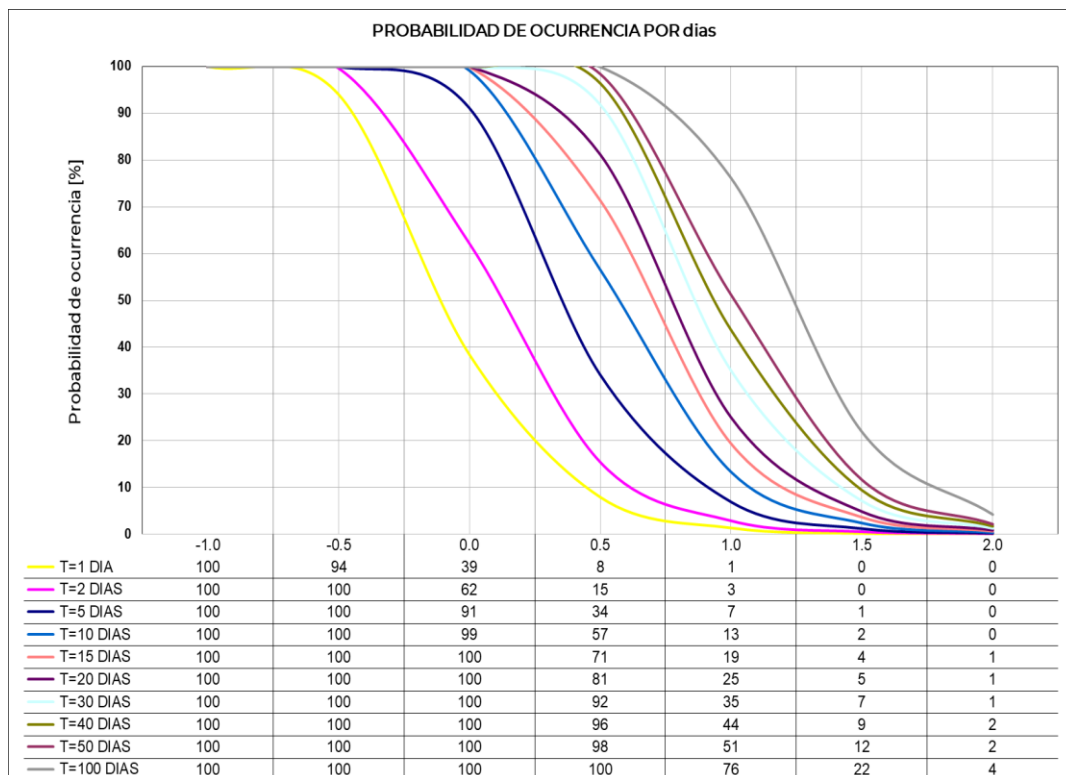
El peligro microsísmico se define como una propiedad de eventos sísmicos, que producen daños y pérdidas, esta propiedad presenta muchas incertidumbres como el tamaño, localización y vibraciones que se pueden producir en eventos futuros, por lo cual el peligro sísmico se expresa como probabilidades de un nivel de vibración para un tiempo determinado.

El peligro microsísmico en El Sector Ayala inferior tiene 2 componentes, el primero es netamente tectónico o natural, el segundo es debido a eventos sísmicos inducidos por la actividad minera.

La importancia del grado de sismicidad inducida de la mina es que se requiere determinar y evaluar el peligro sísmico que existe, se ha estimado que, a partir del momento de magnitud del evento, permite medir el grado o nivel de la sismicidad y así establecer un rango de peligro microsísmico.

De acuerdo a esta ecuación, se determina la razón de eventos microsísmicos diarios que ocurren bajo ciertas magnitudes, por lo que se puede conocer el rango del riesgo microsísmico, lo que limita el nivel de actividad sísmica de la mina en determinada circunstancia nula hasta una extrema (ver tabla 3). Las minas que tienen más de 10 eventos microsísmicos con una magnitud mayor o igual a 1 por día, habrá un nivel de peligro microsísmico muy alto. De esta forma, se puede conocer la ratio calculado diariamente, y también se puede explicar en términos comunes de acuerdo con la tabla 5.

**Tabla 5.** Estimación del peligro sísmico, probabilidad de ocurrencia por día



*Nota:* tomada del Departamento de Geomecánica, El Sector Ayala inferior

En función al gráfico se determina lo siguiente, existe un 80% de probabilidad de recurrencia cada 100 días y se espera que exista un evento de Mw. 1.0

**Tabla 6.** Ocurrencias de eventos microsísmicos

Ocurrencias de eventos sísmicos	Descripción
> 1	Más de un evento microsísmico por día
> 0.3	Unos cuantos eventos microsísmicos por semana
> 0.1	Eventos microsísmicos ocurren aproximadamente una vez a la semana
> 0.03	Eventos microsísmicos ocurren aproximadamente una vez al mes
> 0.01	Unos cuantos eventos microsísmicos por año
> 0.003	Eventos microsísmicos ocurren aproximadamente una vez al año
> 0.001	Un evento microsísmico ocurre cada pocos años
< 0.001	Un evento microsísmico puede haber pasado alguna vez
0	Eventos microsísmicos de esta magnitud nunca han ocurrido

*Nota:* tomada de Australian Centre for Geomechanics

#### 5.7.4. Rango del momento de magnitud (Mw)

El rango del momento de magnitud es el intervalo entre el valor mínimo y el máximo de cada evento microsísmico, que permite una idea de propagación de datos, el rango también es conocido como amplitud.

##### 5.7.4.2. Clasificación

Para los incidentes de varias minas se han desarrollado estándares para clasificarlos según el número, la escala y la duración del daño. Por esta razón, considerando estos factores, según la actividad sísmica son los eventos microsísmicos menores y mayores.

##### 5.7.4.2.1. Eventos microsísmicos mayores

Se entiende como alta emisión acústica, diferente a la voladura. Debido a la gran cantidad de movimiento del volumen de roca durante este tipo de eventos, las ondas de aire se sienten en las interconexiones excavadas. El daño causado en el interior de la mina se debe a dos factores; el

impacto de la explosión y el impacto de las ondas sísmicas, por ejemplo, si el incidente ocurre en una estructura de alto estrés como un pilar, una gran cantidad de rocas se romperá en pequeños fragmentos en un espacio reducido, creando una atmósfera polvorienta y causando serios daños a los soportes de proyectos continuos. Para este tipo de eventos, los geófonos detectan a una distancia de más de 10 kilómetros.

#### **5.7.4.2.2. Eventos microsísmicos menores**

El volumen de desplazamiento en un evento de este tipo suele ser inferior a 0,5 m<sup>3</sup>, y cuando el evento microsísmico ocurre cerca de una grieta, el desplazamiento es de entre 1 y 2 metros cúbicos. Del mismo modo, no habrá choque de aire o choque de ondas como en un evento a largo plazo. Habitualmente, las emisiones sonoras no se detectan a distancias superiores a 50 metros y no se escuchan en la superficie.

#### **5.7.4.3. Tipos**

La mina clasificó estos eventos según los componentes que los causaron. Dichos eventos se denominan como estallido de roca, estallido del pilar y estallido por desplazamiento de falla.

##### **5.7.4.3.1. Estallido de roca – “Strainburst”**

Son ocasionados por altas concentraciones de tensión en los hastiales de la labor. Generalmente la magnitud de estos eventos es menor a 2, y la masa rocosa afectada es muy alto. Esto habitualmente ocurre en minas explosivas y a menudo ocurre durante la perforación frontal y los ciclos de soporte. Debido a la voladura, la roca no puede adaptarse a los cambios de tensión instantáneos, por lo que se producirán daños a pequeña escala. Esto ocurre en la condición estructural geológica y el daño resultante es controlado por estas estructuras.



#### **5.7.4.3.2. Estallido del pilar “Pillar burst”**

Este tipo ocurre cuando la fuerza ejercida sobre el pilar es mayor que la resistencia. Cuando el pilar falla, se libera una gran cantidad de energía almacenada, lo que hace que la parte superior caiga y cierre el hastial de trabajo. La activación de fallas comienza desde el punto más débil de la zona de estrés. En circunstancias normales, la magnitud del estallido del pilar es superior a 3,5 y el daño puede alcanzar miles de toneladas.

#### **5.7.4.3.3. Estallido por desplazamiento de la falla “Fault – slip burst”**

Ocurre cuando el esfuerzo cortante de toda la estructura geológica excede el esfuerzo normal. Esto suele ocurrir cuando se excavan grandes áreas. Para este caso, la energía se propagará del comienzo del punto de origen del evento microsísmico hasta el punto de excavación más cercano, donde se libera el chorro de roca.

#### **5.7.4.4. Correlación entre el momento magnitud y la distancia**

La tabla 7 muestra la relación de la ocurrencia de la magnitud momento, y la energía que libera por el evento microsísmico y el trayecto desde el geófono (llamado radio). Con este fin, la siguiente tabla fue desarrollada con base en la historia de eventos de los eventos sísmicos que ocurrieron en El Sector Ayala inferior. Según la tabla, cuando la magnitud del evento aumenta, el radio (distancia desde el geófono) disminuye y ocurre un evento de terremoto crítico. Se ve que los eventos microsísmicos se clasifican según las condiciones microsísmicas, sean críticas o no críticas.

**Tabla 7.**Correlación entre el momento magnitud y la distancia

		Rango de Magnitud Momento (Mw)				
		< 0	<0 a 0.25>	<0.25 a 0.75>	<1 a 1.5>	<1.5 a 2>
Rango de las distancias desde los geófonos (m)	0 - 5	-	-	-	-	-
	> 5 - 10	-	-	-	-	-
	> 10 - 15	-	-	-	-	0.00
	> 15 - 20	-	-	-	0.00	1.70
	> 20 - 25	-	-	0.70	1.00	1.50
	> 25 - 30	-	-	0.70	1.35	1.55
	> 30 - 35	0.00	0.00	0.80	1.15	-
	> 40 - 45	0.00	0.00	0.85	-	-
	> 50	0.00	0.00	0.60	-	-

Nota: tomada del Departamento de Geomecánica, San Vicente

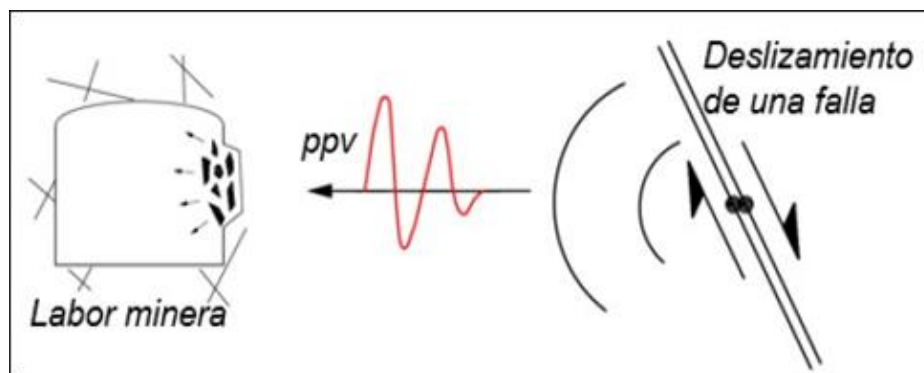
Dado el número de eventos microsísmicos que se consolida en magnitudes menores a 0.75 Mw, se espera que la distancia desde la fuente del evento varíe en el rango de 20 a 30 metros. De esta manera, se puede liberar la energía de liberación clave. Lo cual en las excavaciones mineras ocurren estos eventos, puede ocurrir un evento tipo strainburst (estallido de roca), porque el trabajo estará bajo condiciones de altos esfuerzos.

#### 5.7.4.5.Daño del evento microsísmico

Para hacer que la roca comience y se rompa, se lleva a cabo un proceso en el macizo rocoso. Esto implica 3 pasos importantes. Primero, la roca se rompe cerca de la labor; luego la roca quebrada se mueve hacia la superficie libre; finalmente, el material roto separado del muro de la obra es descargado violentamente. Este paso está relacionado con el mecanismo que lo produce, primero, la roca sin protuberancias); segundo, el movimiento microsísmico causado por el

desplazamiento (los abultamientos de la roca), tercero, la transferencia de energía sísmica. Causando que las rocas se liberen violentamente. El estallido por deslizamiento de la falla está relacionado con la carga dinámica, es decir, está relacionado con la liberación de energía, que se extiende desde el punto de origen del evento microsísmico hasta el punto de excavación más cercano, es decir, el punto de expulsión de la roca, figura 22.

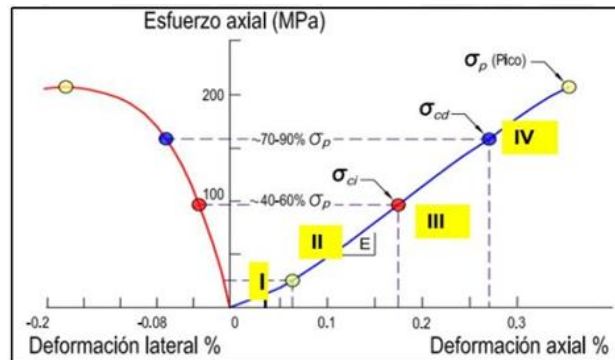
**Figura 22.** Propagación del evento microsísmico a lo largo del macizo rocoso.



Tomada de Hoek and Martin, 2014

En este caso de ruptura por deformación y ruptura de columna, el evento microsísmico ocurrió en la misma ubicación, muy próximo de la periferia de la labor o muro de la columna. El daño de la masa rocosa ocurre en 4 etapas, figura 23. Primero, las grietas existentes se cierran; segundo, hay una pauta lineal tensión-deformación; tercero, se forman y expanden nuevas grietas de manera estable; cuarta etapa, las grietas empiezan a fusionarse y expandirse de manera voluble.

**Figura 23.** Etapas de las fracturas con respecto a los a esfuerzos axiales



Tomada de Hoek and Martin

### 5.8. Causas del estallido de roca

Las consecuencias de los daños causados por estallidos de roca contienen importantes factores que influyen en los eventos sísmicos, según Cai and Kaiser, los factores son:

#### 5.8.1. Factores geológicos

En los esfuerzos in situ las estructuras geológicas se modifican, que son efecto de sismicidad inducida, estas fallas impulsan a la acumulación de esfuerzos y facilitan el relajamiento del macizo rocoso, cambiando la estabilidad de la infraestructura. La roca frágil tiende a reunir energía de tensión, esto puede generar una falla violenta frente a un pequeño evento, porque la energía recibida no es lo suficientemente dúctil para soportar, esto quiere decir, que para tener una falla las características del macizo rocoso tienen que ser de resistencia alta, alta elasticidad y ser frágil; en cambio, una roca más dúctil y blanda puede obtener más energía.

#### 5.8.2. Factores geotécnicos

Con la profundización de los trabajos de excavación, ha aumentado el trabajo in situ. Dado que existe una gran diferencia entre la tensión principal máxima y la tensión principal mínima generada en la parte profunda, se generan tensiones tangenciales elevadas en y cerca del borde de trabajo. Asimismo, el nivel de tensiones, junto con el comportamiento de resistencia y deformación

del macizo rocoso, controla la energía de tensión que obtienen en la roca y que también pueden liberar. Las rocas son muy resistentes y rígidas generando grandes esfuerzos y almacenan grandes cantidades de energía. Para este caso, es indispensable comprender el criterio de falla por esfuerzo inducido para la determinación de la probabilidad que un área sea explotada.

### **5.8.3. Factores de mina**

En la operación minera cambian las tensiones in situ de los macizos rocosos, y estas tensiones crean áreas de baja y alta tensión. Las actividades mineras han cambiado el sistema rígido de la mina. Cuando la tasa de minería es mayor al 80%, se dejarán pilares o residuos sujetos a alta tensión concentrada, lo que conducirá a una disminución del sistema rígido del macizo rocoso y un aumento en almacenamiento y liberación de energía. Por lo tanto, la probabilidad de que se produzcan explosiones aumentará en estas condiciones. De manera similar, la secuencia de extracción tiene un mayor impacto, para los cambios de tensión del macizo rocoso y los procesos de fallas (geología). Detener la minería es un procedimiento que se utiliza en los métodos de minería cuando hay una falla para reducir la posibilidad de que se produzcan explosiones de rocas. Vale la pena mencionar que los cambios en los métodos de minería han dado lugar a cambios fundamentales en la gravedad y el potencial.

### **5.8.4. Factores sísmicos**

Como se sabe, las explosiones de tensión producirán terremotos y eventos potencialmente destructivos cerca de la excavación, mientras que las grandes explosiones de rocas están relacionadas con eventos microsísmicos de movimiento de las fallas. Adicional, es cierto que si el evento microsísmico es grande, la perturbación en el sector afectado será más amplia; si el evento microsísmico está cerca del frente, la perturbación y el desplazamiento de la masa rocosa serán grandes. Por lo tanto, los eventos grandes, como deslizamientos de tierra de fallas, aumentan el

área de potencial explosión y daño severo; sin embargo, el daño es proporcional a la gravedad del suceso y hay ciertas circunstancias que afectan la gravedad del daño por explosión.

## **5.9. Controles aplicables frente a un evento microsísmico**

Los controles aplicables se realizaron después de la evaluación de riesgos, por lo cual se está en la capacidad de determinar si los controles que existen son adecuados, estableciendo la reducción del riesgo.

### **5.9.1. Sistema de monitoreo microsísmico**

- ✓ Pantalla de visualización en tiempo real
- ✓ Monitoreo diario de los softwares:
  - SEIS VIS
  - WAVE VIS
  - HNASS

### **5.9.2. Sostenimientos y relleno**

- ✓ Aplicación e instalación de cable bolting en los tajos.
- ✓ Sostenimiento del frente con malla electrosoldada de sacrificio.
- ✓ Sostenimiento del frente con shotcrete de sacrificio.
- ✓ Relleno detrítico e hidráulico.

### **5.9.3. Taladros de alivio**

Los taladros de alivio ayudan a que el macizo rocoso libere su energía acumulada para una mejor estabilidad.

### **5.9.4. Voladura de pre acondicionamiento**

- ✓ Voladura de desestresing
- ✓ Frente disparado con voladura de preacondicionamiento
- ✓ Voladura controlada, para evitar daños al macizo rocoso.

### **5.10. Análisis de monitoreo microsísmico mediante el software Seis Vis**

El siguiente análisis contempla los eventos de magnitud momento más altos de la zona baja cuerpos y la interpretación sísmica desde el primero de junio hasta el primero de setiembre, teniendo en cuenta los siguientes aspectos.

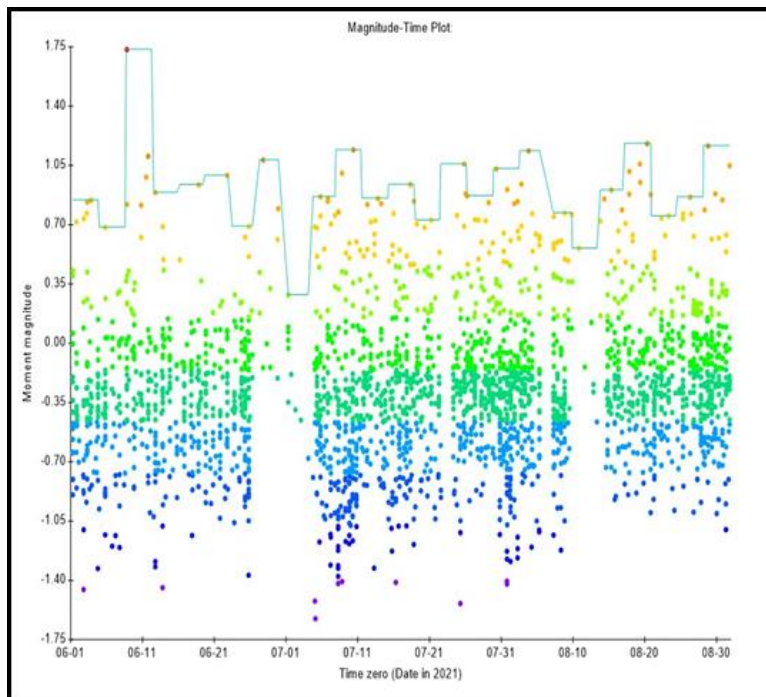
- ✓ Tajos vacíos que actualmente requiere relleno
- ✓ Análisis de la falla principal (falla)
- ✓ Eventos microsísmicos más altos

En el mes de julio se identificó un evento de momento magnitud alto, y en agosto se identificaron 2 eventos de riesgo alto, ambos ubicados en la falla principal Alicia Nv. 1235 - TJ. 8610, con radio de influencia de 20 m.

Entre las 2 primeras semanas de agosto se identificaron 2 tajos vacíos que tuvieron eventos microsísmicos de magnitud alta con una liberación de energía promedio de 25 KJ, con un radio de influencia de 35 m, los eventos microsísmicos identificados tuvieron réplicas, para evitar activaciones se recomienda la instalación de cable bolting, y continuar con el relleno.

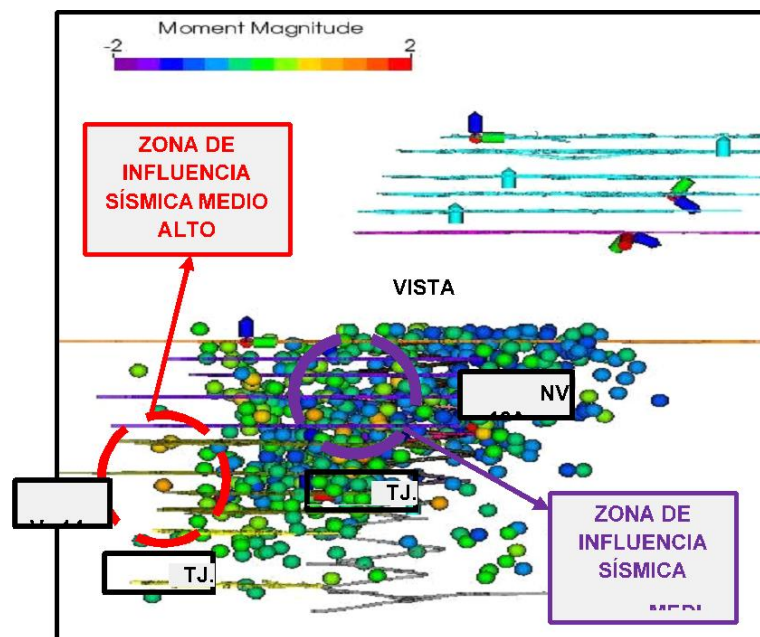
En la figura 24 se muestra la Magnitud momento vs. Tiempo, donde se puede evidenciar que el evento microsísmico más alto es de  $M_w = 1.69$ , en un escenario critico a una distancia de 30 m al tajo se obtiene una energía liberada de 9.52 KJ/m<sup>2</sup>, el cual necesita complementar el sostenimiento con cable bolting para obtener un factor de seguridad de 1.46.

**Figura 24.** Magnitud momento vs. Tiempo



Tomada del software Seis Vis

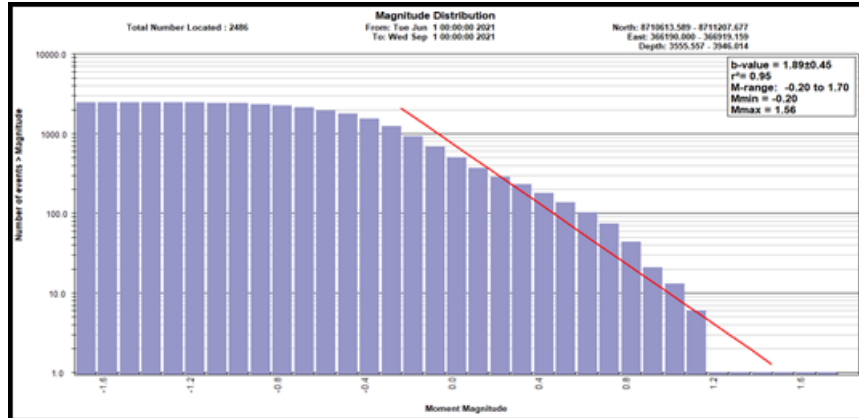
**Figura 25.** Monitoreo microsísmico - Zona Baja Cuerpos.



Tomada del software Seis Vis

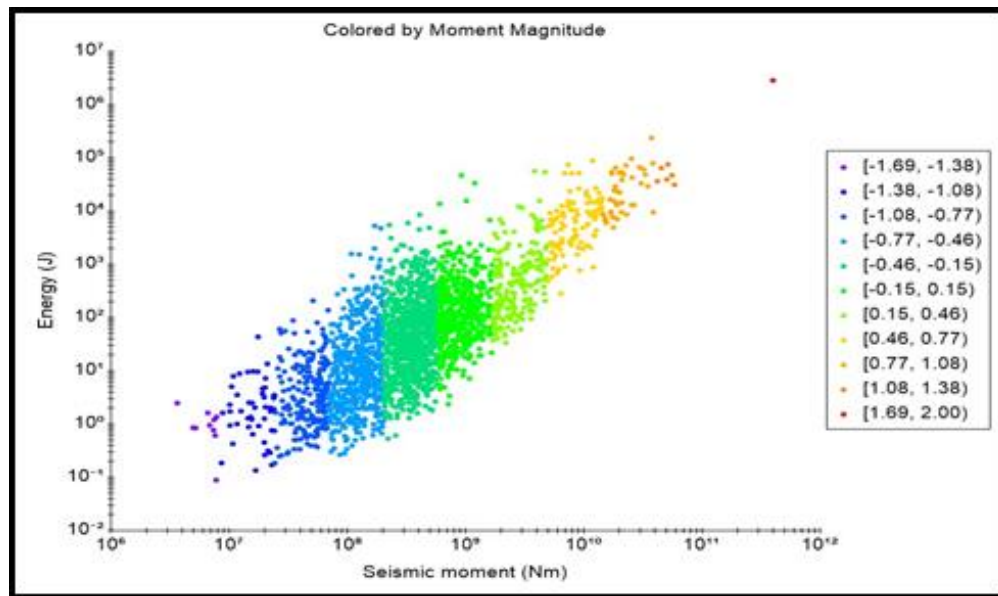


**Figura 26.** Número de eventos vs. Momento de magnitud.



Tomada del software Seis Vis

**Figura 27.** Energía vs. Momento sísmico



Tomada del software Seis Vis

### 5.11. Análisis de la liberación de energía vs. Sostenimiento

A partir del escenario crítico de  $M_w = 1.35$  y distancia de 6 metros, se obtiene una energía liberada de 9.52 KJ/m<sup>2</sup>, se compara con la energía de soporte actual en una etapa de minado y se obtiene FoS de 0.59, el cual no cumple el criterio de aceptabilidad de la mina.

**Tabla 8.** Análisis de la liberación de energía vs. Sostenimiento

<b>Mw</b>	<b>R</b>	<b>MN</b>	<b>PPV</b>	<b>Ec (kJ/m<sup>2</sup>)</b>
1.35	6	1.9	2.71	<b>9.52</b>

**Ec:** liberación de energía (KJ/m<sup>2</sup>)

**Mw:** magnitud Momento

**R:** distancia entre el hipocentro y el sensor

**MN:** magnitud Nuttli

**PPV:** velocidad pico partícula (m/s)

<b>Elementos de sostenimiento</b>	<b>Energía (kJ/m<sup>2</sup>)</b>
Shotcrete 2"	1.7
Perno helicoidal	4.0
<b>Energía total del sostenimiento</b>	<b>5.7</b>
<b>Factor de seguridad</b>	<b>0.59</b>

Se le suma el cable bolting el cual tiene una energía de soporte de 8 kJ/m<sup>2</sup> y se determina el FoS en una etapa de minado y se obtiene 1.44, cumpliendo el criterio de aceptabilidad.

<b>Elementos de Sostenimiento</b>	<b>Energía (kJ/m<sup>2</sup>)</b>
Shotcrete 2"	1.7
Perno helicoidal	4.0
Cable <i>bolting</i> 20 m	8.0
<b>Energía total del sostenimiento</b>	<b>13.7</b>
<b>Factor de seguridad</b>	<b>1.44</b>

### 5.12. Plan de contingencia según los niveles de riesgo

Para el plan de activación se tiene en cuenta el proceso de creación de microgrietas en macizos rocosos que son invisibles a simple vista, son generados por ondas de vibración, que suelen ser de baja intensidad que las personas no pueden sentirlas hasta que las rocas caen, se derrumban o colapsan debido a la inestabilidad geológica.

Se han logrado avances significativos en la última década, en la tecnología de geófonos (sismógrafos) y en la tecnología de transmisión y procesamiento de datos. El análisis de datos sísmicos implica una ilustración en que los eventos liberan energía y en el estudio o análisis de la frecuencia de estos eventos. Se usa en minería y los mapeos pueden identificar áreas frágiles en túneles y pilares de minas subterráneas.

El monitoreo microsísmico revela eventos microsísmicos de baja intensidad ubicada en un espacio confinado. Posteriormente, el parámetro permite informar sobre las zonas vulnerables de la mina y el comportamiento estructural minera frente a actividades productivas como perforación, excavación o voladura, así como otras áreas identificadas como riesgos, rampas principales, tajos, etc. Esta información permite tomar medidas específicas para mejorar la seguridad, eficiencia y mejores prácticas de la operación, de lo cual se ejecutará el plan de activación de respuesta según los niveles de riesgo.

**Tabla 9.** Plan de contingencia según los niveles de riesgo (Mw)

Ítem	Condición		Monitoreo	Acción	Nivel de alerta
	Sonido	Características de la roca			
1	Imperceptible	Relajamiento sin proyección, acumulación de esfuerzos	No se evidencia anomalía por la estación de monitoreo. <b>Mw &lt;-2 a 0&gt;</b>	Se desarrollará la actividad minera con monitoreo constante.	<b>Muy bajo Mw&lt;-2 a 0&gt;</b>
2	Sonido leve	Daños al macizo rocoso sin proyección de roca	Aumento anómalo del número de eventos sísmicos registrados por la estación de monitoreo. <b>Mw &lt; 0 a 0.25&gt;</b>	El área de geomecánica investiga si hay presencia de acumulación de número de eventos (iguales o mayores, eventos fuera de horario de disparo), de no tener eventos mayores se registra el evento y las activadas de las labores se desarrolla con normalidad.	<b>Bajo Mw&lt;0 a 0.25&gt;</b>
3	Sonido fuerte con movimiento	Reventazón con proyección de roca (empuje de roca con desprendimiento de salto)	Si en una zona de laboreo, en los últimos 3 días presenta una acumulación de 20 eventos. <b>Mw &lt; 0.25 a 0.75&gt;</b>	<p><b>Geomecánicas:</b> se determina si el evento ocurrió en sectores continuos a la operación o existen factores geomecánicos. Se realiza el monitoreo durante las siguientes horas por posibles réplicas y se estable la inspección de la zona.</p> <p><b>Operaciones:</b> si el área de geomecánica determina que el evento corresponde a un área activa de trabajo se comunicará con mina y seguridad teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Si existe acumulación de 20 eventos en la zona de influencia en un periodo de 3 días se retirará al personal por 1 hora, y se retomará el área de trabajo, en caso de no presentar desprendimiento o proyección del macizo rocoso.</li> <li>-En caso de observarse daños a la labor, se paralizan los trabajos y se bloquea por 6 horas, sucedido el evento, posteriormente se realizará la inspección.</li> </ul>	<b>Medio B Mw&lt;0.25 a 0.75&gt;</b>
			Si en una zona de laboreo, en los últimos 3 días presenta una acumulación de 10 eventos. <b>Mw &lt; 0.75 a 1&gt;</b>		<p><b>Geomecánica:</b> se determina si la zona del evento es un área activa de trabajo o existen factores geomecánicos. Se realiza el monitoreo durante las siguientes horas por posibles réplicas y se estable la inspección de la zona.</p> <p><b>Operaciones:</b> si el área de Geomecánica determina que el evento corresponde a un área activa de trabajo se comunicará con mina y seguridad teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:</p>

4	Sonido intenso con movimiento	Estadillo con proyección de roca generado	Evento sísmico capaz de sentirse a más de 1 km de hipocentro con proyección de roca y daño al sostenimiento. <b>Mw &lt;1 a 2&gt;</b>	<p>-Si existe acumulación de 10 eventos en la zona de influencia en un periodo de 3 días se retirará al personal por 3 horas, y se retomará el área de trabajo, en caso de no presentar desprendimiento o proyección del macizo rocoso.</p> <p>-En caso de observarse daños a la labor, se paralizan los trabajos y se bloquea por 12 horas, sucedido el evento, posteriormente se realizará la inspección.</p> <p><b>Geomecánica:</b> se determina si la zona del evento es un área activa de trabajo en un radio de 100 metros o existen factores geomecánicos que hayan influenciado. Se realiza el monitoreo durante las siguientes horas por posibles replicas (revisar la frecuencia durante las 36 horas) y se establece la inspección de la zona de influencia.</p> <p><b>Operaciones:</b> si el área de Geomecánica determina que el evento corresponde a un área activa de trabajo se comunicará con mina y seguridad para retirar al personal fuera del peligro sísmico y bloqueo de la labor por 36 horas.</p> <p>En caso de no observar daños a la labor, después de 24 horas se realizará la inspección multidisciplinaria y se retomarán los trabajos.</p>	<b>Alto Mw &lt;1 a 2&gt;</b>
---	-------------------------------	---	---	---	----------------------------------

---

*Nota:* tomada del Departamento de Geomecánica, El Sector Ayala inferior

**Tabla 10.** Rango de la magnitud momento según el grado de stress de la roca (Mw)

Magnitud Momento (Mw)		Grado de stress	Sostenimiento adecuado	Descripción
<-2 a 0>	<b>Muy bajo</b>	Roca no estresada y de baja a moderada resistencia a la compresión de roca.	Sostenimiento de acuerdo a la calidad de roca.	Eventos en condiciones de sismicidad no críticas
<0 a 0.25>	<b>Bajo</b>	Roca poco estresada, el aumento está en función a las excavaciones futuras.	Pernos barra helicoidal.	Eventos en condiciones de sismicidad no críticas
<0.25 a 0.75>	<b>Medio B</b>	Roca estresada, relajamiento moderado en función a las aberturas de los tajos.	Pernos helicoidales + malla 2". Prioridad 3 para relleno de tajos.	Eventos en condiciones de sismicidad críticas
<0.75 a 1>	<b>Medio A</b>	Muy estresado, relajamiento severo en función al tiempo.	Perno helicoidal + malla 2" + shotcrete 2". Prioridad 2 para relleno de tajos.	Eventos en condiciones de sismicidad críticas
<1 a 2>	<b>Muy alto</b>	Núcleo de la zona estresada, relajamiento intenso de la roca.	Pernos helicoidales + malla 2" + shotcrete 3". Prioridad 1 para relleno de tajos.	Eventos en condiciones de sismicidad críticas

*Nota:* tomada del Departamento de Geomecánica, El Sector Ayala inferior

## Conclusiones

- Se concluye que el análisis de la sismicidad inducida en el comportamiento del macizo rocoso permite implementar un sistema de alerta temprana que se acomode a las características y necesidades de la mina, para el reconocimiento de las zonas vulnerables y así poder tomar medidas preventivas correspondientes.
- Según lo que puede manifestar el análisis de la sismicidad inducida en el comportamiento del macizo rocoso se concluye, dónde ocurrió, cuándo ocurrió, y la intensidad del evento, basándose en el funcionamiento del monitoreo microsísmico con el enfoque de la anisotropía, modelos de velocidad y la detención de eventos con desencadenantes.
- De acuerdo a los rangos del momento de magnitud del análisis de la sismicidad inducida en el comportamiento del macizo rocoso se concluye que, los rangos permiten darle umbrales desde muy bajo hasta muy alto según el grado de stress (liberación de energía) de la roca  $M_w = -2$  a  $0.5$  (eventos en condiciones de sismicidad no críticas),  $M_w = > 0.5$  a  $2$  (eventos bajo condiciones de sismicidad críticas).
- De acuerdo a los controles aplicables del análisis de la sismicidad inducida en el comportamiento del macizo rocoso se concluye que, la causa de los estallidos de rocas se genera por la liberación de energía, lo cual no se puede predecir en qué momento se realizará dicha liberación.

### **Recomendaciones**

- Se recomienda que para el análisis de la sismicidad inducida en el comportamiento del macizo rocoso de la zona baja de Ayala Inferior, se implemente un paladín adicional de 6 geófonos (3 uniaxiales y 3 triaxiales) para poder tener más alcance a la profundización y tener un mayor control del monitoreo microsísmico.
- Se recomienda hacer seguimiento de la sismicidad inducida para poder determinar parámetros en las zonas con mayor sismicidad inducida y tener un control en la detección de eventos con desencadenantes y así no confundir un sonido (ruido eléctrico) con un evento.
- Se recomienda usar la escala de Nuttli para determinar el momento de magnitud y de acuerdo a ello cumplir con los umbrales designados para el plan de activación de respuesta (qué hacer en casos de eventos microsísmicos bajos y altos) según los niveles de riesgos.
- Se recomienda usar los controles implementados de mitigación mediante el mecanismo de daño del evento microsísmico, estos controles son: sistema de monitoreo microsísmico (monitoreo diario), soporte preventivo con sostenimiento de sacrificio (malla electrosoldada y shotcrete), perforación de taladros de alivio, realizar voladuras controladas.



### Referencia bibliográfica

- Abreu, J. (2012). Hipótesis, Método & Diseño de Investigación. *International Journal of Good Conscience*, 7 (20), 187-197. <http://www.spentamexico.org/v7-n2/7%282%29187-197.pdf>
- Arias, J., Villasís, M. y Miranda, M. (2016). El protocolo de investigación III: la población de estudio. *Revista Alergia México*, 63 (2), 201-206. <https://www.redalyc.org/pdf/4867/486755023011.pdf>
- Blanco, J. (2018). *Caracterización geomecánica para el análisis de pernos hydrabolt en el sostenimiento de labores subterráneas compañía minera Casapalca* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio institucional. [http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/565/1/T026\\_46307439\\_T.pdf](http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/565/1/T026_46307439_T.pdf)
- Carhuancho, M. (2020). *Optimización del consumo de shotcrete de labores permanentes para labores tipo IIIB – IVA; RMR 31-50 Carahuacra Volcan Compañía Minera S.A.A.* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana del Centro]. Repositorio institucional. <https://repositorio.upecen.edu.pe/bitstream/handle/UPECEN/223/TESIS%20CARHUANCHO%20UTCANI%20MARCO%20ANTONIO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fernández, P., Vallejo, G., Livacic, P. y Tuero, E. (2014). Validez Estructurada para una investigación cuasi-experimental de calidad. Se cumplen 50 años de la presentación en sociedad de los diseños cuasi-experimentales. *Anales de psicología*, 30 (2), 756-771. <https://www.redalyc.org/pdf/167/16731188039.pdf>

López, P. (2004). Población, muestra y muestreo. *Punto Cero*, 9 (8), 69-74.

[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-02762004000100012#:~:text=Es%20un%20subconjunto%20o%20parte,parte%20representativa%20de%20la%20poblaci%C3%B3n.](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012#:~:text=Es%20un%20subconjunto%20o%20parte,parte%20representativa%20de%20la%20poblaci%C3%B3n.)

Lozada, J. (2014). Investigación aplicada: Definición, Propiedad intelectual e industria.

*CienciaAmérica*, 3(1), 34-39.

<http://cienciamerica.uti.edu.ec/openjournal/index.php/uti/article/view/30>

Ojeda, J. (2020). *Aplicación de modificador reológico para reducir el rebote de shotcrete en minería subterránea* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].

Repositorio institucional.

[https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/5150/discover?filtertype\\_0=dateIssued&filter\\_relational\\_operator\\_0>equals&filter\\_0=%5B2020+TO+2021%5D&filtertype\\_1=author&filter\\_relational\\_operator\\_1>equals&filter=Ojeda+Perez%2C+Joel+Alexander](https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/5150/discover?filtertype_0=dateIssued&filter_relational_operator_0>equals&filter_0=%5B2020+TO+2021%5D&filtertype_1=author&filter_relational_operator_1>equals&filter=Ojeda+Perez%2C+Joel+Alexander)

Pantigozo, J. (2013). *Comparación de rendimiento entre swellex e hydrabolt en el sostenimiento en minas subterráneas para elección óptima* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de

San Agustín de Arequipa]. Repositorio institucional.

<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3902>

Perez, B. (2021). *Análisis de variables operacionales en la dosificación del shotcrete en la rampa 4025, nivel 4000 para la shotcrete explotación de la veta Guisela en la Unidad Minera Chungar – 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio institucional.

[https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10439/1/IV\\_FIN\\_110\\_TE\\_Perez\\_Vera\\_2021.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10439/1/IV_FIN_110_TE_Perez_Vera_2021.pdf)

Unsihuay, D. (2018). *Implementación del shotcrete reforzado con fibra de acero, comparado con el sostenimiento estructural en labores mineras subterráneas, UP – San Cristóbal, Volcan Cia. Minera SAA* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú].

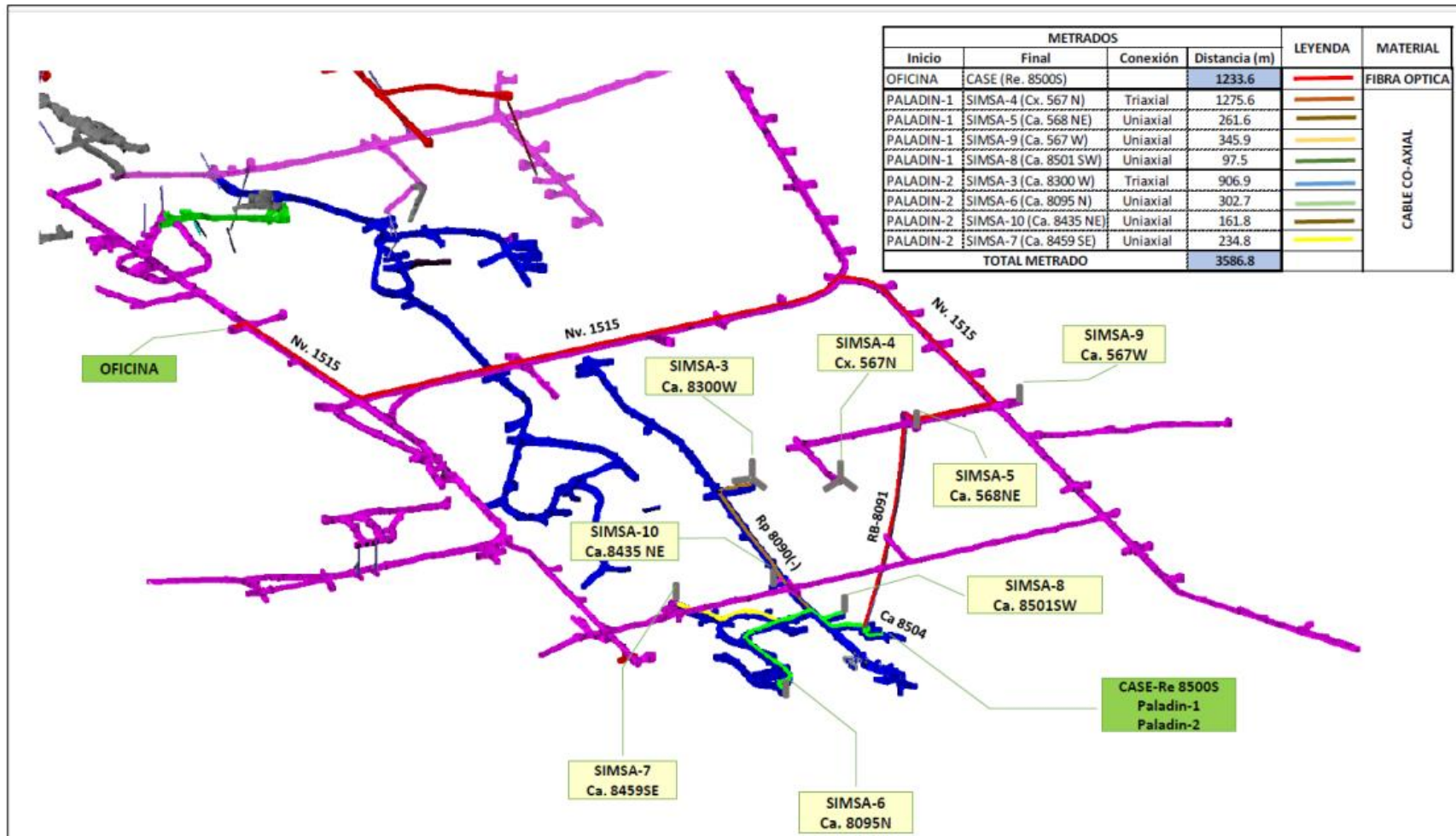
Repositorio

institucional.

<https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5317/tesssi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ANEXO.

ANEXO N° 1 ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA MICROSISMICO UNIDAD MINA SAN VICENTE





**UNSCH**

FACULTAD DE  
**INGENIERÍA**  
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”

## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### CONSTANCIA N° 046-2022-FIMGC

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado en segunda instancia para las **Escuelas Profesionales** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la UNSCH y Resolución Decanal N° 158-2021-FIMGC-UNSCH-D, deja constancia que Sr./Srta.

**Apellidos y Nombres** : BARRIENTOS HUAMAN, Roger Ivan  
**Escuela Profesional** : INGENIERÍA DE MINAS  
**Título de la Tesis** : “ESTUDIO DE SISMICIDAD INDUCIDA PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS DE INESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO DEL SECTOR AYALA INFERIOR MINA SAN VICENTE 2022”  
**Evaluación de la Originalidad** : 29 % Índice de Similitud  
**Identificador de la entrega** : 1873676325

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

Ayacucho, 22 de julio del 2022

Firmado digitalmente  
por LEZAMA CUELLAR  
CHRISTIAN

**Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR**  
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado  
de la FIMGC

Con depósito para Sustentación y Tramite de Titulo

# "ESTUDIO DE SISMICIDAD INDUCIDA PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS DE INESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO DEL SECTOR AYALA INFERIOR MINA SAN VICENTE 2022"

## INFORME DE ORIGINALIDAD

29%

INDICE DE SIMILITUD

29%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://repositorio.continental.edu.pe">repositorio.continental.edu.pe</a> Fuente de Internet	18%
2	<a href="https://repositorio.unap.edu.pe">repositorio.unap.edu.pe</a> Fuente de Internet	4%
3	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	1%
4	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	1%
6	<a href="https://cybertesis.unmsm.edu.pe">cybertesis.unmsm.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://repositorio.uncp.edu.pe">repositorio.uncp.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
8	<a href="https://tesis.ucsm.edu.pe">tesis.ucsm.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%

9	repositorio.uc.cl	Fuente de Internet	<1 %
10	dspace.unitru.edu.pe	Fuente de Internet	<1 %
11	repositorio.unasam.edu.pe	Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.undac.edu.pe	Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.upagu.edu.pe	Fuente de Internet	<1 %
14	vsip.info	Fuente de Internet	<1 %
15	cdn.www.gob.pe	Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS****ACTA N° 053-2022-FIMGC**

En la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal N° 201-2022-FIMGC-D**, siendo los veintinueve días del mes de julio del 2022, a horas 9:00 a.m.; se reunieron los jurados del acto de sustentación, en el Auditorium virtual google meet del Campus Universitario de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Siendo el Jurado de la sustentación de tesis compuesto por el presidente el **Dr. Ing. Efraín Elías PORRAS FLORES**, Jurado el **Mg. Ing. Roberto Juan GUTIÉRREZ PALOMINO**, Jurado el **Mg. Ing. José Agustín ESPARTA SÁNCHEZ**, Jurado Asesor el **MSc. Ing. Johnny Henry CCATAMAYO BARRIOS** y secretario del proceso el **Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR**, con el objetivo de recepcionar la sustentación de la tesis denominada **“ESTUDIO DE SISMICIDAD INDUCIDA PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS DE INESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO DEL SECTOR AYALA INFERIOR MINA SAN VICENTE 2022”**, sustentado por el Señor **Roger Iván BARRIENTOS HUAMAN**, Bachiller en **Ciencias de la Ingeniería Minas**.

El Jurado luego de haber recepcionado la sustentación de la tesis y realizado las preguntas, el sustentante al haber dado respuesta a las preguntas, y el Jurado haber deliberado; califica con la nota aprobatoria de **16 (dieciséis)**.

En fe de lo cual, se firma la presente acta, por los miembros integrantes del proceso de sustentación.

\_\_\_\_\_  
**Dr. Ing. Efraín Elías PORRAS FLORES**  
Presidente

\_\_\_\_\_  
**Mg. Ing. Roberto Juan GUTIÉRREZ PALOMINO**  
Jurado

\_\_\_\_\_  
**MSc. Ing. Johnny Henry CCATAMAYO BARRIOS**  
Jurado - Asesor

\_\_\_\_\_  
**Mg. Ing. José Agustín ESPARTA SÁNCHEZ**  
Jurado

\_\_\_\_\_  
**Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR**  
Secretario del Proceso