

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA



ANÁLISIS DE SISMICIDAD INDUCIDA PERÍODO 2012-2013 EN MINA
SUBTERRÁNEA RÍO BLANCO, ÁREAS 17-18 Y PROYECCIONES
PARA SISTEMA DE MONITOREO MICROSÍSMICO EN PROYECTO
MINERÍA CONTINUA EN CODELCO DIVISIÓN ANDINA

Bárbara Nataly Blanco Arrué

Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico

Concepción, Chile, Junio 2013

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

**ANÁLISIS DE SISMICIDAD INDUCIDA PERÍODO 2012-2013 EN
MINA SUBTERRÁNEA RÍO BLANCO, ÁREAS 17-18 Y
PROYECCIONES PARA SISTEMA DE MONITOREO
MICROSÍSMICO EN PROYECTO MINERÍA CONTINUA EN
CODELCO DIVISIÓN ANDINA**

Bárbara Nataly Blanco Arrué

Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico

Profesor Guía:

Dr. Arturo Belmonte-Pool Villanueva

Comisión:

Dr. Klaus Bataille Bollweg, Daniela Villegas Muñoz



Concepción, Chile, Junio 2013

© CODELCO – CHILE, División Andina

Queda prohibida la utilización de la información descrita a lo largo de esta memoria, y la reproducción parcial o total de esta obra en cualquier forma, medio o procedimiento sin permiso por escrito de la corporación y de la autora.

Agradecimientos

Un profundo y afectuoso agradecimiento a mis padres Verónica Arrué Donoso y Hernán Blanco Ortiz, por estar ahí en las buenas y en las malas, por ese apoyo incondicional que sólo ellos me han entregado, ese ímpetu que me ha ayudado a salir adelante en mis momentos más difíciles y a sus innumerables consejos que cada día me forjan a ser una mejor persona en todo ámbito de la vida. Al conchito y a mis hermanas por entender y comprender mi ausencia y pese a la distancia, me han entregado el ánimo y el apoyo siempre.

Un cordial agradecimiento al Departamento de Geofísica (DGEO) de la Universidad de Concepción, en particular a los profesores; Arturo Belmonte, Klaus Bataille y Dante Figueroa por su formación tanto práctica como teórica a lo largo de mi trayectoria por la carrera y a sus consejos tanto en lo profesional como en lo personal.

Un especial agradecimiento a CODELCO – CHILE División Andina por darme la oportunidad de incluirme en sus labores diarias para permitir realizar esta memoria en sus dependencias. Y mis más sinceros agradecimientos al Área de Geomecánica de la mina subterránea, particularmente a Daniela Villegas M., Christian Lagos E., Luis Toro A., Luis Quiñones A., Fernando Ortiz M. y Rodrigo Calvo S. por su ilimitada disposición a enseñarme y a prestarme apoyo en lo que necesitara a lo largo de mi estadía.

Finalmente, agradezco a mi pareja Milton Urqueta, a mis amigos de niñez, mis amigos, compañeros de Universidad y a todos los que me han acompañado durante esta etapa, por aportar en mi desarrollo emocional y espiritual, por su compañía y paciencia, en prestarme ayuda cuando lo necesite y aclararme el camino cada vez que yo lo veía oscuro, sin la participación de ustedes no habría sido igual.

*“No todo depende de los deseos, pero, aun así,
soy de las que han decidido intentar
llevar a cabo sus deseos.”*

Sigmund Freud

Índice de Contenido

Agradecimientos	7
Índice de Contenido	5
Índice de Figuras	10
Índice de Tablas	20
I.- Introducción	20
1.1. Resumen	20
1.2. Objetivos Generales	21
1.3. Objetivos Específicos	21
1.4. Hipótesis de Trabajo.....	21
II.- Antecedentes Generales	22
2.1. CODELCO - Chile, División Andina	22
2.1.1. Generalidades	22
2.1.2. Reseña Histórica Mina Subterránea Río Blanco	23
2.2. Ubicación Geográfica Mina Río Blanco	24
2.3. Geología del Yacimiento.....	25
2.3.1. Contacto Primario-Secundario	27
2.3.2. Antecedentes Geológicos para el Tercer Panel, Áreas 18-19.....	28
2.4. Clima	28
2.5. Descripción de Métodos de Explotación Aplicados en la Mina Río Blanco	29
2.5.1. Hundimiento Progresivo por Paneles (<i>Panel Caving</i>).....	32
III.- Marco Teórico	37
3.1. Sismicidad Inducida por Actividad Minera.....	37

3.2. Parámetros Sísmicos	41
3.2.1 Magnitud Momento (<i>M_w</i>)	42
3.2.2. Índice de Energía.....	43
3.2.3. Frecuencia de Eventos (FrEv)	44
3.2.4. Volumen Aparente	45
3.2.5. Frecuencia de eventos acumulada esperada (<i>FrEvesp</i>)	46
3.3. Elementos para la Sensibilidad de una Red Sísmica.....	49
3.4. Elementos para la Resolución de una Red Sísmica.....	52
3.5. Elementos de un Sistema de Monitoreo Micro - Sísmico	53
3.5.1. Geófonos	54
3.5.2. Unidad de Adquisición de Datos (QS, GS y SAQS).....	56
3.5.3. Comunicación y Control de la Instrumentación.....	58
3.5.4. <i>Run Time System Software, RTS</i>	60
3.6. Parámetros Mineros.....	60
3.6.1. Extracción.....	60
3.6.2. Socavación	60
3.7. Sector de Minería Continua.....	61
3.7.1. Componentes del Sistema	62
3.7.2. Funcionamiento del Sistema	63
3.8. Condición de Esfuerzos del Tercer Panel.....	64
3.8.1 Condición de Esfuerzos para el Norte del Tercer Panel.....	66
3.8.2 Condición de Esfuerzos para el sector de Minería Continua	66
3.9. Pre Acondicionamiento	67
3.10. Métodos de Hundimiento	69
3.10.1. Método de Hundimiento para sector del Norte del Tercer Panel	69
3.10.2. Método de Hundimiento para sector de Minería Continua	70

IV.- Metodología de Trabajo	71
4.1. Recolección y Análisis de la Información.....	71
4.2. Procesamiento y adquisición de los datos	71
4.2.1. Procesador de eventos <i>Jmts</i>	72
4.3. Análisis de los datos.....	74
4.3.1. Visualizador de eventos <i>Jdi</i>	74
4.4. Estimación de la Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada FrEvesp	75
V.- Resultados	78
5.1. Red de Monitoreo Sísmico, Área 18, Nivel 16 Hundimiento, Sector Norte III Panel.	78
5.1.1. Sensibilidad para el Sistema Sísmico 2013.....	81
5.1.2. Resolución para el Sistema Sísmico 2013.....	84
5.1.3. Ubicación de Sensores para Red Sísmica 2013.....	87
5.1.4. Instalación de Sensores para Sistema Sísmico 2013	89
5.1.5. Calibración Sistema Sísmico 2013.....	94
5.1.6. Chequeo del Sistema de Monitoreo Sísmico.....	99
5.2. Análisis Período 2012-2013	105
5.2.1. Frecuencia de Eventos.....	105
5.2.2. Hundimiento Parcial.....	107
5.2.3. Extracción Parcial	108
5.2.4. Frecuencia de Eventos Acumulada, Socavación Acumulada y Extracción Acumulada	110
5.2.5. Distribución de eventos por fecha y magnitud momento	112
5.2.6. Asociación con estructuras pre-existentes y contacto primario – secundario	113
5.2.7. Distribución parcial y espacial de eventos c/r a la magnitud momento	116
5.2.8. Índice de Energía y Volumen Aparente	119
5.3. Elementos para Sistema de Monitoreo en Sector Minería Continua.....	122
5.3.1. Sensibilidad de la red propuesta.....	126

5.3.2. Resolución de la red propuesta.....	129
5.4. Estimación de la Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada FrEvesp para el Norte del Tercer Panel	132
5.5. Estimación de la Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada FrEvesp para el sector de Minería Continua	137
VI.- Comentarios y Discusión	142
6.1. Instalación del Sistema Sísmico 2013	142
6.2. Análisis de los eventos período 2012 – 2013	143
6.3. Sensibilidad y Resolución para Sistema Sísmico en el sector de Minería Continua.....	145
6.4. Estimación de la Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada para el Sector Norte del Tercer Panel.....	146
6.5. Estimación del Índice de Minería Sector Minería Continua	146
VII.- Conclusiones	147
Anexo A: Elementos Básicos de Sismología Aplicados a Minería Subterránea	149
Anexo B: Glosario de Términos Mineros.....	164
Anexo C: Instrucciones Básicas Para Utilización del <i>Run Time System</i> (RTS)	171
Bibliografía	181

Índice de Figuras

Capítulo II

Figura 2.1. Ubicación geográfica de la Mina Río Blanco, junto a las ciudades cercanas a ella como lo son Valparaíso y Santiago.	25
Figura 2.2. Geología de superficie correspondiente al yacimiento Río Blanco, en donde es posible ilustrar los sectores del rajo Sur-Sur, rajo Don Luis, y en un contorno de color rojo la ubicación del Tercer Panel de la Mina Subterránea Río Blanco (Gallardo, 2005).	26
Figura 2.3. Fallas mayores existentes en Áreas 18 y 19 del Tercer Panel de la mina Subterránea Río Blanco.	28
Figura 2.4. Imagen aérea de División Andina, donde se ilustran las diferentes minas existentes, en especial el sector del Tercer Panel de la Mina subterránea, además se puede observar parte del cráter de subsidencia (DAND, 2012).	30
Figura 2.5. Etapas del proceso de hundimiento, a) Inicio del <i>Caving</i> , b) y c) <i>Caving</i> virgen o sin conexión a superficie.	31
Figura 2.6. Etapas del proceso de hundimiento, d) <i>Caving</i> transciente, e) y f) <i>Caving</i> en régimen y <i>Caving</i> transciente.	32
Figura 2.7. Presenta una representación en 3D del nivel de producción para malla típica de <i>Panel Caving</i> utilizada en la mina subterránea Río Blanco, División Andina.	34
Figura 2.8. Explotación con variante <i>Panel Caving</i> Tradicional (Cavieres, 2008).	35
Figura 2.9. Explotación con variante <i>Panel Caving</i> con Hundimiento Previo (Cavieres, 2008).	35
Figura 2.10. Explotación con variante con <i>Panel Caving</i> con Hundimiento Avanzado (Cavieres, 2008).	36

Capítulo III

Figura 3.11. Vista en perfil de los cambios producidos en los esfuerzos deviatoricos del macizo rocoso debido a las actividades de socavación y extracción, lo que genera la propagación del <i>caving</i>	37
Figura 3.12. Esquema que ejemplifica el como una red sísmica capta la ruptura del macizo rocoso, en la que existe una asociación entre la fuente Sísmico, el medio y la respuesta local que genera. .	39
Figura 3.13. Esquema descriptivo del método de hundimiento. Se destacan los volúmenes de influencia, activo y de desplome.	40
Figura 3.14. Proceso de socavación inicial.	40

Figura 3.15. Proceso de propagación del <i>caving</i>	41
Figura 3.16. Mayor propagación del <i>caving</i> , con curvatura del techo.	41
Figura 3.17. Definición del parámetro Índice de Energía.	44
Figura 3.18. Sensibilidad y Rango Dinámico de sensores usados en minería subterránea. La región entre los límites representa el rango a utilizar por cada instrumento (Mendecki et al., 1999).	50
Figura 3.19. Relación que existe entre diferentes radios de Fuente Sísmica, en un rango para Momento Sísmico y Magnitud Momento y el esfuerzo resultante, la anchura de las líneas representa las variaciones en el tipo de roca (Mendecki et al., 1999).	51
Figura 3.20. (a) Esquema simple del funcionamiento interno de un geófono. (b) Bobinas son utilizadas por cada componente. (c) Imagen que ilustra un geófono proporcionado por el IMS junto a su Junction box, que actualmente están instalados en el sector norte del III Panel en la mina subterránea (<i>Gentileza IMS</i>).....	54
Figura 3.21. (a) Esquema que ilustra la conexión interna de la Junction Box, el lado derecho corresponde a la entrada del cable que proviene del sensor y el extremo izquierdo muestra la salida hacia la unidad de adquisición de datos. (b) Muestra las conexiones de los cables de la Junction Box antes de realizar la instalación del geófono (<i>Gentileza IMS</i>).	55
Figura 3.22. Descripción de las entradas de conexión del sismómetro Quake Seismometer.	57
Figura 3.23. Descripción de conexiones del sismómetro StandAlone.....	57
Figura 3.24. Descripción de las entradas y conexiones del sismómetro GS Seismic Station.	58
Figura 3.25. Disposición del sistema micro sísmico, en donde se aprecia la forma en que están conectadas las unidades de adquisición (QS, SAQS y GS) para conformar la columna principal del sistema.....	59
Figura 3.26. Plano del Tercer Panel de la mina Subterránea y ubicación del sector de Minería Continua. Además se muestra al costado superior derecho el Nivel de Producción (cota 3242) y por debajo el Nivel de Hundimiento (cota 3255) donde la línea amarilla muestra el actual avance de Hundimiento dejado por explotaciones anteriores.	61
Figura 3.27. Esquema tridimensional de Minería Continua, en el cual se visualiza el nivel de producción con la instalación de los <i>panzer</i> , las calles de servicio, entre otros (DAND 2012).....	62
Figura 3.28. Comparación en el funcionamiento de la Minería Convencional y la Minería Continua (DAND 2012).....	64
Figura 3.29. Proceso de fracturamiento y respuesta sísmica de un macizo rocoso con PA. a) En el <i>caving</i> sin PA, debido a la rigidez y resistencia del macizo primario, se observa ruptura violenta y propagación de fracturas naturales de gran tamaño con alta liberación de energía sísmica. b) El PA	

reduce la rigidez del macizo rocoso y la capacidad de acumular energía. Además provoca la formación de bloques con micro-fracturas, impidiendo una ruptura violenta del macizo primario (Cerutti, 2008). 69

Figura 3.30. Esquema que identifica el frente de hundimiento en el sector de las Áreas 18 y 19, Nivel 16 Hundimiento, proceso en *Zona de Caving*, lugar donde se emplea el método de Hundimiento Convencional en la Mina Subterránea Río Blanco. 69

Figura 3.31. Esquema que identifica el método de explotación para el sector de Minería Continua. 70

Capítulo IV

Figura 4.32. Visualización del procesador de eventos *Jmts*, para un evento que ha sido captado por 5 sensores, se ilustra las diferentes llegadas de las ondas en los tres ejes para cada geófono. En este caso, el evento ocurrió a las 13:03:07 con una magnitud de -1.7, el cuál fue aceptado y eventualmente procesado. 73

Figura 4.33. Se ilustran las llegadas de las ondas P y S para los ejes X, Y y Z para un sensor en particular, la llegada de la Onda P se muestra por la primera traza vertical, y la Onda S en la segunda traza. 73

Figura 4.34. Se muestra el uso del Visualizador *Jdi*, en distintas perspectivas. Caso (a), se ilustra en una vista en planta la ocurrencia de sismicidad en el frente de Hundimiento, además de las diferentes estructuras que entran en juego en la zona de estudio. Caso (b) se ilustra en perfil la sismicidad inducida, los sensores en rosado, el avance del hundimiento en línea roja, y en color café la franja aproximada que separa la roca primaria de la roca secundaria. 75

Figura 4.35. Ubicación de áreas emplazadas a lo largo del Tercer Panel de la mina subterránea, cada área tiene un año estipulado para su explotación. 76

Figura 4.36. Esquema que se utilizó para aproximar el volumen perturbado por cada zanja. 77

Capítulo V

Figura 5.37. Se muestra el plano del Tercer Panel de la mina Subterránea Río Blanco, con la ubicación donde se quiere emplazar la nueva red sísmica (Norte del Tercer Panel), la distancia entre GH (galería de hundimiento) es de 26 [m]. La imagen superior derecha muestra el Nivel de Hundimiento y la inferior derecha el Nivel de Producción. 79

Figura 5.38. Distancia máxima la cual puede ser detectado un evento sísmico con una respectiva magnitud de momento dada, donde un acelerómetro posee menos variación que un geófono. Resultados obtenidos por datos de una mina de oro en Sudáfrica (Mendecki et al. A. , 1999). 79

Figura 5.39. Vista en sección de ubicación del Norte del Tercer Panel, junto al contacto primario-secundario.	80
Figura 5.40. Plano el cual, muestra la ubicación de los sensores propuestos (puntos color azul y nombre del geófono en color verde) para la red sísmica con las alturas respectivas de cada pozo en metros (valores color azul).	82
Figura 5.41. (a) Describe la sensibilidad a la cota 3212 con una magnitud mínima de -2.1 y con un promedio de -1.53. (b) Describe la sensibilidad a la cota 3262 con una magnitud mínima de -2.4 y un promedio de -1.59. (c) Describe la sensibilidad a la cota 3312 con una magnitud mínima de -2.1 y un promedio de -1.57.	83
Figura 5.42. (a) Describe la resolución a la cota 3212 con una error de localización mínimo de 3.03 [m] y con un promedio de 5.66 [m]. (b) Describe la resolución a la cota 3262 con una error de localización de 1.71 [m] y un promedio de 4.34 [m]. (c) Describe la resolución a la cota 3312 con una error de localización de 2.31 [m] y un promedio de 5.15 [m].	84
Figura 5.43. (a) Describe la resolución a la cota 3212 con una error de localización mínimo de 4.30 [m] y con un promedio de 7.88 [m]. (b) Describe la resolución a la cota 3262 con una error de localización de 5.17 [m] y un promedio de 2.30 [m]. (c) Describe la resolución a la cota 3312 con una error de localización de 6.64 [m] y un promedio de 3.30 [m].	84
Figura 5.44. (a) Describe la resolución a la cota 3212 con una error de localización mínimo de 4.26 [m] y con un promedio de 11.07 [m]. (b) Describe la resolución a la cota 3262 con una error de localización de 3.50 [m] y un promedio de 14.08 [m]. (c) Describe la resolución a la cota 3312 con una error de localización de 4.22 [m] y un promedio de 12.83 [m].	85
Figura 5.45. (a) Describe la resolución a la cota 3212 con una error de localización mínimo de 7.65 [m] y con un promedio de 15.06 [m]. (b) Describe la resolución a la cota 3262 con una error de localización de 6.22 [m] y un promedio de 15.83 [m]. (c) Describe la resolución a la cota 3312 con una error de localización de 6.89 [m] y un promedio de 15.66 [m].	85
Figura 5.46. Distribución de los errores de localización para eventos ocurridos durante los meses de Febrero y Marzo del 2013, ambas medias no superan los 3 [m] de error de localización.	86
Figura 5.47. Distribución de geófonos, unidades de adquisición de datos para sistema sísmico 2013, además se muestra el avance del hundimiento para el año 2012 y sensores que quedan de la red sísmica anterior.	87
Figura 5.48. Pozo ubicado en la parte superior de la galería, el cual contiene su norte marcado, para posterior inyección del geófono.	89

Figura 5.49. Mufa que se genera para la extensión de los geófonos que se instalarán a una altura mayor de 10 [m].	89
Figura 5.50. a) Se ilustra proceso en donde se introduce el geófono, teniendo en consideración que el norte marcado en la parte exterior de la galería debe coincidir con el norte indicado en el sensor sísmico. b) Varas que se utilizan para elevar el sensor por el interior del pozo, cada una de 2 [m] de longitud.	90
Figura 5.51. Postura del geófono con el tubo del despiche para su posterior instalación, se procura que el norte vaya siempre marcado para mantener la alineación.	91
Figura 5.52. Esquema ilustrativo de la disposición de los sensores, los tubos de despiche y las plazas para el proceso de lechado dentro del pozo que se utilizará para la instalación de los geófonos.	91
Figura 5.53. Etapas de la inyección del geófono.	91
Figura 5.54. Se ilustra el pozo vertical descendente, y parte del proceso de instalación. El desarrollo de instalación es análogo al de un geófono vertical ascendente.	92
Figura 5.55. Ilustración de bomba helicoidal utilizada para la inyección del lechado, sustancia compuesta de cemento y cartón.	92
Figura 5.56. La imagen de la izquierda ilustra el proceso de la inyección del segundo sensor el cual es instalado en la parte inferior del pozo. La imagen de la derecha muestra el proceso terminado, previo al sellado de los tubos para evitar la caída de cemento y para su posterior secado.	93
Figura 5.57. A la derecha se observa la caja metálica instalada en la pared sur del Socavón Norte- que contiene entre el interruptor, conexión a red eléctrica y transformador, la unidad QS4 (caja “amarilla”). Debajo de esta unidad se encuentra la matriz que conecta cada cable que proviene de 2 sensores a los dos conectores SEISMIC 1 (derecha en QS, color rojo) y SEISMIC 2 (izquierda en QS, color azul).	93
Figura 5.58. Se muestra unidad GS (caja negra inferior izquierdo), arriba la unidad UPS.	94
Figura 5.59. Respuesta de sensores 209, 210, 206, 207, 208, 211 para evento registrado por el último tiro de la tronadura realizada el día 18 de Enero.	95
Figura 5.60. Respuesta de sensores 203, 204, 201, 202 para evento registrado por el último tiro de la tronadura realizada el día 18 de Enero.	96
Figura 5.61. Ubicación exacta del tiro de prueba facilitado por personal de topografía, además se ilustra la distribución de sensores de la red sísmica 2013 y el avance del hundimiento a la fecha correspondiente.	96

Figura 5.62. Se muestra el ajuste visual de la variable rms a través del ajuste de las curvas camino tiempo para las fases P (puntos rojos valores observados) y fases S (puntos azul valores observados). Las rectas representan un valor teórico o esperado. A la derecha abajo se observa el resultado del ajuste.....	97
Figura 5.63. Muestra un acercamiento a los sensores de la primera página que despliega <i>Jmts</i> y el picado de ondas P y S realizados.	98
Figura 5.64. Se muestra un acercamiento a los sensores de la segunda página que despliega <i>Jmts</i> y el picado de ondas P y S realizados.....	98
Figura 5.65. Esquema descriptivo de las conexiones existentes del sistema micro-sísmico.	100
Figura 5.66. Visualización de pulso eléctricos generados en cada sensor, se puede ilustrar que lo sensores 209 y 210 no muestran respuesta, puede deberse a que aún no están conectados a la unidad.....	101
Figura 5.67. Visualización de pulsos eléctricos generados en cada sensor. Este caso muestra la correcta solución de cada sensor, la respuesta de los sensores 203 y 204 es diferente ya que el pulso es creado por la unidad de tipo GS, que corresponde a una unidad diferente, más moderna que la QS.....	101
Figura 5.68. Ejemplo de corte en el cable <i>conduit</i> en el trayecto desde la caja de interconexión al host central, generado por una máquina que operaba en el sector, produjo la caída de 3 cajas sísmicas.	103
Figura 5.69. Estado del sísmico, utilizando “ <i>statmon</i> ” en el sistema RTS, el cual ilustra un evidente error en el sistema, asociado al desperfecto ocurrido por el punto de red.....	104
Figura 5.70. Frecuencia de Eventos observada para el período Enero-Agosto 2012, destacando la variabilidad de los meses Enero-Junio.	106
Figura 5.71. Frecuencia de Eventos observada para el período Enero – Abril 2013.	107
Figura 5.72. Hundimiento durante el período Enero – Agosto 2012. Para una mejor visualización se han tomado los valores acumulados por semana.....	107
Figura 5.73. Hundimiento durante el período Enero – Abril 2013.	108
Figura 5.74. Extracción temporal observada durante el período Enero – Agosto 2012.....	109
Figura 5.75. Extracción temporal observada durante el período Enero – Abril 2013.....	109
Figura 5.76. Frecuencia de Eventos Acumulada (imagen superior), Hundimiento Acumulado (imagen intermedia) y Extracción Acumulada (imagen inferior) para el período desde el 11 de Enero al 31 Agosto del 2012.	110

Figura 5.77. Frecuencia de Eventos Acumulada (imagen superior), Hundimiento Acumulado (imagen intermedia) y Extracción Acumulada (imagen inferior) para el período desde el 01 de Enero al 30 Abril del 2013.	111
Figura 5.78. Distribución de eventos espacial con respecto a su fecha de ocurrencia para el período Enero-Agosto 2012 (figura derecha) y para el período Enero-Abril 2013 (figura izquierda), cada una con su perspectiva en planta y en sección.	112
Figura 5.79. Distribución de eventos espacial con respecto a su magnitud de momento para el período Enero-Agosto 2012 (figura derecha) y para el período Enero-Abril 2013 (figura izquierda), cada una con su perspectiva en planta y en sección.	113
Figura 5.80. Eventos correspondientes del 21 de Marzo 2013 al 04 de Abril del 2013 en planta y sección, en el cual se visualiza la ocurrencia de sismicidad en dos focos, uno alojados en el avance de hundimiento y otro a la posible apertura de una estructura geológica.	114
Figura 5.81. Concentración de eventos entorno a fallas estructurales existentes en el sector del norte del tercer panel. La escala ubicada hacia la izquierda es asociada a la magnitud momento de los eventos ilustrados.	115
Figura 5.82. Ilustra la sismicidad inducida alojada por debajo del contacto primario-secundario, y la formación de la zona sismogénica en roca primaria para el período 21 de Marzo 2013 al 04 de Abril del 2013.	116
Figura 5.83. Distribución de magnitudes para el período desde el 11 de Enero al 31 de Agosto del 2012.	117
Figura 5.84. Distribución de magnitudes para el período desde el 01 de Enero al 30 de Abril del 2013.	117
Figura 5.85. Distribución de magnitudes en planta para los meses Enero, Febrero y Marzo del presente año 2013. Se visualizan los eventos en un rango de -3 a -2 en color negro, aquellos entre -2 y -2 en color azul y en verde los que correspondan a eventos con magnitudes entre -1 y 0.	118
Figura 5.86. Distribución de magnitudes en sección para los meses Enero, Febrero y Marzo del presente año 2013.	119
Figura 5.87. Distribución del índice de energía para el período Enero – Agosto 2012 y Enero – Abril 2013 en planta, en color azul se describen los eventos con un índice de energía mayor a cero y aquellos que tienen color rojo poseen un índice de energía menor a cero.	120
Figura 5.88. Distribución del índice de energía para el período Enero – Agosto 2012 y Enero – Abril 2013 en sección, en color azul se describen los eventos con un índice de energía mayor a cero y aquellos que tienen color rojo poseen un índice de energía menor a cero.	120

Figura 5.89. Se ilustra los valores del Índice de Energía y el Volumen Aparente Acumulado para el período del 4 al 10 de Febrero del 2013, en donde el volumen aparente acumulado se muestra en color rojo a la derecha y el índice de energía en color azul a la izquierda.	122
Figura 5.90. Se ilustra los valores del Índice de Energía y el Volumen Aparente Acumulado para el período del 21 de Marzo al 04 de Abril del 2013, en donde el volumen aparente acumulado se muestra en color rojo a la derecha y el índice de energía en color azul a la izquierda.	122
Figura 5.91. Distribución de sensores en Nivel de Hundimiento (imagen de la izquierda) y Nivel de Producción (imagen de la derecha).	124
Figura 5.92. Distribución de sensores para los casos 2, 4 y 5, teniendo en cuenta la pérdida de sensores por el avance del Hundimiento e inconvenientes laborales.	125
Figura 5.93. Sensibilidad para el Caso 1 en donde la magnitud mínima que alcanza a la cota 3305 es de -2.10, en la cota 3255 es de -1.90 y a 3225 es de -1.70.	126
Figura 5.94. Sensibilidad para el Caso 2 en donde la magnitud mínima que alcanza la red sísmica en la cota 3305 es de -2.10, en la cota 3255 es de -2.20 y en la cota 3225 es de -2.10.	127
Figura 5.95. Sensibilidad para el Caso 3 en donde la magnitud mínima a que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de -2.20, en la cota 3255 es de -2.20 y en la cota 3225 es de -2.10 ..	127
Figura 5.96. Sensibilidad para el Caso 4 en donde la magnitud mínima a que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de -2.20, en la cota 3255 es de -2.20 y en la cota 3225 es de -2.10. .	128
Figura 5.97. Sensibilidad para el Caso 5 en donde la magnitud mínima a que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de -2.20, en la cota 3255 es de -2.20 y en la cota 3225 es de -2.10. .	128
Figura 5.98. Resolución para el Caso 1 en donde el error espacial que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de 2.48 [m], en la cota 3255 es de 3.13 [m] y en la cota 3225 es de 4.05 [m].	129
Figura 5.99. Resolución para el Caso 2 en donde el error espacial que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de 3.37 [m], en la cota 3255 es de 3.55 [m] y en la cota 3225 es de 4.09 [m].	129
Figura 5.100. Resolución para el Caso 3 en donde el error espacial que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de 3.66 [m], en la cota 3255 es de 4.20 [m] y en la cota 3225 es de 4.25 [m].	130
Figura 5.101. Resolución para el Caso 4 en donde el error espacial que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de 4.11 [m], en la cota 3255 es de 4.55 [m] y en la cota 3225 es de 5.33 [m].	131

Figura 5.102. Resolución para el Caso 5 en donde el error espacial que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de 5.55 [m], en la cota 3255 es de 6.97 [m] y en la cota 3225 es de 7.85 [m].	131
Figura 5.103. Frecuencia de eventos acumulada esperada obtenida del ajuste realizado para el Caso 1, siendo comparada con la frecuencia de eventos acumulada registrada por el sistema en dicho período.....	135
Figura 5.104. Frecuencia de eventos acumulada esperada obtenida del ajuste realizado para el Caso 2, siendo comparada con la frecuencia de eventos acumulada registrada por el sistema en dicho período.....	136
Figura 5.105. Frecuencia de eventos acumulada esperada obtenida del ajuste realizado para el Caso 3, siendo comparada con la frecuencia de eventos acumulada registrada por el sistema en dicho período.....	136
Figura 5.106. Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada para la Situación 1 del sector Minería Continua, donde se indica la curva obtenida del Caso 1 con puntos rosados, la curva resultante del Caso 2 en puntos azules y la del Caso 3 con puntos rojos.	138
Figura 5.107. Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada para la Situación 2 del sector Minería Continua, donde se indica la curva obtenida del Caso 1 con puntos rosados, la curva resultante del Caso 2 en puntos azules y la del Caso 3 con puntos rojos.	139
Figura 5.108. Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada para la Situación 3 del sector Minería Continua, donde se indica la curva obtenida del Caso 1 con puntos rosados, la curva resultante del Caso 2 en puntos azules y la del Caso 3 con puntos rojos.	140
Figura 5.109. Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada para la Situación 4 del sector Minería Continua, donde se indica la curva obtenida del Caso 1 con puntos rosados, la curva resultante del Caso 2 en puntos azules y la del Caso 3 con puntos rojos.	141
Anexo A	
Figura A.110. Fuerzas equivalentes a la fuente sísmica.	159
Figura A.111. Proyección de mecanismos focales.....	160
Figura A.112. Corte y extensión en formación de un bloque.	161
Anexo C	
Figura C.113. Uso del comando “sitectl”, utilizando sólo la memoria “MEM”, visible en la esquina superior derecha, todos los cambios que se realicen aquí, serán temporales.	172

Figura C.114. Uso del comando “sitectl -x”, la letra -x verifica que las configuraciones se realizarán en el disco “DISK”, visible en la esquina superior derecha, todos los cambios que se realicen aquí, serán permanentes.....	173
Figura C.115. Uso del comando “ascmon”, la segunda línea muestra el número de eventos en la cola para ser procesados en el momento luego el número máximo de eventos en cola y el número máximo de eventos permitidos en la cola a la espera de ser procesados (“No of events/HiWater/Maximum”). Por otro lado las iniciales “As” corresponde al número de sensores que captaron el evento, “Rc” el número de sensores recibidos para procesar y la suma de ambos es el número total de triggers del registro.....	173
Figura C.116. Uso del comando “logmon”, despliegue de mensajes ocurridos durante el día en tiempo real, luego de la fecha y la hora se indica el módulo de origen y el mensaje.....	174
Figura C.117. Uso del comando “logmon”, tecleando “1” (página 1), muestra los mensajes de advertencia ocurridos durante el último tiempo, este muestra que durante el día 26 de febrero hubo restauración del sistema, lo cual coincide con las configuraciones realizadas por el área de geomecánica en esa fecha.	174
Figura C.118. Uso del comando “logmon”, tecleando “2” (página 2), muestra los mensajes de error ocurridos durante el último tiempo, este muestra que durante el día 21 de febrero hubo un serio problema con el sistema sísmico, el cuál coincide con la restauración de cables en la vía de comunicación de los sensores que fueron estropeados por equipos de la mina.	175
Figura C.119. Uso del comando “prdaysum -d 2013/feb/26”, se ilustra la información de los eventos ocurridos el día 26 de Febrero del 2013, los cuales fueron procesados automáticamente por el sistema, en este día ocurrieron 6 eventos, lo cual corresponde al día en el cual el sísmico se restauró completamente.....	175
Figura C.120. Uso del comando “prmonthsum”, despliega el número de eventos por día que han ocurrido en el mes de marzo del 2013, se muestran valores hasta el día 10 ya que ese día fue tomada la imagen.	176
Figura C.121. Uso del comando “qualmon”.	176
Figura C.122. Uso del comando “statmon”, donde la fila “Site_id” corresponde a los sensores numerados desde 201-211, la fila “Port” despliega los puertos de entradas de las unidades de adquisición de datos, luego la fila ”Type” muestra el tipo de unidad si es Qs (QS o SAQS) o GS, una de las filas más importantes es “State” que ilustra el estado de cada caja, en donde “X” significa que hay una óptima transmisión entra la caja y el host central y “s” o ”r” en el caso que exista una falla en la comunicación, y “R” cuando no existe comunicación, en este caso se recomienda	

informar al personal del área para poder realizar el chequeo técnico respectivo y solucionar el problema.....	177
Figura C.123. Uso del comando “asscon”, fila [a] número mínimo de estaciones para que el evento sea registrado. En este caso, el número de asociación se encuentra en 6 estaciones, dicho de otro modo, para que un evento sea registrado se necesitan al menos 6 sensores.....	178
Figura C.124. Uso del comando “sitectl -x”, fila [i] configura el nivel de trigger de cada sensor, en este caso los sensores se encuentra con un nivel de trigger de 39. Luego de realizado el cambio en la configuración, se aconseja después de realizar estos cambios guardar con “shift –e” y restablecer el sistema.....	180

Índice de Tablas

Capítulo III

Tabla 3.1. Valores característicos de cada tipo de geófono, su frecuencia natural en hertz, su ancho de banda de funcionamiento en hertz y su resistencia típica en ohms.	55
Tabla 3.2. Conexiones de la Junction Box para un arreglo tri-axial.	56
Tabla 3.3. Especificación de cable para cada tramo.....	59
Tabla 3.4. Valores de esfuerzos principales in situ para Norte del Tercer Panel	66
Tabla 3.5. Valores de esfuerzos principales inducidos para Norte del Tercer Panel.....	66
Tabla 3.6. Valores de esfuerzos principales in situ para sector de Minería Continua.....	66
Tabla 3.7. Valores de esfuerzos principales inducidos para sector MC	67

Capítulo IV

Tabla 4.8. Descripción del catálogo de eventos sísmicos.....	72
Tabla 4.9. Áreas involucradas para cada Caso	76

Capítulo V

Tabla 5.10. Muestra las coordenadas propuestas de los sensores para la red sísmica 2013, con su respectivo norte, este y cota, además de su ubicación y la conexión a la caja sísmica.	82
Tabla 5.11. Valores para un Número de Asociación de 5 sensores sísmicos.....	83
Tabla 5.12. Ubicación de nuevos sensores en Área 18.	88
Tabla 5.13. Ubicación de sensores sísmicos antiguos en Área 17.....	88
Tabla 5.14. Coordenadas del Tiro de Prueba GH-85	96

Tabla 5.15. Ubicación de Sensores para Red Sísmica en Minería Continua.....	123
Tabla 5.16. Alturas designadas para cada caso a desarrollar.....	125
Tabla 5.17. Disposición de sensores para los casos 2, 4 y 5.	126
Tabla 5.18. Promedio y magnitud mínima obtenida para cada Caso en su respectiva cota.	127
Tabla 5.19. Promedio y magnitud mínima obtenida para cada Caso en su respectiva cota.	128
Tabla 5.20. Promedio y valor mínimo obtenido para Resolución [m] de cada Caso.	130
Tabla 5.21. Promedio y valor mínimo obtenido para Resolución [m] de cada Caso.	131
Tabla 5.22. Valores de Volumen Activo, N° de eventos y Gamma (γ) para los períodos del Caso 1.	132
Tabla 5.23. Valores de Volumen Activo, N° de eventos y Gamma (γ) para los períodos del Caso 2.	133
Tabla 5.24. Valores de Volumen Activo, N° de eventos y Gamma (γ) para los períodos del Caso 3.	133
Tabla 5.25. Mejores Ajustes seleccionados para cada Caso.....	134
Tabla 5.26. Valores obtenidos para la Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada para cada situación propuesta.....	138
Anexo C	
Tabla C.27. Caracteres de apoyo para la configuración de programas en el RTS. (Gentileza ISS)	171
Tabla C.28. Símbolos de apoyo para la configuración de programas en el RTS. (Gentileza ISS)	171



I.- Introducción

1.1. Resumen

La sismicidad inducida en minas se puede entender como la respuesta del macizo rocoso expuesto a la perturbación mecánica y/o remoción de macizos de roca, ambas actividades inducidas por la operatividad minera, los cuales, generan variaciones de cierto estado tensional que deforma al macizo rocoso hasta la ruptura, liberando energía en forma de ondas elásticas.

En minería, los sistemas de monitoreo micro-sísmico constituyen una herramienta de gran apoyo al control que la geomecánica debe establecer respecto de las inestabilidades mecánicas que conducen al proceso de desarme de un macizo rocoso sometido a la actividad minera.

En base a esto, nace un interés por realizar una investigación que desarrolle estudios de parámetros sísmicos y mineros, para intentar dilucidar aspectos asociados a altura de columna de roca primaria y entorno geo-técnico, además aprender sobre los problemas activos que presenta el realizar movimientos de tierra diariamente por motivos de la producción minera en profundidad. Los datos a utilizar son extraídos a partir de los sismogramas registrados por la red de sensores sísmicos provenientes del Instituto de Sismología Minera (IMS, *Institute of Mine Seismology*) que actualmente se encuentran instalados en la Mina subterránea Río Blanco (CODELCO, División Andina).

Actualmente en CODELCO División Andina, existen diferentes procesos para realizar la extracción de mineral, de los cuales actualmente sólo uno de ellos posee una red sísmica implementada. En este contexto, surge la inquietud respecto del modo en que la actividad sísmica podría variar respecto a las condiciones actuales.

Desde la perspectiva planteada, se pretende implementar una red sísmica en el proyecto Minería Continua, en donde a grandes rasgos es un proceso de producción donde las tasas de extracción tenderán a ser más altas que las actuales, activando el proceso de desarme de un macizo rocoso que en su etapa de pre-minería fue sometido a pre-acondicionamiento. Con esto, se deberán establecer asociaciones entre la actividad sísmica (espacial- y temporalmente), la actividad minera (socavación y extracción), la presencia o ausencia de estructuras y contexto geo-mecánico y geo-técnico.

1.2. Objetivos Generales

- ❖ Realizar un análisis de las observaciones existentes extraídas del actual sistema de monitoreo sísmico de División Andina, utilizando variados parámetros sísmicos.
- ❖ Establecer asociaciones entre la actividad sísmica, la actividad minera y el contexto geomecánico, que permitan comprender y acotar las aplicaciones del monitoreo micro-sísmico en un contexto de minería continua.

1.3. Objetivos Específicos

- ❖ Elaborar mapas usando el software de visualización de información sísmica “*Jdi*” y rutinas propias “*MatLab*”.
- ❖ Elaborar catálogos de datos a partir de archivos obtenidos desde el programa de análisis sísmico “*Jmts*”.
- ❖ Analizar información asociada con socavación y extracción.
- ❖ Estudiar series de tiempo asociadas con actividad sísmica y otros parámetros.
- ❖ Comprender la instalación y uso del sistema de monitoreo sísmico en División Andina.
- ❖ Estudiar aspectos y contexto del proyecto Minería Continua.

1.4. Hipótesis de Trabajo

- ❖ La sismicidad inducida en cierto sector productivo posee una proporcionalidad con el volumen perturbado generado en el macizo rocoso: volumen de extracción, volumen socavado y volumen por apertura de zanjas.
- ❖ La sismicidad registrada en un volumen acotado de macizo rocoso que ha sido explotado por actividad minera está alojado en estructuras propias del macizo así como de la evolución de la faena minera.

II.- Antecedentes Generales

2.1. CODELCO - Chile, División Andina

2.1.1. Generalidades

La Corporación Nacional del Cobre (Codelco Chile), es una empresa estatal, por lo que sus utilidades van en beneficio directamente del estado chileno. Su negocio está enfocado principalmente en la exploración, desarrollo, explotación de recursos mineros de cobre y subproductos, y procesamiento hasta convertirlos en concentrado de cobre para una posterior comercialización. Actualmente posee una división administrativa llamada Casa Matriz y ocho divisiones operacionales, las cuales corresponden a División Chuquicamata, División Radomiro Tomic, División Ministro Hales, División Salvador, División El Teniente, División Ventanas, División Gabriela Mistral y División Andina.

Este último, explota parte del yacimiento Río Blanco y actualmente realiza explotación mediante un sistema mixto que combina sus operaciones de minería a rajo abierto (Minas Sur-Sur, Don Luis) y minería subterránea (Mina Río Blanco).

Este mismo, está ubicado en la Cordillera de Los Andes, a 50 kilómetros al noreste de Santiago, entre 3.700 y 4.200 metros de altura s.n.d.m., a unos 30 kilómetros de la carretera internacional a Mendoza (Argentina) desde el poblado de Río Blanco, y a 50 kilómetros de la ciudad de Los Andes, provincia de Aconcagua.

Andina produce unas 188.494 toneladas métricas anuales de concentrados de cobre que son materia prima fundamental para obtener el metal refinado. Además coloca en los mercados 2.901 toneladas métricas de molibdeno al año.

En cuanto a la mina subterránea Río Blanco, actualmente explota el llamado Tercer Panel, cuya producción programada para el período 1995-2015 incluye un total de 272 millones de toneladas de mineral, con una ley de cobre promedio de 1,05% y un ritmo de 45 mil toneladas diarias de tratamiento de mineral.

2.1.2. Reseña Histórica Mina Subterránea Río Blanco

Según la literatura de Andina, la producción industrial de esta División fue inaugurada en 1970, pero se sabía de su riqueza hace mucho, al menos medio siglo antes, fecha en que se hicieron los primeros intentos por iniciar la extracción del mineral.

Antiguamente, se tiene historia de otras mineras trabajando en esa zona, como “*La Americana*” (1860) y “*Los Bronces*” (1880), ambas parecían ser colindantes. Sin embargo, a diferencia de lo pensado en esa época, hoy se sabe que desde un punto de vista geológico, se trataba de un sólo yacimiento que se encuentra entre 3000 y 4000 metros de altura en la zona central de Chile, por lo tanto, profundizando en la situación geográfica, “*Los Bronces*” se ubicaba en la falda nor-oriental del cajón del río San Francisco que da origen al valle río Mapocho o de Santiago y “*La Americana*” estaba en la falda sur-poniente del cajón y valle del río Blanco donde nace el río del mismo nombre (Baros Mancilla, 2012).

Hoy se sabe que Río Blanco es un solo gran yacimiento, definido geológicamente y modernamente como pórfido, del que “*Los Bronces*” y “*La Americana*” formaban parte debido a la continuidad del mineral en un cuerpo elongado o alargado que afloraba a la superficie del terreno. Sin embargo, antiguamente ellos parecían ser minas separadas y no unidas.

Con la instauración del primer código de minería, dictado en 1874 y sus posteriores actualizaciones se sabe que “*Los Bronces*” paso a ser parte de la “*Compañía Minera Disputada de Las Condes*”, y que “*La Americana*” fue parte de “*Las Nuevas Condes*”. Sin embargo, en este último, durante el año 1955 la “*Compañía Cerro Corporation*” inicia los trabajos formales de exploración y puesta en marcha.

El 10 de Diciembre de 1966 es creada por Decreto de la República de Chile la “*Cerro Corporation*”, con un aporte del 30% del capital por parte del estado y el 70% restante de “*Cerro Corporation*”. El proyecto se inició oficialmente el 12 de Enero 1967 y una puesta en marcha en 1970 con una explotación subterránea con instalaciones de chancado y concentración de minerales.

El 16 de julio de 1971 la Compañía Minera Andina S.A. fue nacionalizada (al igual que las cuatro empresas de la gran minería), se dispuso que ella se organizara como una Sociedad Colectiva del Estado, sus socios fueron la Corporación Nacional del Cobre y la Empresa Nacional de Minería con un 95% y un 5% de participación cada una, respectivamente. El Decreto Ley N°1.350, del 28 de febrero de 1976 incorporó a Andina a la Corporación Nacional del Cobre de Chile, cuyo objetivo fundamental fue continuar con la explotación de los yacimientos de Chuquicamata, Salvador, El Teniente y Andina.

Entre 1970 y 1982 fue explotado el Primer Panel de la mina Río Blanco, localizado en el sector norte del yacimiento, mediante el sistema de Hundimiento de Bloques Tradicional. Su producción total fue de 41 millones de toneladas, con una ley promedio de cobre de 1,55%. Posteriormente, entre 1982 y 1997, estuvo en funcionamiento el Segundo Panel, operado mediante el sistema de Hundimiento de Bloques mixto, que incluyó extracción manual a través de “*buitras*” y mecanizada por medio de equipos LHD (*Load Haul Dumper*) y camiones de 30 toneladas.

Actualmente la mina subterránea Río Blanco explota el llamado Tercer Panel que extiende la explotación del yacimiento con reservas de aproximadamente 300 millones de toneladas. Incluye tres unidades geológicas principales: mineral secundario, primario y mixto, que son explotadas por el método *Panel Caving Convencional* y por equipos LHD (*Load Haul Dumper*) y camiones de extracción de bajo perfil. Este panel empezó a producir en julio de 1995, inaugurándose oficialmente el 5 de diciembre de ese año. Este proyecto aumentó la productividad en 36% y disminuyó el costo de operación.

2.2. Ubicación Geográfica Mina Río Blanco

De acuerdo a las coordenadas, Andina se localiza en la latitud 32°52'S y longitud 70°13'O, correspondiendo geográficamente al valle de Aconcagua que se encuentra entre las provincias de San Felipe y Aconcagua. Esta última tiene por capital la ciudad de Los Andes, y se divide en las comunas de Los Andes, San Esteban, Calle Larga y Rinconada. Como provincia limita al norte y al oeste con la provincia de San Felipe, al sur con la provincia de Chacabuco (Región Metropolitana), y al este con la línea fronteriza dada por la Cordillera de Los Andes. Sus principales actividades son la minería, la agricultura, la generación de energía eléctrica y el comercio de exportación.

El acceso se realiza a través del camino internacional que une Chile con Argentina, en un primer tramo de 34 km. Luego, un tramo de 4 km. une esta ruta con la Villa Saladillo (**Figura 2.1**), en donde se sitúa el control de acceso a las dependencias del área industrial de la División. La mina subterránea Río Blanco y las minas a rajo abierto Don Luis, La Unión y Sur-Sur se ubican a 36 Km. y 45 Km. desde Saladillo.



Figura 2.1. Ubicación geográfica de la Mina Río Blanco, junto a las ciudades cercanas a ella como lo son Valparaíso y Santiago.

2.3. Geología del Yacimiento

El yacimiento Río Blanco se encuentra emplazado en su zona superficial en andesita de la Formación Farellones del Período Mioceno y en profundidad en unidades intrusivas del Mioceno-Plioceno. En el área superficial de este mismo, la Formación Farellones se encuentra representada por una secuencia de andesitas basálticas y dacitas dispuestas sub-horizontalmente, estas son instruidas por rocas ígneas, granodioríticas que forman parte del Plutón San Francisco, el cual presenta variaciones de granodiorita cuarzomonzónica, con predominio de ambas facies en el área del yacimiento.

Las unidades con mayor distribución, son conocidas como Granodiorita Cascada (GDCC) y Granodiorita Río Blanco (GDRB). Estas unidades corresponden a la roca de caja en la que se emplaza la mineralización en profundidad. En la **Figura 2.2** se ilustra las litologías existentes en el yacimiento con una vista en planta.

Además, deben mencionarse los complejos de brechas hidrotermales, como son, en el sector correspondiente a la mina subterránea, entre las unidades más relevantes podemos mencionar la Brecha de Matriz Clástica (BXPR), Brecha de Feldespato Potásico (BXSK) y Brecha de Anhidrita (BXANH). Por su parte, en el sector de área Don Luis, Sur- Sur, La Americana y San Enrique las unidades de brechas

predominantes corresponden a las denominadas Brecha de Turmalina (BXT), Brecha Tobacea (BXTO) , Brecha Tobacea de Turmalina (BXTTO) y Brecha Monolito (BXMN).

Las unidades más tardías del yacimiento corresponden a las pertenecientes al Complejo sub-volcánico Río Blanco, que está caracterizado por eventos comagmáticos dacíticos y riolíticos. Las rocas de este complejo sub-volcánico son estériles y corresponden a las unidades Chimenea Dacítica y Chimenea Riolítica, ambas pertenecientes al período Plioceno.

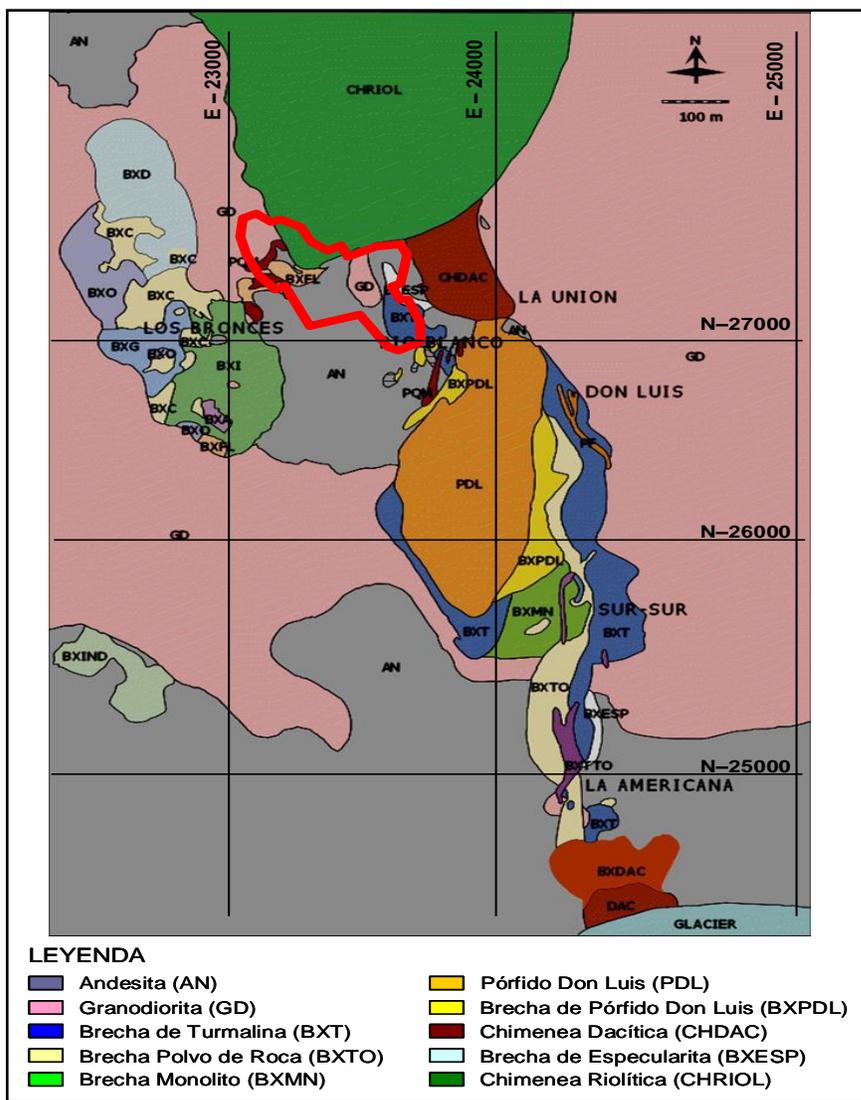


Figura 2.2. Geología de superficie correspondiente al yacimiento Río Blanco, en donde es posible ilustrar los sectores del rajo Sur-Sur, rajo Don Luis, y en un contorno de color rojo la ubicación del Tercer Panel de la Mina Subterránea Río Blanco (Gallardo, 2005).

2.3.1. Contacto Primario-Secundario

Una de las características geológicas relevantes en el yacimiento Río Blanco es la presencia de dos sectores de roca con rasgos distintivos muy característicos, como son la roca primaria y la secundaria. Esta condición, es la base del nivel de aguas subterráneas y un límite que divide la roca que fue afectada por procesos supérgenos de la que no lo fue, es originada posiblemente en una etapa hidrotermal del yacimiento, es de gran importancia ya que condiciona el comportamiento físico – mecánico del macizo rocoso, teniendo como consecuencia final incluso distintas variantes en los métodos de explotación empleados para la extracción del mineral.

Roca Primaria se denomina al macizo rocoso ubicado al interior del yacimiento, variable en su litología, cuyas fracturas se encuentran selladas con yeso y/o anhidrita. Esta roca no está afectada por procesos de alteración debido a la infiltración de aguas superficiales. Es totalmente sellada con relleno en poros y fracturas, constituyendo un macizo duro, cohesivo y relativamente impermeable, de difícil extracción y es probable que las leyes disminuyan, en el caso del cobre. Aunque el origen más probable de este material de relleno es hidrotermal, la denominación recae sobre una base exclusivamente geotécnica y el término no implica ningún alcance de tipo mineralógico, ni de génesis de yacimientos (Villegas D. , 2008).

Roca Secundaria se denomina a aquella roca, ubicada al interior del yacimiento, cuyas fracturas se encuentran en su mayor parte abiertas y, eventualmente, con rastros de circulación de agua, tales como pátinas de limonita, etc. Esta roca se encuentra afectada por procesos consistentes en la infiltración de aguas superficiales que provoca efectos en la roca debido a su carácter oxidante, quedando alterada, porosa y reblandecida, además de enriquecida con especies mineralógicas arrastradas por el agua. Este tipo de roca, cuya litología puede ser variable, no acusa la presencia de yeso o anhidrita. Generalmente se ubica sobre la roca primaria (Villegas D. , 2008).

2.3.2. Antecedentes Geológicos para el Tercer Panel, Áreas 18-19

En cuanto a su litología se encuentra en su base en Granodiorita Río Blanco (GDRB), con zonas menores de Aplitas (APL) y muy puntualmente Brechas de Polvo de Roca (BXPR) y diques de Pórfido Cuarzomonzonítico (PQM) (Ortiz, 2012).

La caracterización estructural está dada por 3 sistemas los que se repiten tanto para el Área 18 como para el Área 19. Un sistema S1 de orientación NNW sub-vertical, Un sistema S2 con orientación NW, también sub-vertical, ambos sistemas con fallas de gran continuidad, y un tercer sistema S3 con orientación NE, sub-vertical el cual posee fallas continuas de espesor mayor a 10 cm. Es posible ilustrar en la **Figura 2.3** las estructuras más relevantes con sus respectivos nombres considerando factores como la cohesión producto del relleno, su potencia y su continuidad (Ortiz, 2012).



Figura 2.3. Fallas mayores existentes en Áreas 18 y 19 del Tercer Panel de la mina Subterránea Río Blanco.

2.4. Clima

Al estar situado en la alta cordillera de Chile Central, se espera un clima templado frío y tundra de altura, que permiten el desarrollo de vegetación natural de matorral, bosque esclerófilo y estepa andina. Es un valle de erosión fluvio-glacial dominado por la cuenca del río Aconcagua, cuyo principal afluente es el río Colorado. De hecho, los cursos de los ríos Blanco y Los Leones, y el estero Riecillo recorren parte del área industrial de la División. La laguna Turquesa está situada en la altiplanicie al oeste del río Blanco; y la

laguna Barrosa está ubicada al este del río Blanco. Por lo regular caen unos 15 a 20 metros de nieve al año. Durante frentes de mal tiempo se ocasionan graves aludes en el invierno. También se produce “*viento blanco*”.

Las precipitaciones principalmente ocurren entre los meses de abril a octubre, además las temperaturas medias ambientales en invierno - otoño alcanzan una media aproximada de -13 °C y son moderadas en primavera - verano (media aproximada de 15 °C), con un promedio anual de 6,4 °C y fluctuaciones entre los 23 y -13 °C.

La humedad relativa del aire es de un 15 % hasta un 90 % con una media inferior al 50 % de humedad relativa. Y las rachas de viento dominan en dirección NW-SE. En invierno, en condiciones extremas, pueden alcanzar hasta los 100 kilómetros por hora. Cabe mencionar, que las condiciones ambientales limitan las operaciones del sector explotado a cielo abierto a 320 días efectivos al año.

2.5. Descripción de Métodos de Explotación Aplicados en la Mina Río Blanco

Desde que la Mina Río Blanco inició sus operaciones en 1970, se han empleado varios métodos de explotación, destacándose una diferencia relevante entre aquellos utilizados en roca secundaria y los aplicados en roca primaria, debido el alto grado de mecanización existente en estos últimos. Adicionalmente, y debido a la competitividad del mercado cuprífero mundial, se han introducido mejoras en las prácticas mineras e innovaciones ingenieriles, tendientes a aumentar la productividad, disminuir los costos de la preparación minera y bajar los costos de operación.

Han sido numerosos los métodos de explotación utilizados en la Mina Río Blanco y mayoritariamente corresponden a técnicas de hundimiento gravitacional masivo de bloques o paneles. En general el método de explotación de Hundimiento de Bloques o Paneles, en su forma más sencilla, puede definirse como el conjunto de operaciones mineras destinadas a cortar la base de sostenimiento de un bloque o panel de mineral, asegurándose que no queden puntos de apoyo, de tal forma que la base inferior de dicho bloque o panel se comporte como una viga (simplemente apoyada o empotrada en sus extremos), y la acción de las fuerzas externas, principalmente la gravitacional, produzcan una primera socavación y posteriormente el desplome completo del bloque o panel, de tal manera que los fragmentos de mineral generados debido al progreso del hundimiento en altura puedan ser manejados y transportados de acuerdo al diseño minero del sector productivo en cuestión.

Esta forma de explotación (hundimiento) en general se aplica en mega yacimientos, como lo son los pórfidos cupríferos, que poseen leyes relativamente bajas, con una alta recuperación de reservas y con una alta tasa de producción y mecanización.

Dentro de los métodos de explotación subterráneos, los de hundimiento son los que poseen un menor costo de extracción, a pesar de que requieren un gran número de desarrollos (labores mineras). Para una correcta aplicación de esta metodología, el tipo de roca que compone el yacimiento debe tener un alto grado de fracturamiento, para que a medida que la roca tenga espacio libre para desplazarse, esta se fracture y así efectivamente se desplace por gravedad. El desplazamiento vertical, también, se induce socavando la base de la columna de mineral que se desea extraer, mediante perforación radial y tronadura. Esta metodología para la explotación de un yacimiento genera una expresión en superficie, que se manifiesta a través de un cráter sobre la explotación, y este fenómeno se denomina *Subsidencia* (**Figura 2.4**).

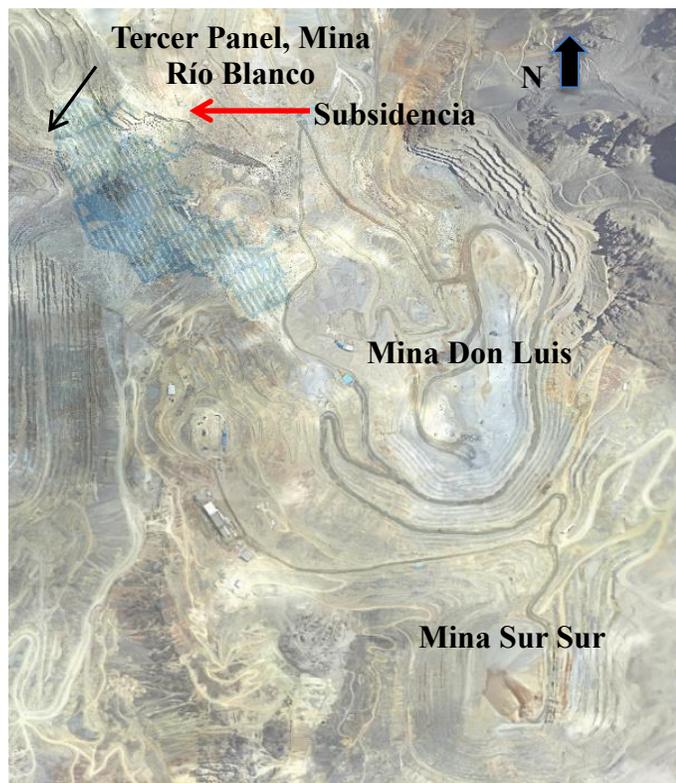


Figura 2.4. Imagen aérea de División Andina, donde se ilustran las diferentes minas existentes, en especial el sector del Tercer Panel de la Mina subterránea, además se puede observar parte del cráter de subsidencia (DAND, 2012).

La mecánica del hundimiento se puede resumir y explicar en los cinco puntos siguientes:

- ❖ **Inicio del hundimiento:** Correspondiente a la condición existente inmediatamente después de la socavación del área inicial que entrará en producción (debe recordarse que dependiendo de la variante del panel de hundimiento, los frentes de socavación y de extracción pueden ser diferentes).
- ❖ **Hundimiento virgen o sin conexión a superficie:** Correspondiente a la condición en que el hundimiento progresa en la vertical y/o en planta, pero no se ha producido la conexión a superficie y existe un Crown Pillar (pilar de corona) entre el techo de la cavidad y la superficie.
- ❖ **Conexión a superficie:** Correspondiente a la condición en que se produce la ruptura del *crown-pillar* (pilar de corona) que existía sobre el techo de la cavidad y ésta se conecta a la superficie. Esta etapa es especialmente importante porque define un cambio sustantivo en la forma, cinemática y modo de ruptura del volumen activo.
- ❖ **Hundimiento transiente:** Correspondiente a la condición en que ya se ha logrado la conexión a superficie, pero el proceso de progreso del hundimiento todavía es afectado o “siente” un incremento del área socavada y en extracción.
- ❖ **Hundimiento permanente o en régimen:** Correspondiente a la condición en que ya se ha logrado la conexión a superficie y en el sector considerado el proceso de hundimiento no es afectado o “no siente” un incremento del área socavada y en extracción.

En la **Figura 2.5** y **Figura 2.6** se muestra un esquema de las distintas etapas o condiciones que presenta el hundimiento durante el progreso de una minería mediante panel hundimiento; desde la condición de inicio de hundimiento, o inmediatamente después del desarrollo de la socavación basal, hasta la condición en que se tiene un sector importante con hundimiento en régimen, el cual no es afectado por incrementos adicionales del área socavada y en extracción (Karzulovic, 2001).

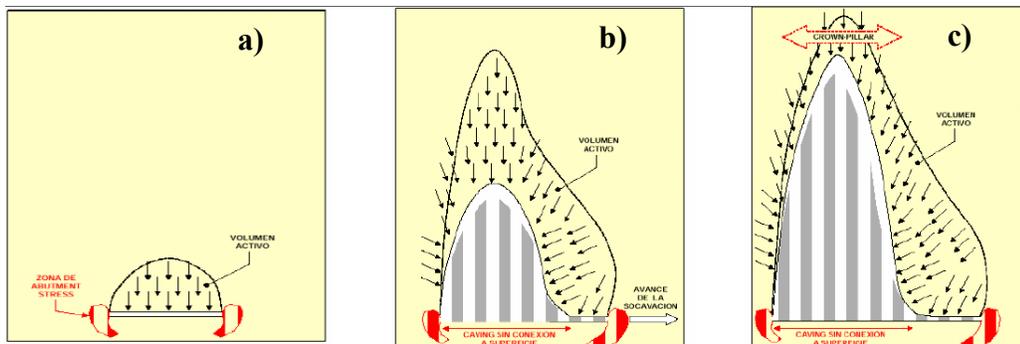


Figura 2.5. Etapas del proceso de hundimiento, a) Inicio del Caving, b) y c) Caving virgen o sin conexión a superficie.

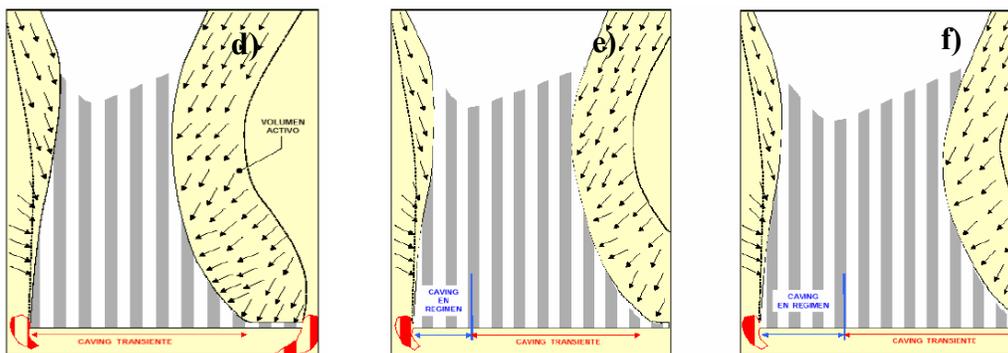


Figura 2.6. Etapas del proceso de hundimiento, d) Caving transiente, e) y f) Caving en régimen y Caving transiente.

2.5.1. Hundimiento Progresivo por Paneles (*Panel Caving*)

Este método es utilizado actualmente en Codelco División Andina, en su variante convencional. Este método de explotación fue creada para mineral primario, la que corresponde a una roca menos fracturada y con estructuras selladas por yeso – anhidrita, y que es más competente que la roca secundaria. Una diferencia básica entre estas dos variantes método es que en el Hundimiento de Paneles se pierde la identidad de bloque que tiene el Hundimiento de Bloques, ya que en el Hundimiento de Paneles se avanza con la explotación a través de una línea de avance denominada frente de hundimiento o socavación.

Dentro del diseño de esta metodología de explotación se tienen los siguientes niveles desarrollados, aplicados en este caso al III Panel de la mina subterránea, que son:

- ❖ **Nivel de Hundimiento (NH):** Este nivel cuenta con galerías de hundimiento (GH) o de socavación que son paralelas entre sí y que se encuentran espaciadas a 26 metros. En este nivel también se desarrollan cruzados que conectan las galerías de hundimiento. Estas labores poseen una sección de 4.0 x 3.6 metros. La cota de este nivel es 3262 m.s.n.m.
- ❖ **Nivel de Producción (NP):** Este nivel está ubicado a 3236 m.s.n.m., corresponden a labores llamadas galerías o calles de producción (CP) cuya sección es de 4.0 x 3.6 metros, que al igual que las galerías de hundimiento son paralelas entre sí y están espaciadas 26 metros una de la otra, dada la malla de extracción. También existen galerías que se intersectan con las de producción en un ángulo de 60°, con un espaciamiento entre ellas de 13 a 15 metros, dependiendo de la malla de extracción aplicada, y que son paralelas unas de otras, estas se denominan galerías zanjas o brazos de

producción (BP), y su sección es de 3.6 x 3.6 metros. En las galerías zanjas se encuentran los puntos de extracción de este método de explotación y las zanjas.

- ❖ **Subnivel de Ventilación (SNV):** Aquí tenemos galerías de inyección y extracción de aire, desde donde se desarrollan chimeneas hacia los distintos niveles. Todas estas galerías se encuentran a una cota de 3222 m.s.n.m.
- ❖ **Nivel de Reducción (NC):** Corresponde a un nivel ubicado 12 metros más abajo del Subnivel de Ventilación, a la cota 3210 m.s.n.m. En este NC existen cámaras de picado en donde el mineral proveniente del Nivel de Producción es recibido. En estas cámaras existen parrillas con las cuales es controlada la granulometría del mineral, que pasa al nivel inferior a través de los piques de traspaso de mineral (OP). Si una colpa no tuviese la granulometría requerida y quedase en la parrilla de control, sería reducida por un martillo picador posicionado en estas salas de control, hasta que pasase completamente por la parrilla.
- ❖ **Nivel de Transporte (NT):** Conjunto de galerías de carguío y transporte de sección 5.5 x 5.0 metros y se encuentran a 25 metros más abajo, a una cota de 3185 m.s.n.m., en estas galerías se encuentran los buzones de descarga, que son aquellas infraestructuras que alimentan los camiones.

La secuencia de explotación, después de haber realizado la preparación, comienza con las tronaduras de zanjas y socavación en el Nivel de Hundimiento. Realizadas estas, se comienza con el proceso del *caving*. El mineral fracturado cae en las zanjas anteriormente abiertas y se comienza a extraer el material por los puntos de extracción ubicados en el Nivel de Producción (**Figura 2.7**). La extracción se realiza con maquinaria de bajo perfil, denominada LHD (*Load Haul Dump*), que carga el mineral en estos puntos de extracción y lo lleva a puntos de vaciado ubicados en las calles de producción y desde donde se dirige al Nivel de Reducción para luego llegar al Nivel de Transporte.

Al igual que en el Hundimiento Progresivo de Bloques, el proceso de extracción debe llevar un tiraje controlado y bien planificado para así mantener el contacto estéril – mineral lo más parejo posible, evitando problemas de dilución que para este método generalmente está entre 10 y 20%.

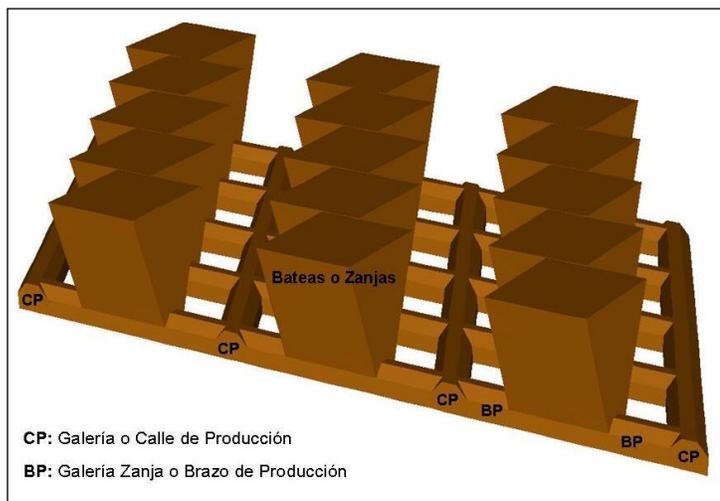


Figura 2.7. Presenta una representación en 3D del nivel de producción para malla típica de *Panel Caving* utilizada en la mina subterránea Río Blanco, División Andina.

En cuanto a la fortificación de este método de explotación usualmente el Nivel de Hundimiento usa como soporte el sistema de fortificación de perno tipo *Split Set*, (Pernos huecos en su interior, con un diámetro levemente mayor al de la perforación, motivo por el cual, una vez insertados en ella, quedan fijos y logran contener bloques menores de roca sueltos) – malla metálica, para el Nivel de Producción, específicamente en las calles de producción. Además de contar con pernos y malla, se incorporan cables y *Shotcrete*, (mezcla de cemento, gravilla y agua la cual se proyecta en las paredes y techo de las galerías para ejercer soporte). Para el caso de los puntos de extracción, la fortificación consiste en cables, marcos metálicos y concreto armado, con zunchos de confinamiento en los pilares. En los niveles restantes generalmente usan como fortificación pernos, malla metálica y *Shotcrete*.

2.5.2.1. Variantes de Explotación en *Panel Caving*

Si consideramos la secuencia operacional de explotación, existen tres variantes en el Hundimiento por Paneles (*Panel Caving*):

- ❖ **Hundimiento Convencional:** Corresponde a la secuencia donde en primer lugar se realiza el desarrollo y construcción de las galerías en niveles de producción y de hundimiento, luego la apertura de zanjas, siguiendo con la socavación del nivel de hundimiento y finalmente extracción del mineral.

Actualmente este método es utilizado en el norte del Tercer Panel de la Mina Subterránea Río Blanco (Figura 2.8).



Figura 2.8. Explotación con variante *Panel Caving* Tradicional (Cavieres, 2008).

- ❖ **Hundimiento Previo (*Pre-Undercut*):** Corresponde a la secuencia donde se realiza el desarrollo de galerías de hundimiento, luego el proceso de socavación, siguiendo con el desarrollo de galerías en nivel de producción y apertura de bateas y finalmente proceso de extracción (Figura 2.9).

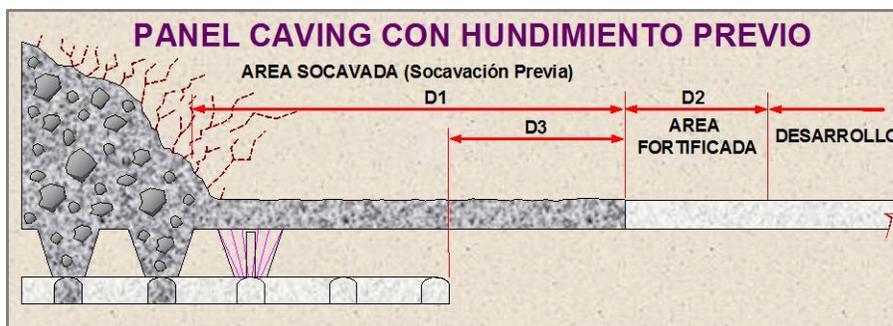


Figura 2.9. Explotación con variante *Panel Caving* con Hundimiento Previo (Cavieres, 2008).

- ❖ **Hundimiento Avanzado:** Es una situación intermedia entre las dos anteriores, donde se desarrollan las galerías en el nivel de hundimiento, luego viene el proceso de socavación, seguido del desarrollo de galerías en el nivel de producción, finalizando con la apertura de zanjas y posterior proceso de extracción (Figura 2.10). Este método ha sido utilizado en las instalaciones de la Mina el Teniente.

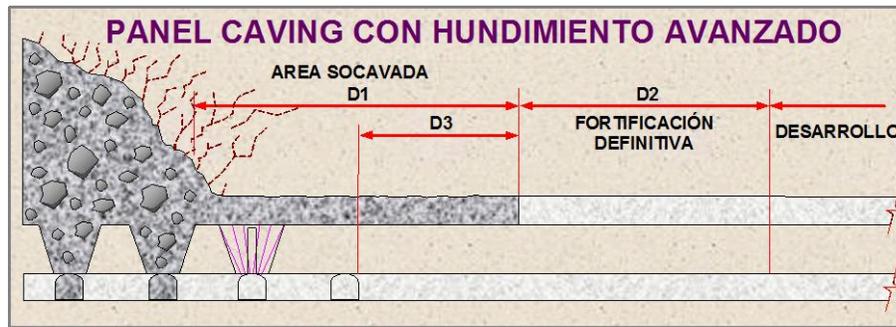


Figura 2.10. Explotación con variante con *Panel Caving* con Hundimiento Avanzado (Cavieres, 2008).

III.- Marco Teórico

3.1. Sismicidad Inducida por Actividad Minera

Una mina subterránea puede estar constituida de diferentes tipos de excavaciones sobre una gran área. La compleja distribución en un proceso minero que es dependiente del tiempo, hace complejo determinar los esfuerzos inducidos por el desarrollo minero de galerías, túneles, chimeneas, procesos de extracción, sin olvidar las estructuras geológicas propias del macizo rocoso que rodea al desarrollo, entre otros. Entonces, como una mina crece (o se desarrolla), el esfuerzo natural perturbado también crece (o se desarrolla). En consecuencia, los esfuerzos inducidos por la actividad minera son el resultado de incrementos en el flujo del campo de esfuerzo natural y su interacción con las paredes inclinadas del *caving*, cambios en la rigidez de la roca, estructuras geológicas y socavación de pilares, efectos por el flujo de mineral, entre otros. Es posible entender de manera gráfica estos procesos a través de la visualización de la **Figura 3.11** (Jeremy, 1987).

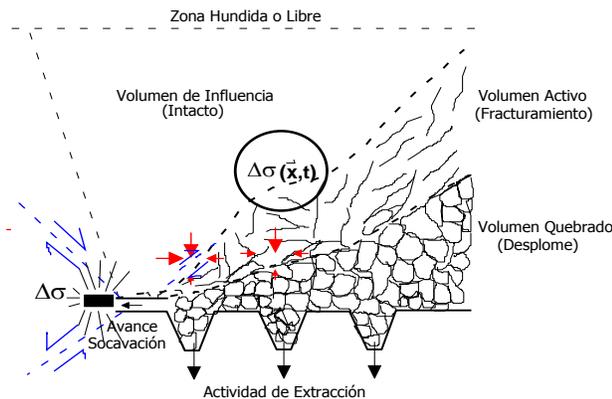


Figura 3.11. Vista en perfil de los cambios producidos en los esfuerzos deviatoricos del macizo rocoso debido a las actividades de socavación y extracción, lo que genera la propagación del *caving*.

El concepto que existe detrás de la **Figura 3.11** puede ser resumido en términos de la existencia de una función asociada al estado de esfuerzos deviatoricos, digamos $\sigma(\mathbf{x}, t)$, que depende de la posición dentro del macizo y un instante determinado. El proceso minero se puede concebir, en particular el asociado al avance de la socavación, como la aplicación de un $\Delta\sigma$ ubicado en el frente del hundimiento y aplicado instantáneamente a través de tronadura. Si se hace una similitud con un modelo de apertura de una grieta,

cuyas fuerzas motrices son verticales y de tracción, se puede mostrar que para ángulos del orden de $\pm 80^\circ$, desde el punto de perturbación y respecto a la horizontal, se concentra una perturbación en donde la diferencia entre los esfuerzos vertical y horizontal ($\sigma_{yy}-\sigma_{xx}$) es positiva, mientras que hacia la zona por sobre y debajo de la losa de socavación, dicha diferencia es negativa. Dichas diferencias aumentan según crece la extensión de la zona que se somete a la apertura. Este simple modelo puede ser interpretado como que el avance de la socavación equivale a perturbar instantánea y dinámicamente un macizo sometido a cierta condición dada por la existencia de un tensor deviatorico $\sigma(\mathbf{x},t)$ generando una aceleración, que según cual el estado de equilibrio del macizo provocará la ocurrencia de eventos, es decir, sismicidad inducida (Belmonte, Curso Sismología Aplicada a Minería, Parte 5, Hundimiento - Pre Acondicionamiento - Riego - Talud, 2005).

Así también, se define un evento sísmico como la generación de una radiación de ondas mecánicas en un medio sólido, desde una zona de origen denominada foco o fuente sísmica, y debido a la deformación brusca del medio en esa zona, estas ondas mecánicas se propagan al medio que rodea a la zona del foco.

La existencia de la radiación de onda implica la presencia de movimientos relativos de partes del medio sólido en la zona del foco de las ondas. Por otro lado, un evento sísmico queda sujeto a la existencia de un medio con un registro de los trenes de ondas radiados desde la zona de la fuente sísmica. Para ello, se debe contar con algún sistema que haga registro de los movimientos de las partículas del medio sólido resultantes de la propagación de las ondas elásticas.

Generalmente, el sistema utilizado consta de una red de transductores asociados a un sistema de captura y proceso de información. Los transductores más utilizados para el registro de ondas mecánicas son sistemas físicos que traducen el movimiento de las partículas del medio resultante del paso de un tren de ondas a variables eléctricas.

Entonces desde una ruptura brusca del macizo rocoso, es posible caracterizar una liberación de energía en forma de onda, las cuales son captadas por un sistema de monitoreo sísmico (**Figura 3.12**).

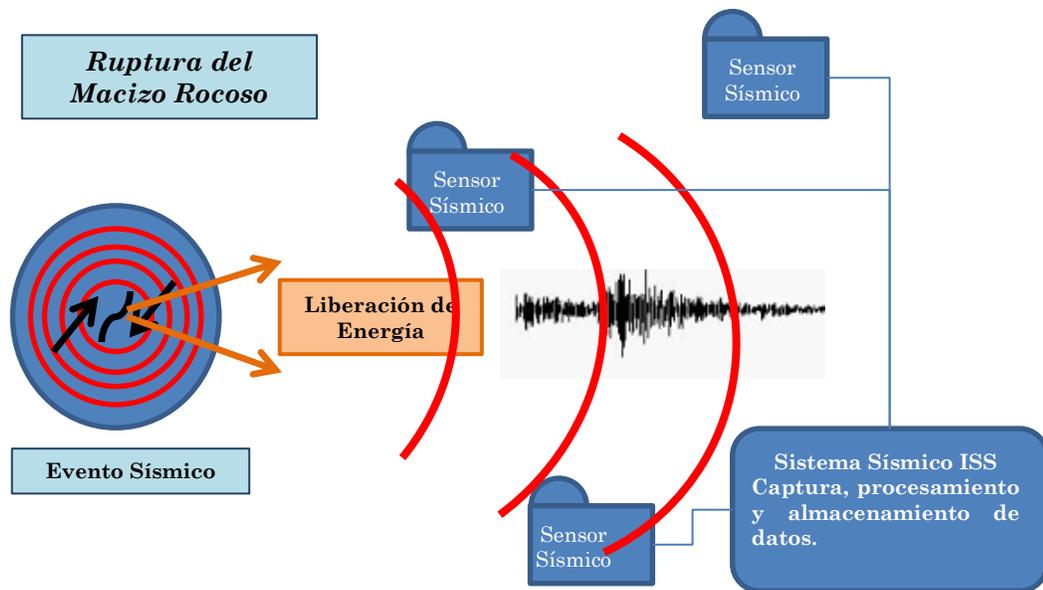


Figura 3.12. Esquema que ejemplifica el como una red sísmica capta la ruptura del macizo rocoso, en la que existe una asociación entre la fuente Sísmico, el medio y la respuesta local que genera.

Para entender de cierta manera el comportamiento del macizo rocoso el cual es afectado por la actividad minera se debe comprender que el volumen de roca al que nos vemos expuestos posee distintas propiedades las cuales podemos resumir en el concepto de “calidad del macizo rocoso”, en términos de macizo *competente*, “duro”, altamente confinado o intacto, o bien, *poco competente*, “blando”, desconfinado o degradado (Belmonte et al., 2005).

Se considera que el sector donde se realiza la principal perturbación al macizo rocoso (frentes de hundimiento) puede generalizarse en tres zonas de influencia que describen la zona activa de sismicidad. En primer lugar existe volumen denominado “*Volumen Activo*” (Zona Sismogénica) donde se observa una zona caracterizada por una roca en proceso de deformación y fracturamiento sin capacidad de desplomarse aún. También tenemos el “*Volumen Quebrado*” (Zona de Aflojamiento), donde el macizo rocoso se encuentra en un estado de desarme y desplome, altamente desconfinado y fracturado, en movimientos preferentemente verticales (**Figura 3.13**).

Cabe mencionar, que toda sismicidad inducida ocurre dentro de roca primaria y no en roca secundaria, debido a sus características geológicas y geotécnicas (**Sección 2.3.1.**).

En esta situación, la zona donde mayoritariamente deben producirse todos los eventos sísmicos inducidos por la actividad minera es llamada “*Zona Sismogénica*”. La zona donde se produce el desplome de roca y en la cual se encuentra en un estado de desarme es nombrada “*Zona de Aflojamiento*”. Aquel volumen de roca intacto que se ubica por sobre la zona sismogénica, involucrado en el proceso de *caving* en el mediano plazo, se denomina “*Volumen de Influencia*”.

Cabe destacar, que el límite entre el volumen Activo y el volumen quebrado se denomina “*Frente de Desplome*” y el límite que separa el volumen activo e influencia se denomina “*Frente Activo*” (Dunlop & Gaete, Bases para un Criterio de Alerta, 1994).

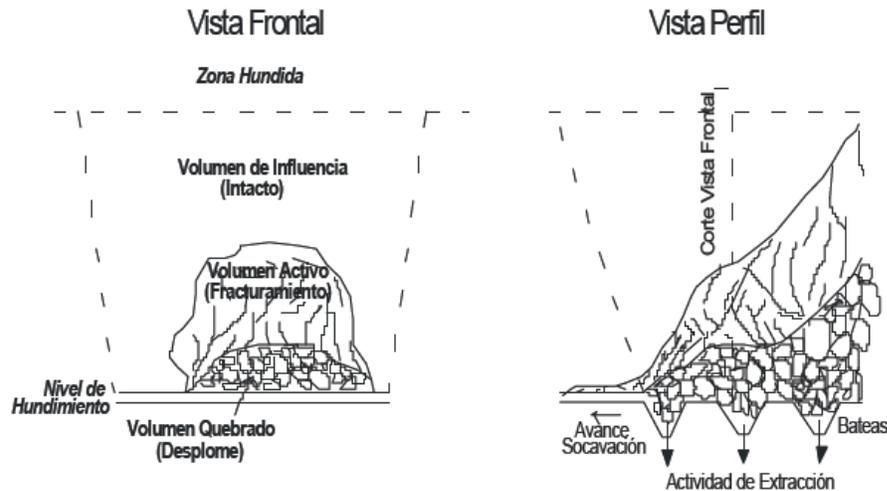


Figura 3.13. Esquema descriptivo del método de hundimiento. Se destacan los volúmenes de influencia, activo y de desplome.

La caída de los bloques quebrados sobre los puntos de extracción, desde la zona de desplome, va cambiando la geometría de la cavidad desde su forma inicial tabular y plana. Esta secuencia comienza con el proceso de socavación inicial (**Figura 3.14**), en donde inicialmente se define un espacio o cavidad plana y tabular, donde el mecanismo de emisión de esfuerzo se caracteriza por un régimen extensivo en la zona de desplome del material y concentraciones compresivas hacia los extremos de la base del hundimiento. Luego, viene una propagación del *caving* (**Figura 3.15**) que genera un techo curvo donde el régimen de esfuerzo es ahora compresivo, incrementando la importancia del esfuerzo asociado al mecanismo del hundimiento. Y finalmente, esto viene seguido de una mayor propagación del *caving* (**Figura 3.16**), donde aumenta la curvatura del techo de la cavidad manteniendo los esfuerzos asociados el mecanismo del hundimiento (Flores & Karzulovic, 2004).

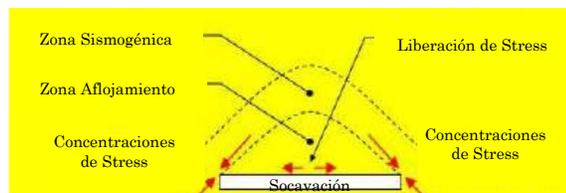


Figura 3.14. Proceso de socavación inicial.

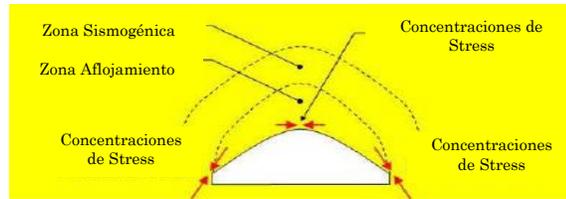


Figura 3.15. Proceso de propagación del caving.

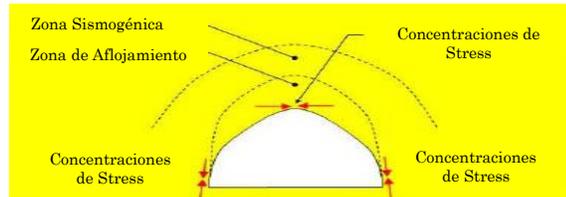


Figura 3.16. Mayor propagación del caving, con curvatura del techo.

Cabe mencionar que la extracción como actividad minera, inducirá cambios en los frentes que delimitan los volúmenes de roca antes descritos. En consecuencia, determinan la evolución del volumen activo. En este sentido, tanto el frente de hundimiento como las tasas de extracción y socavación se convierten en parámetros relevantes para mantener estable al volumen activo. Así, el grado de estabilidad del macizo rocoso, en relación a un determinado proceso minero, dependerá fundamentalmente de las tasas de avance de la socavación y extracción, de la geometría del frente de hundimiento y las características geológicas del volumen de roca.

Finalmente, Desde la perspectiva del análisis de la inestabilidad del macizo rocoso frente a un proceso de perturbación del régimen natural de esfuerzos, cuantitativamente desconocido, complejamente dinámico, variable en el tiempo y en el espacio, la localización de los eventos sísmicos razonablemente exacta es importante ya que todos los parámetros subsecuentes (parámetros de la fuente sísmica, atenuación, inversión de velocidad) dependen de la localización, la que a su vez depende de la forma de onda registrada en los sensores de la red sísmica. Esto obliga a mantener un sistema de monitoreo en condiciones que aseguren calidad de la información base (Intituto de Innovación en Minería y Metalurgia, IM2 S.A., 2009).

3.2. Parámetros Sísmicos

A continuación, se mencionan conceptos básicos de sismología los cuales se emplean para el análisis e interpretación de la sismicidad inducida en minería. Para una mayor información sobre los conceptos básicos de sismología se puede dirigir al **Anexo A**.

3.2.1 Magnitud Momento (M_w)

La necesidad de comparar los “tamaños” de sismos y terremotos determinó la búsqueda de un parámetro que permitiese su ordenación. De esta forma, nació la magnitud definida por Richter (1958), con la expresión siguiente (**Ecuación 3.1**).

$$M = \text{Log}(A) - \text{Log}(A_0) \quad (3.1)$$

Donde A es la amplitud registrada para un sismo determinado, por un instrumento específico, a una distancia dada del epicentro del evento. Y por otro lado, A_0 es la amplitud registrada para el mismo tipo de instrumento, a la misma distancia, para un sismo considerado patrón (Dunlop & Gaete, Sismicidad Inducida y Estallidos de Roca en Mina el Teniente, 1999).

Si bien un parámetro de este tipo se relaciona con la energía radiada de un evento sísmico, esta escala dependerá, entre otros factores, de las características instrumentales. Además, este parámetro se ha mostrado inadecuado debido a que una ruptura requiere más de un parámetro ser para caracterizada adecuadamente. Por ejemplo, se deben caracterizar las dimensiones geométricas de la ruptura y la energía radiada por ésta, es decir, es necesaria una descripción cualitativa del evento.

Considerando lo anterior, se optó por establecer una magnitud que se asociará directamente a un parámetro de la fuente con significado físico. Y por esta razón la magnitud se estima directamente a partir del momento sísmico (M_0), y así entonces, es directamente proporcional al área de ruptura y deslizamiento promedio sobre dicha área. (Dunlop R. , 2001)

Teniendo en cuenta estas condiciones, se optó por establecer una magnitud que se asociara directamente a un parámetro de la fuente para los eventos registrados por el sistema instalado en la Mina. De esta forma, se usa como magnitud local de los eventos del yacimiento, la magnitud “Hanks- Kanamori” o magnitud momento definida por la **Ecuación 3.2** (Hanks & Kanamori, 1979).

$$M_w = 0.667 * \log(M_0) - 6.01 \quad (3.2)$$

Donde M_0 es el momento sísmico en [N-m].

3.2.2. Índice de Energía

El Índice de Energía es un estimador de la caída de esfuerzos en la zona de ruptura del macizo rocoso. Para definir este parámetro, es conveniente introducir el término *esfuerzo aparente* σ_A , el cual se define por la expresión de la **Ecuación 3.3**.

$$\sigma_A = \mu E/M_0 \quad (3.3)$$

Donde M_0 es el momento sísmico, E corresponde a la energía radiada y μ es la rigidez del medio. Esta expresión entrega una aproximación a las condiciones de esfuerzos en la zona donde se ubica la fuente sísmica. En efecto, una fractura en la que se produzca deslizamiento en una roca poco competente, con bajo nivel local de esfuerzos, se esperará obtener valores bajos de energía radiada y altos de momento sísmico, lo que genera valores bajos de esfuerzo aparente. Por el contrario, en una roca competente, sujeta a altos esfuerzos locales, una fractura tendrá asociados valores más altos de energía radiada y menores de momento sísmico, produciendo valores más altos de esfuerzo aparente.

Para independizar este parámetro respecto de las variaciones de momento sísmico, se desarrolló el parámetro índice de energía adimensional. Este se calcula como la razón entre la energía radiada observada y la energía radiada esperada (**Ecuación 3.4**).

$$IE = \log(E_{obs}) - \log(E_{esp}) \quad (3.4)$$

Donde E_{esp} es la energía radiada esperada, la cual se calcula como la recta que mejor ajusta el conjunto de puntos formados por la energía radiada y el momento sísmico. Y por otro lado, E_{obs} es la energía radiada observada que se obtiene desde la **Figura 3.17**.

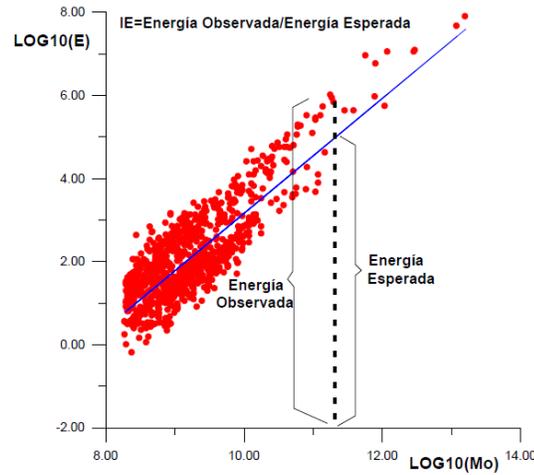


Figura 3.17. Definición del parámetro Índice de Energía.

Valores altos de índice de energía ($IE > 1$), indican una alta tasa de liberación de energía por unidad de deformación en la fuente, lo que se debe principalmente a la existencia de una roca competente, confinada, y con un alto nivel de esfuerzos. Mientras que valores sistemáticamente bajos ($IE < 1$), indicarán bajas tasas de liberación de energía por unidad geométrica del evento, debido a que la roca se califica como poco competente, desconfinada, y con bajos niveles de esfuerzos en la fuente (Dunlop R. , 2001).

3.2.3. Frecuencia de Eventos (FrEv)

Este parámetro indica la cantidad de eventos que pasa una media determinada y ocurren en un volumen de roca dado, dicho de otro modo, la frecuencia de eventos *FrEv* es la tasa de ocurrencia de eventos y está ligado directamente a las actividades de extracción, socavación, apertura de zanjas y/o el tipo de geología de la zona. Si la actividad sísmica se detiene, la *FrEv* disminuye a valores cercanos a cero, esto determina un parámetro importante para caracterizar la sismicidad y sus eventuales causas y consecuencias (Belmonte, 2005).

3.2.4. Volumen Aparente

El volumen aparente (VA) (**Ecuación 3.5**), es proporcional al volumen con deformación inelástica co-sísmica ocurrida entorno de la zona de ruptura del macizo, es decir, alrededor de la fuente sísmica. Este es proporcional al cuadrado del momento sísmico e inversamente proporcional a la energía radiada. El volumen aparente se mide en m^3 .

Este parámetro está definido por la expresión:

$$VA = \frac{M_0^2}{2\mu E} [m^3] \quad (3.5)$$

Donde M_0 es el momento sísmico, E es la energía radiada y μ indica la rigidez del medio. La utilización del volumen aparente (VA) cobra sentido cuando se introduce el concepto de condición de inestabilidad local. La energía de deformación acumulada (**Ecuación 3.6**) dentro de un volumen se puede escribir como el producto entre el esfuerzo y la deformación (Belmonte et al., 2005).

$$W = \int_V \sigma \epsilon dV \quad (3.6)$$

El volumen aparente refleja el volumen macizo que potencialmente ha sido removido, por tanto, sus cambios de gradiente son de importancia para poder calificar al macizo en observación según su estado de quiebre. Por lo general, altas pendientes positivas pueden estar sujetas a una alta frecuencia de eventos, ya su vez con una intensa actividad de socavación y/o extracción.

En este sentido, se observa que un aumento en el volumen aparente acumulado (VAA) va acompañado de una disminución del índice de energía. Dicho cambio se asocia a una fase de transición entre un estado de *endurecimiento* a uno de *relajación*.

Al introducir la condición de inestabilidad de la **Ecuación 3.6**, se obtiene una relación en donde sus componentes están referidas a las variaciones temporales tanto del esfuerzo como de la deformación, resultando lo siguiente:

$$\frac{d^2W}{dt^2} < 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{d^2W}{dt^2} = \int \frac{d\sigma}{dt} \frac{d\tau}{dt} < 0 \quad (3.8)$$

$IE \quad VA$

La relación expuesta a través de la **Ecuación 3.8** indica que la condición de inestabilidad local se dará siempre y cuando las variaciones de los esfuerzos y deformaciones son en sentido contrario. En caso que se produzca una disminución de esfuerzos simultáneamente, con un aumento de las deformaciones es interpretable como un estado de liberación de bajas energías, es decir, se hablará de un macizo en estado de fragmentación, desarme, “*softening*” o en fase de relajación. En caso contrario, sí se produce un aumento de los esfuerzos con disminución de la deformación, estará ligado a una condición en que el macizo acumula energía de deformación sin liberarla. Se hablará de un estado de endurecimiento, “*hardening*” o fase de activación (Dunlop R. , 2001).

3.2.5. Frecuencia de eventos acumulada esperada ($FrEv_{esp}$)

Este parámetro es una herramienta cuantitativa de control, con el objeto de mantener acotada la magnitud y energía liberada de los eventos sísmicos ocurridos en un volumen determinado principalmente por la distribución espacial y temporal del proceso del fracturamiento del macizo. El proceso en donde se generan rupturas en el macizo de roca es parte del proceso de deformación que tiende a restablecer el estado de equilibrio en el volumen de roca perturbado por la minería. La fase de reequilibrio se expresa por medio de rupturas y de movimientos entre las partes sólidas (Mendecki, 1997).

Debemos tener en cuenta, que la ocurrencia de sismicidad es también asociada a los procesos de ruptura en el sector de estudio, la geometría que posee el macizo rocoso, la condición de esfuerzos existente en el sector de explotación y a las condiciones geológicas estructurales.

Existen ciertas fases evolutivas en el proceso de deformación que afecta al volumen activo (**Sección 3.1**). Este es conducido principalmente por la fuerza gravitacional y el proceso de desequilibrio que es dirigido fundamentalmente por las actividades de extracción y socavación a través del método de “*caving*”. Este mismo, apoya el quiebre progresivo de la masa de roca, donde se inicia con la socavación y continúa con la extracción, los eventos sísmicos corresponden a cada ruptura que se origina en la roca primaria.

Desde la sismicidad, tanto la interacción entre sub volúmenes del macizo rocoso como las características mecánicas del material involucrado son introducidos sólo cualitativamente. Así, es posible cuantificar el efecto de éste sobre la evolución del volumen activo y el número de eventos esperado en dicho volumen. Entonces, la evolución del volumen activo limita, en definitiva, las posibilidades de la actividad sísmica, ya que limita la extensión de las rupturas.

El volumen activo está sometido a un proceso de activación, conducido por las fuerzas presentes, y un proceso de restauración. Además, se encuentra limitado por un volumen en proceso de desplome o desarme y otro intacto denominado volumen de influencia, pero potencialmente en vías de transformarse en el largo plazo en activo; el volumen activo se encuentra en proceso de fracturamiento. Desde el punto de vista sísmico nos interesa la roca que posee posibilidades de quebrarse, pues el material ya quebrado no es susceptible de ser activado nuevamente.

De una forma cuantitativa, la evolución total del volumen activo en el tiempo se aproxima al aporte de la minería de manera proporcional a cada una de sus actividades donde predominan la extracción, la socavación y la apertura de zanjas. De esto, se espera que exista un balance entre el volumen de mineral extraído y el volumen de mineral fragmentado producto de los procesos de deformación y ruptura del macizo. Por otra parte, el volumen restaurado se supone proporcional al volumen activo, así como el material quebrado extraído será generado en dicho proceso de restauración (Mendecki, 1997).

Asumiendo que una determinada tasa de eventos es asociada a la actividad minera y depende de la geometría del volumen activo y su evolución temporal, entonces estimando el volumen activo, podemos deducir el número de eventos que para tal volumen generado en una determinada minería se espera que ocurran. La estrategia de control derivada de este modelo consiste básicamente en determinar las diferencias resultantes entre la cantidad de eventos inferida a través de la evolución del volumen activo generada por la perturbación minera, y la sismicidad observada.

Dado que el supuesto principal para una estimación de una tasa de actividad sísmica asociada a una minería dada, es que el número de eventos depende de la geometría del volumen activo y su evolución en el tiempo, entonces se menciona una expresión que estima la geometría del volumen activo, se formula la **Ecuación 3.9** considerando el aporte dado por la minería junto con la disminución causada por el proceso de restauración (Dunlop et al., 1999).

$$V_{t+1} = V_t + \alpha_s V_t^s + \alpha_e V_t^e + \alpha_z V_t^z - R_t \quad (3.9)$$

Donde V_t es el volumen activo en el tiempo t , V_t^s es el aporte de la socavación al volumen activo en el tiempo t , V_t^e corresponde al aporte de extracción en el tiempo t , V_t^z es el aporte de la apertura de zanjas en el tiempo t y R_t es el volumen restablecido o reequilibrado. Y α_s es la constante de proporcionalidad de la socavación, α_e es la constante de proporcionalidad de la extracción y α_z es la constante de proporcionalidad de la apertura de zanja.

Una solución a esta **Ecuación 3.9** es:

$$V_t = V_0(1 - \beta)^t + \sum_{i=0}^{t-1} (\alpha_s V_i^s + \alpha_e V_i^e + \alpha_z V_i^z) (1 - \beta)^{t-1-i} \quad (3.10)$$

Donde la sumatoria es de $i=0$ a $t-1$. Cabe suponer que el volumen restaurado es proporcional al volumen activo, dicho de otro modo, el volumen que retoma una condición de equilibrio es distributivo al volumen activo existente en un momento dado. Es decir, se ha supuesto:

$$R_t = \beta V_t \quad \text{con } 0 < \beta < 1 \quad (3.11)$$

Esta solución de la **Ecuación 3.10** entrega la evolución en el tiempo del volumen activo en función de los parámetros α_s , α_e , α_z y β . En general, el volumen activo inicial V_0 puede considerarse nulo. El parámetro β expuesto en la **Ecuación 3.11** depende de las condiciones cinemáticas y de las propiedades del macizo, este está limitado por el ritmo de la minería y por el volumen activo máximo admisible. En términos generales, se puede considerar valores cercanos a 1 para una roca poco competente, y para mayores restricciones cinemáticas, menor deberá ser la constante β (Dunlop et al., 1999).

La estimación de una tasa de sismicidad asociada a una minería se apoya en suponer que la cantidad de eventos es proporcional al tamaño del volumen activo en un instante dado. De esta forma, en términos de mediano y largo plazo, la Frecuencia de Eventos Acumulado Esperado descrita en la **Ecuación 3.12**, se puede estimar como una tasa de sismicidad proporcional al tamaño de volumen activo (V), definiendo γ como la tasa promedio de eventos por unidad de volumen.

$$FrEv_{esp}(t) = \gamma * V(t) \quad (3.12)$$

Si denominamos N_t la tasa de eventos para el instante t , podemos entonces dentro de un período dado, estimar las constantes α_s , α_e , α_z y β minimizando la raíz del cuadrado de las diferencias (*Root Mean Square, RMS*), para cada instante t , entre la frecuencia de eventos acumulado esperada y la tasa de eventos, de la forma:

$$\Delta N = \sqrt{\sum_{k=0}^{k=t-1} (FrEv_{esp}(k) - N(k))^2} \quad (3.13)$$

En resumen, este parámetro estima una tasa de actividad sísmica asociada a una minería. Para esto, estimamos un volumen activa asociado a esa minería, basado en las tasas de volúmenes fragmentados por la extracción, la socavación y la apertura de zanjas. A partir de este volumen activo, se estima la tasa de eventos sísmicos asociado (Dunlop et al., 1999).

3.3. Elementos para la Sensibilidad de una Red Sísmica

La *sensibilidad* es medida en términos de la magnitud mínima que el sistema puede detectar. Dicho de otro modo, se entiende por la distribución espacial de magnitudes mínimas que la determinada red de sensores “puede escuchar”. Es decir, cuáles son las amplitudes más pequeñas que el sistema instalado es capaz de detectar. Dichas amplitudes son “leídas” en términos de una magnitud mínima. La detección tiene relación con dos elementos:

La relación señal/ruido que caracteriza a cada instrumento (**Figura 3.18**), Esta condición es impuesta por el instrumento y su fabricante.

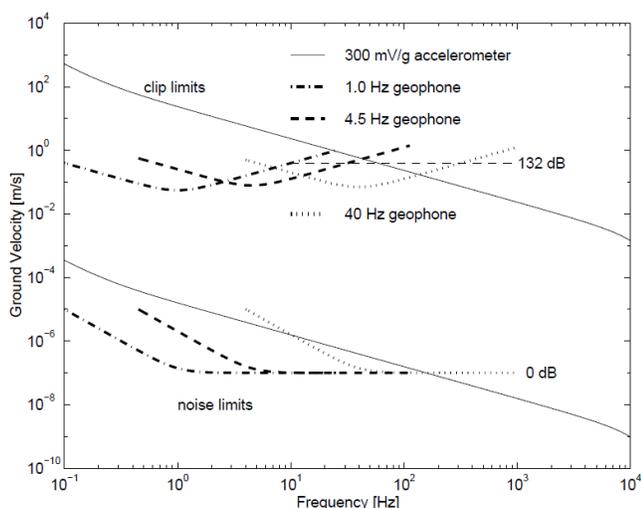


Figura 3.18. Sensibilidad y Rango Dinámico de sensores usados en minería subterránea. La región entre los límites representa el rango a utilizar por cada instrumento (Mendecki et al., 1999).

Y la relación entre cierto número de estaciones que “detectan” cierta señal y las que no lo hacen. Esta condición es manipulable por el operador del sistema y condiciona lo que se denomina *Número de Asociación por Sensores* diferenciándolo respecto de sistemas de detección donde el proceso de captura de datos es continuo y no diferencia el grado de alcance.

En División Andina, así como la mayoría de los casos de sistemas sísmicos que consisten de 10 o más sensores para minería subterránea, se exige al sistema que “se gatille” cuando al menos 4, 5 ó 6 sensores “detectan” cierta señal que supere, a su vez, cierto umbral impuesto por el tipo de instrumento, dicho de otro modo, la captura de un evento en el sistema de sensores instalados está sujeto a que cierto número de estaciones (sensores) sea el mínimo exigido para registrar y guardar la información de un evento. Si esta condición se cumple, el sistema registra una ventana de tiempo que contiene la señal que superó la exigencia del Número de Asociación dada para dicho sistema. Cuando esto ocurre, todo el sistema se activa y se graba una ventana de tiempo, en cada sensor instalado, que contendrá a la señal que causó la activación del mismo sistema. Cabe destacar que la red monitoreo 2012 ha funcionado con una condición de al menos 5 estaciones (número de asociación de 5 sensores).

Para efectuar dicha estimación, se parte del concepto básico asociado a la atenuación de la energía radiada con la distancia. En estricto rigor, se puede demostrar que para una señal sísmica se cumple la relación de la **Ecuación 3.14**.

$$Energía\ Sísmica\ Radiada = (R v_{max})^2 \quad (3.14)$$

Con R la distancia entre la fuente y un detector, y v_{max} la velocidad de partícula máxima o también conocido como *Peak Particle Velocity (PPV)*. Este concepto está descrito como la velocidad máxima que experimenta una partícula que es atravesada por una onda sísmica (Onda P u Onda S). No se debe confundir con la velocidad de propagación de dicha onda sísmica (Belmonte, Resumen Inicio Actividades y Análisis de Datos-ANDINA, Informe I., 2011).

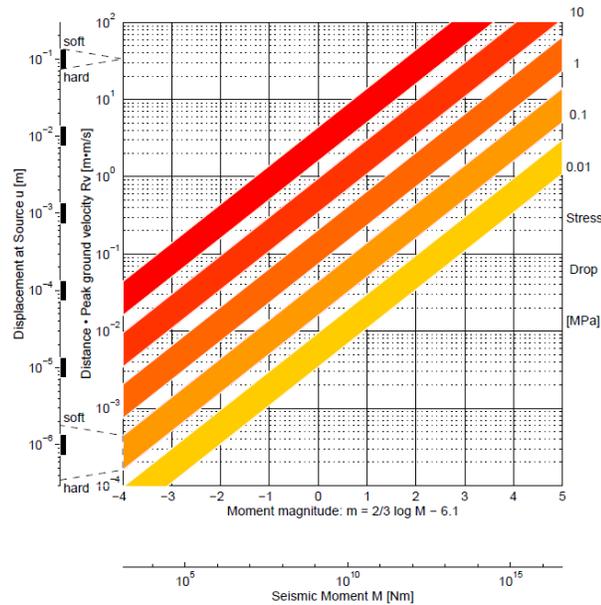


Figura 3.19. Relación que existe entre diferentes radios de Fuente Sísmica, en un rango para Momento Sísmico y Magnitud Momento y el esfuerzo resultante, la anchura de las líneas representa las variaciones en el tipo de roca (Mendecki et al., 1999).

La relación de la **Ecuación 3.14** establece la proporcionalidad inversa entre la velocidad de partícula máxima y la distancia recorrida por el frente sísmico, como se puede apreciar en la **Figura 3.19**. A partir de dicha relación, se contemplan factores de corrección y la energía está expresada en términos de la caída de tensión ($\Delta\sigma$) y el momento sísmico (M_0) (Mendecki et al., 1999).

Si se considera la distancia R desde la fuente sísmica, para roca competente se considera la expresión dada en la **Ecuación 3.15** (Mendecki et al., 1999).

$$R v_{max} = 7x10^{-9} \sqrt[3]{\Delta\sigma^2 M_0} \quad (3.15)$$

En que Rv_{max} es una constante, $\Delta\sigma$ en [Pa] y M_0 en [N-m].

Utilizando la **Ecuación 3.15**, para valores de σ y M_0 dados, con cierto umbral inferior asociado al rango dinámico de cada sensor (**Figura 3.18**), y aplicando un criterio para el *Número de Asociación* o “gatillo” para la activación del sistema completo, es posible estimar espacialmente la sensibilidad de una red sísmica. El valor de $\Delta\sigma$ se asume constante y el valor de M_0 corresponde al conjunto de posibles magnitudes (M_W) que son posibles de evaluar y consultar en la búsqueda de magnitudes mínimas.

3.4. Elementos para la Resolución de una Red Sísmica

La resolución de una red sísmica está asociada con el error que la distribución de sensores condiciona en el espacio donde potencialmente un evento sísmico puede ocurrir. Es decir, para todo el espacio que rodea la red de sensores, cuál es el error esperado si se asumen valores de RMS (*Root Mean Square*) representativos (es decir, valores RMS observados).

Las componentes del denominado RMS mostradas en la **Ecuación 3.16**, son las diferencias de tiempo teórico y observado en cada estación para una fuente dada. Así mismo, es un parámetro de control para determinar, en la aplicación del método de localización inverso, el fin del proceso iterativo de búsqueda de una locación de una fuente sísmica u otra.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_i^N (\Delta t_i)^2}{N}} \quad \text{con } \Delta t_i = (t_i^{\text{observado}} - t_i^{\text{teórico}}) \quad (3.16)$$

Bajos valores de RMS se asocian a una “mejor” convergencia en la solución del problema de localización hipocentral. Éstos fluctúan para “buenas” soluciones en el orden de 10^{-2} a 10^{-3} [s], lo que se vincula con errores espaciales del orden de algunos pocos metros, en general (Belmonte, Resumen Inicio Actividades y Análisis de Datos-ANDINA, Informe I., 2011).

Ahora bien, al combinar las componentes del RMS y la distribución espacial de sensores, es posible extraer una distribución del error de localización en sus componentes N-S, E-W y Vertical (x, y, z) para cada

punto fuente. Esta distribución del error permite estimar en todo el espacio un orden de magnitud de las dimensiones mínimas que son razonablemente posibles medir con exactitud.

En un principio, es válido suponer que aquellos puntos que están más bien fuera del volumen de estudio respecto a la distribución de la red de estaciones sísmicas, contendrán una resolución baja, de lo contrario, aquellas que se encuentren en el centro de esta poseerán una mejor resolución.

3.5. Elementos de un Sistema de Monitoreo Micro - Sísmico

... "En general, un sistema de monitoreo sísmico en minería permite cuantificar la exposición a la sismicidad y es también una herramienta logística para guiar el esfuerzo en la prevención, la calificación de los riesgos sísmicos y alertas a posibles inestabilidades del macizo rocoso que podría resultar en estallidos de roca en minas subterráneas" ... (Mendecki et al., 2010)

Los sistemas de monitoreo micro-sísmico, proveen información acerca de la condición local del macizo rocoso y las condiciones de esfuerzo en el mismo, la información registrada es grabada en formas de ondas, dónde se extrae esencialmente la amplitud y frecuencia. Estas dos variables dependen del estado de esfuerzo de la roca, el tamaño de la fuente sísmica, la magnitud del evento y la tasa a la cual la roca se deforma durante el proceso de ruptura.

A partir de un arreglo tridimensional y/o unidimensional de sensores sísmicos, se recibe información en tiempo real de la ocurrencia de sismicidad, la cual, debe ser procesada e interpretada por los especialistas del área, a fin de entender a qué fenómeno se atribuyen, cuál es el comportamiento del macizo rocoso en el volumen de roca analizado, qué sector tiene una mayor vulnerabilidad, de qué manera interactúan los sensores entre sí y cuál es la relación con la actividad minera en el entorno.

La utilización de un sistema sísmico tiene como objetivo ser una herramienta que guía esfuerzos para la prevención y el control de la actividad sísmica inducida, además de otorgar un apoyo a la operación minera y lograr un seguimiento y control del proceso productivo de la Mina Subterránea, y así, velar por un trabajo laboral seguro tanto para el personal (trabajadores, supervisores, entre otros.) como la maquinaria e infraestructura comprometida en el área de trabajo (Villegas, Plan de Instalación y Monitoreo Sísmico Área 18, Nivel 16 Hundimiento –III Panel., 2012).

Todo el instrumental que forma parte del sistema sísmico implementado en la Mina subterránea Río Blanco, es proporcionado por el Instituto de Sismología Minera (IMS, *Institute of mine Seismology*). Es

importante mencionar, que antes de realizar la instalación se debe procurar realizar una previa verificación de todos los instrumentos, ya que una vez instalados los sensores, es inasequible su modificación en terreno.

3.5.1. Geófonos

Los sensores sísmicos instalados actualmente en la Mina Río Blanco son transductores de velocidad, este sistema electro-mecánico permite transformar el movimiento de partícula del macizo en una señal eléctrica proporcional a la velocidad de partícula del medio. (**Figura 3.20 (a)**). Su principio de funcionamiento es una bobina móvil con un núcleo magnético en su interior, lo que genera una señal eléctrica al moverse la bobina. Este sistema se utiliza para el registro de señales en frecuencias mayores que la frecuencia de resonancia del sistema. Cada uno puede conformar un arreglo tri-axiales o uni-axial de 4.5 [Hz] que deben ser instalados dentro de 2° de precisión c/r a la vertical, existen otros de 14 [Hz] que se caracterizan por que pueden ser instalados en cualquier ángulo de orientación. Un Geófono de esta clase se compone por tres bobinas que corresponden a las tres componentes del sensor como se ilustran en las **Figura 3.20 (b) y (c)**, la componente Este-Oeste o “X”, la componente Norte-Sur o “Y” y componente Vertical o “Z” (Dunlop et al., 1999).



Figura 3.20. (a) Esquema simple del funcionamiento interno de un geófono. (b) Bobinas son utilizadas por cada componente. (c) Imagen que ilustra un geófono proporcionado por el IMS junto a su Junction box, que actualmente están instalados en el sector norte del III Panel en la mina subterránea (*Gentileza IMS*).

Todo sensor dependiendo de su frecuencia natural y su alcance en ancho de banda, exhiben valores diferentes de resistencia (**Tabla 3.1**).

Tabla 3.1. Valores característicos de cada tipo de geófono, su frecuencia natural en hertz, su ancho de banda de funcionamiento en hertz y su resistencia típica en ohms.

Frecuencia del sensor [Hz]	Ancho de Banda [Hz]	Resistencia [Ohm]
4.5 ± 0.5 Hz	4 - 2.000	390
14 Hz $\pm 7\%$	8 - 2.000	3500

Cada geófono con arreglo tri-axial de 4.5 [Hz], tiene una salida de 4 pares de cables donde cada par pertenece a una componente (X, Y y Z), dos cables por eje ya que una corresponde a la componente positiva y otra a la negativa, y un cuarto par para la electrónica interna del sensor que establece la orientación en la que se instala el sensor.

Si se trata de un sensor uni-axial, se utiliza sólo el par Blanco / Negro (componente Z). Además, se debe tener precaución con el resto de los cables, estos deben quedar sellados para evitar la interferencia de ruido eléctrico externo (*Intitute of Mine Seismology*).

Es posible apreciar en la **Figura 3.21** que salida del sensor está conectada a la Junction box, este es un dispositivo que se ubica por el borde de la galería, fuera del pozo donde se introduce el geófono, su función es conectar la salida del cable del geófono con una extensión de cable que se dirigirá hacia la unidad de adquisición de datos, por dentro de la Junction box se encuentran las conexiones de cada par de cables.

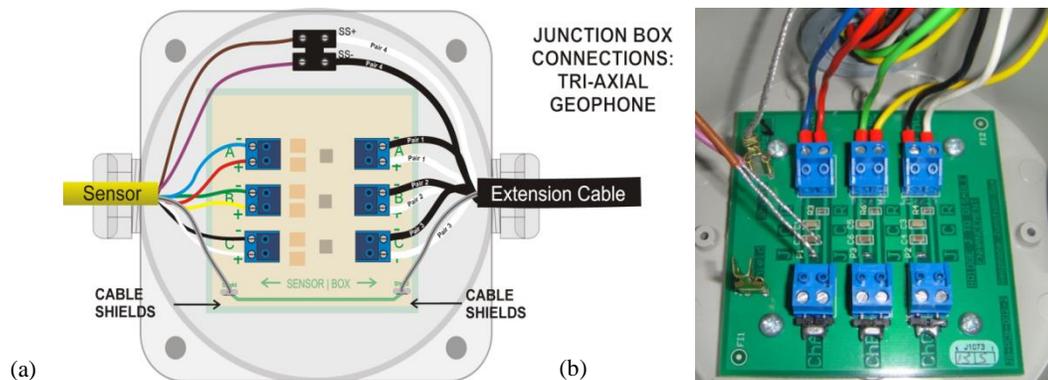


Figura 3.21. (a) Esquema que ilustra la conexión interna de la Junction Box, el lado derecho corresponde a la entrada del cable que proviene del sensor y el extremo izquierdo muestra la salida hacia la unidad de adquisición de datos. **(b)** Muestra las conexiones de los cables de la Junction Box antes de realizar la instalación del geófono (*Gentileza IMS*).

A continuación, la **Tabla 3.2** muestra la descripción de cada conexión de cables al interior de la Junction Box.

Tabla 3.2. Conexiones de la Junction Box para un arreglo tri-axial.

Par	Componente	Color/Signo
Azul – Rojo	X (Norte-Sur)	Azul (-) – Rojo (+)
Verde – Amarillo	Y (Este-Oeste)	Verde (-) – Amarillo (+)
Negro – Blanco	Z (Arriba-Abajo)	Negro (-) – Blanco (+)
Café – Violeta	-	Orientación

3.5.2. Unidad de Adquisición de Datos (QS, GS y SAQS)

Su función primordial es realizar la transformación de la señal de análoga capturada por el sensor a una señal digital, la cual, será enviada por un cable de comunicación al lugar donde se encuentran los módems de comunicación. Estos sismómetros elaborados por IMS se van renovando cada cierto período de tiempo, su función es la misma, pero poseen ciertas diferencias en la configuración que serán descritas a continuación.

Los sismómetros de la IMS poseen las siguientes prioridades:

- ❖ Tasas de muestreo entre 3 [Hz] y 48000 [Hz].
- ❖ Registro continuo o *trigger*.
- ❖ 6 canales de conexión para sensores con 24 bits de rango dinámico: 2 tri-axiales o 6 uni-axiales u otra combinación.
- ❖ 1 conexión removible a un *Hard Disk Drive* (USB).
- ❖ 1 ó 2 conexiones a puertos de comunicación para telemetría o comunicación satelital (Protocolos RS232/RS485).
- ❖ 1 conexión a *DC Power* (10-28 [V]).
- ❖ 1 conexión a antena GPS.

Actualmente los sismómetros proporcionados por *IMS* que se encuentran instalados en la mina Subterránea son:

1.- *Quake Seismometer (QS).*

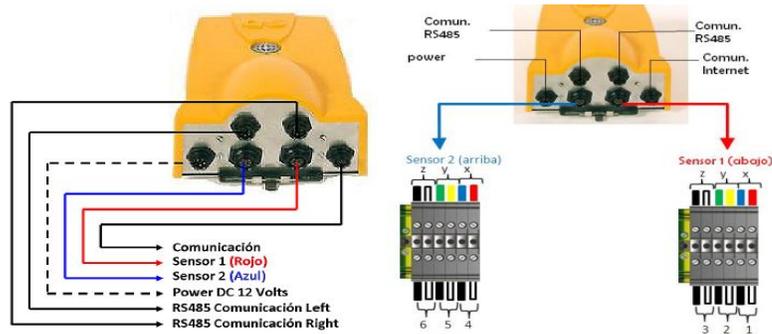


Figura 3.22. Descripción de las entradas de conexión del sismómetro Quake Seismometer.

Es válido mencionar que el dispositivo de la **Figura 3.22** funciona con un transformador eléctrico de corriente continua que transforma la corriente de 220 Volts a una de 12 Volts. En este sismómetro los eventos son registrados por los sensores 1 y 2, luego se realiza una conversión análoga/digital, donde la información sale por el cable de comunicación el cual es enviado a los respectivos módems.

2.- *Stand Alone QS (SAQS).*

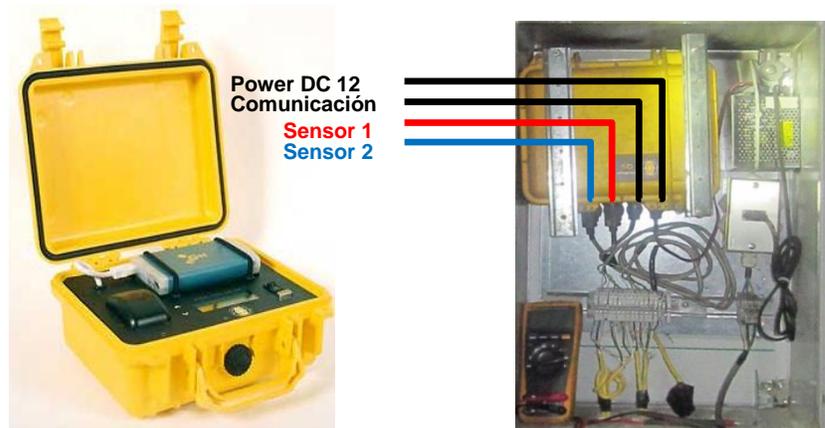


Figura 3.23. Descripción de conexiones del sismómetro StandAlone.

El sismómetro de la **Figura 3.23**, es similar al sismómetro anterior, sólo cambia la forma física ya que es más segura, pero el procedimiento es el mismo.

3.- GS Seismic Station (GS).

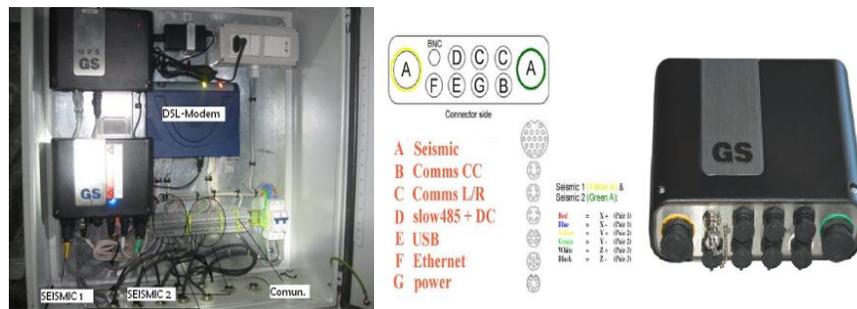


Figura 3.24. Descripción de las entradas y conexiones del sismómetro GS Seismic Station.

A diferencia de los sismómetros mencionados anteriormente, la *GS Seismic Station* no necesita de una modem rack MR485 para realizar un cambio en el protocolo de comunicación, pero se apoya de un modem DSL que es alimentado con electricidad de forma independiente el cuál realiza el traslado de comunicación al sector de la broquera (La GS está conectada a este módem), además, posee un módem UPS, donde su función es respaldar de energía cuando ocurren bajas o caídas de energía eléctrica. Es posible ver parte de sus conexiones en la **Figura 3.24**.

3.5.3. Comunicación y Control de la Instrumentación

Los módems de comunicación se encuentran situados en el sector de la “Broquera”, posee la función de administrar el flujo de datos para ser enviados de manera correcta al computador base. En primer lugar, una unidad MR485 que provee la comunicación vía unidades de monitoreo digital de *IMS* cuando se usa un tipo de comunicación RS485. División Andina permite 4 extensiones RS485, actualmente, la unidad MR485 está conectada a 3 unidades QS y una unidad SAQS. Luego, usando cables de comunicación *Ethernet* y ATU (cable de sincronización de tiempo), la información es tratada y procesada en la unidad *Equinox*, el cual genera la señal de tiempo ATU, que hace de Controlador Sísmico.

Por otro lado, la comunicación proveniente desde la unidad GS, debe ser sincronizada en el mismo tiempo el cuál se encuentra la información recibida desde las QS's y la SAQS, por lo que existe un instrumento el cual realiza esta sincronización de forma continua, hablamos del *I-Splitter* inteligente. Luego de este procedimiento la información pasa directamente hacia el *DSLAM* el cuál envía el flujo de datos a través de un punto de red al computador base (**Figura 3.25**). La distancia entre las unidades *Equinox* y *DSLAM* no debe ser superior a 2 [m].

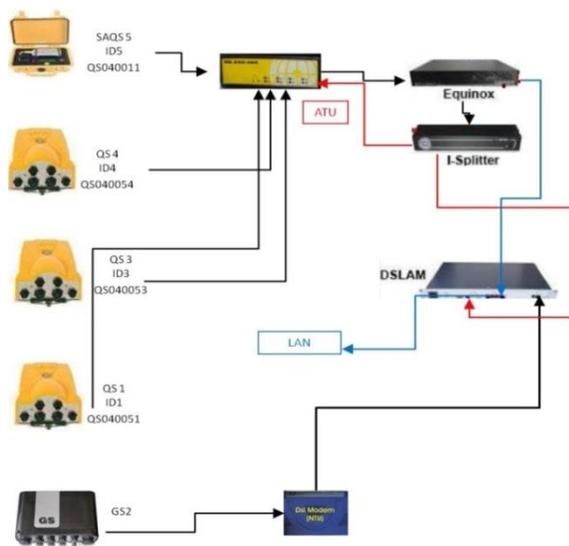


Figura 3.25. Disposición del sistema micro sísmico, en donde se aprecia la forma en que están conectadas las unidades de adquisición (QS, SAQS y GS) para conformar la columna principal del sistema.

Para una comunicación expedita es necesario utilizar cables de conexión, donde la **Tabla 3.3** menciona el número de cables que utiliza cada tramo, además de las características del cable instalado:

Tabla 3.3. Especificación de cable para cada tramo.		
Tramo	Número de cables	Tipo de Cable
Geófono – Junction Box	4 pares (8 Cables)	Cable de cobre 0.5 mm ²
Junction Box – Sismómetro	4 pares (8 Cables)	Cable de cobre 0.5 mm ²
Sismómetro – Caja de Interconexión	2 pares (4 Cables)	Cable de cobre 0.5-0.8 [mm ²]
Caja de Interconexión – Módem Central	Un par (2 Cables)	Cable de cobre 0.5-0.8 [mm ²]

Cabe mencionar, que entre un sensor y una unidad QS, SAQS o GS deben existir no más de 1200 [m], ya que la distancia estropea la calidad de la señal, esto es exigido por el protocolo de comunicación RS485. En caso contrario, se debe usar otra unidad QS como unidad de transferencia.

El módem centralizado (MR/485) requiere de un par single (2 alambres) para ser conectado a cada unidad QS/SAQS en cada extensión (4 extensiones para el MR/485 para conexión de sismómetros). Y la distancia entre nodos RS485 (QS a Módem) está limitada a 1200 [m] debido al protocolo de comunicación RS485 que es utilizado en esta instalación. Actualmente 4 de los 5 sismómetros se encuentran conectados a la unidad módem MR485.

3.5.4. Run Time System Software, RTS

El sistema sísmico instalado en el sector del norte del III Panel, en la Mina Subterránea Río Blando, se encuentra bajo la configuración computacional de un sistema proveniente de la *IMS*, cuyo nombre es *Run Time System* (RTS), en donde a través de la utilización de comandos, códigos y otros, es posible realizar cambios temporales o en el tiempo para todo tipo de requerimientos. Para mayor información de los comandos y funciones se puede acceder al **Anexo C**, Instrucciones Básicas Para Utilización del *Run Time System* (RTS).

3.6. Parámetros Mineros

Aquellos conceptos que se mencionan a continuación, se utilizan para generar relaciones y posibles asociaciones con los parámetros sísmicos, además ayudará a realizar una interpretación adecuada del comportamiento del macizo rocoso el cual es afectado por la actividad minera.

3.6.1. Extracción

Corresponde a la cantidad de material extraído (material quebrado) medido en toneladas por día en cada punto de extracción habilitado en el nivel de Producción de la Mina Subterránea, se cuantifica en toneladas por tiempo (día, mes u otro).

3.6.2. Socavación

Dentro del método *Panel Caving*, es el proceso en el cual se genera un corte al macizo rocoso para generar el hundimiento, para posteriormente producir el colapso (que el macizo rocoso se hunda por el efecto de la gravedad). Dicho de otro modo, corresponde al área quemada para efectuar un avance en el hundimiento o frente de socavación, se cuantifica en [m^2].

3.7. Sector de Minería Continua

Corresponde a un proyecto controlado por Casa Matriz y parte de la División Andina donde se implementará un proceso automatizado y operado a distancia que permite extraer el mineral de forma continua y simultánea desde distintos puntos. Este sector de prueba se encuentra ubicado en el III Panel de la mina Subterránea Río Blanco donde es posible visualizar en la **Figura 3.26**. Para Codelco, es una idea de gran envergadura en términos de inversión, y tal vez uno de los más grandes en la industria, enfocado a hacer una prueba industrial que valide una nueva tecnología innovadora.

El sector de prueba posee características favorables como su altura de columna de alrededor de 300 m y una columna de mineral primario promedio de 150 m, su sector esta contiguo a una zona hundida, en si es una zona independiente pero compatible con el plan de producción regular.

El proyecto considera un total de $7.072 m^2$ sin condiciones geomecánicas extremas y con una hundibilidad adecuada y no presenta problemas por subsidencia. Para efectos de validación de tecnología, un bloque o unidad mínima de Minería Continua se define con cuatro calles de producción con 8 puntos de extracción por cada calle, parte de esta configuración se aprecia en la **Figura 3.27**. El tamaño de la muestra se justifica con el hecho que las dos calles centrales estarán contenidas en una ambiente global de minería continua y mostrarían de mejor manera el comportamiento del sistema. Tamaños más pequeños de la muestra significarán que los resultados estarán influenciados, en gran medida, por las condiciones de bordes (Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, 2012).

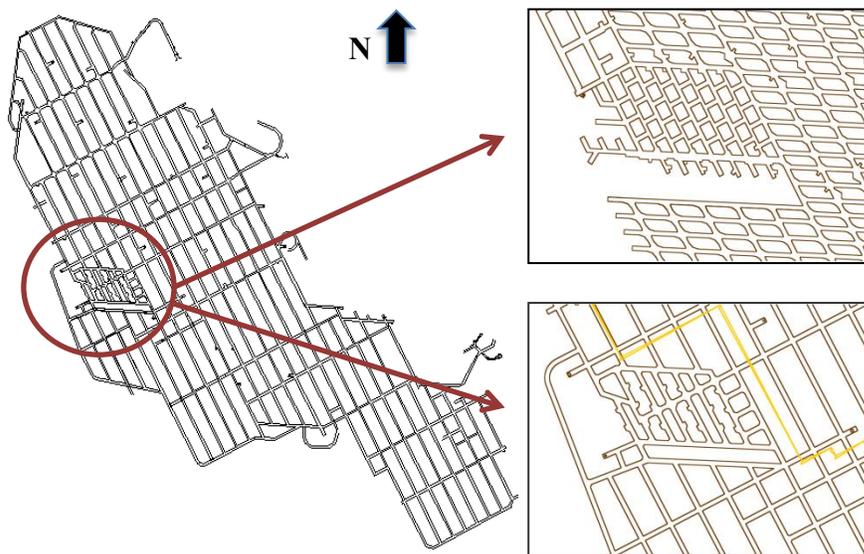


Figura 3.26. Plano del Tercer Panel de la mina Subterránea y ubicación del sector de Minería Continua. Además se muestra al costado superior derecho el Nivel de Producción (cota 3242) y por debajo el Nivel de Hundimiento (cota 3255) donde la línea amarilla muestra el actual avance de Hundimiento dejado por explotaciones anteriores.

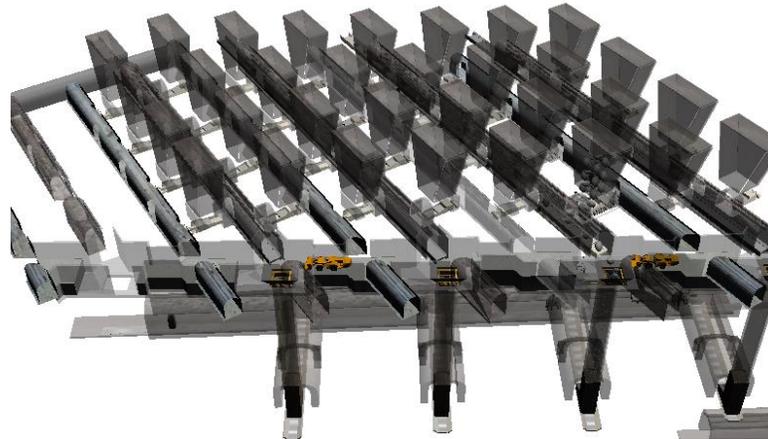


Figura 3.27. Esquema tridimensional de Minería Continua, en el cual se visualiza el nivel de producción con la instalación de los *panzer*, las calles de servicio, entre otros (DAND 2012).

3.7.1. Componentes del Sistema

- ❖ **Dozer Feeder:** Equipos fundamentales dentro del funcionamiento correcto del módulo de minería continua. Este es el encargado de realizar la operación de extracción mecánica de mineral desde cada punto de extracción.
- ❖ **Chancador Sizer:** Equipo encargado de la reducción del mineral, proveniente del *panzer*, que alimenta los piques de traspaso al nivel de transporte intermedio.
- ❖ **Calles de servicio:** Las galerías de servicio se utilizan para acceder a los equipos extractores (*Dozer Feeder*) y a los puntos de extracción, para realizar ahí operaciones de mantención y descolgadura.
- ❖ **Transportador de cadenas (*Panzer*):** Equipo que alimenta de mineral a los *Chancadores Sizer* desde el *Dozer Feeder*.
- ❖ **Cadenas:** Sistema diseñado para controlar el flujo desde el punto de extracción al *Transportador Sizer*. Es accionado mediante un huinche eléctrico, ubicado en la parte superior de la galería, con capacidad de 5 toneladas.
- ❖ **Lanzas hidráulicas:** Sistema de reanudación de flujo es para la colgadura producida en el sector inmediatamente arriba del equipo *Dozer Feeder*.
- ❖ **Carro multipropósito:** Monorriel suspendido, para reducción de rocas y descuelgues.
- ❖ **Pique de traspaso:** el pique de traspaso se conecta con el *Sizer* del nivel de producción con los alimentadores de la correa (cota 3200).
- ❖ **Correas de Transporte:** Compuesta por dos niveles de correas que conectan el sector de validación con la tolva norte del tercer panel.

- Nivel 3200: Transporte intermedio. Recibe el mineral proveniente de los piques de traspaso del nivel de producción mediante 4 correas alimentadoras y descarga en un pique que conecta con la correa principal ubicada en la cota 3160.

-Nivel 3160: Transporte principal. Recibe el mineral proveniente del nivel de transporte intermedio (cota 3200).

3.7.2. Funcionamiento del Sistema

El módulo de Minería Continua poseerá tres niveles los cuales se detallan a continuación:

- ❖ **Nivel de Hundimiento:** Posee calles cada 26 m, en el cual, se permite realizar pre-acondicionamiento del macizo rocoso.
- ❖ **Nivel de Producción:** Este subnivel se encuentra 15 m bajo el nivel de hundimiento, posee 4 calles compuestas por 8 puntos de extracción cada una (32 puntos de extracción en total). Por un lado, contiene 5 calles de servicio intercaladas con los módulos y un *Dozer Feeder* por punto de extracción, donde la malla de tendrá un área de 10x5 m. Y por el otro, un *Chancador Sizer* por módulo, ubicado en el extremo sur.
- ❖ **Nivel de Transporte:** Se caracteriza por conectarse mediante correas desde el sector de validación con la Tolva Norte del tercer panel para realizar el carguío de camiones.

El sistema se inicia con un proceso de pre-acondicionamiento del macizo rocoso y la utilización de equipos estacionarios que extraen el mineral y lo transportan en forma ininterrumpida a través de un transportador continuo, que permite el traslado de grandes colpas o piedras. El material llega al *Chancador Sizer*, que reduce el mineral a una granulometría (tamaño) adecuada para ser transportado por correa y, finalmente, es trasladado a una planta concentradora. Así, la Minería Subterránea Continua opera al estilo de una “**fábrica de rocas**” mineralizadas.

Actualmente, el 60% de la producción de la empresa se obtiene de la minería a rajo abierto y un 40% de la minería subterránea. Con estos procesos se pretende, en el mediano plazo, invertir estos porcentajes. Además, le permitirá responder a los principales desafíos que tiene la Corporación, como aumentar la productividad, disminuir los costos, controlar los riesgos y proteger la salud de los trabajadores.

A continuación, en la **Figura 3.28** se ilustra las principales diferencias que tendría el implementar la Minería Continua con el actual uso de la Minería con Hundimiento Convencional.



Figura 3.28. Comparación en el funcionamiento de la Minería Convencional y la Minería Continua (DAND 2012).

Entre los beneficios más esperados para División Andina y Codelco son:

- ❖ Aumento de la productividad en al menos 50%.
- ❖ Se triplica la velocidad de extracción del mineral.
- ❖ Disminución de 20% de los costos operacionales.
- ❖ Mayor productividad del área en extracción.
- ❖ Mejores condiciones laborales, de salud y de seguridad para los trabajadores.
- ❖ Uso más eficiente de la energía.

3.8. Condición de Esfuerzos del Tercer Panel

Un factor que es válido mencionar es la condición de esfuerzos a la cual se somete los sectores del Norte del Tercer Panel y Minería Continua, ambos situados en el Nivel 16 Producción del Tercer Panel de la mina subterránea Rio Blanco. Esta condición de esfuerzos puede variar, ya sea por su condición geomecánica, o a su geometría, o además por las estructuras geológicas pre-existentes en la zona. Para tener pleno conocimiento y un entendimiento de cuál es la condición de esfuerzos a la que nos enfrentamos definiremos conceptos y elementos utilizados por el personal del Área de Geomecánica de la mina subterránea.

Desde la perspectiva de la mecánica de rocas, en un régimen rígido el desarrollo de fallas y la iniciación de deslizamiento sobre fracturas pre-existentes dependen del estado de esfuerzos aplicado al volumen de roca. Con esta afirmación asumimos que un evento sísmico consiste en una ruptura que implica el deslizamiento repentino de un bloque respecto de otro. Una falla o zona de falla constituye el espacio de contacto entre ambos bloques (Stein & Wysession, 2003). De esta forma y como primera aproximación, es posible introducir dentro de un macizo rocoso sometido a explotación por método de hundimiento un criterio de falla clásico como el de *Mohr-Coulomb*. Éste indica básicamente que dado un tensor deviatorico de esfuerzos diferente de cero, bastará con que las diferencias máximas superen cierto umbral de resistencia de la roca para que se generen las condiciones de iniciación de una ruptura (Belmonte, Curso Sismología Aplicada A Minería – Parte 3 – Deformación – Elasticidad., 2005).

La resistencia de un pilar (Crown Pillar, **Anexo B**) depende del volumen de este, debido a un efecto escala asociado a los defectos y discontinuidades presentes en el macizo rocoso. Además depende de la geometría del pilar, debido a un efecto geométrico que influye en la distribución de esfuerzo en el cuerpo del pilar y en sus condiciones de borde (Karzulovic & Goodman, 1988).

Conforme con lo anterior, la determinación de la resistencia de un pilar no es un proceso fácil. Dada las características del problema que aquí interesa y la calidad de la información resulta conveniente realizar un análisis paramétrico que permita evaluar la sensibilidad de los resultados a las posibles variaciones de los parámetros considerados (Villegas D. , 2008).

Desde el punto de vista geomecánico, el análisis de la resistencia del macizo rocoso considera el denominado criterio de *Hoek-Brown*, el cual se basa en la estimación de tres parámetros que caracterizan a la roca; la resistencia a la prueba de compresión uni-axial (σ_{ci}) de la pieza intacta, la constante de *Hoek-Brown* (m_i) para la pieza intacta y el denominado Índice de Resistencia Geológica (*GSI, Geological Strength Index*) para la masa de roca (**Figura 3.17**). Parámetros adicionales como el RMR (*Rock Mass Rating, Anexo B*), y la frecuencia de fracturas (ff) completan la información necesaria para calificar la calidad de una determinada roca (Belmonte, Curso Sismología Aplicada A Minería – Parte 3 – Deformación – Elasticidad., 2005).

$$\vec{\sigma}_1 = \vec{\sigma}_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\vec{\sigma}_3}{\sigma_{ci}} + S \right)^a \quad (3.17)$$

Donde $\vec{\sigma}_1$ y $\vec{\sigma}_3$ son los esfuerzos principales mayores efectivos en [MPa], m_b corresponde al parámetro de *Hoek-Brown* para el macizo rocoso, σ_{ci} es la resistencia a la compresión uniaxial de los bloques

de la roca intacta que conforman el macizo rocoso en [MPa] y S y a son constantes que dependen de las características del macizo rocoso (Villegas D. , 2008).

3.8.1 Condición de Esfuerzos para el Norte del Tercer Panel

Para el Norte del Tercer Panel se utilizarán los siguientes esfuerzos para un macizo rocoso in situ mencionados en la **Tabla 3.4**.

σ_1			σ_2			σ_3		
[MPa]	Azimut [°]	Inclinación[°]	[MPa]	Azimut [°]	Inclinación[°]	[MPa]	Azimut [°]	Inclinación[°]
21.8	95.2	25.8	16.9	355.6	19.1	15.1	233.3	57.0

Y los esfuerzos inducidos, los cuales son obtenidos a partir de un modelamiento en 3D utilizando el software “*Map 3D*” (Villegas D. , 2008), el cual el macizo rocoso se ve afectado a la actividad minera de explotación y producción corresponden a los mostrados en la **Tabla 3.5**.

σ_1 [MPa]	σ_3 [MPa]
[45.0-50.0]	[3.0-7.0]

3.8.2 Condición de Esfuerzos para el sector de Minería Continua

Análogamente para el sector de Minería Continua se rescatan los valores de esfuerzos medidos in situ obtenidos de los pilares de producción mediante la técnica “*Hollow Inclusion*” (**Tabla 3.6**)

σ_1			σ_2			σ_3		
[MPa]	Azimut [°]	Inclinación[°]	[MPa]	Azimut [°]	Inclinación[°]	[MPa]	Azimut [°]	Inclinación[°]
24.3	325.7	-28.0	17.9	68.1	-22.0	10.9	190.6	-53.1

Y los valores de esfuerzos inducidos obtenidos de los pilares de producción del sector de Minería Continua, desarrollados por un modelamiento en 3D con el software “*Map 3D*” (Martinez, 2013), se mencionan a continuación en la **Tabla 3.7**.

Tabla 3.7. Valores de esfuerzos principales inducidos para sector MC	
σ_1 [MPa]	σ_3 [MPa]
[43.0-48.5]	[0.0-2.0]

3.9. Pre Acondicionamiento

Ya que es la explotación en minería subterránea del mineral primario la causa principal de la desestabilización dinámica del macizo rocoso, una técnica que pretende cambiar la condición mecánica del sistema rocoso mejorando sus condiciones de hundibilidad y de fragmentación, en una fase anterior a la explotación minera (antes de iniciar el *caving*), consiste en degradar al macizo de tal manera que su respuesta a la minería así como el posterior manejo de materiales sean favorables y adecuados para contemplar un aumento de las velocidades asociadas al proceso de extracción, permitiendo finalmente que éste pueda ser continuo (Belmonte, Curso Sismología Aplicada a Minería, Parte 5, Hundimiento - Pre Acondicionamiento - Riego - Talud, 2005).

El Pre-Acondicionamiento (PA) actualmente puede realizarse de tres formas:

- ❖ **Por Fracturamiento Hidráulico (FH):** El FH es una adaptación de la tecnología utilizada en la industria del petróleo a la minería subterránea, y consiste en presurizar un tramo de perforación o de una fractura preexistente con un fluido determinado, comúnmente agua, el cual se inyecta hasta alcanzar una presión neta suficiente para iniciar una fractura de tensión y propagarla al interior del macizo rocoso (Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, Pre-acondicionamiento del Macizo Rocosos 1999-2012., 2012).
- ❖ **Por Debilitamiento Dinámico por Explosivos (DDE):** Este proceso implica dimensionar los parámetros críticos de tronadura para un entorno ausente de caras libres y en el que se supone la utilización de cargas cilíndricas de una determinada longitud. Éstas deben ser detonadas en una

secuencia apropiada a fin de aprovechar la cooperación entre las ondas de esfuerzo generadas por la tronadura, y así maximizar la efectividad del PA (Chacón et al., 2003). Esta prueba ha sido implementada en parte del Tercer Panel, con resultados favorables.

- ❖ **Por el Método Mixto:** Consiste en la implementación de los dos métodos mencionados anteriormente, iniciando con FH y luego continuando aplicando el DDE, la hipótesis se basa en que las discontinuidades generadas mediante el primer método servirían de superficies reflectoras para el campo de onda de la posterior tronadura, concentrando el mayor efecto entre las facturas hidráulicas y minimizando la posibilidad de acoplamiento desfavorable de ondas fuera de la zona de interés (Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, Pre-acondicionamiento del Macizo Rocosó 1999-2012., 2012). Este método deberá ser implementado en el sector de Minería Continua.

Según la literatura existente sobre la experiencia de estos métodos aplicados en otras minas subterráneas, mencionan que un macizo pre-acondicionado genera nuevas fracturas o estructuras que en parte debilitan al macizo inicial transformándolo en un medio que libera durante su quiebre menor energía. La presencia de estas nuevas fracturas y micro-fracturas obstaculizan la ruptura violenta y la propagación de fisuras naturales, haciéndolas de menor tamaño y facilitando la formación de bloques. De esta manera la respuesta sísmica de alto riesgo debería ser menor (Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, Pre-acondicionamiento del Macizo Rocosó 1999-2012., 2012).

El macizo rocoso primario, por su rigidez y resistencia, acumula gran cantidad de energía en un proceso de *caving* de altos esfuerzos. Cuando ésta excede la resistencia del macizo, se produce un colapso y la energía se libera en forma sísmica, produciendo eventos de magnitud proporcional a la cantidad de energía liberada (**Figura 3.29**) (Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, Pre-acondicionamiento del Macizo Rocosó 1999-2012., 2012).

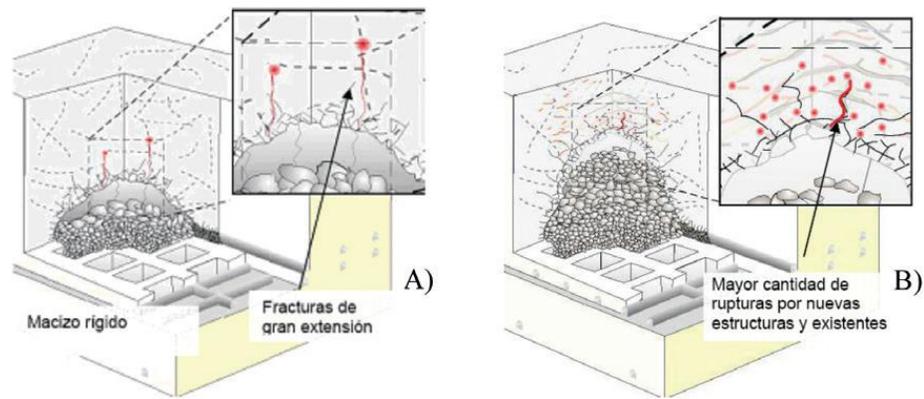


Figura 3.29. Proceso de fracturamiento y respuesta sísmica de un macizo rocoso con PA. a) En el *caving* sin PA, debido a la rigidez y resistencia del macizo primario, se observa ruptura violenta y propagación de fracturas naturales de gran tamaño con alta liberación de energía sísmica. b) El PA reduce la rigidez del macizo rocoso y la capacidad de acumular energía. Además provoca la formación de bloques con micro-fracturas, impidiendo una ruptura violenta del macizo primario (Cerutti, 2008).

3.10. Métodos de Hundimiento

3.10.1. Método de Hundimiento para sector del Norte del Tercer Panel

Se considera que los eventos ocurridos durante los años 2012-2013 se generan en una roca la cual se encuentra en un estado de *caving*, proceso el cual existe una velocidad de propagación en el macizo rocoso y eventualmente se conecta a superficie generando un cráter de subsidencia (**Ver Sección 2.5**). Dicho cráter se encuentra emplazado por detrás del avance de hundimiento. Con esto, podemos decir que en el sitio donde se encuentra el avance del hundimiento, nos encontramos en *Zona de Caving*. La **Figura 3.30** muestra un método de hundimiento convencional, el cual se utiliza actualmente en el Norte del Tercer Panel.

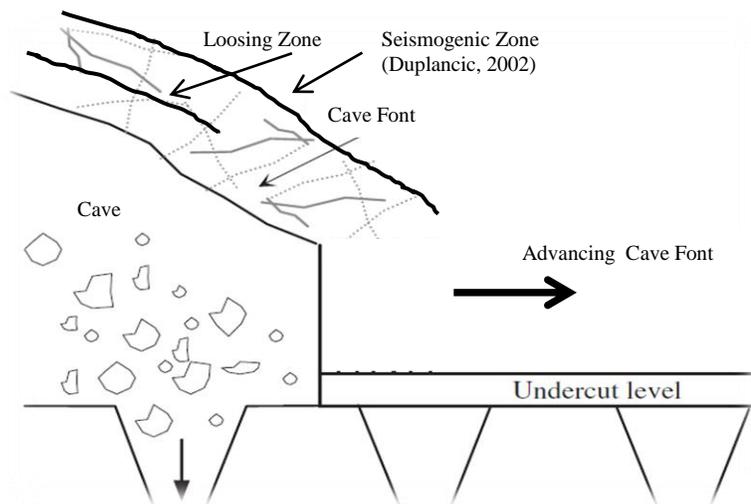


Figura 3.30. Esquema que identifica el frente de hundimiento en el sector de las Áreas 18 y 19, Nivel 16 Hundimiento, proceso en *Zona de Caving*, lugar donde se emplea el método de Hundimiento Convencional en la Mina Subterránea Río Blanco.

3.10.2. Método de Hundimiento para sector de Minería Continua

El método de hundimiento que se debería utilizar en el sector de Minería Continua es distinto, ya que el método de hundimiento que se implementará consistirá en un Hundimiento avanzado (Ver Capítulo 2.5.2.1) en donde la socavación se realizará antes que la apertura de zanjas, es posible ilustrarlo en la Figura 3.31.

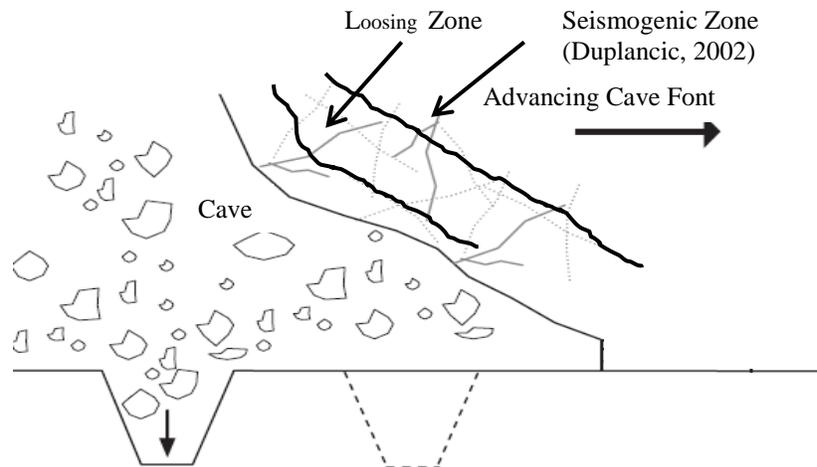


Figura 3.31. Esquema que identifica el método de explotación para el sector de Minería Continua.

Como mencionamos anteriormente, la roca *in-situ* (roca intacta que no ha sido perturbada por ningún efecto minero) ha sido afectada anteriormente por un pre-acondicionamiento donde su propósito es intervenir la roca en sus condiciones naturales de confinamiento. Antes de iniciar la explotación, entre sus principales ventajas se puede mencionar que produce una mejora en la velocidad de propagación del *caving* disminuyendo el tiempo de conexión con el cráter, y permite incrementar las velocidades de extracción del mineral primario, así como reducir el riesgo de colgadura (*airblast*), además modifica el comportamiento de la sismicidad del macizo, el grado de fragmentación y aminora el daño a la infraestructura (Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, Pre-acondicionamiento del Macizo Rocoso 1999-2012., 2012).



IV.- Metodología de Trabajo

4.1. Recolección y Análisis de la Información

Se procederá a realizar una lectura y análisis de material bibliográfico, documentos técnicos de instalación del sistema sísmico de años anteriores, reportes, cartillas sísmicas e informes existentes en el historial de la mina, además de cualquier tipo de documentación inherente al tema del estudio. Se complementará con la labor de entender y comprender el entorno mina, aprender métodos de explotación, conceptos en terreno, entre otros.

Además, se contemplan visitas en terreno, para adquirir un conocimiento sobre los equipos sísmicos emplazados en la mina, específicamente en el norte del III Panel, Nivel 16 Hundimiento. De aquí, se busca comprender la instalación y las funciones de cada componente del sistema sísmico. Y se incorporará también, conocer el estado geológico, geotectónico y geomecánico del sitio donde se emplaza el sistema sísmico.

4.2. Procesamiento y adquisición de los datos

Considerando que el sistema sísmico se encuentra en óptimo funcionamiento se procede a recopilar una base de datos, el cual consiste en un catálogo que resume toda la información registrada para cada evento procesado y aceptado en el desarrollo del “picado de onda”, proceso el cuál, se realiza para obtener la localización de los eventos sísmicos. Dicho archivo, es generado en un formato estándar ASCII con extensión .evp a partir del software *Jmts*, el detalle de cada parámetro que entrega este archivo es posible visualizarlo en **Tabla 4.8.**

Tabla 4.8. Descripción del catálogo de eventos sísmicos.

Número de Columna	Variable
1	Fecha (yyyymmdd)
2	Hora (hhmmss)
3	Error de Localización [m]
4	Coordenada mina X [m]
5	Coordenada mina Y [m]
6	Coordenada mina Z [m]
7	Momento [Nm]
8	Energía [J]
9	Momento P [Nm]
10	Energía P [J]
11	Momento S [Nm]
12	Energía S [J]
13	Nº de Asociación por Evento
14	Frecuencia de Esquina [Hz]
15	Caída de Esfuerzo Estático [Pa]
16	Caída de Esfuerzo Dinámico [Pa]
17	Desviación de Momento [Nm]
18	Desviación de Energía [J]

4.2.1. Procesador de eventos *Jmts*

Jmts corresponde a un programa de señales sísmicas. Está desarrollado por *IMS* y su función es, entre otras cosas, observar la forma de onda de los eventos capturados por los sensores sísmicos (geófonos) (**Ver Figura 4.32**) para poder realizar lo que se denomina “picado de ondas”, que consiste en verificar de forma manual el tiempo de llegada de la onda P y onda S del sensor correspondiente, se expone un ejemplo en la **Figura 4.33**, donde se visualizan las llegadas de estas ondas para cierto sensor. Con esto, se busca encontrar el menor error de localización posible, además de obtener una magnitud razonable de los eventos registrados por la red sísmica. Entre las funciones adicionales en este procesador existe el análisis espectral, polarización de las formas de onda, cálculo del tensor de momentos y mecanismo de foco, entre otros.

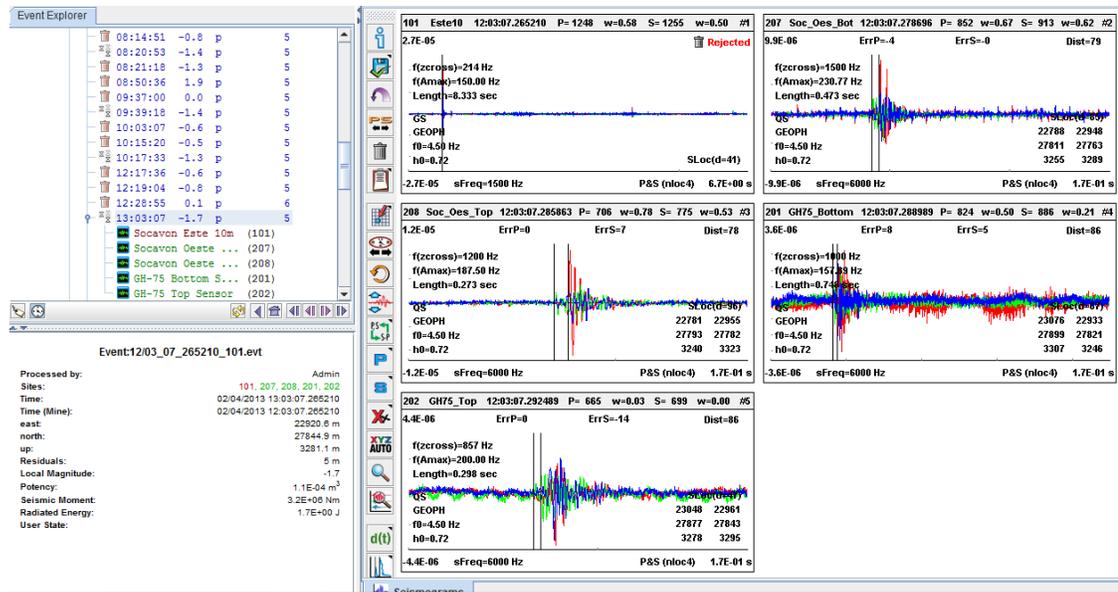


Figura 4.32. Visualización del procesador de eventos *Jmts*, para un evento que ha sido captado por 5 sensores, se ilustra las diferentes llegadas de las ondas en los tres ejes para cada geófono. En este caso, el evento ocurrió a las 13:03:07 con una magnitud de -1.7, el cuál fue aceptado y eventualmente procesado.

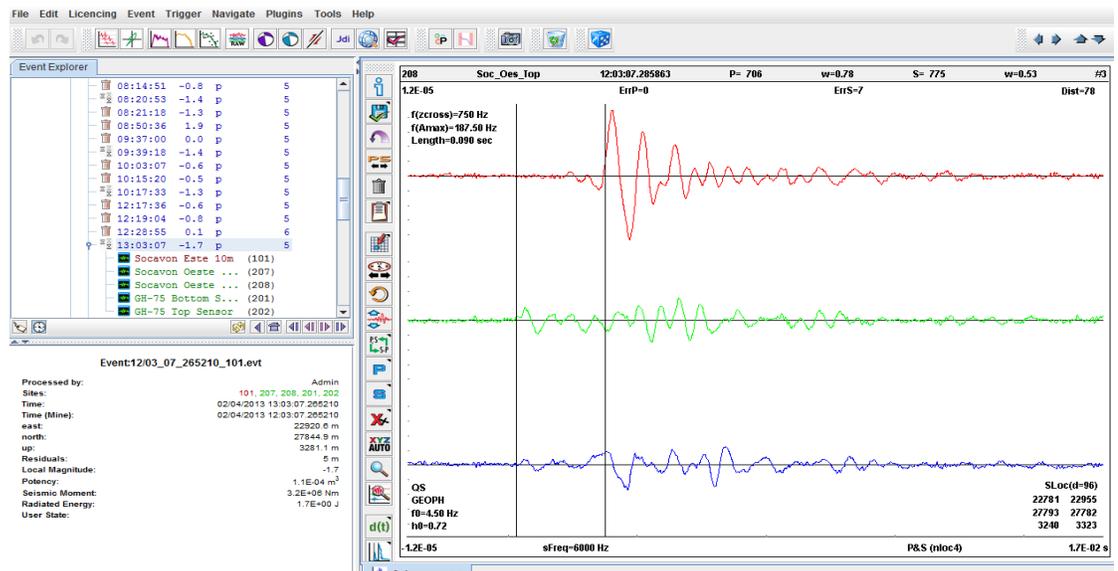


Figura 4.33. Se ilustran las llegadas de las ondas P y S para los ejes X, Y y Z para un sensor en particular, la llegada de la Onda P se muestra por la primera traza vertical, y la Onda S en la segunda traza.

El personal encargado de realizar este procesamiento de los eventos ocurridos a través del *software Jmts* debe procurar que se extraiga una muestra representativa del 30% del total de eventos registrados por el sistema, considerando los siguientes aspectos para una mayor calidad en la localización de los eventos.

- ❖ En primera instancia se seleccionan los eventos registrados por un mayor número de estaciones (Número de Asociación).
- ❖ Luego, se toman en cuenta por la calidad del evento (resonancia y nivel de ruido en los sismogramas).
- ❖ Y por último, visualizando la inestabilidad del evento al momento del proceso, su cercanía al volumen minero a analizar, entre otros.

4.3. Análisis de los datos

Parte del análisis de los datos consiste en la utilización del catálogo obtenido para una visualización de la localización generada a partir del procesamiento mencionado anteriormente. Utilizando el *software Jdi*, proporcionado por IMS (*Institute of Mine Seismology*) es posible observar dichos eventos sísmicos a través del catálogo evp. Además, existen versiones educacionales las cuales fueron utilizadas a lo largo de esta investigación, para realizar códigos, modificación de planos, y cálculos de programación, donde se emplearon los programas denominados “*Autocad*”, “*Matlab*” y “*Surfer*”.

4.3.1. Visualizador de eventos *Jdi*

Jdi es un programa de visualización de la información sísmica, permite observar tanto la localización de la sismicidad inducida como la distribución en el tiempo y en el espacio de distintos parámetros sísmicos (magnitud local, magnitud momento, índice de energía, volumen aparente, número de *Schmidt*, etc.). (**Ver Figura 4.34.**) Además, nos permite aplicar filtros espaciales y temporales a la ocurrencia de sismicidad en diferentes sectores, implementar planos en formato *AUTOCAD* (.dxf, .dwg) de los diferentes niveles de la mina e incluir modelamiento de estructuras geológicas (fallas, diaclasas, betillas, etc.), contacto primario-secundario, topografía, entre otros.

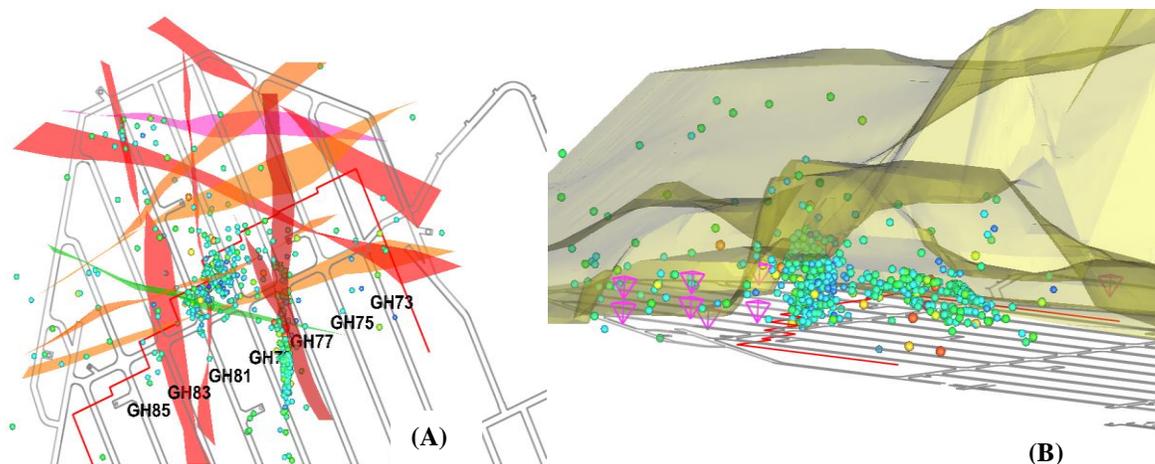


Figura 4.34. Se muestra el uso del Visualizador *Jdi*, en distintas perspectivas. Caso (a), se ilustra en una vista en planta la ocurrencia de sismicidad en el frente de Hundimiento, además de las diferentes estructuras que entran en juego en la zona de estudio. Caso (b) se ilustra en perfil la sismicidad inducida, los sensores en rosado, el avance del hundimiento en línea roja, y en color café la franja aproximada que separa la roca primaria de la roca secundaria.

4.4. Estimación de la Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada $FrEv_{esp}$

A partir de los eventos registrados durante el período 2012 - 2013 se evaluarán tres casos, para cada uno se desarrollará la estimación de la Frecuencia de eventos Acumulada Esperada, mencionando a continuación el período para cada caso.

- ❖ **Caso 1:** Set de datos correspondiente al 11 de Enero del 2012 al 26 de Junio del 2012.
- ❖ **Caso 2:** Set de datos correspondiente al 11 de Enero del 2012 al 31 de Agosto del 2012.
- ❖ **Caso 3:** Set de datos correspondiente al 01 de Enero del 2013 al 30 de Abril del 2013.

Cada caso es característico de una altura de columna, en donde el Caso 1 y 2 se encuentra entre 140 [m] y 190 [m] (sección XC-65, secciónXC-55) (Ortiz F. , 2011) desde el nivel de producción y para el Caso 3 varía entre 55 [m] a 60 [m] (sección XC -35, sección XC-25) desde el nivel de hundimiento (Ortiz, 2012).

Las áreas involucradas para cada caso se ilustran en la **Figura 4.35** y se caracterizan en la **Tabla 4.9**.

Tabla 4.9. Áreas involucradas para cada Caso		
Caso 1	Áreas 16 y 17	15858 [m ²] – 19440 [m ²]
Caso 2	Áreas 16 y 17	15858 [m ²] – 19440 [m ²]
Caso 3	Áreas 18 y 19	7240 [m ²] – 9660 [m ²]

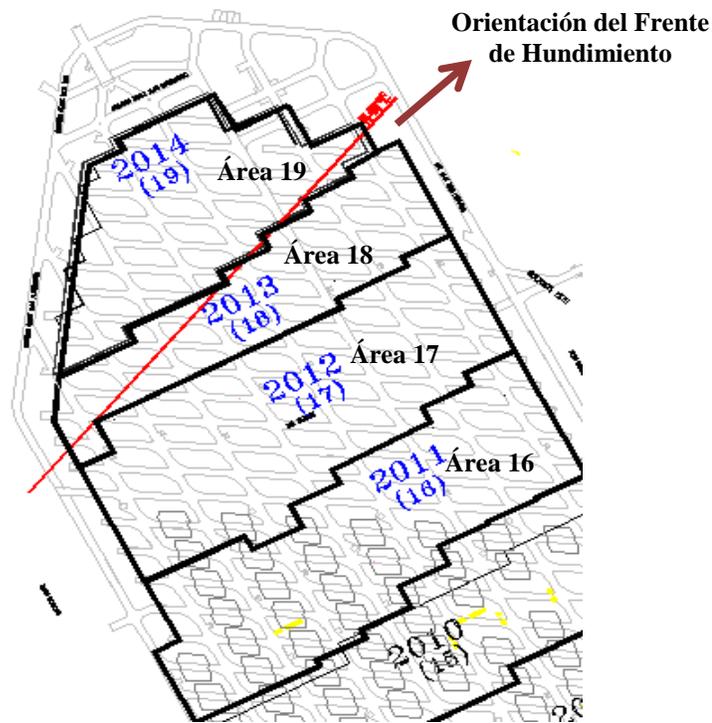


Figura 4.35. Ubicación de áreas emplazadas a lo largo del Tercer Panel de la mina subterránea, cada área tiene un año estipulado para su explotación.

La tasa promedio de eventos por unidad de volumen (γ) se desarrollará utilizando un aproximado del volumen activo tomando intervalos de 2 semanas. Así, se calculará el volumen activo de todos los intervalos dados para cada caso tomando el sector que visualice un clúster de sismicidad o haya mayor ocurrencia de eventos. De aquí, se obtendrá un promedio el cuál será representativo para todos los intervalos considerados en cada caso. De esta forma se obtendrá un γ que caracterice el volumen activo generado en cada caso propuesto.

Considerando lo expuesto anteriormente para cada caso con su respectivo set de datos será sometido a un proceso de ajuste utilizando rutinas en *Matlab*, de donde se obtendrán las constantes de proporcionalidad de socavación α_s , extracción α_e y apertura de zanjas α_z , que cumplan con RMS más bajos y que concuerden con la realidad geomecánica y geotécnica del macizo rocoso existente en el sector de estudio.

Posteriormente los mejores ajustes que cumplan con los casos descritos serán utilizados para estimar la Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada en el sector de Minería Continua.

De acuerdo a lo expuesto en la **Sección 3.2.5** de la presente tesis, necesitamos valores que representen el volumen perturbado por la extracción, socavación y apertura de zanjas. Para el Norte del Tercer Panel se utilizan valores reales proporcionados por el personal de Geomecánica de la mina Subterránea, y para el sector de Minería Continua estimaremos valores basándonos en planes de producción y hundimiento proporcionados por el personal encargado del proyecto.

Se estima que el sector de Minería Continua tendrá un hundimiento de 1500 a 1800 [m^2] mensuales lo que indica que se realizará una estimación del área a hundir en un período de 5.5 meses, en donde se resumirán en 11 períodos quincenales. El área que involucra el Proyecto Minería Continua es de ~ 7000 [m^2]. Además se proyectó una extracción de 5000 a 21000 [tpd] de manera de considerar un 100% de confiabilidad del sistema tomando el valor inferior, cantidad que representa el 14% de la producción total del Tercer Panel y el valor superior corresponde al 52% del total que actualmente produce el Tercer Panel, (Corporación Nacional del Cobre de Chile CODELCO - CHILE, 2012).

El sector de Minería Continua tiene un total de 32 zanjas a utilizar por lo que para cada apertura de zanjas se ha estimado lo siguiente, el volumen de las zanjas posee un área de 86.65 [m^2] y un volumen de 433.22 [m^3] (**Figura 4.36**), considerando que la densidad de la roca es de 2.7 [ton/m^3], se obtiene que por cada zanja que sea habilitada para la extracción se perturbarán 1169.70 [ton] del macizo rocoso, este valor se adecuará al plan de hundimiento donde la apertura de zanjas esta pronosticada a ciertos períodos.

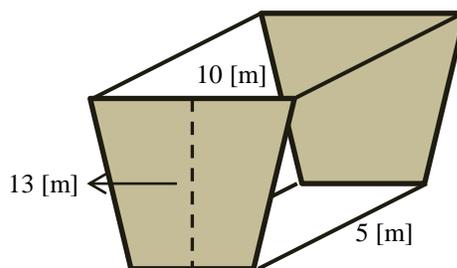


Figura 4.36. Esquema que se utilizó para aproximar el volumen perturbado por cada zanja.



V.- Resultados

5.1. Red de Monitoreo Sísmico, Área 18, Nivel 16 Hundimiento, Sector Norte III Panel.

Durante el mes de Enero del 2013, se da inicio a la instalación de una nueva distribución de arreglos tri-axiales en el Nivel 16 hundimiento, sector norte del III Panel, con el objeto de ser un apoyo a la operatividad minera, y también, generar un seguimiento continuo y controlado del avance de Hundimiento. A largo plazo, se espera que este sistema sea capaz de cuantificar e identificar los cambios generados en el macizo rocoso.

En minería, existen numerosos factores los cuales se debe tener en cuenta a la hora de analizar las posibles ubicaciones de estos sensores, para que de una u otra forma proporcionen un óptimo funcionamiento. Así, una de las principales interrogantes para que el monitoreo sísmico sea eficaz, asienta en la ubicación o lugar específico donde se emplazarán los sensores, teniendo en mente esto, se han tomado en cuenta los siguientes factores:

- ❖ **El volumen de interés y disposición del sector a monitorear:** Esto caracteriza el área en el cual se instalarán los geófonos, además de escoger la mejor distribución en diferentes cotas de altura para cada sensor.

En caso anteriores, la red sísmica se ha emplazado por sobre el nivel de Hundimiento, sitio donde se realizan los polvorazos fracturando la roca hasta la ruptura y generando el *caving*, este volumen quebrado es extraído por los brazos de producción dispuestos en el nivel de producción. Podemos ilustrar con las siguientes imágenes (**Figura 5.37**) el sector donde nos vemos envuelto, el denominado Tercer Panel junto a su fase de explotación de las áreas 18 y 19 (Norte del Tercer Panel), además de identificar el volumen el cual debemos considerar para nuestra futura disposición de sensores.

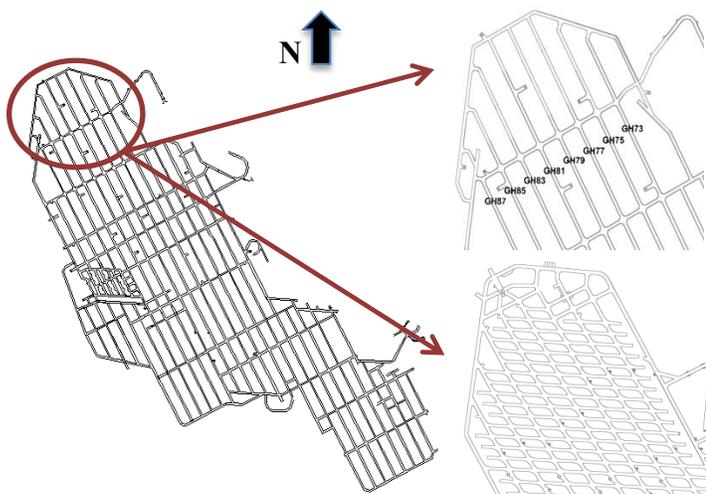


Figura 5.37. Se muestra el plano del Tercer Panel de la mina Subterránea Río Blanco, con la ubicación donde se quiere emplazar la nueva red sísmica (Norte del Tercer Panel), la distancia entre GH (galería de hundimiento) es de 26 [m]. La imagen superior derecha muestra el Nivel de Hundimiento y la inferior derecha el Nivel de Producción.

Para tener una idea de que alcance es el más apropiado para la ubicación de los sensores, es posible basarnos en estudios realizados en otras minas (Mendecki et al. A. , 1999), en donde se calcula la distancia máxima detectable en función de la magnitud para el caso de un acelerómetro y un geófono, medido en una mina de oro en Sudáfrica (**Ver Figura 5.38**). Entonces, para cierto volumen de estudio, se debe tener en cuenta la siguiente gráfica, donde los valores expuestos dependen de los niveles de ruido, condiciones ambientales establecidas por el operador, atenuación de la onda a través de la roca, y otros factores que de una u otra forma puedan variar la calidad de una red sísmica.

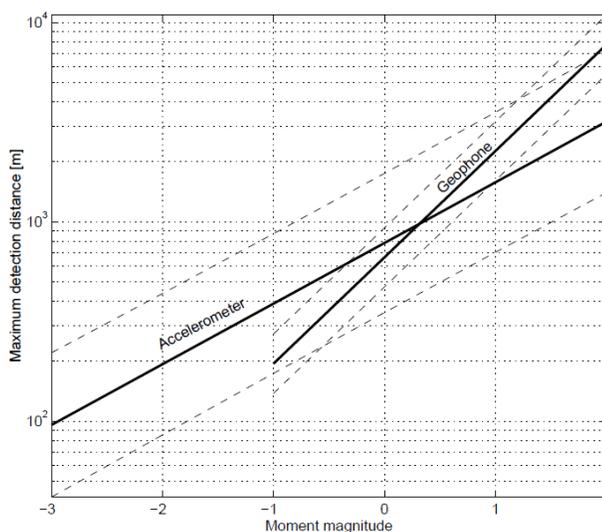


Figura 5.38. Distancia máxima la cual puede ser detectado un evento sísmico con una respectiva magnitud de momento dada, donde un acelerómetro posee menos variación que un geófono. Resultados obtenidos por datos de una mina de oro en Sudáfrica (Mendecki et al. A. , 1999).

- ❖ **El contacto primario-secundario y la ubicación de los sistemas estructurales mayores:** Ayuda a tener presente donde se encuentran las principales zonas críticas del macizo a monitorear, además de tener en cuenta el límite de roca primaria para la ubicación del sensor, ya que este no cumple una función eficiente si se ubica en roca secundaria.

En una vista en sección (**Figura 5.39**) es posible ilustrar la profundidad a la cual se encuentra el norte del tercer panel, además de elementos claves como lo son la topografía y el contacto primario secundario (**Sección 2.3.1**).

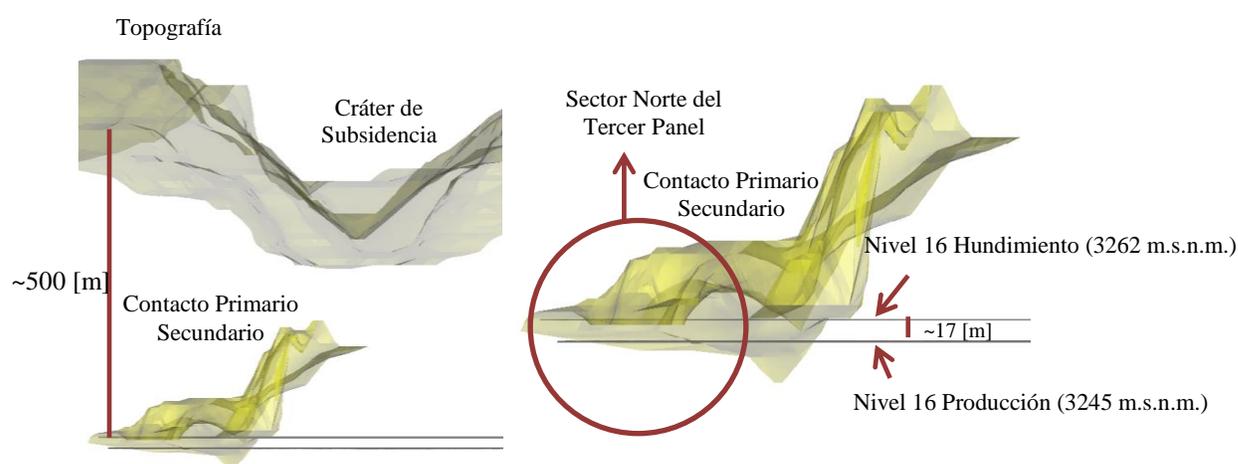


Figura 5.39. Vista en sección de la ubicación del Norte del Tercer Panel, junto al contacto primario-secundario.

- ❖ **El avance de la socavación en el periodo de monitoreo (2013-2014):** Cabe destacar que esta información es relevante para la futura interpretación de los datos registrados por la red sísmica, y la durabilidad de los sensores. Además, estos deben estar instalados en el entorno mismo del hundimiento.
- ❖ **Instalación de las unidades de adquisición de datos (QS's, SAQS y GS) y la distancia de éstas hacia el modem ubicado en el sector de la broquera:** Es importante la ubicación de estas componentes que forman parte del sistema sísmico, ya que deben ser situadas en un sector estable y sin riesgo de que el instrumental pueda ser dañado, así también los cables que separan la unidad de adquisición del sector de la broquera, deben estar libres del contacto con cables de alta tensión y protegidos del agua.

- ❖ **La transmisión, lectura y almacenamiento de la información en los diferentes módems hacia la vía Intranet:** En este punto, debemos procurar que los puntos de red sean estables, y la configuración realizada sea la óptima.

- ❖ **Sensibilidad de la red sísmica.**

Este parámetro se calcula para asumir un caso teórico donde la sensibilidad de una red sísmica se entiende como la distribución espacial de magnitudes mínimas que la determinada red de sensores “puede escuchar”. Es decir, cuáles son las amplitudes más pequeñas que el sistema instalado es capaz de detectar. Dichas amplitudes son “leídas” en términos de una magnitud mínima (Belmonte A. , 2012).

- ❖ **Resolución de la red sísmica:** La resolución de una red sísmica está asociada con el error que la distribución de sensores condiciona en el espacio donde potencialmente un evento sísmico puede ocurrir. Es decir, para todo el espacio que rodea la red de sensores, cuál es el error esperado si se asumen valores de *RMS* representativos (es decir, valores *RMS* observados).

5.1.1. Sensibilidad para el Sistema Sísmico 2013

La sensibilidad es una medida que se asocia a las amplitudes más bajas que la distribución de geófonos detecta, y se interpretan a través de magnitudes mínimas que el sistema es capaz de percibir.

Cada instrumento posee una asociación entre la señal y el ruido que la hace característica, generalmente esta impuesta por el fabricante del equipo. Para la actual red sísmica que posee geófonos tri-axiales de 4.5 Hz, se consideró un umbral de velocidad alrededor del $0.7e-4$ m/s (Mendecki et al. A. , 1999).

Por otro lado, el número de asociación el cual está configurado el sistema en condiciones óptimas es de 6 sensores, esto quiere decir que para que cierto evento sea registrado por la red, al menos, 6 sensores deben captar dicho evento. A medida que el avance de hundimiento se ha efectuado, es posible que perdamos sensores sísmicos ya que el volumen en el cual estaban instalados pasa a ser un volumen quebrado y luego, son arrastrados por la extracción, por lo que es necesario disminuir la exigencia del número de asociación ya que se dispondrá de menos geófonos. En general, la exigencia del número de asociación no debe ser menos de 4 sensores, de lo contrario, el sistema sísmico es acondicionado a escuchar mucho ruido. Cabe mencionar, que estos parámetros se asumen porque es la visión teórica de la que podemos interpretar la eficacia del sistema.

Se dispone de una distribución que cuenta con 10 geófonos desplegados por el área 18 del nivel 16 Hundimiento, III Panel, en la que se ilustra la distribución y sus respectivas ubicaciones en **Figura 5.40** y la **Tabla 5.10**.

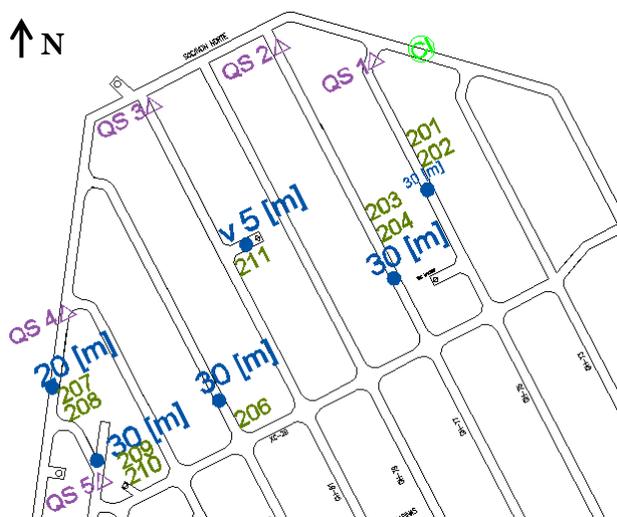


Figura 5.40. Plano el cual, muestra la ubicación de los sensores propuestos (puntos color azul y nombre del geófono en color verde) para la red sísmica con las alturas respectivas de cada pozo en metros (valores color azul).

Tabla 5.10. Muestra las coordenadas propuestas de los sensores para la red sísmica 2013, con su respectivo norte, este y cota, además de su ubicación y la conexión a la caja sísmica.

SITIO	UBICACIÓN	COORDENADA			CAJA SISMICA
		ESTE	NORTE	COTA	
201	GH-75	23004.68	27859.88	3276.58	QS1 (QS)
202				3286.58	
203	GH-77	22992.90	27826.22	3281.43	QS2 (GS)
204				3286.43	
206	GH-83	22928.17	27782.28	3286.96	QS3 (QS)
207	SOCAVÓN OESTE	22867.80	27787.36	3271.85	QS4 (QS)
208				3281.85	
209	REFUGIO	22882.00	27758.98	3277.31	QS5 (SAQS)
210				3287.31	
211	GH-81	22938.61	27837.49	3257	QS3 (GS)

Entonces, teniendo en cuenta todas las condiciones mencionadas anteriormente, es posible observar en la **Figura 5.41** la sensibilidad para distintas cotas.

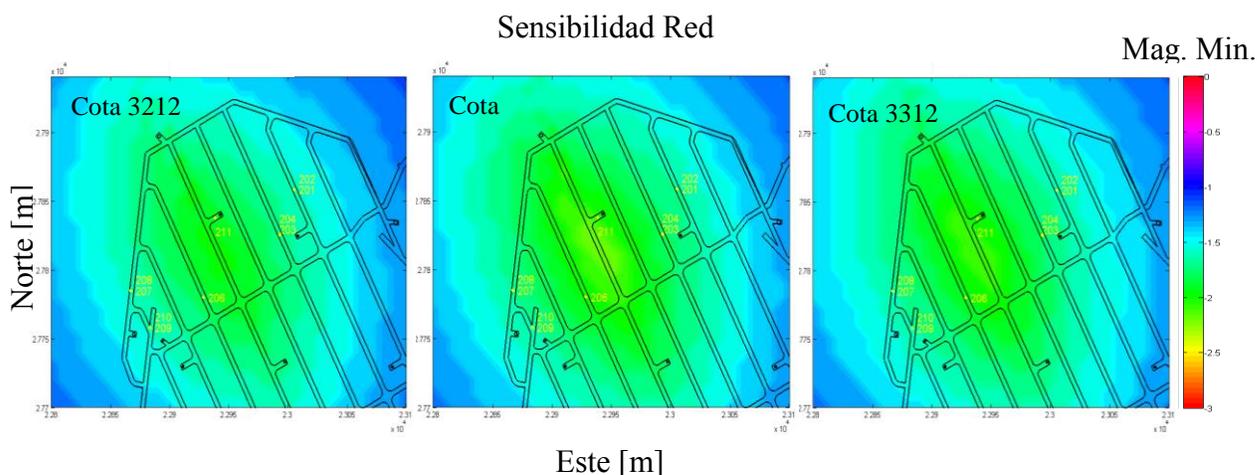


Figura 5.41. (a) Describe la sensibilidad a la cota 3212 con una magnitud mínima de -2.1 y con un promedio de -1.53. (b) Describe la sensibilidad a la cota 3262 con una magnitud mínima de -2.4 y un promedio de -1.59. (c) Describe la sensibilidad a la cota 3312 con una magnitud mínima de -2.1 y un promedio de -1.57.

Además, se realizó el procedimiento para un caso no favorable en donde se modificó el número de asociación a 5 sensores (**Ver Tabla 5.11**), los valores obtenidos corresponden a la sensibilidad registrada en términos de Magnitud mínima y Promedio de magnitud mínima para las cota 3312, 3262 y 3212. Para un caso en donde la exigencia de geófonos sea de 5, dicho de otro modo en donde el evento sea capturado y registrado con un mínimo de cinco sensores.

Tabla 5.11. Valores para un Número de Asociación de 5 sensores sísmicos.		
Cota	Promedio Magnitud Mínima	Magnitud Mínima
3312	-1.57	-2.30
3262	-1.60	-2.40
3212	-1.53	-2.30

De esto, es posible destacar que la magnitud mínima que podría llegar a captar la red sísmica en condiciones óptimas es de -2.4. Además, para una configuración con número de asociación 6, los valores son similares con los obtenidos con un número de asociación 5, por lo que facilita la situación cuando el avance de hundimiento se lleve a cabo o en el caso donde se pierdan geófonos y se deba por capacidad bajar esta exigencia, en definitiva la calidad de las localizaciones se mantiene.

5.1.2. Resolución para el Sistema Sísmico 2013

Por otra parte, la resolución se refleja a través de un error de localización espacial correspondiente a la red sísmica propuesta, dicho de otro modo, se asocia al error que la distribución de sensores condiciona en el espacio, en el cual un cierto evento puede ocurrir. Para este cálculo, se dispuso de residuales de la velocidad de onda P y onda S obtenidas desde la calibración de la red sísmica 2011 (Belmonte A. , 2012). (Proceso en que se obtienen las velocidades de onda P y onda S procesando un evento sísmico producido por una tronadura, el cual se sabe su ubicación con anterioridad, ajustando el menor error posible para dichas velocidades).

En primer lugar, en consideración a lo mencionado anteriormente, se ilustra el error de localización obtenido para cada eje norte (X), este (Y) y Vertical (Z). (Ver Figuras 5.42, 5.43 y 5.44)

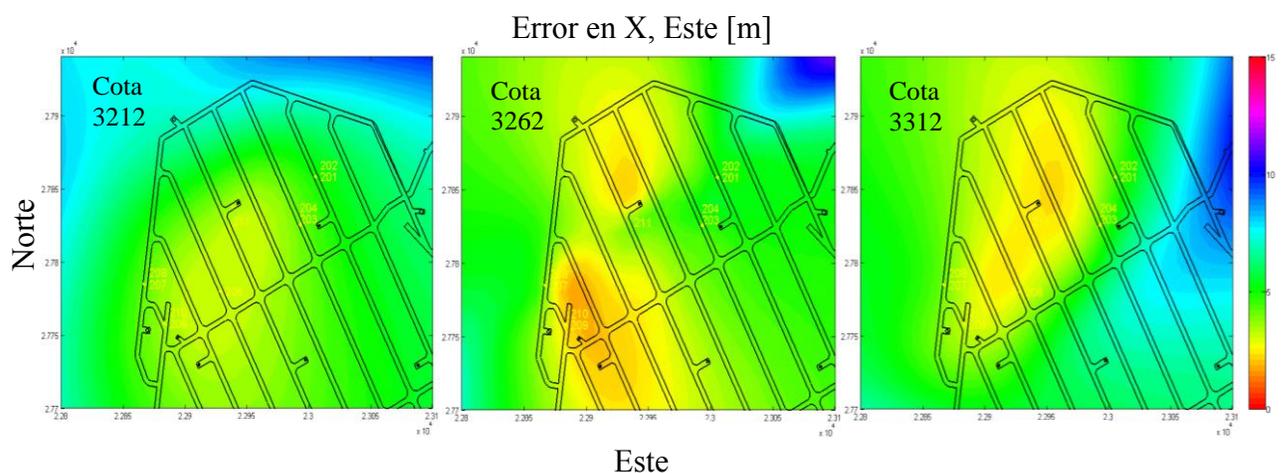


Figura 5.42. (a) Describe la resolución a la cota 3212 con un error de localización mínimo de 3.03 [m] y con un promedio de 5.66 [m]. (b) Describe la resolución a la cota 3262 con un error de localización de 1.71 [m] y un promedio de 4.34 [m]. (c) Describe la resolución a la cota 3312 con un error de localización de 2.31 [m] y un promedio de 5.15 [m].

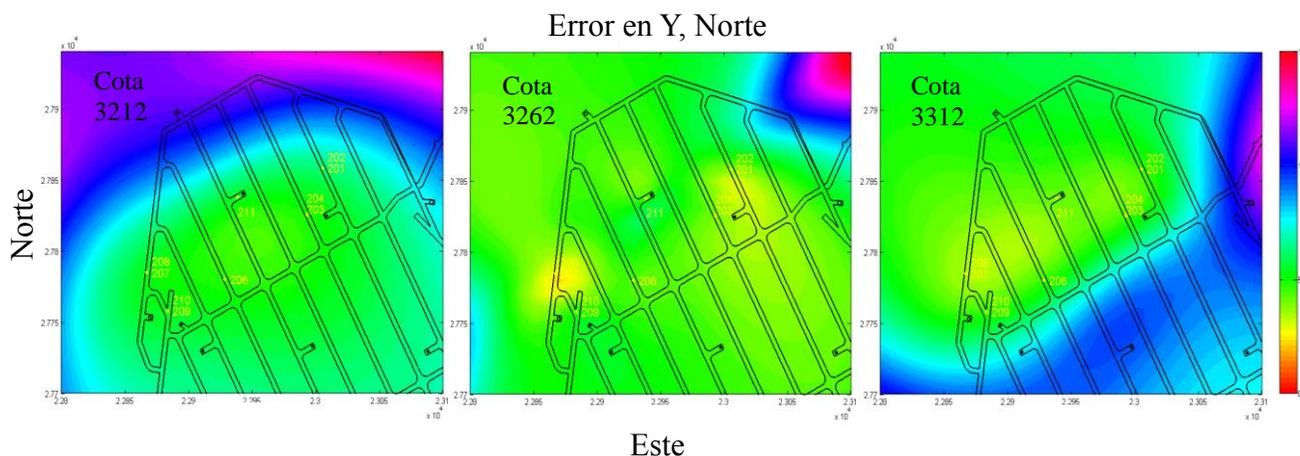


Figura 5.43. (a) Describe la resolución a la cota 3212 con un error de localización mínimo de 4.30 [m] y con un promedio de 7.88 [m]. (b) Describe la resolución a la cota 3262 con un error de localización de 5.17 [m] y un promedio de 2.30 [m]. (c) Describe la resolución a la cota 3312 con un error de localización de 6.64 [m] y un promedio de 3.30 [m].

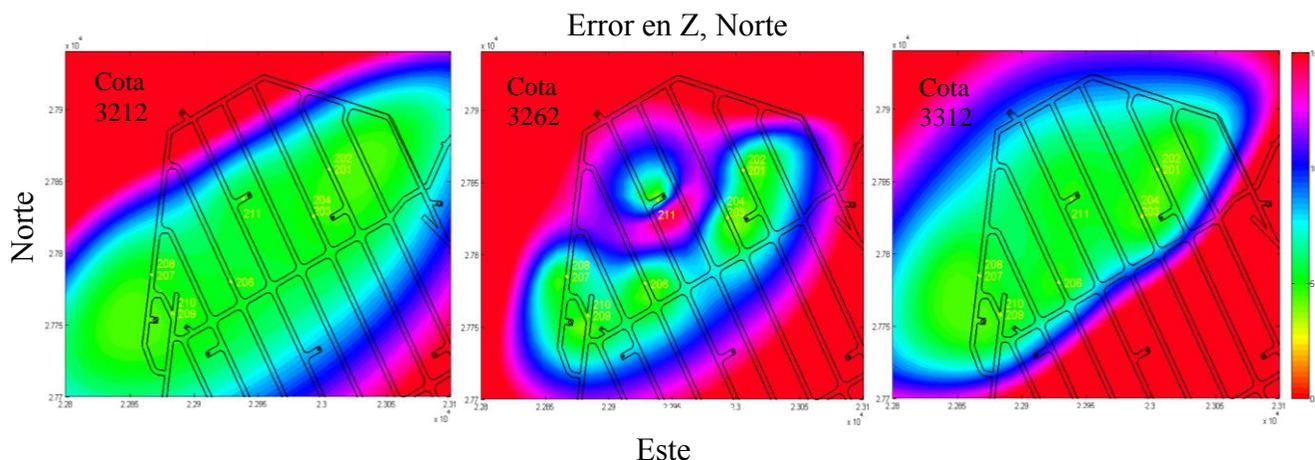


Figura 5.44. (a) Describe la resolución a la cota 3212 con una error de localización mínimo de 4.26 [m] y con un promedio de 11.07 [m]. (b) Describe la resolución a la cota 3262 con una error de localización de 3.50 [m] y un promedio de 14.08 [m]. (c) Describe la resolución a la cota 3312 con una error de localización de 4.22 [m] y un promedio de 12.83 [m].

La infraestructura a la que nos vemos insertos, compuesta por varios sub-niveles (producción, ventilación, inyección), de debe considerar al realizar una perforación para no entorpecer las variadas actividades laborales. Es por esto, que las capacidades proporcionadas por el personal que realiza las labores de perforación están sujetas a estos factores en donde los errores pueden aumentar hacia la vertical.

Análogo a las figuras anteriores, es posible apreciar de manera espacial el Error de Localización (**Figura 5.45**), ilustrando lo siguiente:

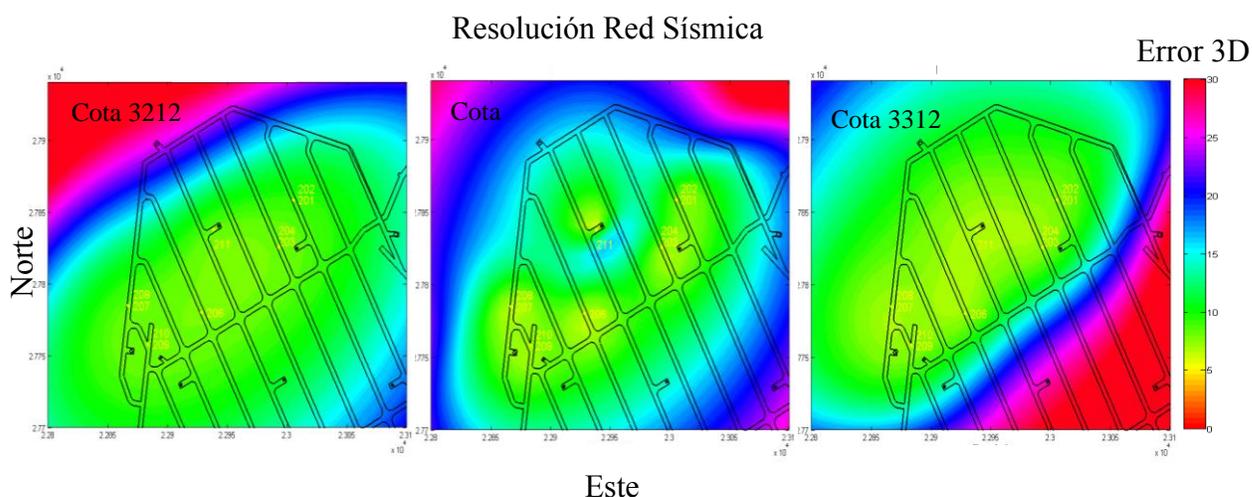


Figura 5.45. (a) Describe la resolución a la cota 3212 con una error de localización mínimo de 7.65 [m] y con un promedio de 15.06 [m]. (b) Describe la resolución a la cota 3262 con una error de localización de 6.22 [m] y un promedio de 15.83 [m]. (c) Describe la resolución a la cota 3312 con una error de localización de 6.89 [m] y un promedio de 15.66 [m].

Se puede observar que los errores de localización mínimos (aquellos de color verde, ~10 [m]) se encuentran concentradas hacia el centro del sector norte del Tercer Panel, nivel de Hundimiento (cota 3262) donde el error se mantiene, y de manera gráfica se muestra un contorno que rodea la distribución de sensores propuesta. A medida que la escala de colores cambia a colores más fuertes (colores rojos), los errores de localización aumentan su valor, situándose en lugares fuera de la distribución de sensores y al exterior del nivel de hundimiento.

Es válido mencionar que la propuesta dada de sensores es una distribución más bien homogénea o plana a lo largo de sus componentes norte y este, dado esto, se ilustra que los eventos que ocurren en cota contienen una inestabilidad en la localización y generan una zona donde se producen pocas posibilidades de triangular con exactitud (la altura en donde ocurrió el evento es mucho menor al largo entre los sensores sísmicos). Por lo tanto, se recomienda una búsqueda en la distribución de geófonos lo más homogénea posible a lo largo de todas sus componentes.

Con eventos obtenidos durante los meses de Febrero y Marzo del 2013, es posible apreciar la distribución de los errores de localización para eventos captados por más de 6 sensores (**Figura 5.46**), teniendo a disposición una red de 10 geófonos, los cuales la mayoría no superan un error de localización de 5 [m], podemos decir que la localización de cierto evento puede distribuirse alrededor de una galería de hundimiento, ya que esta posee dimensiones similares.

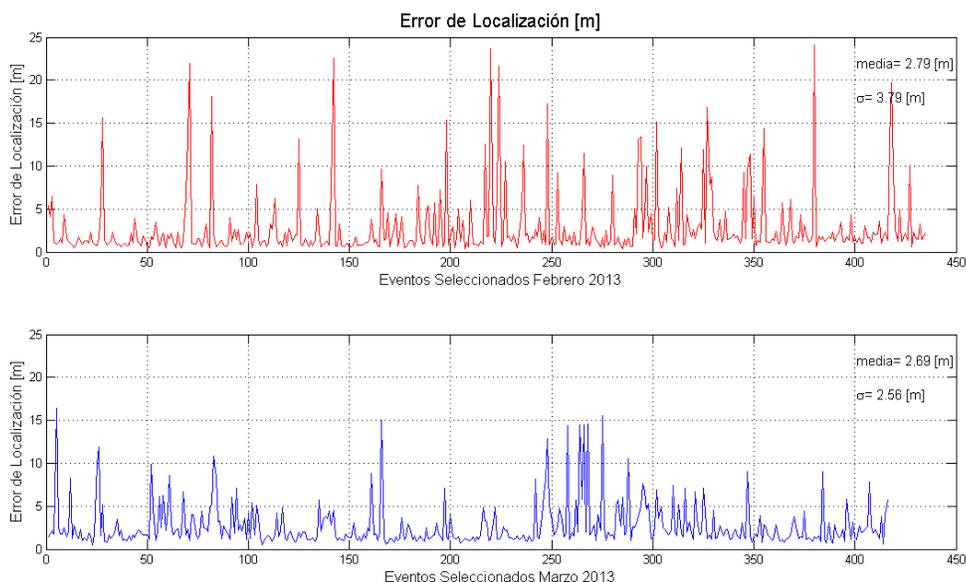


Figura 5.46. Distribución de los errores de localización para eventos ocurridos durante los meses de Febrero y Marzo del 2013, ambas medias no superan los 3 [m] de error de localización.

5.1.3. Ubicación de Sensores para Red Sísmica 2013

Poniendo en práctica todos los factores mencionados anteriormente, queda dispuesta la ubicación y cableado de diez geófonos tri-axiales y cinco cajas de adquisición de datos en el área 18, Nivel 16 de Hundimiento. Los sensores son enumerados del 201 al 211. Las cajas sísmicas se enumeran de la 1 a la 5, habiendo una unidad de adquisición GS, una SAQS y tres QS. Como se puede apreciar, cada caja sísmica “recibe” dos sensores (6 canales, una componente por canal).

A continuación, se ilustran en color azul los 10 puntos donde se realizaron pozos para la red sísmica 2013 - Área 18, luego los puntos en color rojo son aquellos que pertenecen a la red sísmica instalada el 2011 - Área 17, cada punto hace referencia a la longitud del pozo, y al costado en color amarillo aparece los nombres de los geófonos instalados en ese sitio respectivamente, y por último las unidades de adquisición de datos son aquellas que se muestran con color lila, cada una de ellas actualmente tiene 2 sensores conectados (Figura 5.47). Además, en la Tabla 5.12 se mencionan las ubicaciones respectivas para cada geófono en el nivel 16 Hundimiento, coordenadas para cada sensor (Este, Norte, Cota), y se muestra la altura del pozo la cual el geófono fue instalado y el sismómetro con el cual se conectará (Villegas D. , 2012).

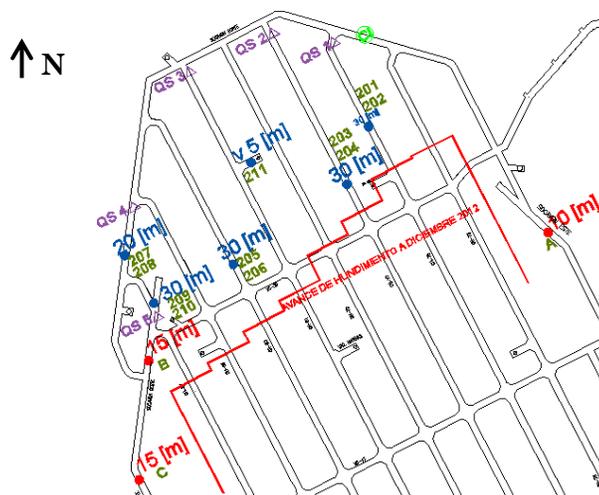


Figura 5.47. Distribución de geófonos, unidades de adquisición de datos para sistema sísmico 2013, además se muestra el avance del hundimiento para el año 2012 y sensores que quedan de la red sísmica anterior.

Tabla 5.12. Ubicación de nuevos sensores en Área 18.

SITIO	UBICACIÓN	COORDENADA			LONGITUD POZO	UBICACIÓN GEÓFONO (POZO)*	CAJA SISMICA
		ESTE	NORTE	COTA			
201	GH-75	23004.68	27859.88	3276.58	30	10	QS1 (QS)
202				3286.58			
203	GH-77	22992.90	27826.22	3281.43	30	15	QS2 (GS)
204				3286.43			
205	GH-83	22928.17	27782.28	3271.96	30	5	QS3 (QS)
206				3286.96			
207	SOCAVÓN OESTE	22867.80	27787.36	3271.85	20	5	QS4 (QS)
208				3281.85			
209	REFUGIO	22882.00	27758.98	3277.31	30	10	QS5 (SAQS)
210				3287.31			
211	GH-81	22938.61	27837.49	3257	5,5	5	QS2 (GS)

Además, en la **Tabla 5.13** se ilustran las respectivas coordenadas de los geófonos que quedaron en funcionamiento con la red sísmica implementada el año 2012.

Tabla 5.13. Ubicación de sensores sísmicos antiguos en Área 17.

SITIO	UBICACIÓN	COORDENADA			LONGITUD POZO	UBICACIÓN GEÓFONO (POZO)	CAJA SISMICA
		ESTE	NORTE	COTA			
A	SOCAVÓN ESTE	23107.52	27798.60	3272	10	10	QS1 (QS)
B	SOCAVÓN OESTE NORTE	22880.54	27725.03	3275	15	10	QS5 (QS)
C	SOCAVÓN OESTE SUR	22875.54	27657.26	3275	15	15	QS5 (QS)

A medida que se van disminuyendo los sensores, producto del avance del hundimiento, se conectarán los sensores pertenecientes a la red sísmica 2011, esto quiere decir que el sistema 2013 cuenta con la posibilidad de conectar 3 sensores del sistema 2012. Estos no fueron afectados por el proceso de hundimiento y extracción en el periodo 2012, quedando “intactos” y disponibles para sumarse al sistema actual.

5.1.4. Instalación de Sensores para Sistema Sísmico 2013

La instalación de sensores a lo largo del nivel 16 de hundimiento es vital para el funcionamiento óptimo de la red sísmica a lo largo del tiempo. El procedimiento inicia con el chequeo visual de cada pozo, considerando que estos han sido perforados con anterioridad. Aquí, se requiere una revisión previa en donde deberá estar en óptimas condiciones para proceder con el emplazamiento, no debe estar tapado, y no debe tener filtraciones hídricas, es posible apreciarlo en la **Figura 5.48**. Luego, se realiza una preparación de los sensores, aquellos geófonos que deban ser instalados a más de 10 metros se les debe generar una “mufa” (**Figura 5.49**), que consiste en la extensión del cable el cual contiene la conexión de las componentes, ya que estos de fábrica sólo contienen 15 metros de cable. Al insertar el segundo geófono (sensor ubicado a menor altura) se debe procurar que este no afecte o dañe a la mufa generada para el otro geófono (sensor ubicado a mayor altura) (**Figura 5.50**).



Figura 5.48. Pozo ubicado en la parte superior de la galería, el cual contiene su norte marcado, para posterior inyección del geófono.



Figura 5.49. Mufa que se genera para la extensión de los geófonos que se instalarán a una altura mayor de 10 [m].

En este proceso, las perforaciones se han diseñado de tal forma que quepan dos geófonos en alturas distintas (uno a 20 [m] y otro a 10 [m] u otra combinación). La inyección del geófono se realiza a través de varas metálicas de 2 [m] de longitud (**Figura 5.50.**), estas se van uniendo a medida que el sensor es introducido en el pozo. Además, el geófono va acompañado de un tubo PVC de color naranja, el cual, cumple

la función de ser un tubo de “despiche”, este da el aviso de cuando el lechado del pozo se ha completado (**Figura 5.52.**).

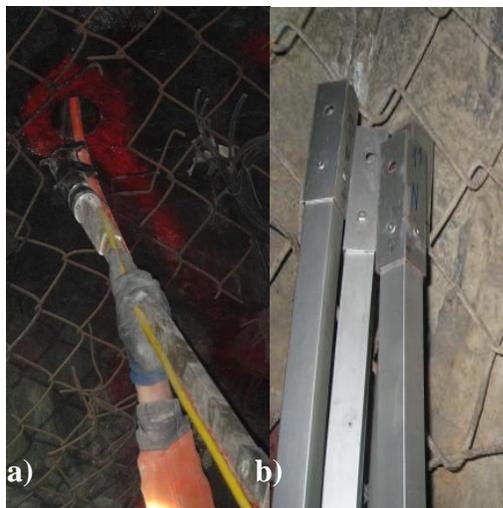


Figura 5.50. a) Se ilustra proceso en donde se introduce el geófono, teniendo en consideración que el norte marcado en la parte exterior de la galería debe coincidir con el norte indicado en el sensor sísmico. b) Varas que se utilizan para elevar el sensor por el interior del pozo, cada una de 2 [m] de longitud.

Cabe mencionar, que se debe lechar primero el geófono que se ubica a menor altura y luego el de mayor altura, esto para evitar que el lechado se desprenda y caiga por su peso generado. El personal encargado de esta actividad llama al proceso “Pre-taco”.

Durante el desarrollo de esta actividad (**Figura 5.53**) se debe considerar que el norte demarcado en el geófono debe coincidir con el norte marcado al superior de la galería por fuera del pozo. A medida que este se introduce se van incluyendo las varas de 2 [m], hasta cumplir con la altura deseada, para encajar el geófono en el pozo, se utilizan sus soportes que están a los costados, lo cuales se enganchan con parte del pozo (**Figura 5.51**).

Es válido mencionar, que para una mejor resolución y un menor error de localización en los datos obtenidos por los eventos sísmicos, se procede a instalar un geófono vertical descendente, lo que provocará una mejor distribución de la red sísmica, parte del proceso de instalación lo podemos ilustrar en la **Figura 5.54**.

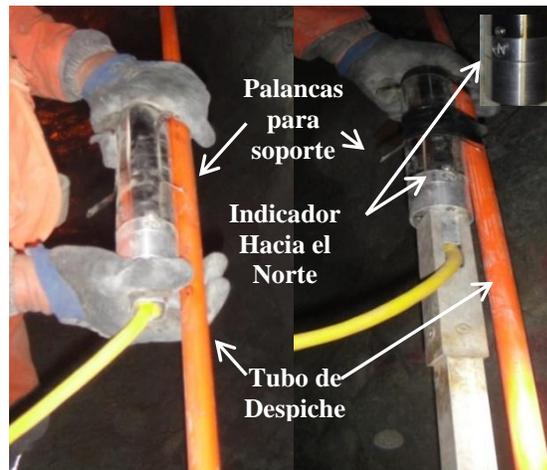


Figura 5.51. Postura del geófono con el tubo del despiche para su posterior instalación, se procura que el norte vaya siempre marcado para mantener la alineación.

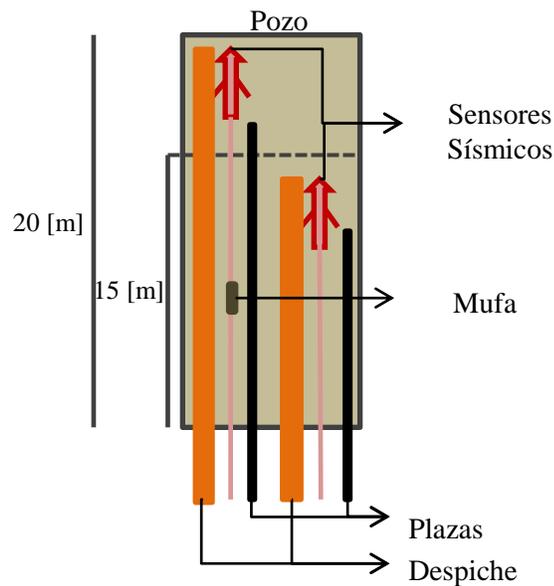


Figura 5.52. Esquema ilustrativo de la disposición de los sensores, los tubos de despiche y las plazas para el proceso de lechado dentro del pozo que se utilizará para la instalación de los geófonos.



Figura 5.53. Etapas de la introducción del geófono.



Figura 5.54. Se ilustra el pozo vertical descendente, y parte del proceso de instalación. El desarrollo de instalación es análogo al de un geófono vertical ascendente.

Para la inyección del lechado, se requiere de una bomba helicoidal, llamada “*Sprayboy*”, y se utilizan “*Planzas*” que corresponden a tubos de plástico (generalmente de color negro). Este lechado está compuesto por cemento (4,5 [kg]), agua (20 [litros]), y para obtener una sustancia más espesa y consistente le adhieren recortes de cartón (**Figura 5.55**). Esta sustancia es necesario realizarla alrededor de 3-4 veces, para completar el volumen teórico del pozo (96 [mm] x 25 [m]). Al concretar este desarrollo, se dobla el tubo y se mantiene sellado hasta que el lechado se haya secado (**Figura 5.56**).



Figura 5.55. Ilustración de bomba helicoidal utilizada para la inyección del lechado, sustancia compuesta de cemento y cartón.



Figura 5.56. La imagen de la izquierda ilustra el proceso de la inyección del segundo sensor el cual es instalado en la parte inferior del pozo. La imagen de la derecha muestra el proceso terminado, previo al sellado de los tubos para evitar la caída de cemento y para su posterior secado.

Realizados estos procesos, se procede a realizar el cableado desde la Junction box (puntos donde están ubicados los sensores, ver **Sección 3.6.1**) a las respectivas cajas sísmicas donde se encuentran las unidades de adquisición de datos. Durante la conexión es relevante acordar la disposición entre cada sensor y el sitio de conexión en la caja sísmica correspondiente. En el caso de las unidades QS y SAQS (**Figura 5.57**), se establece que el sensor ubicado en la cota menor (a lo largo de cada pozo hacia arriba) sea conectado al enlace “SEISMIC 1” (ROJO) y el sensor ubicado en la cota mayor sea conectado al enlace “SEISMIC 2” (AZUL). En el caso de la caja GS, el conector “SEISMIC 1” se identifica con el color AMARILLO y el conector “SEISMIC 2” con el color VERDE. Para el caso de la unidad GS, la disposición recién expuesta debe ser invertida (**Figura 5.58**).



Figura 5.57. A la derecha se observa la caja metálica instalada en la pared sur del Socavón Norte- que contiene entre el interruptor, conexión a red eléctrica y transformador, la unidad QS4 (caja “amarilla”). Debajo de esta unidad se encuentra la matriz que conecta cada cable que proviene de 2 sensores a los dos conectores SEISMIC 1 (derecha en QS, color rojo) y SEISMIC 2 (izquierda en QS, color azul).

Esta disposición es de importancia, ya que la definición de un conector “SEISMIC 1” o “SEISMIC 2” relaciona e identifica, en el proceso de configuración del sistema, la ubicación de cada sensor instalado con la

lectura que de éste se hará al momento de procesar las series de tiempo o sismogramas capturados por el mismo sistema. La identificación de cada sensor es asignada por los números 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210 y 211.

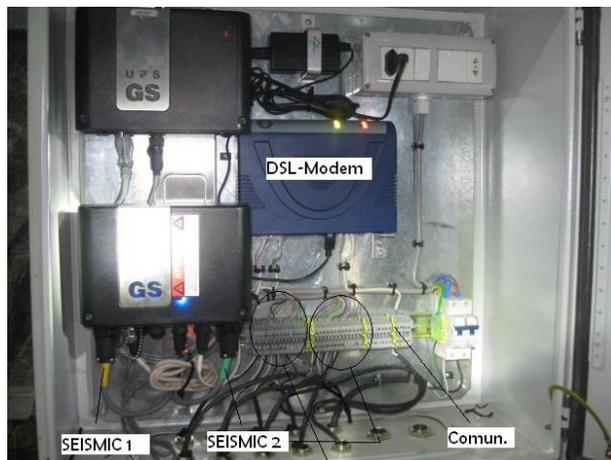


Figura 5.58. Se muestra unidad GS (caja negra inferior izquierdo), arriba la unidad UPS.

Las conexiones entre cada caja sísmica y la broquera mantienen la disposición genérica ya expuesta en la instalación del sistema de monitoreo sísmico 2012 (Belmonte A. , Informe 4 - Instalación Sistema de Monitoreo Sísmico, 2012). En el presente caso, cabe sólo considerar la nueva ubicación de sensores y su nueva relación con cada caja sísmica disponible.

En este sentido, se puede decir que se cuenta con 30 canales disponibles (RTS), equivalentes a la disposición de 10 sensores 3-Axiales (3 componentes cada sensor: X,Y,Z), distribuidos en 5 cajas sísmicas que permite la instalación de 6 canales cada uno, en este caso, 2 sensores 3-A (para más información ver **Sección 3.6.3**). Con esto, personal del Instituto Sismológico Minero (*Institute of Mine Seismology, ISS*) procede a realizar el levantamiento computacional de este, para su posterior uso.

5.1.5. Calibración Sistema Sísmico 2013

Al estar toda la red dispuesta, parte del apoyo que nos entrega el personal de Instituto Sismológico Minero (*Institute of Mine Seismology, ISS*) consiste en la calibración del sistema sísmico. El objetivo de esta fase, es considerar las velocidades de Onda P y Onda S más exactas y consistentes al sector de estudio para los posteriores cálculos que se realizan para la localización de los eventos. Para esto, se debe procesar un

evento sísmico el cuál con anterioridad se tenga conocimiento de la ubicación exacta en el cual se produjo, en donde las tronaduras son de gran apoyo.

Entonces, en palabras generales entendemos por tronadura, método el cual se realiza el carguido de explosivos para dar avance al desarrollo de una frente de Hundimiento donde el área involucrada es más grande que una quemada (**Anexo B**), este carguido se realiza por tiros donde entre tiros existe una distancia de 1.8 [m] en la pared de la galería (*Burden*), la ubicación exacta que utilizamos para la calibración corresponde a la del último tiro, y a través del personal encargado solicitamos un retardo de 10 segundos de este último, así es posible verificarlo con facilidad en el software *Jmts*.

El día del evento en el cuál se realizó la calibración corresponde al viernes 18 de enero del 2013, alrededor de las 20:00 hrs, en la **Figura 5.59** y **Figura 5.60** es posible ilustrar la siguiente respuesta de los sensores a dicho evento sin procesar.

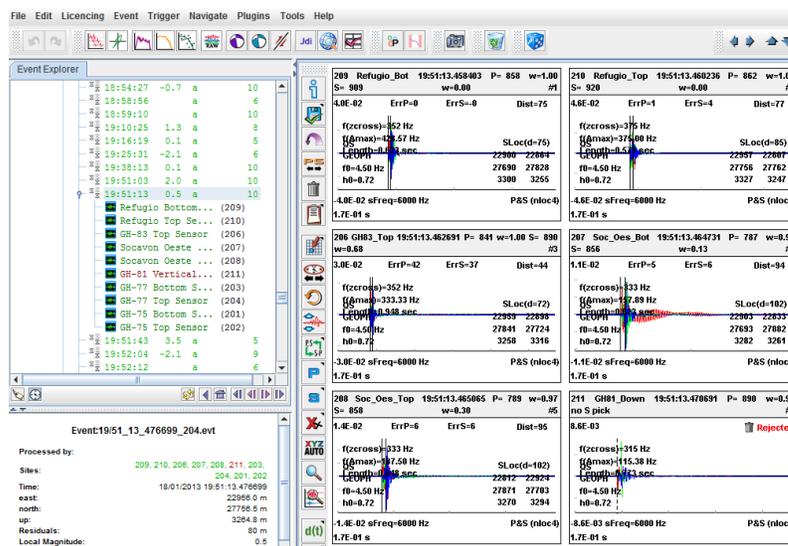


Figura 5.59. Respuesta de sensores 209, 210, 206, 207, 208, 211 para evento registrado por el último tiro de la tronadura realizada el día 18 de Enero.

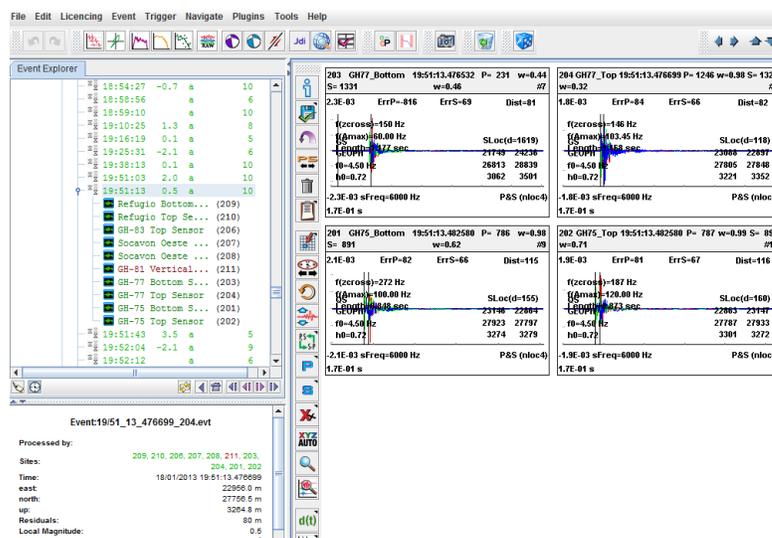


Figura 5.60. Respuesta de sensores 203, 204, 201, 202 para evento registrado por el último tiro de la tronadura realizada el día 18 de Enero.

La ubicación exacta del tiro de prueba es posible ilustrarla en la Figura 5.61 y se mencionan sus coordenadas en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14. Coordenadas del Tiro de Prueba GH-85		
Coordenada Mina X	Coordenada Mina Y	Coordenada Mina Z
22917.7	27741.9	3265.2

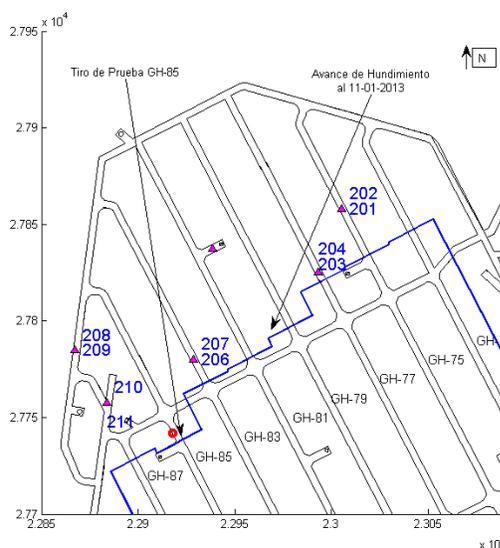


Figura 5.61. Ubicación exacta del tiro de prueba facilitado por personal de topografía, además se ilustra la distribución de sensores de la red sísmica 2013 y el avance del hundimiento a la fecha correspondiente.

Teniendo esta información, se identifica la señal sísmica correspondiente a la recibida por el tiro de prueba, este mismo se identifica por el último tiro del tren de tiros producido en la tronadura el cual se encuentra con un retardo de 10 segundos de sus antecesores. El evento ocurrió el 18 de Enero del 2013 a las 19:51:13 hrs. (Belmonte A. , Informe 18 - Instalación y Calibración Sistema Monitoreo Sísmico 2013-Andina-Udec, 2013).

Con las señales seleccionadas se identifican las llegadas de las fases de Onda P y Onda S, si es que existen, para estos eventos los 10 sensores capturaron la señal, se aprecian señales claras y con opción de ser picadas ambos tipos de onda (**Figura 5.63, Figura 5.64**). Con los tiempos de llegada obtenidos se localiza el evento y se revisa su relación con las coordenadas obtenidas en el tiro de prueba.

Si se confirma que el evento del análisis es correcto, se procede a ingresar manualmente las coordenadas del tiro de prueba y estimar las velocidades de propagación que ajustan el denominado *root mean square* (rms) según los picados realizados (fase P y S) (**Figura 5.62**) (Belmonte A. , Informe 18 - Instalación y Calibración Sistema Monitoreo Sísmico 2013-Andina-Udec, 2013).

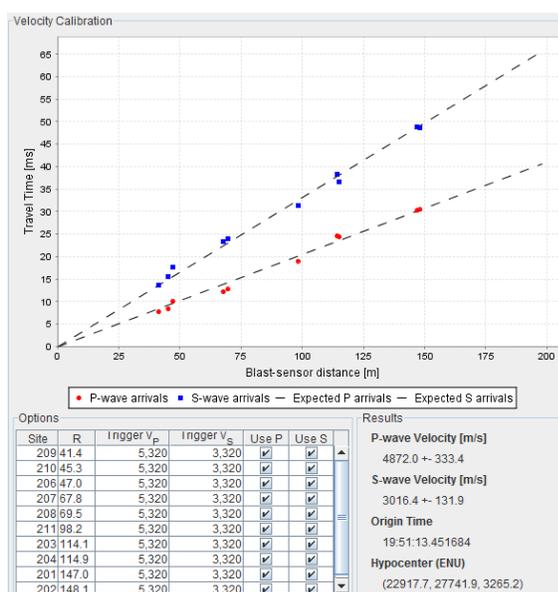


Figura 5.62. Se muestra el ajuste visual de la variable rms a través del ajuste de las curvas camino tiempo para las fases P (puntos rojos valores observados) y fases S (puntos azul valores observados). Las rectas representan un valor teórico o esperado. A la derecha abajo se observa el resultado del ajuste.

Las velocidades de propagación obtenidas son $V_p = 4872 \pm 333 [m/s]$ y $V_s = 3016 \pm 131 [m/s]$. Estos resultados se ajustan a un orden de velocidad de propagación esperado, considerando el error asignado (equivalente a un 7% y 4% respectivamente). Este error se traduce también en errores de localización esperados entorno a los 3 a 5 [m] en un plano XY y hasta 8 [m] en la coordenada Z. Además la

razón $V_p/V_s = 1.61$, corresponde a un valor bajo asociado usualmente a la roca de buena calidad. El rango usual de esta variable va desde 1.55 a 1.85 (Belmonte A. , Informe 18 - Instalación y Calibración Sistema Monitoreo Sísmico 2013-Andina-Udec, 2013).

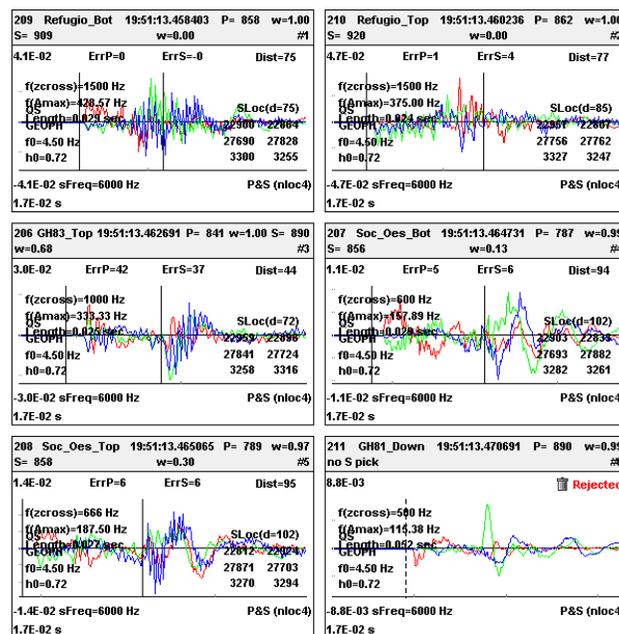


Figura 5.63. Muestra un acercamiento a los sensores de la primera página que despliega *Jmts* y el picado de ondas P y S realizados.

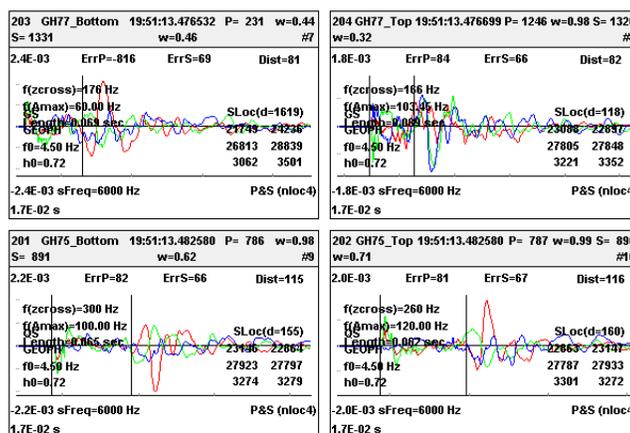


Figura 5.64. Se muestra un acercamiento a los sensores de la segunda página que despliega *Jmts* y el picado de ondas P y S realizados.

Durante este proceso se observa que al sacar estaciones cercas a este evento (sensor 211), la velocidad de Onda P aumenta, esto se asocia a que el efecto del polvorazo las estaciones cercanas al evento perciben la velocidad de onda de un material quebrado y no al de la roca in situ.

5.1.6. Chequeo del Sistema de Monitoreo Sísmico

Para que todo sistema se mantenga en óptimo funcionamiento a lo largo del tiempo, es necesario cada cierto período se realicen chequeos tanto técnicos (revisión de cables, mediciones de continuidad, etc.) como computacionales (utilizando *Run Time System, RTS ISS*), el cual avalen que nuestro sistema no ha sufrido fallas ni desperfectos dentro de la toma de datos.

5.1.6.1. Funcionamiento visual con *Run Time System, RTS*

Es posible realizar un chequeo diario de la red sísmica, utilizando el sistema RTS, teniendo en cuenta comandos sencillos, es posible comprender del estado de las unidades de adquisición de datos, si se encuentran caídas o estables, y tener claridad de las posibles advertencias o errores del sistema, entre otros. Entre los comandos involucrados en este proceso predominan los siguientes: “*statmon*”, “*longmon*”, “*ascmon*” y “*qualmon*”. Para mayor información de los comandos y funciones se puede acceder al **Anexo C**, Instrucciones Básicas Para Utilización del *Run Time System (RTS)*.

5.1.6.2. Esquema de red sísmica

El sistema sísmico 2013 actual posee 10 sensores y 5 unidades de adquisición de datos (QS, SAQS, GS). Cada uno de los sensores está conectado a estas unidades usando 6 conductores en tres cables de un par cada uno con malla y pantalla. Las unidades de adquisición se conectan y transmiten la señal digital al host central (milidon) a través de un cable multipar (6 pares), pasando por la caja de interconexión (C.I.) ubicada en el Nivel 16 de Hundimiento (Villegas D. , 2012).

Cada unidad sea QS, SAQS o GS posee el siguiente recorrido en el sector de la mina (**Figura 5.65**), los sensores se encuentran instalados en el sector del norte del tercer panel, cada uno de ellos se encuentra conectado a su “Junction box”.

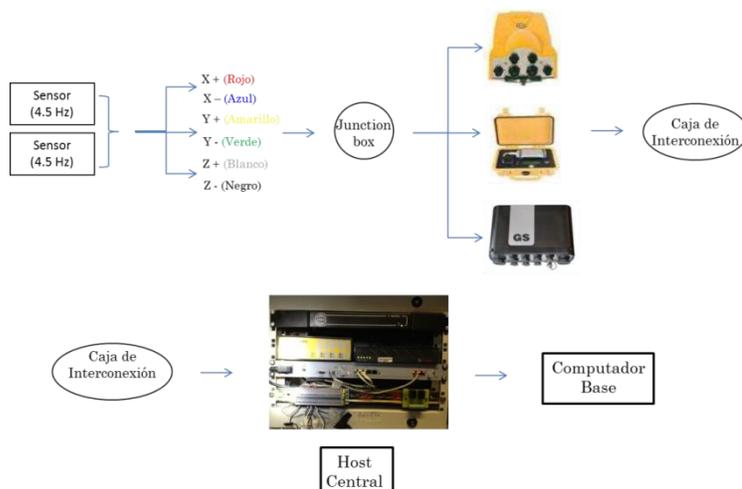


Figura 5.65. Esquema descriptivo de las conexiones existentes del sistema micro-sísmico.

Por ende, cada Junction box posee 3 cables de un par, que conduce los datos obtenidos por cada eje del arreglo tri-axial (x, y, z), para ser recibidos por la unidad de adquisición de datos. Desde este punto, debe salir un cable de comunicación el cual se dirigirá a la Caja de Interconexión (C.I.) esta tiene como objetivo reunir los cables de comunicación (5 par de cables de comunicación) procedentes de las distintas cajas sísmicas que alojan un par de sensores (un par por cada unidad) donde se protegen con un cable del tipo “conduit” y serán dirigidos al Host Central ubicado en el sector de la Broquera Nivel 16, Hundimiento. Y finalmente utilizando un punto de red es posible transmitir los datos hacia el computador base ubicada en la oficina del área de Geomecánica, Nivel 17, Barrio Cívico.

5.1.6.3. Puntos de Fallas entre el sensor y la Junction Box

Se debe procurar que las conexiones realizadas entre el sensor y la Junction Box coincidan y sea realizado de manera correcta, donde cada eje coincida con el par de cables de la Junction box, una imagen explicativa de esto se muestra en la **Sección 3.6.1, Figura 3.21.**

Por otro lado, es posible visualizar el funcionamiento de los sensores, a través de su respuesta electrónica, este chequeo se realiza a través del RTS, utilizando el comando “*trigger -i0*”, el cual genera un pulso electrónico a los sensores, manifestándose una respuesta en cada eje, el cual puede ser visto en el *Jmts*, de la siguiente forma:

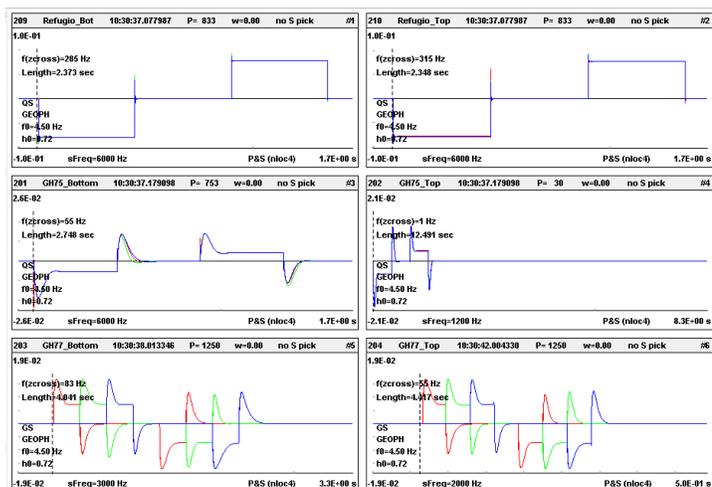


Figura 5.66. Visualización de pulso eléctrico generados en cada sensor, se puede ilustrar que los sensores 209 y 210 no muestran respuesta, puede deberse a que aún no están conectados a la unidad.

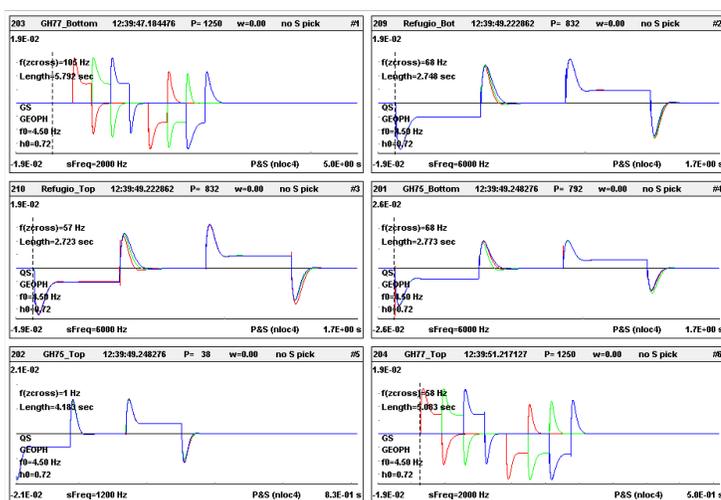


Figura 5.67. Visualización de pulsos eléctricos generados en cada sensor. Este caso muestra la correcta solución de cada sensor, la respuesta de los sensores 203 y 204 es diferente ya que el pulso es creado por la unidad de tipo GS, que corresponde a una unidad diferente, más moderna que la QS.

En el caso de que la respuesta se visualice distinta a la mostrada en la **Figura 5.66** o **Figura 5.67**, es probable que los cables estén conectados de manera incorrecta, se aconseja cambiar la conexión de los cables correspondientes a los ejes, es probable que el cable asociado a un eje positivo esté conectado en donde debería estar el eje negativo.

5.1.6.4. Puntos de Fallas entre la Unidad de Adquisición de Datos y la Caja de Interconexión

Un punto débil en las conexiones de la red sísmica es este, ya que los cables donde se transmite la comunicación quedan expuestos a las actividades operativas de la mina. Una vez que sabemos que una o varias unidades de adquisición están caídas, (visualizando el sistema RTS con “*statmon*”), debemos realizar un chequeo en terreno para encontrar el punto de falla, así, se recomienda seguir los siguientes pasos:

- ❖ Revisión de entrada de voltaje a la caja de adquisición de datos: en este punto se debe verificar que la entrada sea de 220 Volts, y además, que el transformador que alimenta la unidad de adquisición esté funcionando correctamente, en donde la salida debe estar entre 12-20 Volts. Sólo en el caso de la GS, se debe revisar que el modem DSL también este alimentado con 220 Volts, ya que este se alimenta de manera independiente a la unidad de adquisición de datos.
- ❖ Es bueno revisar el estado de las regletas ya que estas pueden con el tiempo perder su funcionalidad. Se pueden chequear realizando mediciones de continuidad en los puntos de salida. Si estas llegasen a no marcar continuidad, se procura realizar el cambio de regletas.
- ❖ En el caso de que los dos puntos anteriores estén en óptimo funcionamiento y no exista errores en la alimentación de las unidades, se procede a realizar puente en los cables de comunicación de cada unidad, luego se medirá continuidad en las salidas de la caja de interconexión. Con esto, nos aseguramos de que los cables no estén dañados y se encuentren en buenas condiciones para el traspaso de comunicación.

Sin embargo, puede existir el caso en el que el cable este sulfurado (filtración de aguas con óxido de cobre), y marque continuidad pero esta, no sea lo suficiente para la transferencia de información. En este caso, se aconseja realizar un chequeo en terreno donde se vaya visualizando el cable en el camino, asegurándose que no esté dañado y no haya ingresado agua por dentro de este. En caso de que un par de cables no marque continuidad, se procederá a realizar cambio de este, ya que debe encontrarse cortado en parte del trayecto.

Si el problema persiste, se aconseja extraer la unidad de adquisición de datos y conectarla directamente al host central, en donde se deberá chequear con el sistema RTS, si esta logra funcionar de forma directa o no.

5.1.6.5. Puntos de Fallas entre la Caja de Interconexión y el *Host* Central

Los posibles errores que sean encontrados en este trayecto, se manifiestan en cortes de comunicación en el cable del tipo *conduit*, entre el nivel 16 de Hundimiento al sector de la broquera, donde existe tránsito de máquinas y camionetas. Para chequear este recorrido, se aconseja, realizar puente de cables en un extremo (Caja de interconexión o *Host* central) y luego desde el otro extremo medir continuidad, en el caso de que en un par no se obtenga respuesta, es posible de que este cortado en alguna parte del trayecto, así es recomendable, realizar la revisión en terreno para encontrar la zona en donde se encuentra el corte (**Figura 5.68**).



Figura 5.68. Ejemplo de corte en el cable *conduit* en el trayecto desde la caja de interconexión al *host* central, generado por una máquina que operaba en el sector, produjo la caída de 3 cajas sísmicas.

5.1.6.6. Puntos de Fallas entre el *Host* Central al Computador Base

Las fallas relacionadas a este ítem, se basan en los puntos de red en los que se realiza el traspaso de información. Es posible que este tema presente errores, donde el sistema sísmico se caerá por completo, se visualiza una imagen a continuación en donde se realiza el chequeo diario en el sistema RTS, y las unidades de adquisición no muestran comunicación (**Figura 5.69**)

```

ISS Station Monitor V10.1.6 (138/and ) Mon Mar 11 13:52:51 996 Page 0.1.1
Started Mon Mar 11 12:31:51 2013 Polling Open sgrams 0
Site_id 2020212020202020212020
1 2 1 6 7 8 9 0 3 4
Xmitter.... 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5
Port.....
Enabled.... 1-- 2-- 3-- 4-- X--
Type..... Q-- Q-- Q-- Q-- G--
State..... ■--■--■--■--■--
Activity...
Level..... 39393939393939393939
Last Tran..3b 3b 3b 3b 3d
Last Recv..
Triggers...
Buffer.....
Block.....
Pending... 2 2 2 2 1
Timeouts... 1 1 1 1 1
Failures...
Version... 62--62--62--62--49--
Short.... | G G G G S S R R G G
Name..... | H H H H o o e e H H
          | 7 7 8 8 c c f f 7 7
          | 5 5 1 3 _ _ u 7 7
Connected to 10.37.46.49 SSH2 - aes128-cbc - hmac-md5 - n( 80x24

```

Figura 5.69. Estado del sísmico, utilizando “statmon” en el sistema RTS, el cual ilustra un evidente error en el sistema, asociado al desperfecto ocurrido por el punto de red.

En este caso, se debe informar el desperfecto al personal a cargo de los puntos de red, para su posterior revisión técnica y posible modificación.

5.2. Análisis Período 2012-2013

Durante el mes de noviembre del año 2012 hasta el mes de mayo del 2013, se da apoyo al seguimiento y control del sistema de monitoreo micro sísmico emplazado en el nivel 16 Hundimiento del Tercer Panel de la Mina Subterránea Río Blanco, tomando registro del comportamiento del macizo rocoso para su futura interpretación. Para esto, se constituyen cartillas, las cuales reúnen toda la información con respecto a la ocurrencia de sismicidad en un intervalo de tiempo de dos semanas, se involucran aspectos como: la distribución de la sismicidad con respecto a la fecha de ocurrencia, la distribución de sismicidad con respecto a la magnitud local del evento, la distribución asociada a la estructuras geológicas existentes en la zona de monitoreo, la ocurrencia de sismicidad asociada a la extracción y a la socavación, la variabilidad del índice de energía y el volumen aparente acumulado, entre otros.

5.2.1. Frecuencia de Eventos

En la **Figura 5.70** podemos ilustrar la ocurrencia de eventos durante el período desde el 11 de Enero al 31 de Agosto del 2012, contempla una ocurrencia de 12838 eventos procesados manualmente, en donde los meses de Junio, Julio y Agosto concentran la mayoría de ellos con un valor de 11277 eventos. La notable variabilidad en la ocurrencia de eventos puede ser atribuida a dos efectos, en primer lugar, a fines del mes de junio se modifica el criterio de procesamiento manual, en el cual una mayor cantidad de eventos son aceptados por el sistema sísmico y así procesados manualmente, y en segundo lugar, efectivamente se observa un aumento en las tasas de socavación, esto puede ser mostrado en la **Figura 5.72**. Con esto, visualizando la ocurrencia descrita por el programa RTS, es posible comprobar que la tasa de eventos capturados hasta fines de junio 2012 es proporcional a la tasa de eventos aceptados y graficados.

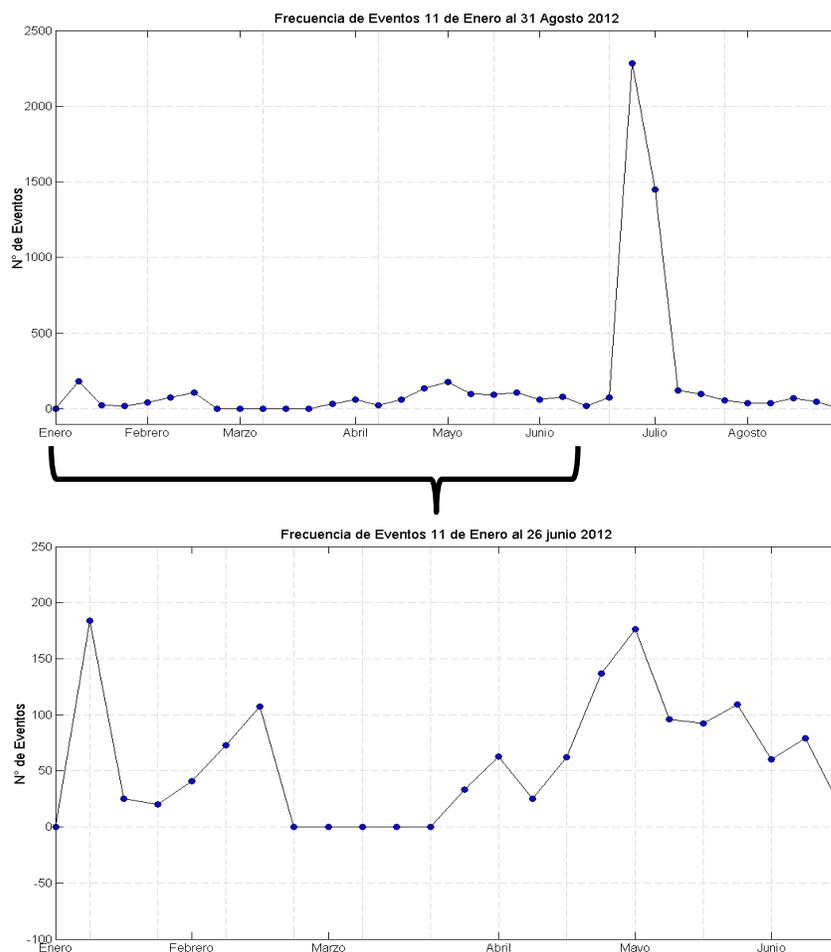


Figura 5.70. Frecuencia de Eventos observada para el período Enero-Agosto 2012, destacando la variabilidad de los meses Enero-Junio.

Por otro lado, se puede observar en la **Figura 5.71** la frecuencia de eventos para el período Enero – Abril 2013, contempla una ocurrencia de 2421 eventos procesados manualmente, se alcanza un máximo de 486 eventos día, y se estima que el promedio es de 135 eventos procesados por día.

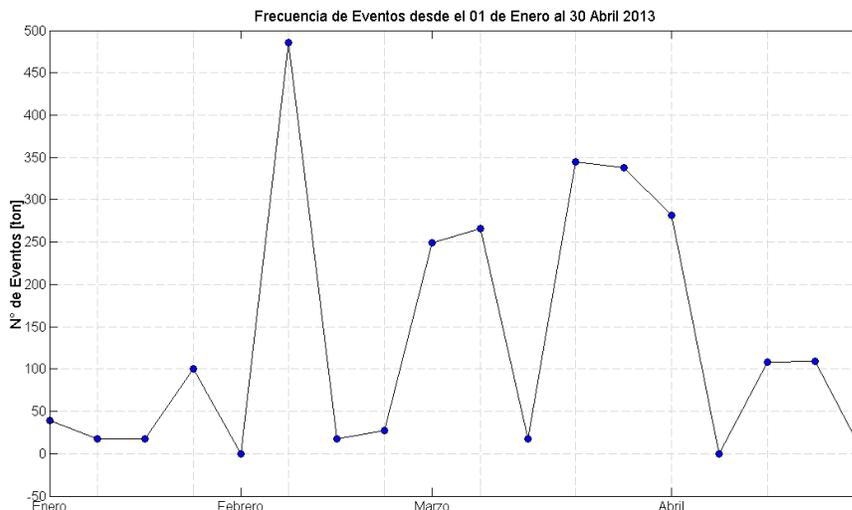


Figura 5.71. Frecuencia de Eventos observada para el período Enero – Abril 2013.

5.2.2. Hundimiento Parcial

En cuanto a la socavación temporal ocurrida en el período de Enero – Agosto 2012, podemos mencionar el área total socavada es de 17730 m^2 , con un máximo en Julio con 10715 m^2 . La socavación se desarrolla a una tasa más o menos constante en el orden de $300\text{-}400 \text{ m}^2$ por quemada, su variabilidad se muestra en la Figura 5.72, además, se observa en dicha figura que el hundimiento fue iniciado a finales del mes de Marzo, manteniéndose en receso los primeros meses del año.

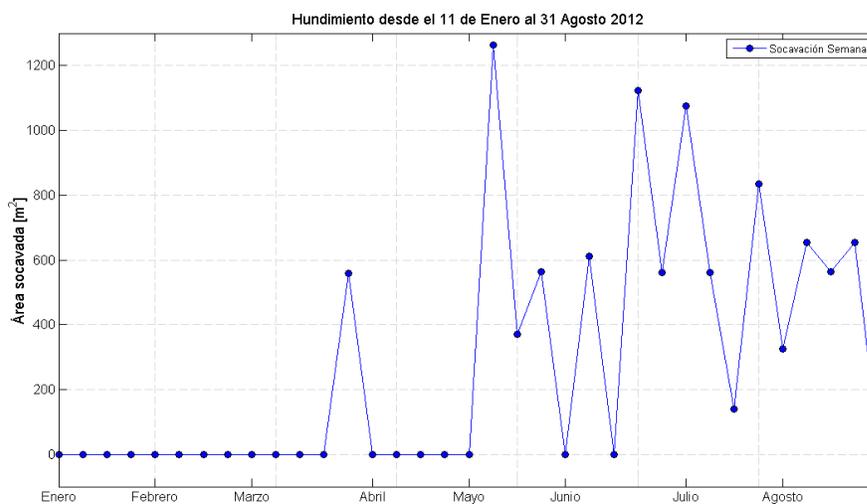


Figura 5.72. Hundimiento durante el período Enero – Agosto 2012. Para una mejor visualización se han tomado los valores acumulados por semana.

Cabe mencionar, que el período de tiempo en donde la sismicidad aumenta abruptamente, coincide con el aumento en la socavación en el mes de Junio.

Por otro lado, en la **Figura 5.73** se muestra el Hundimiento observado durante el período 2013, podemos señalar que el área total socavada fue de 3656 m^2 , con un máximo en el mes de Marzo con 1406 m^2 . A lo largo de este período, se observa que la socavación se desarrolla a una tasa más o menos constante en el orden de $250\text{-}350 \text{ m}^2$ por quemada, una tasa menor a la observada durante el período Enero – Agosto 2012. La socavación se detiene a principios del mes de Abril por motivos operacionales.

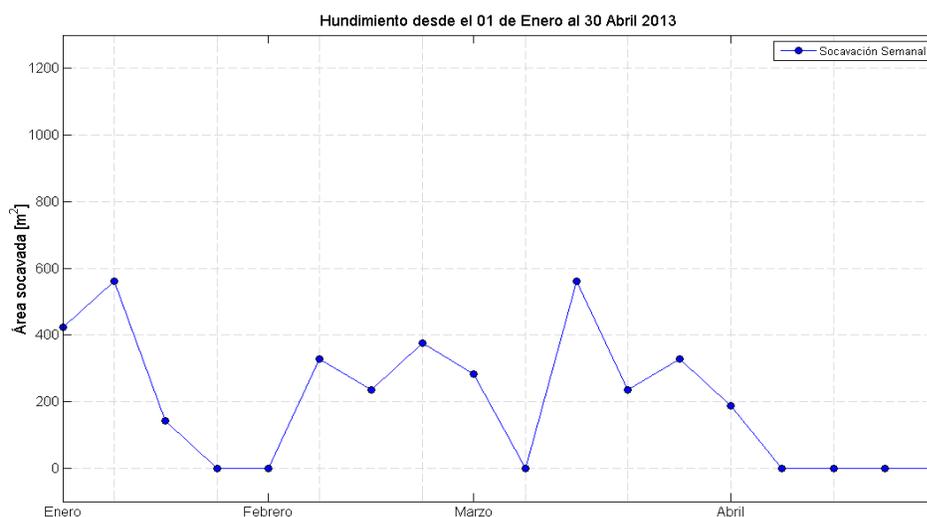


Figura 5.73. Hundimiento durante el período Enero – Abril 2013.

5.2.3. Extracción Parcial

La distribución temporal de la extracción para el período 2012 puede visualizarse en la **Figura 5.74**. De aquí, podemos mencionar que se ilustra la tasa de extracción acumulada en toneladas por quincenas, obteniendo un total de $8 \cdot 10^6$ toneladas durante el período y un máximo al inicio del mes de Enero de $8 \cdot 10^5$ toneladas extraídas. Los valores fluctúan entorno a las 500 mil toneladas, aumentando en un orden del 20% en el período Mayo a Agosto c/r al de Enero-Abril 2012.

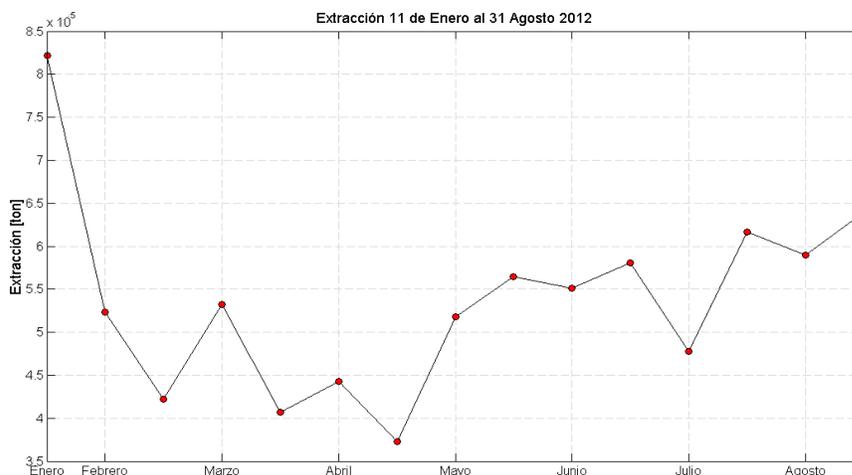


Figura 5.74. Extracción temporal observada durante el período Enero – Agosto 2012.

De la misma forma, podemos apreciar en la **Figura 5.75** la extracción temporal observada para el período Enero –Abril 2013, en donde se estima un total de $4 \cdot 10^6$ toneladas, la mitad que lo observado en el período 2012, esto puede atribuirse a la disminución de la socavación ya que el área a hundir (área 18) es mucho menor que la correspondiente al 2012 (área 16 - área 17) y también a que el período considerado es menor. Al igual que el período anterior, los valores fluctúan entorno a las 500 mil toneladas, manteniéndose una extracción lineal a lo largo del período mencionado.

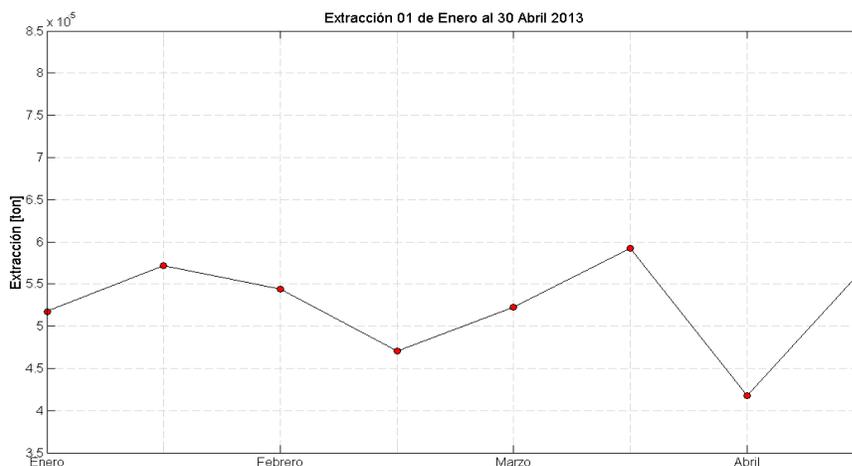


Figura 5.75. Extracción temporal observada durante el período Enero – Abril 2013.

5.2.4. Frecuencia de Eventos Acumulada, Socavación Acumulada y Extracción Acumulada

Uno de los objetivos contemplados en este trabajo fue establecer asociaciones entre la ocurrencia de eventos y parámetros mineros como lo son la socavación y la extracción, es por esto, que en la **Figura 5.76** y **Figura 5.77** se ilustra la variabilidad acumulada del hundimiento, la extracción y la frecuencia de eventos para ambos período establecidos. Cabe mencionar, que las cantidades acumuladas obtenidas corresponden a valores tomados de las quincenas para cada período.

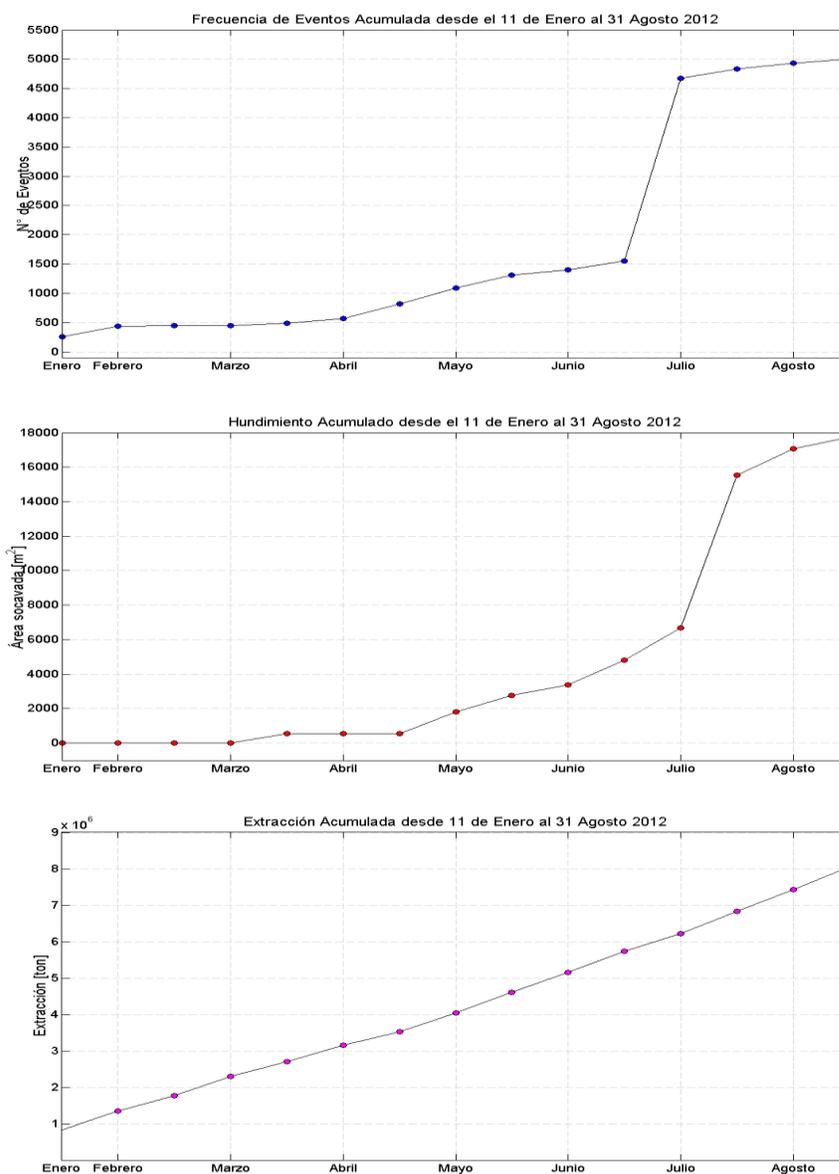


Figura 5.76. Frecuencia de Eventos Acumulada (imagen superior), Hundimiento Acumulado (imagen intermedia) y Extracción Acumulada (imagen inferior) para el período desde el 11 de Enero al 31 Agosto del 2012.

Durante el período desde el 11 de Enero al 31 de Agosto del 2012 se puede observar que el aumento de la frecuencia de eventos para los meses de Junio, Julio y Agosto tiene directa relación con el aumento en la socavación. Y es posible mencionar que la extracción aumenta de manera constante a lo largo de los meses.

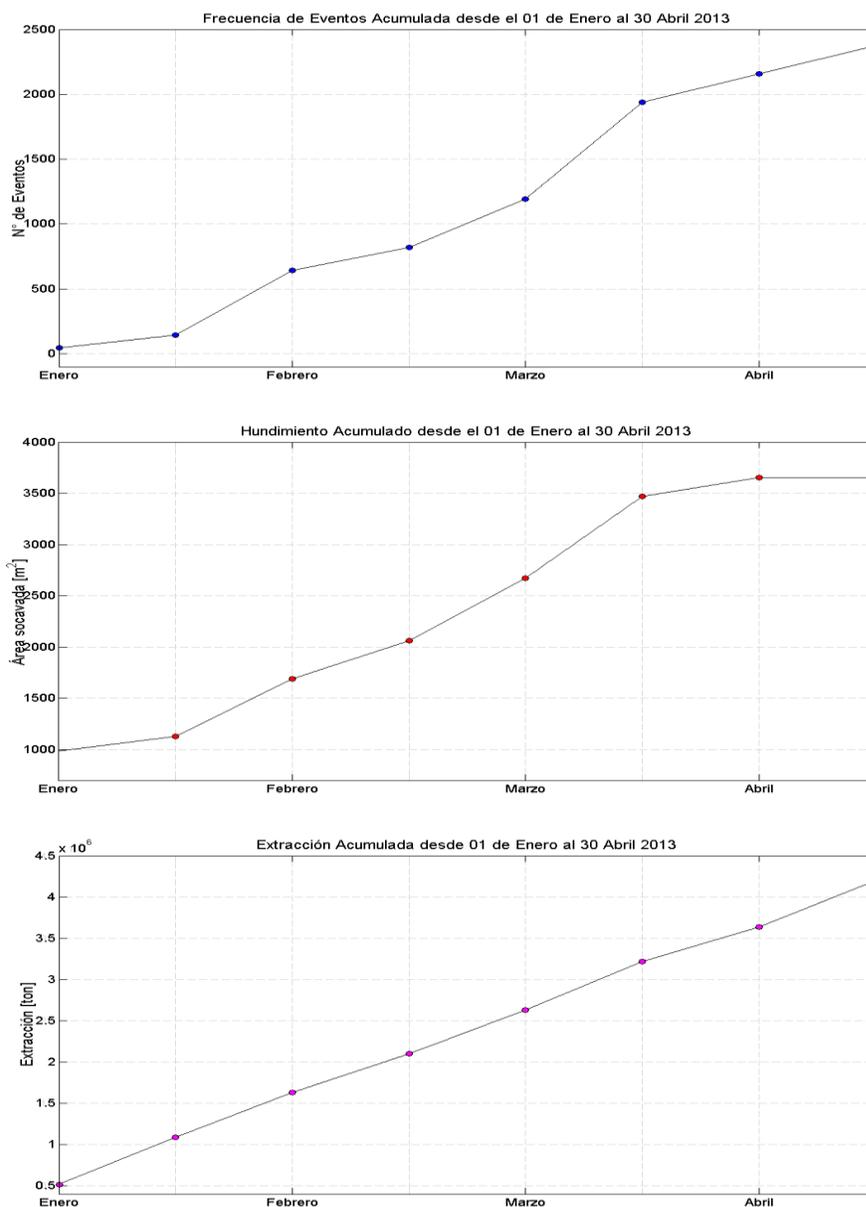


Figura 5.77. Frecuencia de Eventos Acumulada (imagen superior), Hundimiento Acumulado (imagen intermedia) y Extracción Acumulada (imagen inferior) para el período desde el 01 de Enero al 30 Abril del 2013.

Al igual que el período anterior, se ilustra que durante el período desde el 01 de Enero al 30 de Abril del 2013 el aumento de la frecuencia de eventos tiene directa relación con el aumento en la socavación, además, se observa que la extracción aumenta de manera constante a lo largo de los meses.

5.2.5. Distribución de eventos por fecha y magnitud momento

Las Figuras 5.78 y 5.79 exponen la distribución espacial de los eventos respecto a la fecha de ocurrencia a con respecto a su magnitud momento calculada para ambos períodos. Es posible observar la diferencia en cuanto al número de eventos ocurridos en cada período.

De aquí podemos mencionar que el período desde 11 de Enero al 31 de Agosto del 2012 se originan eventos por debajo de la cota 3262 correspondiente al nivel 16 Hundimiento, esto se asocia al criterio de localización implementado en ese momento por el personal encargado. En cambio, para el período desde el 01 de Enero al 30 de Abril del 2013 los eventos tienden a concentrarse en zonas cercanas al avance de Hundimiento y por sobre al nivel 16 Hundimiento.

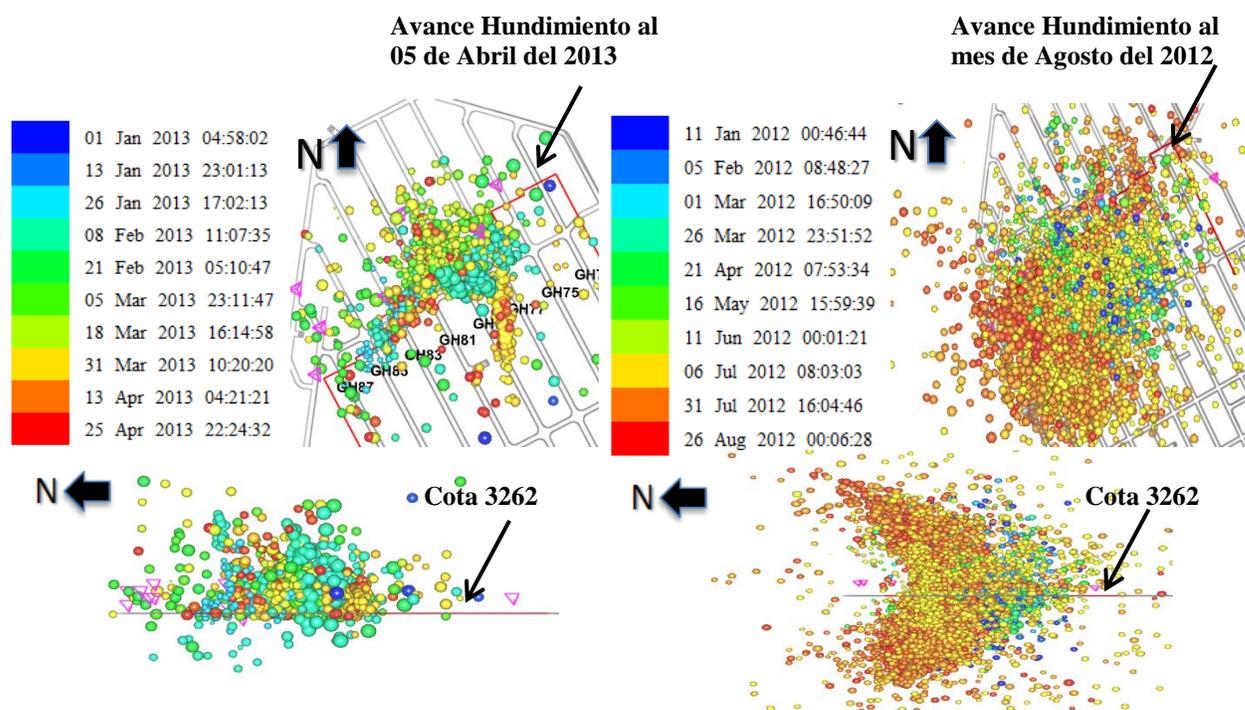


Figura 5.78. Distribución de eventos espacial con respecto a su fecha de ocurrencia para el período Enero-Agosto 2012 (figura derecha) y para el período Enero-Abril 2013 (figura izquierda), cada una con su perspectiva en planta y en sección.

En cuanto a la fecha de ocurrencia, es posible observar que para el período Enero-Agosto 2012 se observa una mayor concentración hacia a eventos ocurridos en los meses Julio y Agosto. Y por otro lado para el período de Enero-Abril 2013 la ocurrencia se distribuye de manera constante a lo largo de los meses, dicho de otro modo, no existe una variación en gran escala.

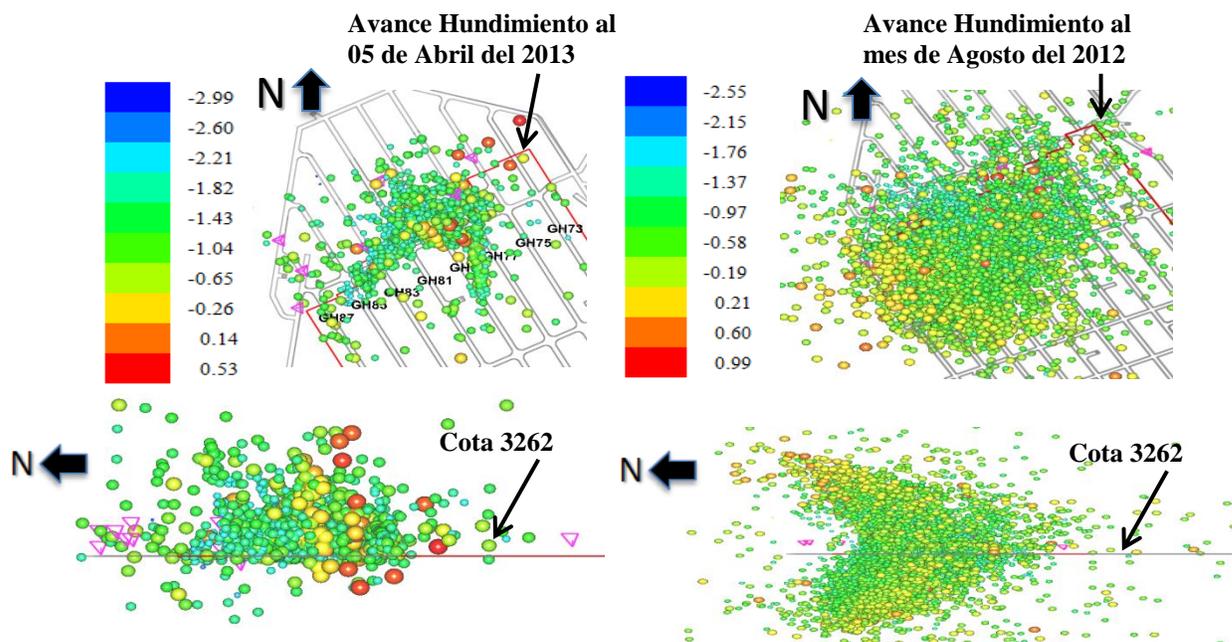


Figura 5.79. Distribución de eventos espacial con respecto a su magnitud de momento para el período Enero-Agosto 2012 (figura derecha) y para el período Enero-Abril 2013 (figura izquierda), cada una con su perspectiva en planta y en sección.

De la distribución con respecto a la magnitud ilustrada en la **Figura 5.79** es posible mencionar que para ambos períodos, gran parte de los eventos se concentran entre las magnitudes -2.50 y 0.00.

5.2.6. Asociación con estructuras pre-existentes y contacto primario – secundario

Parte del trabajo que contempla la interpretación de la sismicidad generada, es buscar si los eventos sísmicos han ocurrido por estructuras geológicas pre-existentes en la zona. Teniendo esto en consideración la **Figura 5.80** ilustra la ocurrencia de sismicidad alojada en torno a una falla en particular, generándose en otro sitio distinto al que se ubica el avance del hundimiento. Esta sismicidad se originó durante el período de 21 de Marzo al 4 de Abril del 2013, las prismas en color magenta representan la ubicación de los sensores de la red sísmica 2013.

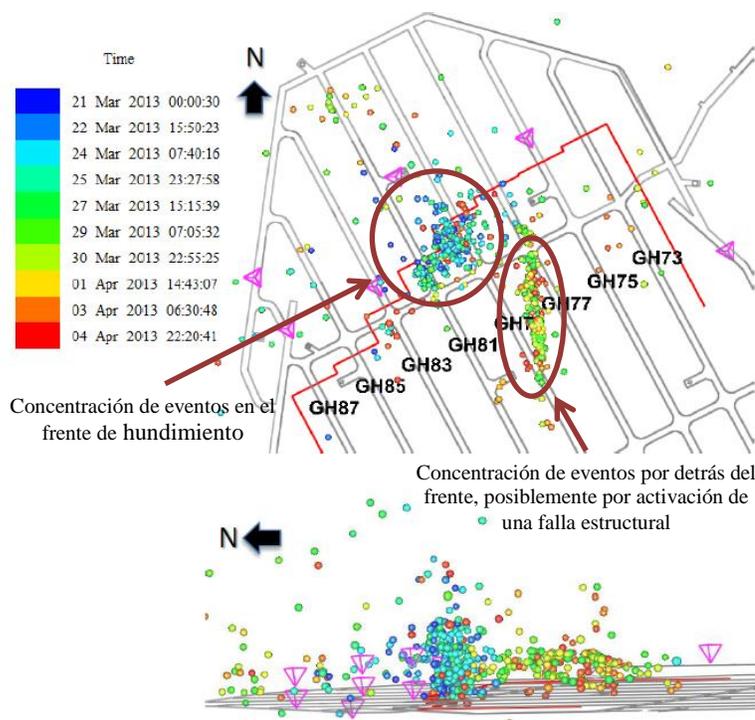


Figura 5.80. Eventos correspondientes del 21 de Marzo del 2013 al 04 de Abril del 2013 en planta y sección, en el cual se visualiza la ocurrencia de sismicidad en dos focos, uno alojados en el avance de hundimiento y otro a la posible apertura de una estructura geológica.

Cabe mencionar, que la concentración de eventos se visualiza donde ocurre el avance de hundimiento (línea de color rojo), esto indica que si se produce el mecanismo de *caving* y existe un hundimiento del macizo rocoso. Además se observa la activación de una falla alojándose por detrás del frente de hundimiento los cuales se originan en una fecha distinta a la ocurrencia de eventos a lo largo del avance del frente (27 de marzo al 04 de abril 2013). Dichos eventos contienen similar altura y se encuentran concentrados en un mismo sitio (**Figura 5.80**).

En la **Figura 5.81** se muestran las fallas mayores en el sector Norte del Nv. 16 Hundimiento, dentro de las cuales, las de mayor criticidad corresponden a las de color rojo (mayor extensión, espesor y relleno de mala calidad), seguidas por las de color naranja, magenta y verde.

Si consideramos todas las fallas mayores existentes en el sector del norte del tercer panel, es posible apreciar que la sismicidad registrada en ese mismo período se origina por detrás del frente de hundimiento se aloja en torno a una estructura, y que la sismicidad que se origina en el avance de hundimiento concuerda con la intersección de varias de estas, esto es posible apreciarlo en la **Figura 5.81**. Además la magnitud de estos eventos se encuentra entre valores de -2.3 y -0.5.

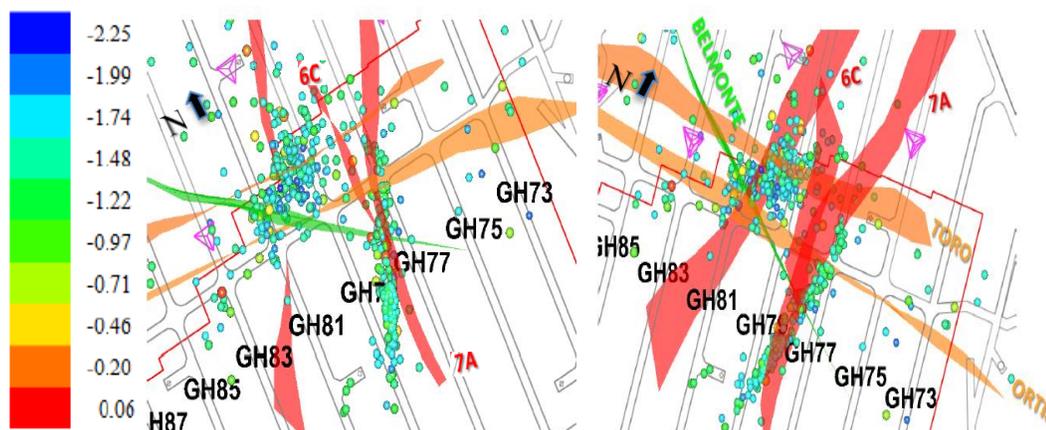


Figura 5.81. Concentración de eventos entorno a fallas estructurales existentes en el sector del norte del tercer panel. La escala ubicada hacia la izquierda es asociada a la magnitud momento de los eventos ilustrados.

Se observa también que la mayor frecuencia de eventos del sector sur es asociada a la Falla 7A (roja). Además, se puede apreciar la distribución de los eventos siguiendo una forma curvada hacia el norte, según el rumbo y el desplazamiento de la estructura. Hacia el sur de la misma, la distribución de la sismicidad toma un rumbo diferente, que podría estar relacionada con otras estructuras menores asociadas al eje.

Utilizando el mismo período con el cual se mostró la presencia de activación de fallas existentes en la zona, se muestra la asociación que existe con el contacto primario – secundario en la **Figura 5.82**. De esta, es posible apreciar que la sismicidad se encuentra localizada bajo la superficie del contacto primario – secundario teniendo en cuenta que gran parte de la sismicidad ocurre en roca primaria (**Sección 3.1**). Sin embargo, existen algunos eventos localizados sobre este, esto se puede explicar primero, como un posible error de localización de los mismos en el momento del proceso, pero se debe tener en cuenta que el contacto primario – secundario no corresponde a una superficie exacta, ya que posee un intervalo de transición entre ambas mineralizaciones.

De la misma **Figura 5.82** es posible relacionar la zona sísmogénica del modelo conceptual de hundimiento (**Sección 3.1**) en la cual se observa la forma “cóncava” que delimita la zona de desarme, en donde se produce la actividad sísmica inducida por la minería (frente de hundimiento). De lo anterior, es posible apreciar una forma cóncava cada vez más elevada, suponiendo con esto, un régimen de *caving* activo.

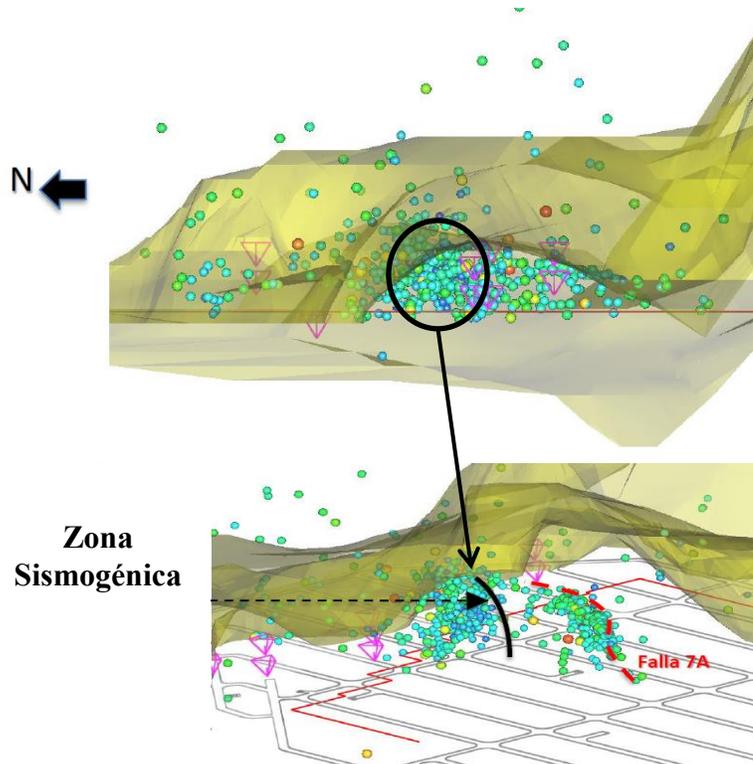


Figura 5.82. Ilustra la sismicidad inducida alojada por debajo del contacto primario-secundario, y la formación de la zona sismogénica en roca primaria para el período 21 de Marzo 2013 al 04 de Abril del 2013.

5.2.7. Distribución parcial y espacial de eventos c/r a la magnitud momento

De la misma forma que el ítem anterior, se muestra la ocurrencia de sismicidad pero con respecto a su magnitud de momento (M_w), lo que ayuda a contemplar los intervalos de magnitudes existentes en la zona, para tomar decisiones con respecto al comportamiento del macizo rocoso.

En la **Figura 5.83** se ilustra la variabilidad en las magnitudes para el período Enero- Agosto 2012, es posible apreciar que estas magnitudes se encuentran en un rango de -1.8 a 0.4. Donde la magnitud más alta corresponde a una prueba de DDE (Debilitamiento Dinámico por explosivos, **sección 3.9**). Es posible visualizar que durante los meses Junio, Julio y Agosto las magnitudes obtenidas son más elevadas con respecto a los meses anteriores. Además se visualizan vacíos que corresponden a fechas donde el sistema no se encontraba operativo.

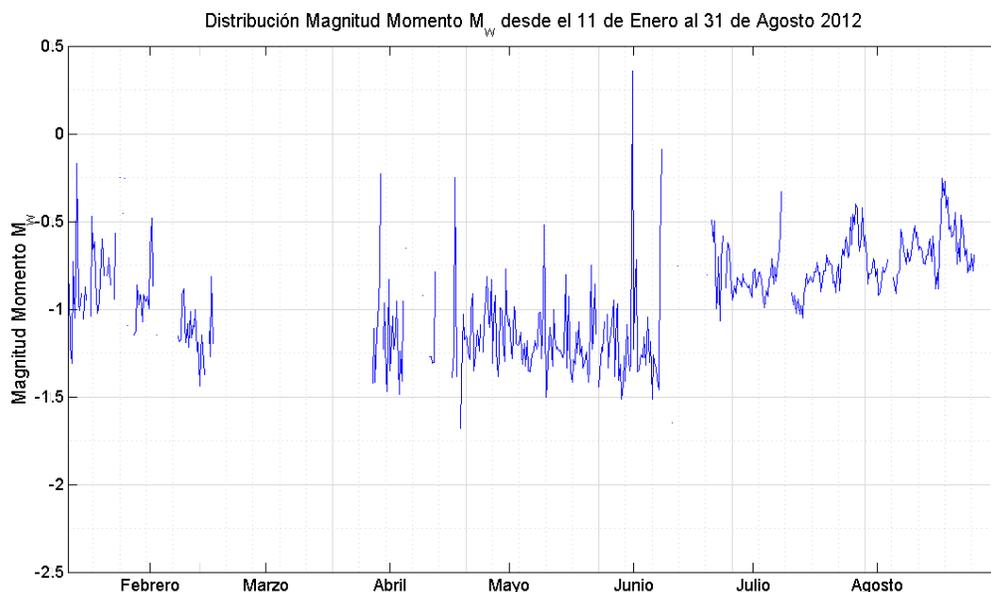


Figura 5.83. Distribución de magnitudes para el período desde el 11 de Enero al 31 de Agosto del 2012.

Y a través de la **Figura 5.84** es posible apreciar la distribución de magnitudes para el período Enero - Abril 2013, en donde las magnitudes se encuentran en un rango de -2.4 a 0.1. Los vacíos observables son debidos a caídas del sistema por motivos operacionales, en los que se pueden mencionar, cortes de cables por maquinaria minera, pérdidas de puntos de red y bajas en la electricidad. Estas magnitudes tienden a ser más bajas que las registradas en los meses del año 2012, puede vincularse a la sensibilidad que posee el sistema sísmico en cada período y a su número de asociación configurado.

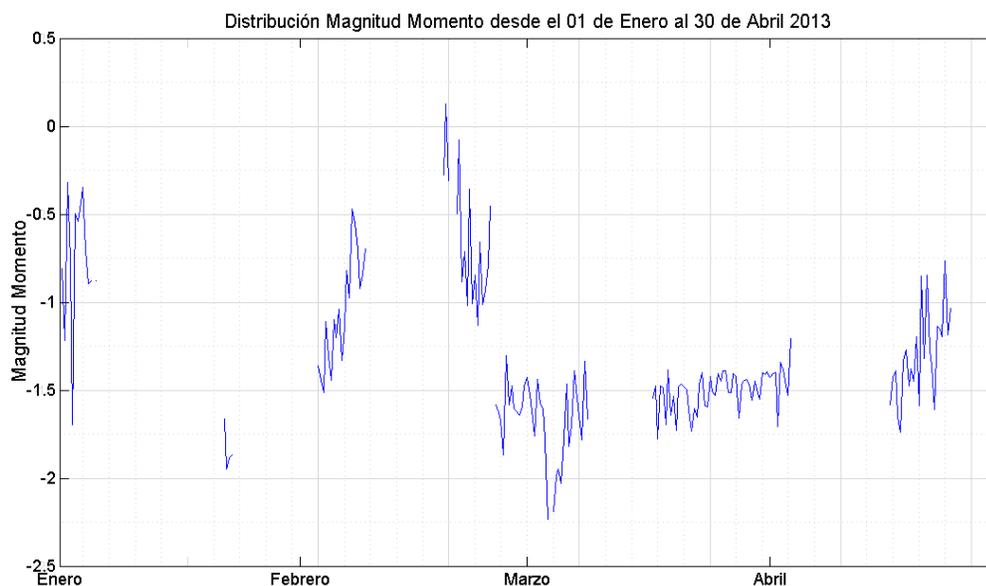


Figura 5.84. Distribución de magnitudes para el período desde el 01 de Enero al 30 de Abril del 2013.

Para una visualización de la distribución de las magnitudes en planta se han escogido los meses de Enero, Febrero y Marzo del presente año, en donde se ilustra su perspectiva en planta y en sección en las Figuras 5.85 y 5.86.

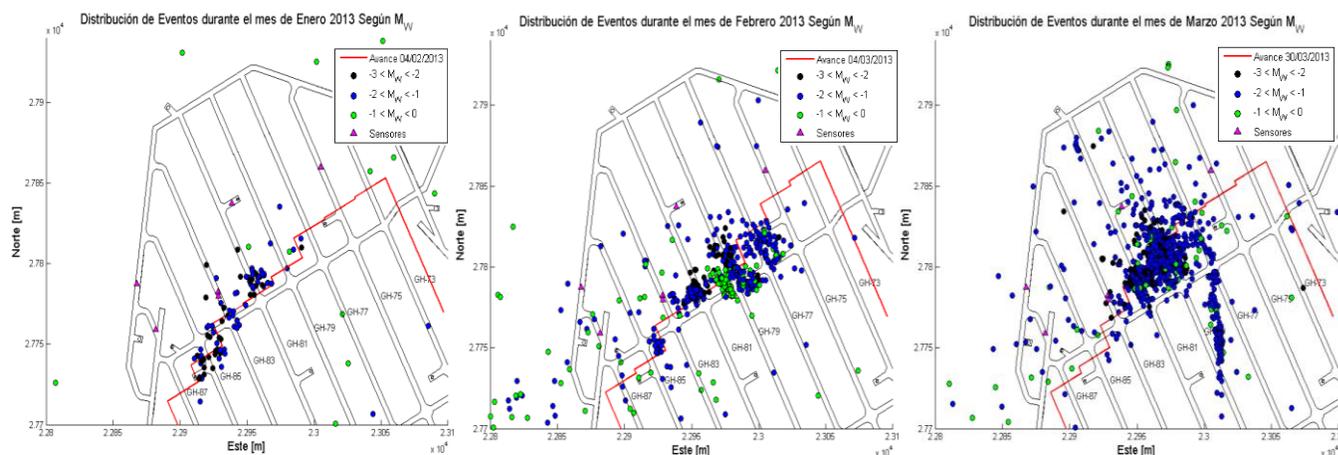


Figura 5.85. Distribución de magnitudes en planta para los meses Enero, Febrero y Marzo del presente año 2013. Se visualizan los eventos en un rango de -3 a -2 en color negro, aquellos entre -2 y -1 en color azul y en verde los que correspondan a eventos con magnitudes entre -1 y 0.

De las figuras expuestas es posible apreciar 3 intervalos de magnitudes, donde predominan los eventos con magnitudes momento entre -2 y -1. Para cada mes es apreciable en color rojo la franja que caracteriza el avance del hundimiento, y en pirámides magenta la ubicación de los sensores a la fecha. Cabe mencionar, que los eventos ocurridos en estos meses poseen poca dispersión y la gran mayoría se concentra en la zona del frente de hundimiento (línea roja).

La poca ocurrencia de eventos durante el mes de Enero, se asocia a que la red sísmica para el años 2013 empezó a operados de ese mes, y posterior a este inicio el sistema sísmico se vio sujeto a cambios en su configuración, por lo que los eventos ilustrados corresponden sólo a eventos ocurridos la última semana de dicho mes.

En la **Figura 5.86** se ilustra la sismicidad registrada para cada mes en sección. Es posible apreciar, que en los tres casos, la mayoría de los eventos se alojan en el frente de Hundimiento y la mayoría de ellos se encuentra entre las magnitudes -2 y -1. Por otro lado, un grupo en particular de los eventos ocurridos en el mes de Febrero se alojan hacia atrás del frente de hundimiento, y presentan magnitudes más elevadas (entre -1 y 0), esto es posible atribuirlo a que en dicha zona se comenzaron las labores de desarrollo para el sector de minería continua, puede que de alguna forma u otra esto haya perturbado a parte de la roca en ese sitio.

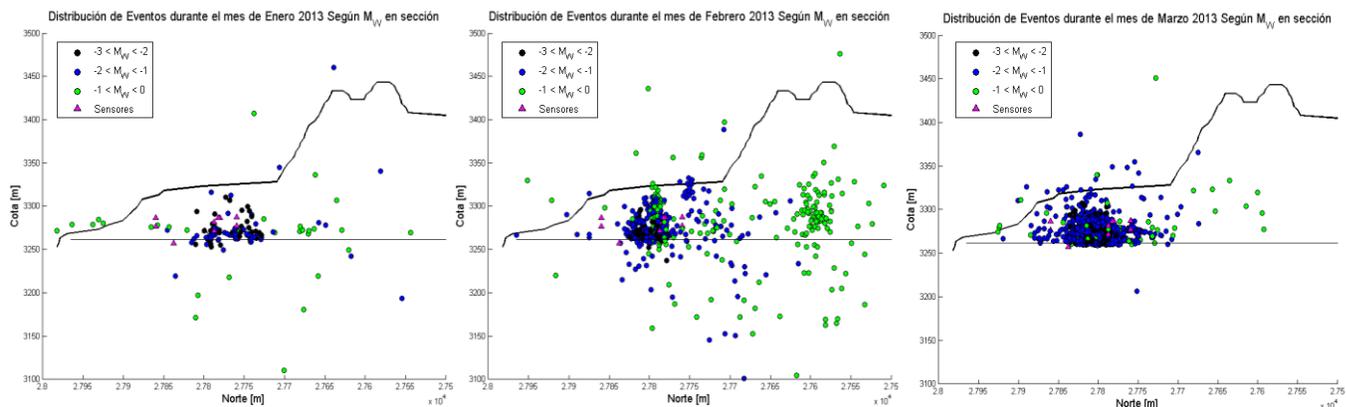


Figura 5.86. Distribución de magnitudes en sección para los meses Enero, Febrero y Marzo del presente año 2013.

5.2.8. Índice de Energía y Volumen Aparente

La descripción del estado del macizo rocoso según su relación esfuerzo/deformación, puede ser estimada a partir del análisis de las variaciones temporales del Índice de energía (IE) y Volumen Aparente (VA). Para una condición en la que se produce el desarme del macizo rocoso, se espera que el IE disminuya y el VA aumente, lo que es interpretable como una disminución de esfuerzos simultáneamente con un incremento de las deformaciones y por lo tanto una liberación de energía, en caso contrario, si el IE aumenta y el VA decrece o se mantiene sin variación, se puede interpretar como un estado de acumulación de energía sin liberar.

En las siguientes imágenes (**Figura 5.87 y 5.88**) se ilustran para los períodos Enero – Agosto 2012 y Enero – Abril 2013 la distribución del índice de energía en planta y en sección, diferenciándose de los que son mayores a cero y menores a cero. Los datos utilizados en este cálculo ha sido filtrados utilizando una condición de que los eventos seleccionados no superen los 10 [m] de error de localización y que hayan sido localizados por al menos 5 sensores. Además, cada período se ilustra en color verde el avance de hundimiento correspondiente a ese momento.

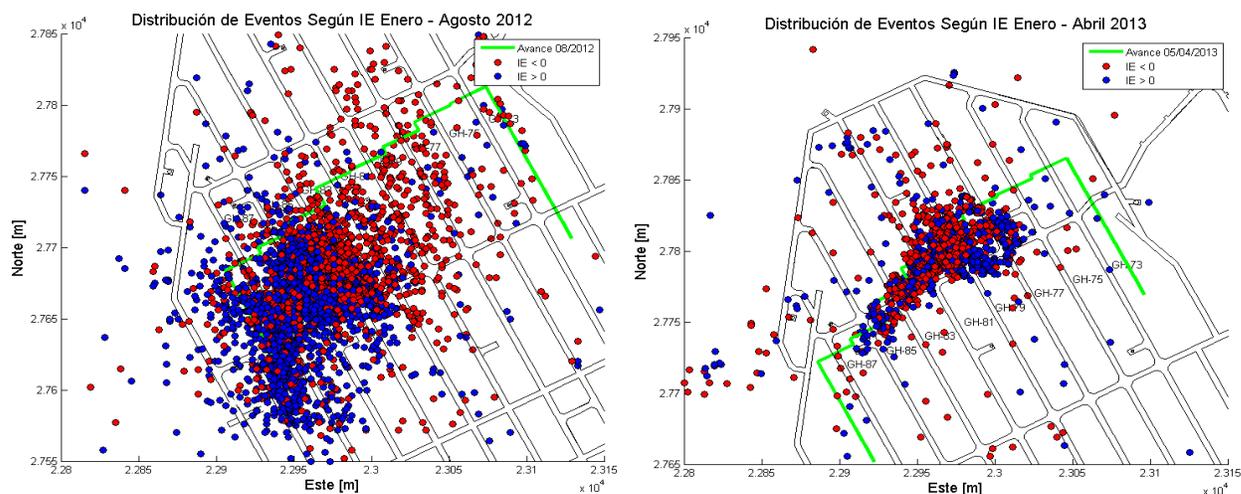


Figura 5.87. Distribución del índice de energía para el período Enero – Agosto 2012 y Enero – Abril 2013 en planta, en color azul se describen los eventos con un índice de energía mayor a cero y aquellos que tienen color rojo poseen un índice de energía menor a cero.

Es posible apreciar en la imagen de la izquierda correspondiente a meses del año 2012, la distribución con valores mayores a cero se aloja al costado izquierdo del panel (círculos de color azul), y que los valores menores a cero se concentran al lado derecho (círculos de color rojo), esto es curioso, ya que en cierta forma describe que los eventos de la izquierda poseen una condición de inestabilidad, dicho de otro modo, se encuentran en “fase de endurecimiento” (*hardening*). Y que los eventos concentrados hacia la derecha se encuentran en una “fase de relajación” (*softening*).

De la misma forma, es posible visualizar en la imagen de la derecha la cual describe el índice de energía obtenido para el período de Enero – Abril 2013 que los eventos en un estado de relajación se encuentran delante de aquellos que muestran un estado de endurecimiento.

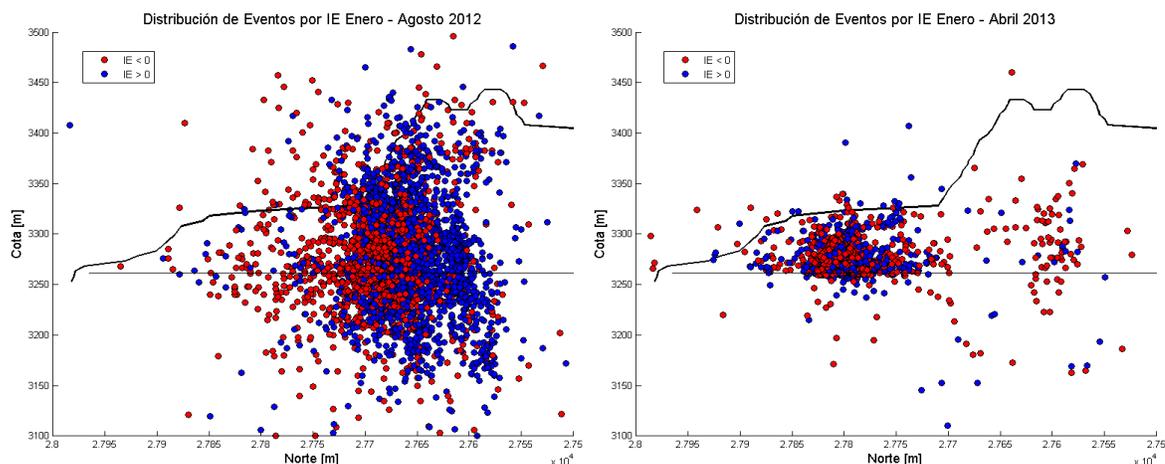


Figura 5.88. Distribución del índice de energía para el período Enero – Agosto 2012 y Enero – Abril 2013 en sección, en color azul se describen los eventos con un índice de energía mayor a cero y aquellos que tienen color rojo poseen un índice de energía menor a cero

Así mismo, en la **Figura 5.88** es posible ilustrar la distribución de eventos con respecto a su índice de energía en sección para ambos períodos, en donde se observa en ambos casos, una concentración de eventos con índice de energía menor a cero por delante de aquellos eventos con índice de energía mayor a cero. También es apreciable, que los eventos se alojan por debajo del contacto primario – secundario. Esto podría ser un factor en la frecuencia de eventos registrada en el sector para cada período.

Para poder visualizar de manera representativa estos cambios de IE y VA, se han tomado dos períodos en donde se aprecia variaciones significantes de estos parámetros caracterizando de buena forma el comportamiento del macizo rocoso en los procesos de “*softening*” (desarme) y de “*hardening*” (endurecimiento).

Durante el período desde el 4 al 10 de Febrero se puede observar los tramos en los cuales se produce el fracturamiento del macizo rocoso, en donde el IE disminuye y el VA se incrementa, liberando la energía acumulada. Existe un período de tiempo (alrededor del 07 de febrero), durante el cual se observó un incremento del IE, relacionado con una invariabilidad del VA, esto se atribuye a un aumento de la energía acumulada en el sector y constituye una alerta desde el punto de vista geomecánico. Finalmente el período culminó con una liberación de energía. Esto es apreciable en la **Figura 5.89**. Cabe mencionar, que durante el día 5 de Febrero el sistema no registro datos por problemas operacionales.

Durante el período desde el 21 de marzo al 04 de abril es posible intervalos en los cuales se produce acumulación de energía del macizo rocoso, en donde el IE aumenta y el VA se incrementa, lo anterior está ligado a una condición en que el macizo acumula energía de deformación y con los días la va liberando en forma graduada. Aquí se habla de un estado de endurecimiento (*hardening*) o fase de activación la energía acumulada. Esto es posible visualizarlo en la **Figura 5.90**.

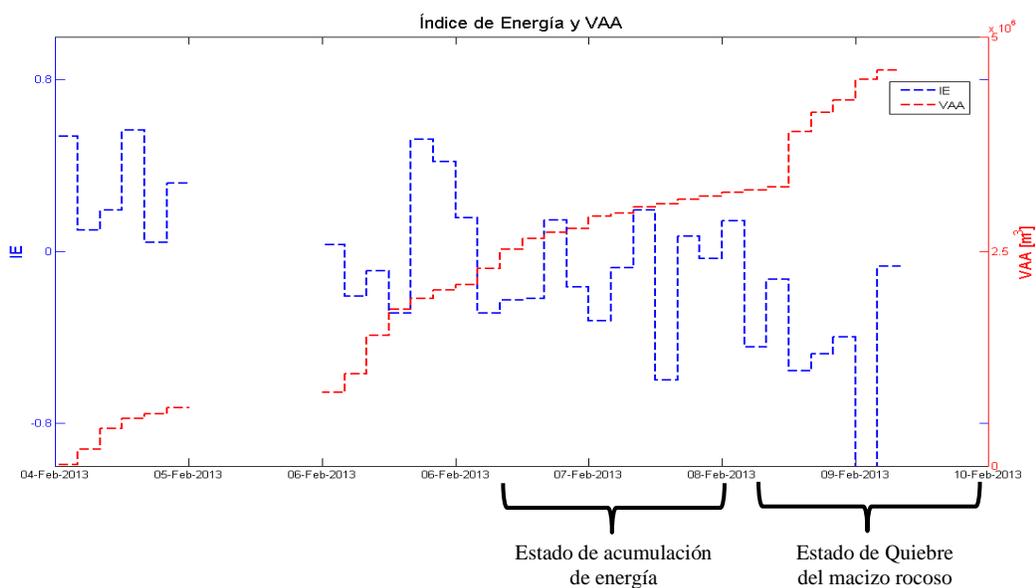


Figura 5.89. Se ilustra los valores del Índice de Energía y el Volumen Aparente Acumulado para el período del 4 al 10 de Febrero del 2013, en donde el volumen aparente acumulado se muestra en color rojo a la derecha y el índice de energía en color azul a la izquierda.

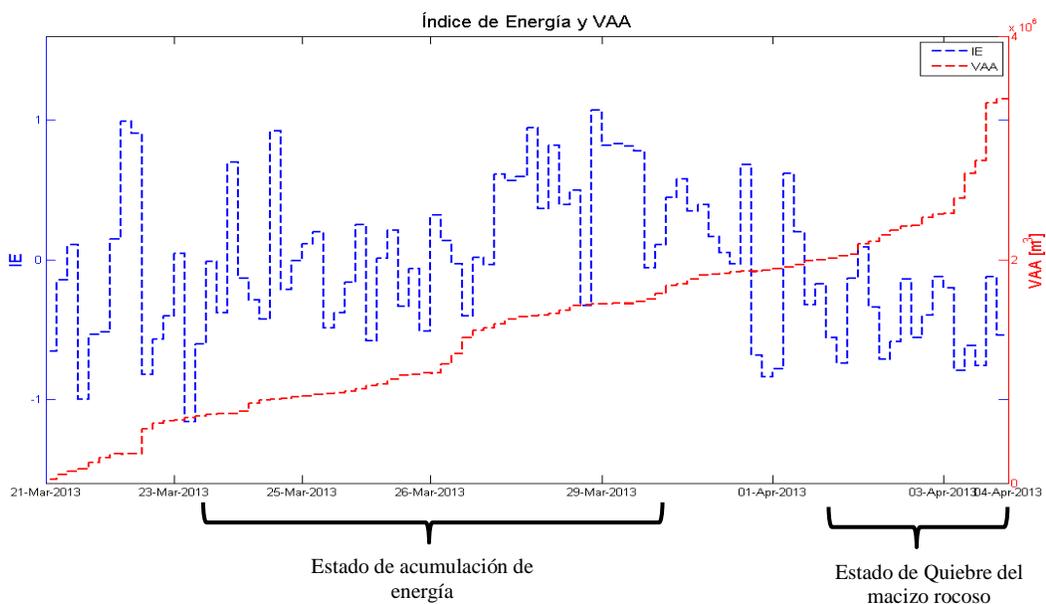


Figura 5.90. Se ilustra los valores del Índice de Energía y el Volumen Aparente Acumulado para el período del 21 de Marzo al 04 de Abril del 2013, en donde el volumen aparente acumulado se muestra en color rojo a la derecha y el índice de energía en color azul a la izquierda.

5.3. Elementos para Sistema de Monitoreo en Sector Minería Continua

En esta sección, se dispone de una distribución de sensores para la red de monitoreo micro-sísmico en el sector de Minería Continua. Con la experiencia obtenida de sistemas sísmicos implementados en la Mina Subterránea en períodos anteriores, se decide esta vez, utilizar 18 sensores de 14 [Hz], 10 con arreglo tri-axial y 8 uni-axiales, recordando que este tipo de geófonos puede ser instalado en cualquier orientación (**Sección 3.6.1.**). La ubicación exacta de cada geófono en esta propuesta fue seleccionada teniendo en cuenta factores como:

- ❖ **La infraestructura del entorno:** Conociendo los niveles y sub niveles existentes, para no afectar la construcción por la futura perforación del pozo a realizar.
- ❖ **Galerías transitables por el personal:** El personal dispone de las “Calles de Servicio” para realizar todo tipo de trabajos, los sensores que quisieran ser instalados por el nivel de producción deben situarse en estas galerías y no en las “Galerías *Panzer*” (**Sección 3.7.1.**). Esto facilita la instalación, el recorrido de los cables y el acceso a la futura configuración o restauración de estos.
- ❖ **Estructuras geológicas existentes en la zona:** Considerando las estructuras mayores que se encuentran en el sector, para no situar el sensor en un sitio donde se pueda generar la activación de una falla.

La ubicación entorno al sector de Minería Continua queda descrita en la **Tabla 5.15** y **Figura 5.91** En la columna referida al sensor “u” expresa que es un sensor uni-axial y “t” expresa que es un sensor tri-axial. La ubicación es referida al nivel de producción o hundimiento en la cual se quiere emplazar el sensor. La ubicación a lo largo del eje z (en cota), se verá representada por casos, ya que su distribución espacial depende de la calidad de la red.

Tabla 5.15. Ubicación de Sensores para Red Sísmica en Minería Continua.

Sensor	Ubicación	Este [m]	Norte [m]	Sensor	Ubicación	Este [m]	Norte [m]
--------	-----------	----------	-----------	--------	-----------	----------	-----------

001t	XC-77/Soc W	22986.48	27460.28	010u	XC-87/GH-84	23103.45	27403.11
002u	XC-77/GH-86	23045.12	27462.75	011t	BP-37	22950.30	27426.17
003u	XC-85/GH-84	23077.38	27454.99	012u	GS-3/GDZ-20	23065.75	27408.72
004t	XC-90/GH-93	22991.71	27378.60	013t	BP-37/GS-1	23008.32	27399.60
005t	XC-90/GH-89	23045.85	27389.98	014t	GS-4/GDZ-25	23065.15	27462.32
006t	XC-90/GH-85	23096.04	27387.75	015t	GS-2/GDZ-9	23014.83	27446.17
007t	GH-90	23005.62	27423.69	016u	GS-1/GDZ-2	22987.88	27439.94
008t	XC-85/GH-87	23041.39	27436.01	017u	CP-83/BP-41	23105.63	27441.57
009u	GH-85	23078.48	27420.67	018u	GE-1/CHIMENEA	22972.95	27473.58

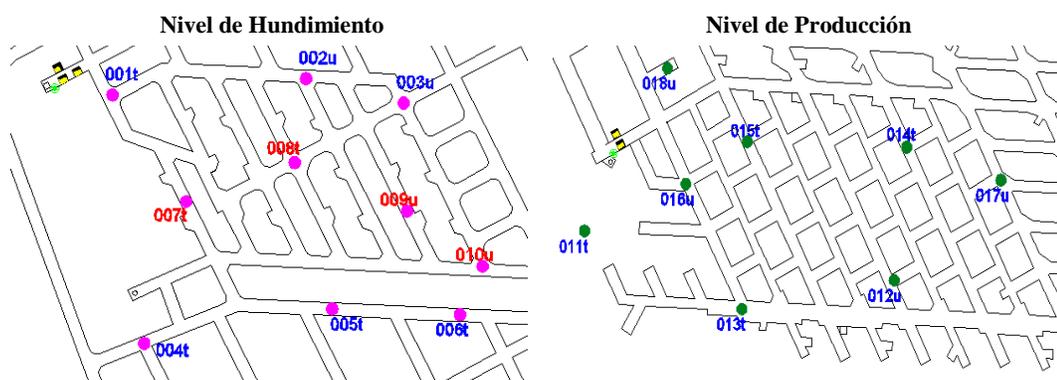


Figura 5.91. Distribución de sensores en Nivel de Hundimiento (imagen de la izquierda) y Nivel de Producción (imagen de la derecha).

Considerando los aspectos mencionados anteriormente, se realizan dos secuencias de casos en donde la primera involucra la instalación de sensores a diferentes alturas, y la segunda simula la pérdida de geófonos producto del avance del hundimiento. En ambas secuencias, se supone que los eventos son captados con un número de asociación de ocho sensores, valga decir, que de los 18 sensores existentes sólo ocho captaron y registraron dicho evento sísmico. En la primera secuencia se consideran tres casos que se diferencian por la altura de los geófonos. El caso 1 supone una distribución espacial extensa, donde el largo de los pozos pueden ser de hasta 70 [m]. El caso 2 supone una distribución espacial menos extensa, en donde los pozos no sean mayores a 40 [m] y el caso 3 una distribución espacial limitada en donde la altura de pozos no superen los 25 [m], se puede visualizar los sus alturas en detalle en la **Tabla 5.16**.

Tabla 5.16. Alturas designadas para cada caso a desarrollar.

Sensor	Caso 1 [m]	Caso 2 [m]	Caso 3 [m]	Sensor	Caso 1 [m]	Caso 2 [m]	Caso 3 [m]
001t	3325	3295	3275	010u	3285	3280	3270
002u	3280	3275	3260	011t	3255	3255	3270
003u	3295	3285	3270	012u	3263	3263	3263
004t	3305	3290	3270	013t	3275	3275	3275
005t	3280	3275	3265	014t	3263	3263	3263
006t	3325	3295	3275	015t	3263	3263	3263
007t	3375	3275	3265	016u	3263	3263	3263
008t	3285	3280	3265	017u	3285	3285	3285
009u	3270	3270	3260	018u	3280	3280	3280

Para la segunda secuencia disponemos de tres casos, en donde se simule la pérdida de geófonos, y además, los posibles inconvenientes que pueden ocurrir durante la producción del sector, por ejemplo el corte de cables o la caída de unidades, esto también produce una pérdida de sensores en la red sísmica. Se utiliza el Caso 2 como inicial, asumiendo las coordenadas descritas anteriormente en la **Tabla 5.15** y **Tabla 5.16**, para ello se ilustran la **Figura 5.92** con las diferentes distribuciones, suponiendo el Caso 4 como una primera fase de hundimiento y el Caso 5 como una segunda fase, con un hundimiento más avanzado. La **Tabla 5.17** ilustra la disposición de los respectivos sensores, siendo “X” cuando el geófono si exista en la distribución y un “-” cuando no exista.



Figura 5.92. Distribución de sensores para los casos 2, 4 y 5, teniendo en cuenta la pérdida de sensores por el avance del Hundimiento e inconvenientes laborales.

Tabla 5.17. Disposición de sensores para los casos 2, 4 y 5.

Sensor	Caso 2 [m]	Caso 4 [m]	Caso 5 [m]	Sensor	Caso 2 [m]	Caso 4 [m]	Caso 5 [m]
001t	X	X	X	010u	X	X	-
002u	X	-	-	011t	X	X	-
003u	X	-	-	012u	X	X	X
004t	X	X	X	013t	X	X	X
005t	X	X	X	014t	X	X	X
006t	X	X	X	015t	X	X	X
007t	X	X	-	016u	X	-	-
008t	X	-	-	017u	X	-	-
009u	X	-	-	018u	X	X	X

5.3.1. Sensibilidad de la red propuesta

De la primera secuencia, referida a los Casos 1, 2 y 3, es posible obtener la siguiente sensibilidad, ilustradas en la **Figura 5.93**, **Figura 5.94**, y **Figura 5.95** los sensores ubicados en el nivel de hundimiento son aquellos de color rojo y para aquellos ubicados en el nivel de producción se encuentran marcados con color azul. Se ha realizado el cálculo para las cotas 3305 (50 [m] arriba del nivel de hundimiento), 3255 (nivel de hundimiento) y 3225 (30 [m] bajo el nivel de hundimiento).

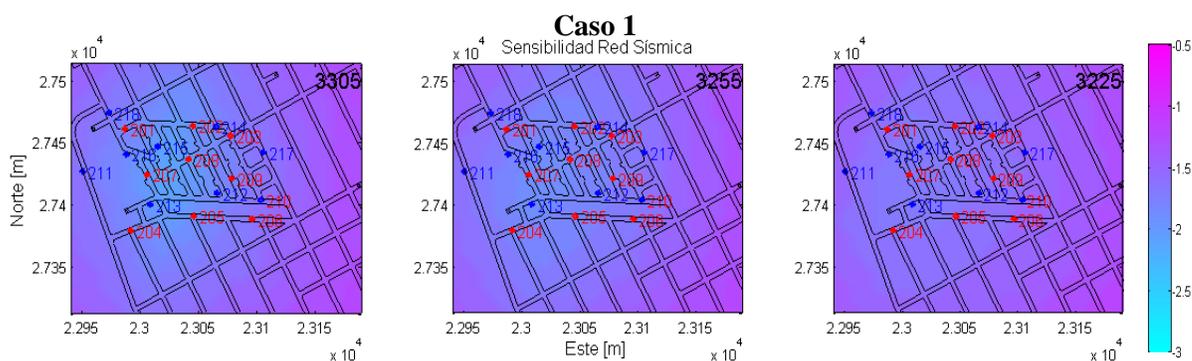


Figura 5.93. Sensibilidad para el Caso 1 en donde la magnitud mínima que alcanza a la cota 3305 es de -2.10, en la cota 3255 es de -1.90 y a 3225 es de -1.70.

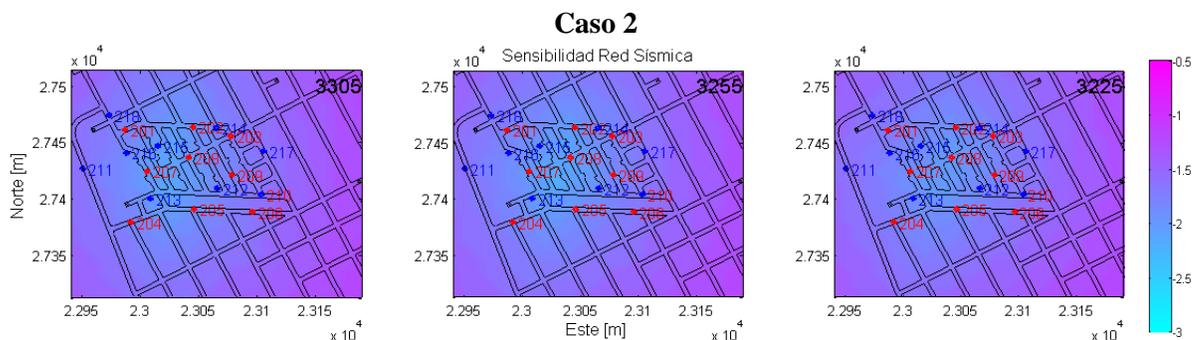


Figura 5.94. Sensibilidad para el Caso 2 en donde la magnitud mínima que alcanza la red sísmica en la cota 3305 es de -2.10, en la cota 3255 es de -2.20 y en la cota 3225 es de -2.10.

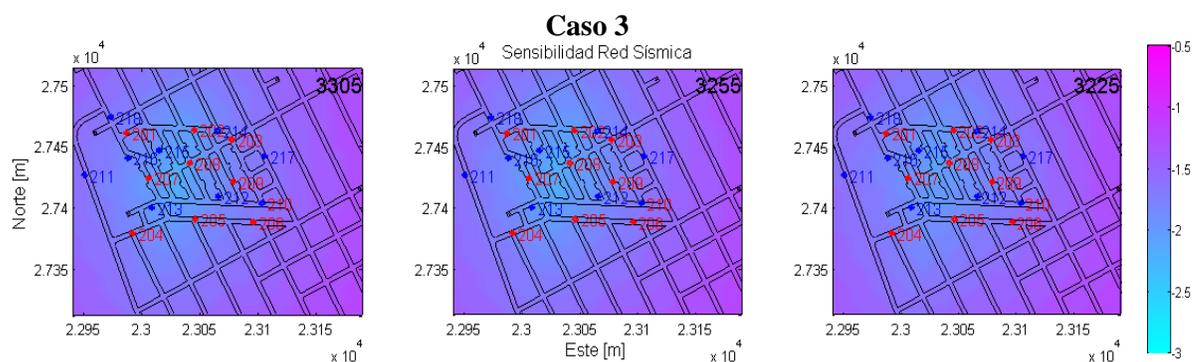


Figura 5.95. Sensibilidad para el Caso 3 en donde la magnitud mínima a que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de -2.20, en la cota 3255 es de -2.20 y en la cota 3225 es de -2.10

De las figuras expuestas anteriormente podemos mencionar que las magnitudes no superan los -2.20, correspondiendo a colores celestes, y que su promedio de magnitudes mínimas se encuentra entre -1.40 y -1.60, lo que concuerda con las magnitudes existentes en el Norte del Tercer Panel (Tabla 5.18).

Tabla 5.18. Promedio y magnitud mínima obtenida para cada Caso en su respectiva cota.

Caso	Caso 1			Caso 2			Caso 3		
Cota	3305	3255	3225	3305	3255	3225	3305	3255	3225
Promedio	-1.60	-1.57	-1.49	-1.60	-1.60	-1.56	-1.60	-1.61	-1.57
Magnitud Mínima	-2.10	-1.90	-1.70	-2.10	-2.20	-2.10	-2.20	-2.20	-2.10

De la misma forma que la secuencia anterior, se muestran los resultados obtenidos para la segunda secuencia, correspondiente a los Casos 2, 4 y 5 es posible ilustrar la sensibilidad en la **Figura 5.94**, **Figura 5.96**, y **Figura 5.97**.

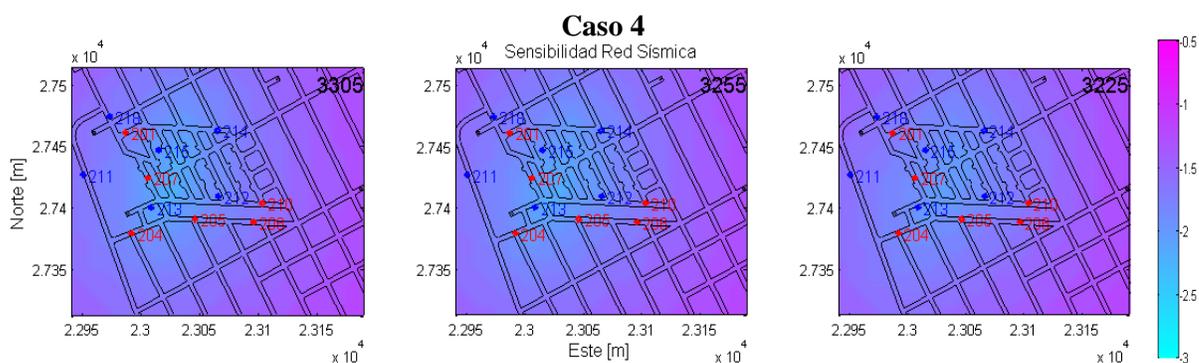


Figura 5.96. Sensibilidad para el Caso 4 en donde la magnitud mínima a que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de -2.20, en la cota 3255 es de -2.20 y en la cota 3225 es de -2.10.

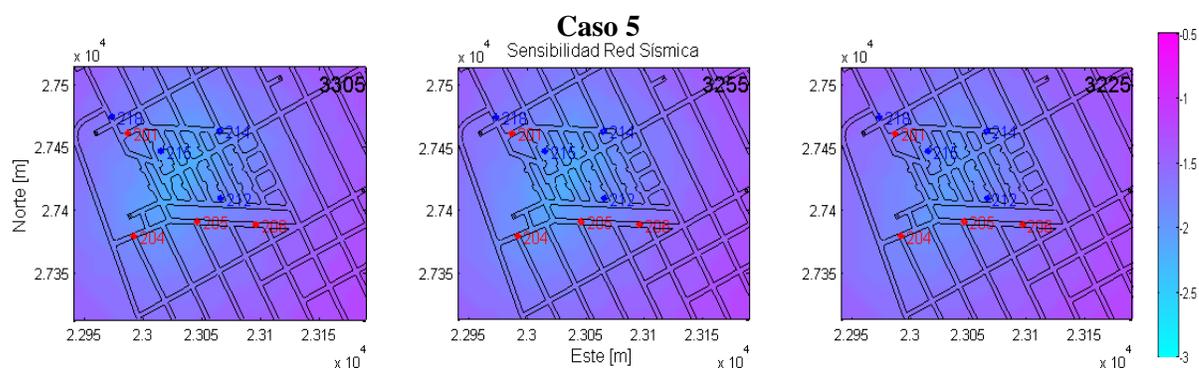


Figura 5.97. Sensibilidad para el Caso 5 en donde la magnitud mínima a que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de -2.20, en la cota 3255 es de -2.20 y en la cota 3225 es de -2.10.

De las figuras expuestas anteriormente podemos mencionar que las magnitudes no superan los -2.20, y que sus magnitudes se rondan entre -2.20 y -1.00, lo que concuerda con las magnitudes existentes en el Norte del Tercer Panel (Tabla 5.19).

Tabla 5.19. Promedio y magnitud mínima obtenida para cada Caso en su respectiva cota.									
Caso	Caso 2			Caso 4			Caso 5		
Cota	3305	3255	3225	3305	3255	3225	3305	3255	3225
Promedio	-1.60	-1.60	-1.56	-1.61	-1.61	-1.57	-1.65	-1.64	-1.59
Magnitud Mínima	-2.10	-2.20	-2.10	-2.20	-2.20	-2.10	-2.20	-2.20	-2.10

5.3.2. Resolución de la red propuesta

Para el caso de la resolución, es posible apreciar en las **Figura 5.98**, **Figura 5.99**, y **Figura 5.100** las imágenes obtenidas para la primera secuencia referida a los Casos 1, 2 y 3, en donde valores cercanos a 5 [m] se representan en colores celestes y aquellos cercanos a 10 [m] en colores rosados. Además, los sensores ubicados en el nivel de hundimiento son aquellos de color rojo y para aquellos ubicados en el nivel de producción se encuentran marcados con color azul. Se ha realizado el cálculo para las cotas 3305 (50 [m] arriba del nivel de hundimiento), 3255 (nivel de hundimiento) y 3225 (30 [m] bajo el nivel de hundimiento).

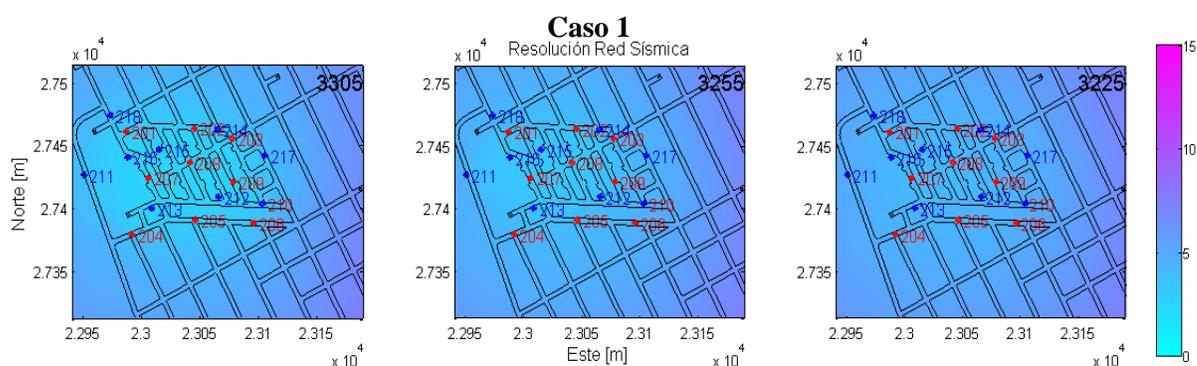


Figura 5.98. Resolución para el Caso 1 en donde el error espacial que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de 2.48 [m], en la cota 3255 es de 3.13 [m] y en la cota 3225 es de 4.05 [m].

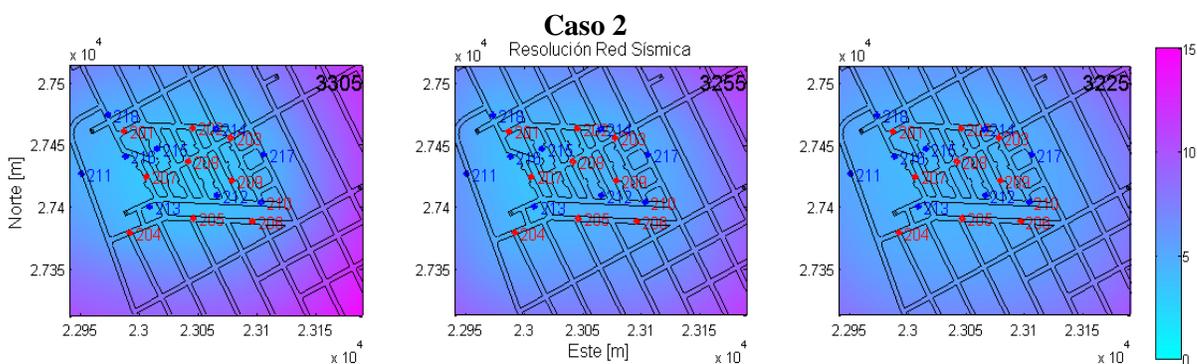


Figura 5.99. Resolución para el Caso 2 en donde el error espacial que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de 3.37 [m], en la cota 3255 es de 3.55 [m] y en la cota 3225 es de 4.09 [m].

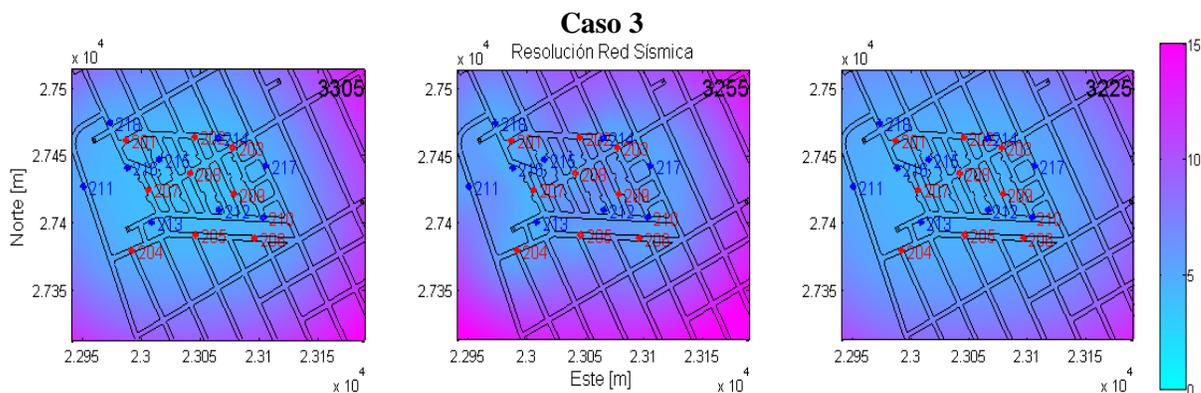


Figura 5.100. Resolución para el Caso 3 en donde el error espacial que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de 3.66 [m], en la cota 3255 es de 4.20 [m] y en la cota 3225 es de 4.25 [m].

En los casos expuestos anteriormente, se puede visualizar el aumento del error en torno al 44 %, lo que es posible notar en el aumento de las tonalidades rosadas (~10 [m]) en la cota 3305, y un aumento del error espacial de un 5 % en cotas bajas (3225), esto es posible afirmarlo en los valores de la **Tabla 5.20**. Además, es válido mencionar, que la calidad se mantiene eficiente entorno a la ubicación de los sensores, dicho de otro modo, que valores de resoluciones bajos se encuentran en parte del sector que se quiere monitorear.

Tabla 5.20. Promedio y valor mínimo obtenido para Resolución [m] de cada Caso.

Caso	Caso 1			Caso 2			Caso 3		
Cota	3305	3255	3225	3305	3255	3225	3305	3255	3225
Promedio	4.70	5.06	5.39	7.00	6.44	5.98	7.11	8.61	6.52
Error Mínimo	2.48	3.13	4.05	3.37	3.55	4.09	3.66	4.20	4.25

De la misma forma que la secuencia anterior, se muestran los resultados obtenidos para la segunda secuencia, correspondiente a los Casos 2, 4 y 5 es posible ilustrar la resolución espacial en la **Figura 5.99**, **Figura 5.101**, y **Figura 5.102**.

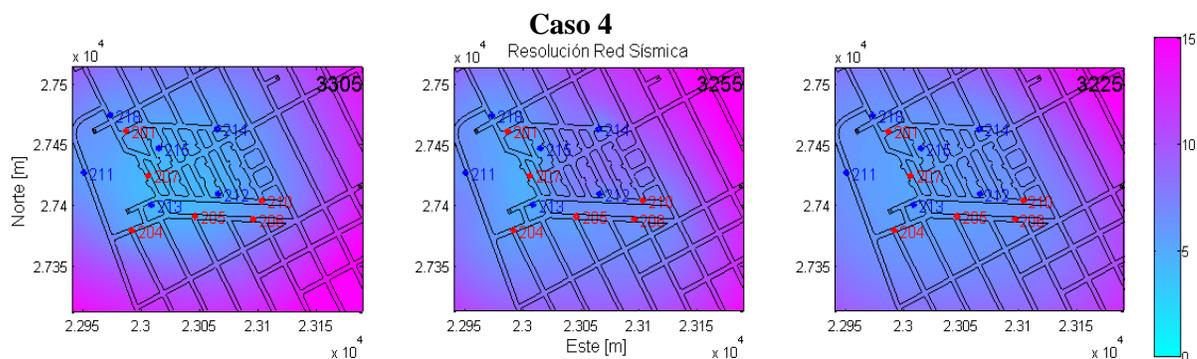


Figura 5.101. Resolución para el Caso 4 en donde el error espacial que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de 4.11 [m], en la cota 3255 es de 4.55 [m] y en la cota 3225 es de 5.33 [m].

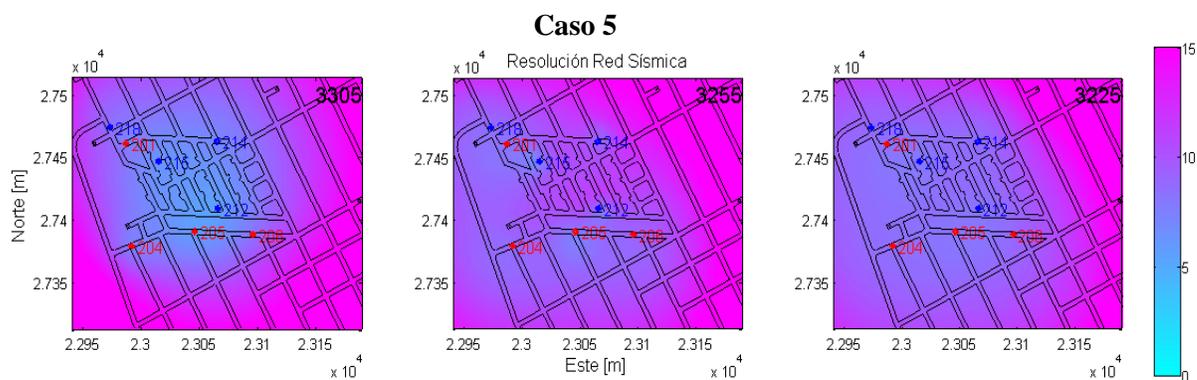


Figura 5.102. Resolución para el Caso 5 en donde el error espacial que alcanza la red sísmica propuesta en la cota 3305 es de 5.55 [m], en la cota 3255 es de 6.97 [m] y en la cota 3225 es de 7.85 [m].

En esta secuencia se ilustra un aumento considerable del error espacial, en la cota 3305 alcanza el 73 % y en la cota 3225 el 90%, a continuación se mencionan los promedios obtenidos para cada caso (**Tabla 5.21**).

Tabla 5.21. Promedio y valor mínimo obtenido para Resolución [m] de cada Caso.									
Caso	Caso 2			Caso 4			Caso 5		
Cota	3305	3255	3225	3305	3255	3225	3305	3255	3225
Promedio	7.00	6.44	5.98	8.80	9.11	8.21	11.72	12.26	11.47
Error Mínimo	3.37	3.55	4.09	4.11	4.55	5.33	5.55	6.97	7.85

5.4. Estimación de la Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada $FrEv_{esp}$ para el Norte del Tercer Panel

En primer lugar, se realizó la aproximación de los volúmenes activos para cada caso, estos fueron calculados utilizando el programa visualizador de eventos *Jdi*. Con esto, se obtuvo valores de la tasa de eventos promedio por unidad de volumen (γ), la cual la utilizamos para obtener el valor promedio para cada caso propuesto. Los valores utilizados pueden visualizarse en la **Tabla 5.22** para el Caso 1, la **Tabla 5.23** para el Caso 2 y **Tabla 5.24** para el Caso 3.

Así, para el Caso 1 se utilizó un $\gamma_1 = 4.47 \cdot 10^{-4}$ [# eventos/ m^3], con una desviación estándar de $\sigma_1 = 9.43 \cdot 10^{-4}$. En el Caso 2 se empleó un $\gamma_2 = 6.66 \cdot 10^{-4}$ [# eventos/ m^3], con una desviación estándar de $\sigma_2 = 9.79 \cdot 10^{-4}$. Y finalmente para el Caso 3 se obtuvo un $\gamma_3 = 2.20 \cdot 10^{-3}$ [# eventos/ m^3], con una desviación estándar de $\sigma_3 = 1.90 \cdot 10^{-3}$.

Tabla 5.22. Valores de Volumen Activo, N° de eventos y Gamma (γ) para los períodos del Caso 1.

Caso 1	Volumen Activo [m^3]	N° de Eventos [#]	Gamma (γ) [#/ m^3]
11 – 31 Enero 2012	$9.07 \cdot 10^5$	148	$1.63 \cdot 10^{-4}$
01 – 15 Febrero 2012	$9.18 \cdot 10^5$	121	$1.32 \cdot 10^{-4}$
16 – 29 Febrero 2012	$2.26 \cdot 10^5$	9	$3.98 \cdot 10^{-5}$
01 – 15 Marzo 2012	-	No Hay Registro	-
16 – 31 Marzo 2012	$7.79 \cdot 10^5$	23	$2.95 \cdot 10^{-5}$
01 – 15 Abril 2012	$6.57 \cdot 10^5$	56	$8.52 \cdot 10^{-5}$
16 – 30 Abril 2012	$7.52 \cdot 10^5$	120	$1.60 \cdot 10^{-4}$
01 – 15 Mayo 2012	$1.25 \cdot 10^6$	140	$1.12 \cdot 10^{-4}$
16 – 31 Mayo 2012	$9.21 \cdot 10^5$	86	$9.34 \cdot 10^{-5}$
01 – 15 Junio 2012	$9.67 \cdot 10^5$	50	$5.17 \cdot 10^{-5}$
16 – 26 Junio 2012	$6.96 \cdot 10^5$	307	$4.41 \cdot 10^{-4}$

Tabla 5.23. Valores de Volumen Activo, N° de eventos y Gamma (γ) para los períodos del Caso 2.

Caso 2	Volumen Activo [m^3]	N° de Eventos [#]	Gamma (γ) [$\#/m^3$]
11 – 31 Enero 2012	$9.07 \cdot 10^5$	148	$1.63 \cdot 10^{-4}$
01 – 15 Febrero 2012	$9.18 \cdot 10^5$	121	$1.32 \cdot 10^{-4}$
16 – 29 Febrero 2012	$2.26 \cdot 10^5$	9	$3.98 \cdot 10^{-5}$
01 – 15 Marzo 2012	-	No Hay Registro	-
16 – 31 Marzo 2012	$7.79 \cdot 10^5$	23	$2.95 \cdot 10^{-5}$
01 – 15 Abril 2012	$6.57 \cdot 10^5$	56	$8.52 \cdot 10^{-5}$
16 – 30 Abril 2012	$7.52 \cdot 10^5$	120	$1.60 \cdot 10^{-4}$
01 – 15 Mayo 2012	$1.25 \cdot 10^6$	140	$1.12 \cdot 10^{-4}$
16 – 31 Mayo 2012	$9.21 \cdot 10^5$	86	$9.34 \cdot 10^{-5}$
01 – 15 Junio 2012	$9.67 \cdot 10^5$	50	$5.17 \cdot 10^{-5}$
16 – 30 Junio 2012	$6.96 \cdot 10^5$	1938	$2.78 \cdot 10^{-3}$
01 – 15 Julio 2012	$1.11 \cdot 10^6$	2895	$2.61 \cdot 10^{-3}$
16 – 31 Julio 2012	$3.32 \cdot 10^6$	1646	$4.96 \cdot 10^{-4}$
01 – 15 Agosto 2012	$1.39 \cdot 10^6$	1212	$8.91 \cdot 10^{-4}$
16 – 31 Agosto 2012	$9.73 \cdot 10^5$	405	$4.16 \cdot 10^{-4}$

Tabla 5.24. Valores de Volumen Activo, N° de eventos y Gamma (γ) para los períodos del Caso 3.

Caso 3	Volumen Activo [m^3]	N° de Eventos [#]	Gamma (γ) [$\#/m^3$]
01 – 15 Enero 2013	$1.66 \cdot 10^5$	2	$1.20 \cdot 10^{-5}$
16 – 31 Enero 2013	$2.30 \cdot 10^5$	84	$3.65 \cdot 10^{-4}$
01 – 15 Febrero 2013	$2.34 \cdot 10^5$	301	$1.29 \cdot 10^{-3}$
16 – 28 Febrero 2013	$6.29 \cdot 10^4$	71	$1.13 \cdot 10^{-3}$
01 – 15 Marzo 2013	$9.65 \cdot 10^4$	296	$3.07 \cdot 10^{-3}$
16 – 31 Marzo 2013	$7.22 \cdot 10^4$	366	$5.06 \cdot 10^{-3}$
01 – 15 Abril 2013	$8.21 \cdot 10^4$	220	$2.67 \cdot 10^{-3}$
16 – 30 Abril 2013	$7.52 \cdot 10^4$	217	$2.89 \cdot 10^{-3}$

El desarrollo de esta estimación contempló un ajuste de 68921 iteraciones, de las cuales cada una arrojó un valor para las constantes de proporcionalidad α_s , α_e , α_z . Además, se consideró que el parámetro beta (β) es de 0.35, debido a las condiciones cinemáticas, condiciones de esfuerzo y las propiedades del macizo rocoso en el cual se emplaza el sector del norte del Tercer Panel en la mina subterránea Río Blanco.

La siguiente Tabla muestra los valores obtenidos que mejor se ajustan a la frecuencia de eventos real registrada por el sistema, en donde se destaca su *rms* (*root mean square*), el porcentaje a cual corresponde el *rms* con respecto a los *rms* ordenados de menor a mayor y además del máximo *rms* y el mínimo *rms* obtenido para los tres casos mencionados en la metodología de esta investigación (**Sección 4.4**) (**Tabla 5.25**).

Caso	Caso 1	Caso 2	Caso 3
α_s	2.50	2.50	2.50
α_e	0.80	1.00	0.40
α_z	0.50	0.80	0.20
RMS	1527.43	2805.53	278.98
RMS [%]	10.33	1.16	0.80
Mínimo RMS del ajuste	1311.57	2738.76	264.35
Máximo RMS del ajuste	11332.03	29423.27	20964.40

El mejor ajuste obtenido para el Caso 1 en donde se consideró datos correspondientes al 11 de Enero al 26 de Junio del 2012 es posible visualizarlo en la **Figura 5.103**. Es posible mencionar que las curvas obtenidas para la frecuencia de eventos acumulada y la frecuencia de eventos acumulada esperada ($FrEv_{esp}$) se ajustan de buena forma, con un *rms* bajo, en torno al 10% c/r al total de los *rms* obtenidos. Con respecto a las constantes de proporcionalidad obtenidas, se muestra una predominancia de la constante de proporcionalidad referida a la socavación α_s , seguido por α_e y finalmente la α_z . Esto indicaría que el aporte en la socavación afecta en gran medida al volumen activo para la ocurrencia de sismicidad en la zona.

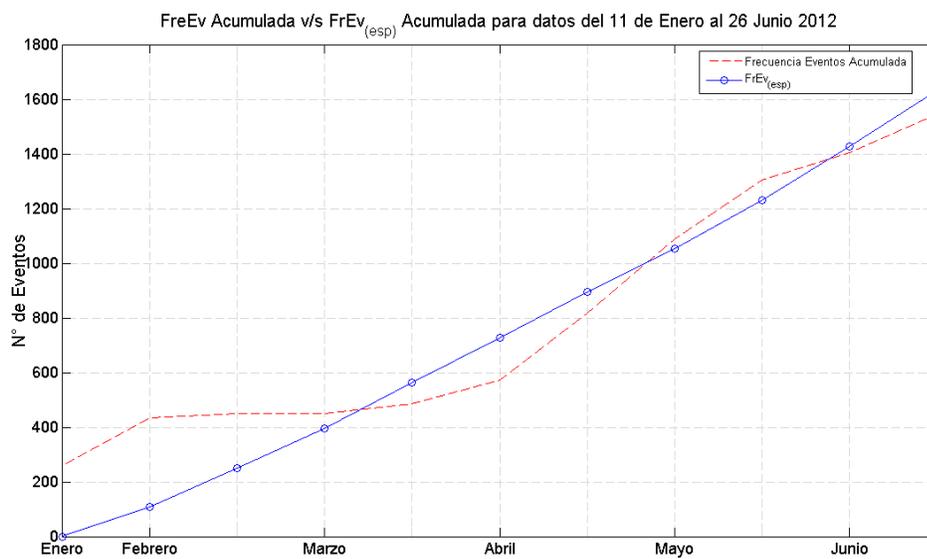


Figura 5.103. Frecuencia de eventos acumulada esperada obtenida del ajuste realizado para el Caso 1, siendo comparada con la frecuencia de eventos acumulada registrada por el sistema en dicho período.

En la **Figura 5.104** se observa el mejor ajuste obtenido para el Caso 2 que contempla eventos desde el 11 de Enero al 31 de Agosto del 2012, en donde los valores de *rms* obtenidos son más bajos que el caso anterior, ubicado al 1% de los *rms* más bajos obtenidos para este ajuste. Pese a la variabilidad que se observa en los meses de Junio y Julio, en donde la ocurrencia de sismicidad aumenta en gran consideración, la curva de frecuencia de eventos acumulada esperada ajusta en buena medida a la frecuencia de eventos acumulada registrada por el sistema en dicho período. Y de la misma forma que el caso anterior, la constante de proporcionalidad referida a la socavación α_s predomina en comparación a la referida a la extracción y a la apertura de zanja.

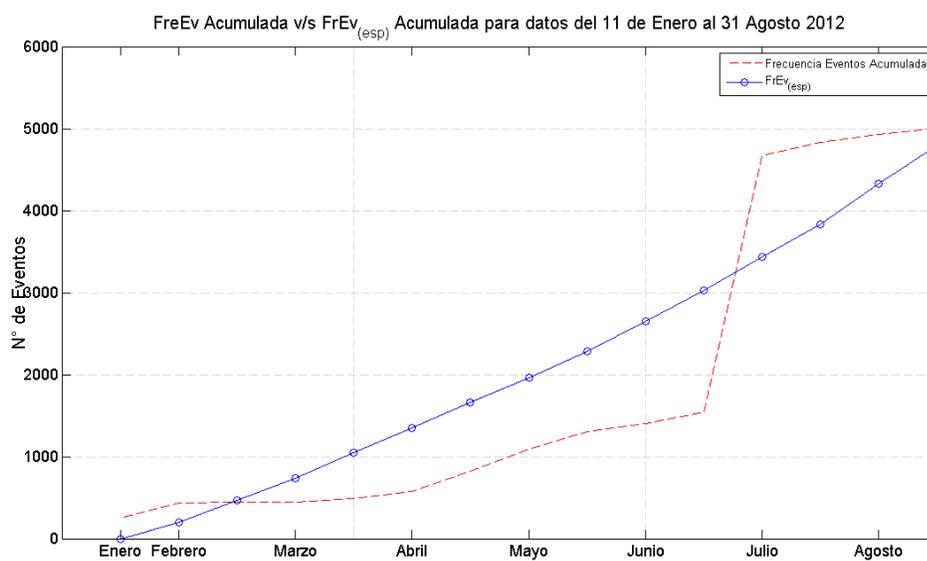


Figura 5.104. Frecuencia de eventos acumulada esperada obtenida del ajuste realizado para el Caso 2, siendo comparada con la frecuencia de eventos acumulada registrada por el sistema en dicho período.

Por último se ilustra en la **Figura 5.105** el ajuste obtenido para el Caso 3, donde se utilizan valores de eventos durante el período 01 de Enero al 30 de Abril del 2013. De la misma forma que los dos casos expuestos anteriormente la constante de proporcionalidad referida a la socavación α_s tiene mayor peso que las dos restantes. El valor de *rms* obtenido se encuentra ubicado en torno al 0.8 % de los *rms* más bajos obtenidos para este ajuste, lo que implica que es un muy buen ajuste para el caso.

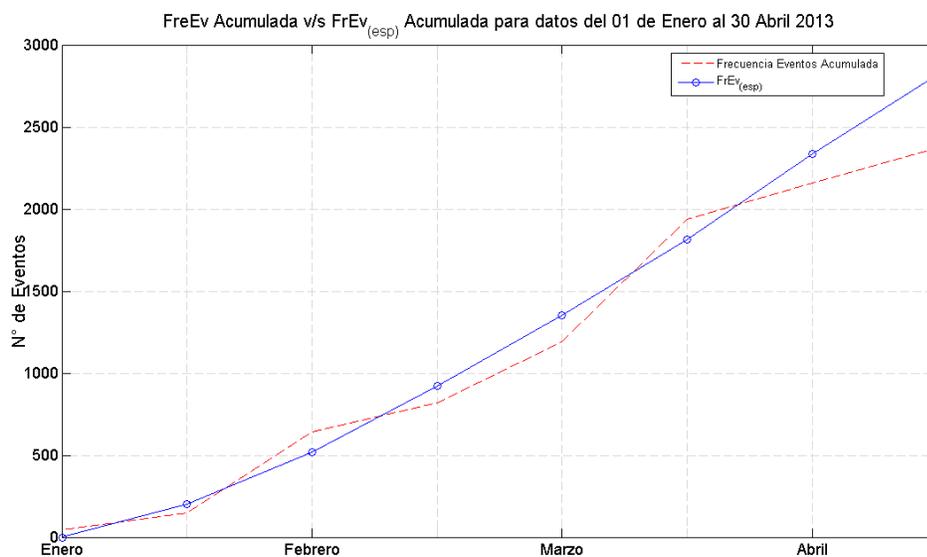


Figura 5.105. Frecuencia de eventos acumulada esperada obtenida del ajuste realizado para el Caso 3, siendo comparada con la frecuencia de eventos acumulada registrada por el sistema en dicho período.

De los tres casos expuestos podemos observar que la variabilidad de la ocurrencia de eventos va asociada en directa relación a la socavación, esto implica que el volumen activo generado en el sector es generado en gran parte por los volúmenes que son perturbados debido a la socavación del frente de hundimiento. Esto es seguido por el volumen perturbado que genera la de extracción y finalmente la apertura de bateas.

5.5. Estimación de la Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada $FrEv_{esp}$ para el sector de Minería Continua

Para realizar la estimación de la frecuencia de eventos acumulada esperada para el sector de Minería Continua se aplicarán los 3 casos calculados anteriormente que representan los mejores ajustes obtenidos. Además, se considera un parámetro beta (β) de 0.35, el mismo utilizado en el norte del Tercer Panel, debido a que las condiciones de esfuerzo y las propiedades del macizo rocoso son similares (**Ecuación 5.18**).

$$\text{Norte del Tercer Panel } (\sigma_1, \sigma_3) \approx \text{Minería Continua } (\sigma_1, \sigma_3) \quad (5.18)$$

De lo mencionado en la metodología expuesta (**Sección 4.4**), se considerarán 4 situaciones distintas para Minería Continua en donde se diferencian de la siguiente manera:

- ❖ **Situación 1:** 1500 m^2 mensuales para hundir y 5000 [tpd] de extracción.
- ❖ **Situación 2:** 1500 m^2 mensuales para hundir y 10500 [tpd] de extracción.
- ❖ **Situación 3:** 1800 m^2 mensuales para hundir y 10500 [tpd] de extracción.
- ❖ **Situación 4:** 1500 m^2 mensuales para hundir y 21000 [tpd] de extracción.

A continuación, en la **Tabla 5.26** se observan los intervalos de frecuencia de eventos acumulada esperada obtenidos para cada situación, el cual se realizó para cada caso obtenido en el ítem anterior.

Tabla 5.26. Valor mínimo y máximo obtenido para la Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada para cada situación propuesta.

Situación	Situación 1	Situación 2	Situación 3	Situación 4
Caso 1	237 – 1730	376 – 2619	397 – 2798	641 – 4317
Caso 2	269 – 1932	443 – 3044	464 – 3223	774 – 5166
Caso 3	174 – 1325	244 – 1770	265 – 1949	376 – 2619

De esta forma, se ilustra en la **Figura 5.106**, la frecuencia de eventos acumulada esperada ($FrEv_{(esp)}$) para la Situación 1, en donde se considera un hundimiento de 1500 m^2 mensuales y una extracción de 5000 toneladas por día. Se visualiza una franja que delimita los extremos de los resultados obtenidos para el Caso 2 y 3, en donde existe una diferencia de ~ 160 eventos al final del período 6 y una de ~ 600 eventos al final del período 11. Para el Caso 1 la tasa de eventos por período varía desde 40 a 170 eventos. Para el Caso 2 la tasa de eventos varía de 40 a 269 eventos y en el Caso 3 de 40 a 237 eventos, lo que indica que el aumento de sismicidad es mayor para el Caso 2, esto es apreciable en la **Figura 5.106**.

Se observa en las figuras que durante la períodos 1 y 2, en los tres casos se presenta una frecuencia de eventos acumulada esperada equivalente y por lo general cantidades bajas, esto justifica un contexto en el cual se empieza a perturbar el macizo rocoso in situ, zona donde no se ha realizado actividad minera, dicho de otro modo, se inicia la simulación desde un estado inicial donde no se ha realizado extracción, tampoco socavación y apertura de zanjas. Este patrón deberá repetirse en todas las situaciones propuestas en este ítem.

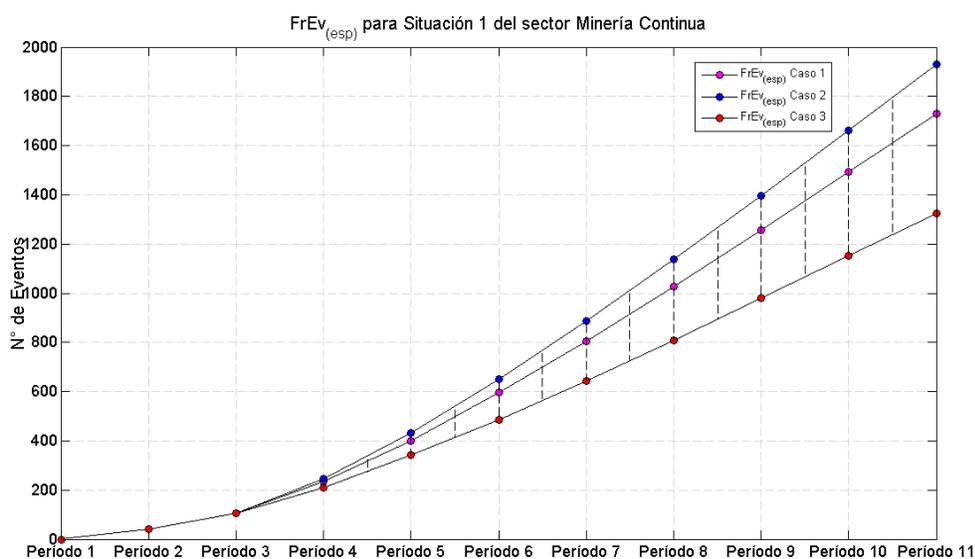


Figura 5.106. Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada para la Situación 1 del sector Minería Continua, donde se indica la curva obtenida del Caso 1 con puntos rosados, la curva resultante del Caso 2 en puntos azules y la del Caso 3 con puntos rojos.

Los resultados obtenidos para la Situación 2, se ilustran en la **Figura 5.107**, en donde se considera un hundimiento de 1500 m^2 mensuales y una extracción de 10500 toneladas por día. Se visualiza una franja que delimita los extremos de los resultados obtenidos para el Caso 2 y 3, en donde existe una diferencia de ~ 339 eventos al final del período 6 y una de ~ 1274 eventos al final del período 11. Esto indica un aumento de aproximadamente el 100% c/r a lo obtenido en la Situación 1.

Para el Caso 1 la tasa de eventos por período varía desde 40 a 376 eventos. Para el Caso 2 la tasa de eventos varía de 40 a 443 eventos y en el Caso 3 de 40 a 244 eventos, lo que indica que el aumento de sismicidad es mayor para el Caso 2 al igual que la Situación 1, esto es apreciable en la **Figura 5.107**.

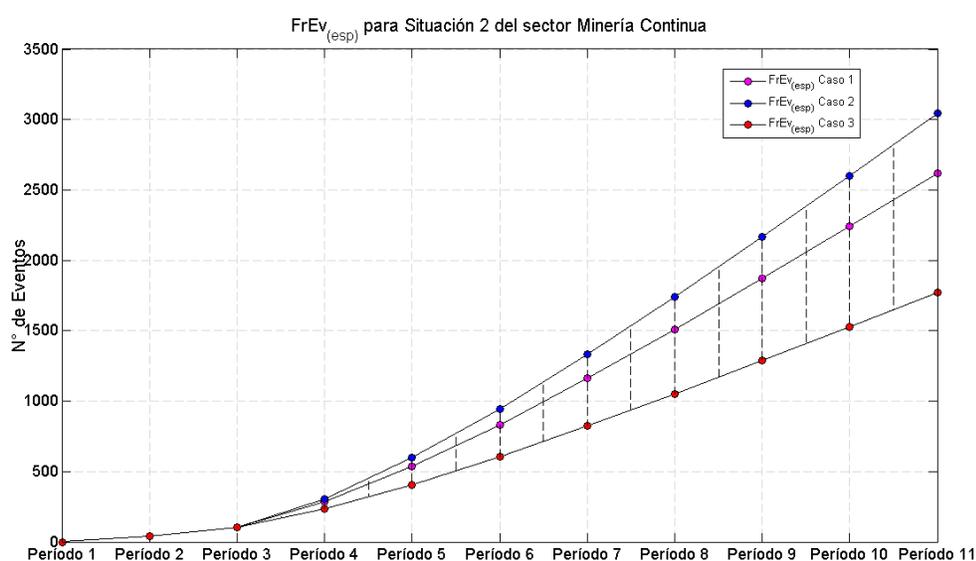


Figura 5.107. Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada para la Situación 2 del sector Minería Continua, donde se indica la curva obtenida del Caso 1 con puntos rosados, la curva resultante del Caso 2 en puntos azules y la del Caso 3 con puntos rojos.

Para continuar, en la **Figura 5.108**, se muestran los resultados obtenidos para la Situación 3, considerando un hundimiento de 1800 m^2 mensuales y una extracción de 10500 toneladas por día. Se observa una franja que delimita los extremos de los resultados obtenidos para el Caso 2 y 3, en donde existe una diferencia de ~ 339 eventos al final del período 6 y una de ~ 1274 eventos al final del período 11. Esto indica un aumento de aproximadamente el 100% c/r a lo obtenido en la Situación 1 y coincide con el mismo rango para la Situación 2.

Para el Caso 1 la tasa de eventos por período varía desde 48 a 398 eventos. Para el Caso 2 la tasa de eventos varía de 48 a 464 eventos y en el Caso 3 de 48 a 265 eventos, lo que indica que el aumento de sismicidad es mayor para el Caso 2 al igual que la Situación 1 y 2, esto es apreciable en la **Figura 5.108**.

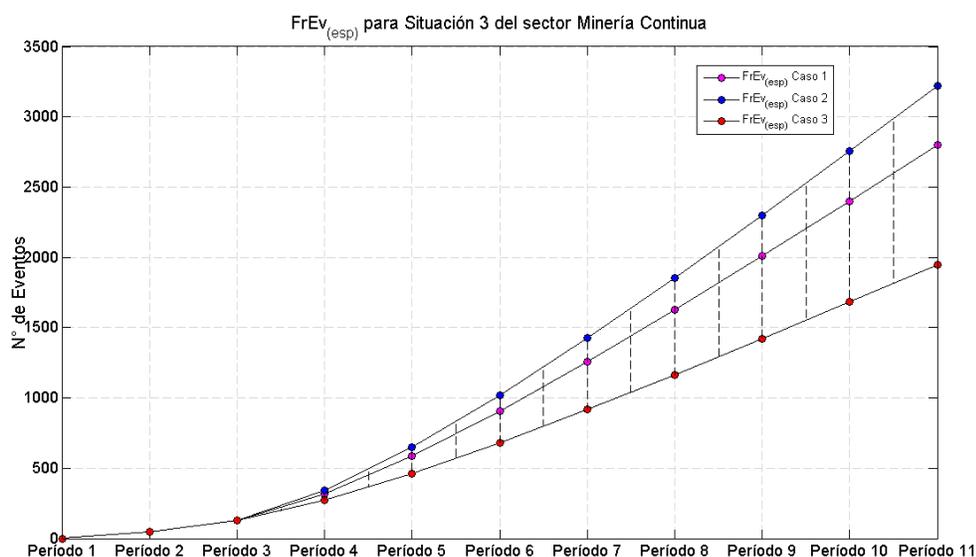


Figura 5.108. Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada para la Situación 3 del sector Minería Continua, donde se indica la curva obtenida del Caso 1 con puntos rosados, la curva resultante del Caso 2 en puntos azules y la del Caso 3 con puntos rojos.

Finalmente, en la **Figura 5.109**, se observan los valores resultantes para la Situación 4 considerando un hundimiento de 1500 m^2 mensuales y una extracción de 21000 toneladas por día. Se observa una franja que delimita los extremos de los resultados obtenidos para el Caso 2 y 3, en donde existe una diferencia de ~ 679 eventos al final del período 6 y una de ~ 2547 eventos al final del período 11. Esto indica un aumento de aproximadamente el 450% c/r a lo obtenido en la Situación 1 y un 200% c/r a la Situación 2 y Situación 3.

Para el Caso 1 la tasa de eventos por período varía desde 40 a 641 eventos. Para el Caso 2 la tasa de eventos varía de 40 a 774 eventos y en el Caso 3 de 40 a 376 eventos, lo que indica que el aumento de sismicidad es mayor para el Caso 2 al igual que la Situación 1, 2 y 3, esto es apreciable en la **Figura 5.109**.

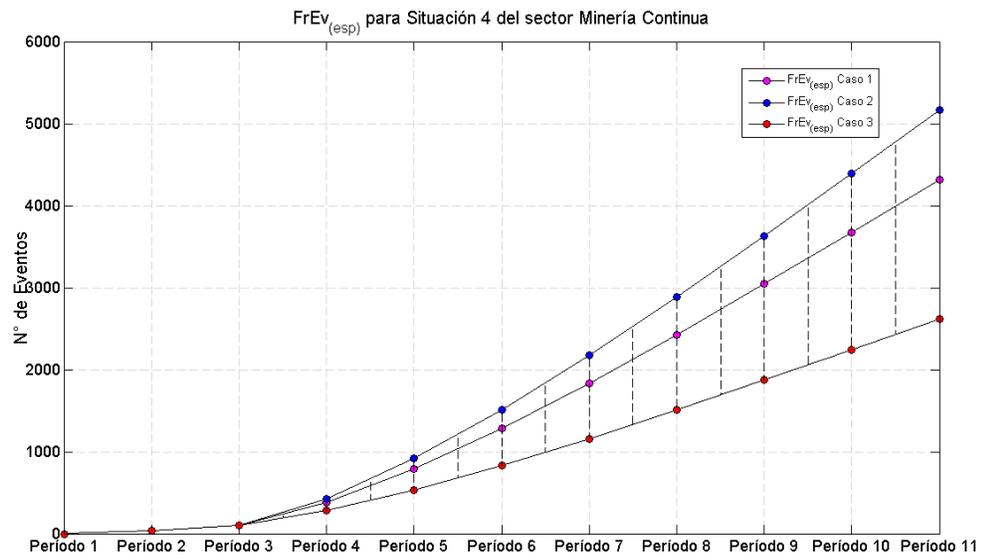
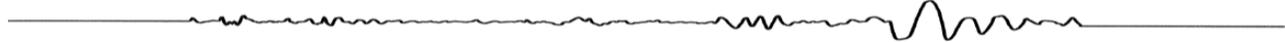


Figura 5.109. Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada para la Situación 4 del sector Minería Continua, donde se indica la curva obtenida del Caso 1 con puntos rosados, la curva resultante del Caso 2 en puntos azules y la del Caso 3 con puntos rojos.



VI.- Comentarios y Discusión

6.1. Instalación del Sistema Sísmico 2013

- ❖ La planificación que se realiza en la instalación de la red de sensores para un sistema de monitoreo sísmico involucra que el volumen de interés sea debidamente especificado, sumándose a esto, el considerar estructuras pre-existentes en la zona como lo es el contacto primario – secundario y la ubicación de sistemas estructurales mayores (fallas geológicas).
- ❖ Estudios como la sensibilidad de la red y la resolución la cual puede estar envuelta en este sistema son de gran apoyo a la calidad y eficacia de la futura red a disponer. Los valores obtenidos en estos dos parámetros concuerdan con el registro de eventos que se ha podido observar en el período que el sistema sísmico ha estado operativo.
- ❖ Para un diseño adecuado a la realidad y entorno minero, se deben considerar aspectos como la planificación del desarrollo de la minería, válgase esto, planes de hundimiento y extracción que son de gran ayuda para definir una ubicación adecuada del sensor y la durabilidad que pueda tener este. Además, tener en cuenta la infraestructura del sector como lo son los niveles inferiores o superiores, servirá de apoyo para no interferir en estas construcciones.
- ❖ El objetivo de un sistema de monitoreo micro-sísmico es ser una herramienta para el monitoreo y seguimiento de las condiciones del macizo rocoso, dando un apoyo a la evolución y comportamiento de este mismo que es afectado por las perturbaciones que genera la actividad minera, donde es vital que haya un óptimo funcionamiento de la red implementada. Este depende, de la correcta instalación que se realice además de la posterior manipulación y mantenimiento por parte de personal a cargo.
- ❖ Durante el desarrollo de la instalación del sistema sísmico es esencial tener atención y meticulosidad en la verificación del correcto funcionamiento de sus componentes y conexiones, esto forma parte de realizar las correctas conexiones en cada uno de los módulos (*Junction Box*, Caja sísmicas, Geófonos, entre otros.). Por otro lado, el personal a cargo de la introducción de los geófonos en el pozo, debe tener

en cuenta la adecuada colocación de los sensores en el mismo, ya que resulta indispensable que estos sean precisos en su ubicación, manteniendo su orientación con respecto al norte geográfico, para un óptimo registro de los eventos sísmicos.

- ❖ La calibración del sistema sísmico no deja de ser un punto menor a considerar, ya que su errónea ejecución puede mostrar una mala interpretación de las velocidades de onda P y S características del sector a monitorear. En esta oportunidad, se utiliza el último tiro de una quemadura donde previamente se sabe su ubicación, este método no es el más apropiado, ya que la quemadura corresponde a la detonación de 18 tiros, y aunque el último contemple un retardo, puede estar sujetos a detonaciones por simpatía lo que contribuye a observar registros acoplados que no muestren una señal clara, por lo que dificulta el procesamiento manual del evento y no logramos contemplar a cabalidad la información requerida. Se recomienda para esto, utilizar una quemadura la cual contemple sólo un tiro.

- ❖ La red implementada en el Norte del Tercer Panel, en el Nv. 16 de Hundimiento de la Mina Subterránea Río Blanco posee una limitancia que está asociada a la capacidad de tener sólo 30 canales a disposición, lo que dificulta el poder aumentar la cantidad de geófonos para dicho sistema, Aunque cabe mencionar que esto, va a depender de la extensión de la zona la cual se quiera monitorear.

6.2. Análisis de los eventos período 2012 – 2013

- ❖ El aumento de sismicidad registrado durante los meses de Junio y Agosto del año 2012 se asocia a tres posibles efectos: Por un lado, es posible que haya una modificación del Número de Asociación de eventos aceptados. Por otro lado, puede ser atribuido al aumento de la socavación registrado en el mismo período. Esto se puede apreciar a través de la visualización de eventos con el programa RTS, en el cual el aumento de la frecuencia de eventos es directamente proporcional al aumento de la socavación registrada en ese mismo período. Y por último puede estar asociado al cambio de criterio para el procesamiento manual de los eventos sísmico, que coincidió su cambio a fines del mes de Junio del 2011.

En este mismo contexto, se adhiere la ocurrencia de un DDE (08 de Junio 2012), aunque no es posible concretar si dicho acontecimiento activo el macizo rocoso en las dimensiones observadas en esa misma fecha.

- ❖ Respecto al criterio para procesar los eventos sísmicos, se recomienda que cada vez que haya una pérdida de sensores, se modifique el “Número de Asociación” de eventos aceptados y también el número de sensores para la cual el sistema acepta automáticamente los eventos, con esto, se evita que la frecuencia

de eventos aumente de manera considerable con eventos que contienen un gran nivel de resonancia en sus registros, así no se pierde la calidad de los eventos registrados.

- ❖ En planta, la sismicidad de ambos períodos se concentra a lo largo de calles, cruzados y estructuras geológicas mayores, en particular, en la intersección de dichas estructuras. En sección, es posible visualizar el avance de la sismicidad y la formación de la zona sismogénica (volumen activo) en la dirección de avance del frente de hundimiento. Sólo para el período 2012, se observa una zona intacta que es rodeada por una sismicidad que forma una especie de “herradura”.
- ❖ Relacionando la actividad minera y la frecuencia de eventos en el período 2013, se puede observar que la evolución temporal y espacial de los parámetros sísmicos expuesto indican que la Socavación controla la ocurrencia de sismicidad registrada en el volumen de macizo analizado por sobre la Extracción. Y la ausencia de estas forzantes en el desarme del macizo reduce paulatinamente el número de eventos sísmicos e induce una condición estable en el macizo, lo cual establece una fuerte relación entre actividad minera y ocurrencia de sismicidad.

El desarrollo de la Extracción tanto espacial como temporal no muestra una dependencia predominante con respecto a la frecuencia de eventos registrada en los sectores a monitorear, su progreso a través del tiempo es más bien lineal.

- ❖ Con respecto a la activación de fallas pre-existentes en la zona, es posible a través de los datos obtenidos durante el período 2013, visualizar este tipo de liberaciones concentrándose en estructuras mayores. El sistema impuesto está sujeto a condiciones estructurales, donde la energía tiende a liberarse por estructuras, donde se encuentra la presencia de planos más débiles existentes en el macizo rocoso, los cuales los eventos mayoritariamente se extienden por cizalle y no por tracción.
- ❖ Además es posible asociar el contacto primario – secundario (**Figura 5.82**). La sismicidad se encuentra localizada bajo la superficie del contacto primario – secundario teniendo en cuenta que gran parte de la sismicidad ocurre en roca primaria. Sin embargo, existen algunos eventos localizados sobre este, esto se puede explicar primero, como un posible error de localización de los mismos en el momento del proceso, pero se debe tener en cuenta que el contacto primario – secundario no corresponde a una superficie exacta, ya que posee un intervalo de transición entre ambas mineralizaciones.

- ❖ En ambos períodos analizados es posible asociar la zona sismogénica en diferentes formas, pero coherentes con el modelo conceptual de hundimiento (**Sección 3.1**). En la cual, se observa la forma “cóncava” que delimita la zona de desarme, en donde se produce la actividad sísmica inducida por la minería (frente de hundimiento). De lo anterior, es posible apreciar en distintos períodos una forma cóncava cada vez más elevada, suponiendo con esto, un régimen de *caving* activo.
- ❖ Las variaciones registradas del índice de energía (IE) y volumen aparente acumulado (VAA), muestran de manera clara períodos de desarme y acumulación de energía, en donde estos resultados han sido de apoyo al área de geomecánica para visualizar el comportamiento del *caving* a lo largo del tiempo.
- ❖ Es válido mencionar que durante el tiempo que el sistema sísmico 2013 ha estado operativo, gran parte de la sismicidad registrada se aloja en los sectores del frente de hundimiento, lo que indica que la calidad de los registros es la adecuada, porque ilustra lo que realmente está ocurriendo en el macizo rocoso.

6.3. Sensibilidad y Resolución para Sistema Sísmico en el sector de Minería Continua

- ❖ La propuesta de sensores utilizada para este desarrollo apoya la calidad de los resultados obtenidos, ya que se han tomado las recomendaciones de las experiencias anteriores (red sísmica 2011 y 2013), considerando una red sísmica mucho más homogénea en todas sus componentes.
- ❖ La sensibilidad de una red estará siempre sujeta al nivel de *trigger* que uno quiera establecer en la configuración, el cual, limita el intervalo de frecuencias que los sensores puedan llegar a captar, afectando directamente en los valores de magnitud resultantes. Esto se realiza generalmente para una mejora en el nivel de resonancia en los registros.
- ❖ La resolución del sistema propuesto, estará condicionado al error de las velocidades de onda registradas por los sensores una vez que se realice la calibración de este, cabe destacar, que el desarrollo impuesto en esta investigación utiliza los registrados por el sistema sísmico emplazado en el sector del Norte del Tercer Panel.

6.4. Estimación de la Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada para el Sector Norte del Tercer Panel

- ❖ Las aproximaciones establecidas en el desarrollo de este parámetro están sujetas a posibles extensiones y refinamientos. Además, los volúmenes activos para cada período han sido considerando la ocurrencia de eventos más visible, dicho de otro modo, cuando se observe un clúster de sismicidad. El largo característico del volumen activo considerado, debe ser donde predominan las rupturas y no necesariamente corresponden a la vertical. No se ha considerado las diferencias litológicas impuestas en la roca de cada sector.
- ❖ Las constantes de proporcionalidad de la socavación, de la extracción y de la apertura de zanjas obtenidas del ajuste, son cantidades que traducen cuantos metros cúbicos se refieren a volumen activo, estos resultados se encuentra bajo el 10% de los rms obtenidos, lo que implica un buen ajuste para cada caso.

6.5. Estimación del Índice de Minería Sector Minería Continua

- ❖ Considerando que el desarrollo de este parámetro es un alcance preliminar al comportamiento que tendrá el macizo rocoso emplazado en el sector de Minería Continua, no fue posible incluir dentro de los cálculos desarrollados un factor de ajuste que incluya el efecto en el cual la roca estará condicionada a efectos del Pre-Acondicionamiento con el método mixto (FH y DDE), ya que la experiencia en dicha labor aún está en desarrollo.
- ❖ Es importante destacar, que ningún modelo es válido si no es calibrado, en el caso de este, se han utilizado constantes tomadas por los ajustes realizados para el Norte del Tercer Panel. Entonces queda pendiente para el sector de Minería Continua el desarrollo de este método, ya que no será 100% validado hasta obtener datos reales tomados del sector para su posterior calibración.



VII.- Conclusiones

- ❖ El registro observado durante el período 2013 está bajo un criterio de procesamiento el cuál entrega resultados con errores de localización muy bajos y parámetros mucho más precisos en comparación a registros de eventos observados durante el año 2012. Además, en la visualización de estos se observa una menor dispersión, y dichos eventos se logran concentrar en el avance del hundimiento o en casos particulares en torno a estructuras geológicas.
- ❖ El sistema de monitoreo sísmico emplazado en el Nivel 16 Hundimiento es bastante vulnerable a condiciones operacionales, tales como: caídas de energía eléctrica, caídas del punto de red, cortes y daño de cables por equipos mineros u otras operaciones, entre otros. Para esto, es importante realizar chequeos diarios que nos entreguen el estado en el cual se encuentra la red sísmica utilizando información desplegada desde el software RTS, además, de la inspección en terreno para una visualización de las componentes y su funcionamiento.
- ❖ Entre los principales factores que perturban el macizo rocoso, tenemos que las labores mineras de socavación dominan por sobre las de extracción y la apertura de zanjas en la ocurrencia de eventos en el sector de estudio.
- ❖ Es importante tener en cuenta el sistema de estructuras y el contacto primario – secundario presente en el volumen de macizo involucrado en el análisis, ya que es un controlador de posibles fuentes sísmicas. Se determina una proporcionalidad entre la sismicidad generada y el volumen que conforma la roca primaria, y además la existencia de estructuras mayores existentes en el sector de análisis.
- ❖ La red de sensores propuesta para el sistema sísmico en el sector de Minería Continua entrega valores razonables de sensibilidad y resolución, que no escapan de lo observado en los registros del período 2012-2013 en el sector del norte del tercer panel. Es recomendable que al momento que se pierdan sensores, se realice la configuración del número de asociación para evitar pérdidas en la calidad de los registros.

- ❖ En la estimación de la Frecuencia de Eventos Acumulada Esperada en el norte del Tercer Panel, las actividades socavación predominan por sobre las actividades de extracción y la apertura de zanjas.

Anexo A: Elementos Básicos de Sismología Aplicados a Minería Subterránea

A.1. Ondas Mecánicas

Las ondas sísmicas resultan del equilibrio entre esfuerzo y deformación. Generalmente, la relación entre el esfuerzo y la deformación está dada por un tensor de cuarto orden:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (\text{A.19})$$

Para un medio homogéneo, isotrópico, continuo y elástico:

$$c_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (\text{A.20})$$

Donde λ y μ son los parámetros de Lamé, μ es el módulo de corte, o rigidez, (*shear modulus*), y $\kappa = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ es el módulo de incompresibilidad (*bulk modulus*), donde constituyen las constantes elásticas del medio (Peter M., 2009). La combinación de la **Ecuación A.1** y **Ecuación A.2** nos da:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} + 2\mu \epsilon_{ij} \quad (\text{A.21})$$

Con esto, es posible buscar la ecuación de movimiento en un cierto volumen dV ; y tenemos que la suma (integral) de la masa por la aceleración dentro del volumen es igual a las fuerzas de superficie y de volumen que actúan sobre dV :

$$\int_V \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} dV = \oint_S T_i dS + \int_V f_i dV = \oint_S \sigma_{ij} n_j dS + \int_V f_i dV \quad (\text{A.22})$$

Usando el teorema de la divergencia de Gauss,

$$\oint_S \vec{a} \cdot \vec{dS} = \oint_S a_i n_i dS = \int_V \nabla \cdot \vec{a} dV = \int_V \frac{\partial a_i}{\partial x_i} dV \quad (\text{A.23})$$

Ignorando las fuerzas de cuerpo (esta aproximación sirve para altas frecuencias, fuerzas como gravedad son solamente importantes en periodos mayores que ~ 300 s), llegamos a

$$\int_V \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} dV = \int_V \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} dV \quad (\text{A.24})$$

Usando la **Ecuación A.1** podemos escribir la ecuación de movimiento como:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \quad (\text{A.25})$$

Y en forma vectorial, utilizando la **Ecuación A.2**, la ecuación de movimiento queda descrita como:

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \vec{\mathbf{u}}) + \mu \nabla^2 \vec{\mathbf{u}} \quad (\text{A.26})$$

Por último, utilizando la identidad vectorial, $\nabla^2 \vec{\mathbf{u}} = \nabla(\nabla \cdot \vec{\mathbf{u}}) - \mu(\nabla \times \nabla \times \vec{\mathbf{u}})$ en la **Ecuación A.8** en componentes de dilatación y rotación:

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = (\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot \vec{\mathbf{u}}) - \mu(\nabla \times \nabla \times \vec{\mathbf{u}}) \quad (\text{A.27})$$

A partir de la divergencia de la **Ecuación A.9** llegamos a

$$\rho \frac{\partial^2 (\nabla \cdot \vec{\mathbf{u}})}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 (\nabla \cdot \vec{\mathbf{u}}) \quad (\text{A.28})$$

Donde define la propagación de un cambio en el volumen ($\nabla \cdot \vec{\mathbf{u}}$) a través del medio. Aquí, hablamos de la **Onda -P**, que corresponden a ondas de compresión, o longitudinales, que se caracterizan por tener un movimiento de las partículas del sólido en la misma dirección en que se propagan los frentes de ondas. Su velocidad de propagación está dada por:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{\kappa + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (\text{A.29})$$

Y a partir del rotor de la **Ecuación A.9**, y aplicando la identidad vectorial mencionada anteriormente, llegamos a:

$$\rho \frac{\partial^2 (\nabla \times \vec{u})}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 (\nabla \times \vec{u}) \quad (\text{A.30})$$

Donde caracteriza a una **Onda-S**, que define la propagación de una perturbación rotacional a través del medio, corresponde a las ondas de corte o cizalle, las que se caracterizan por un movimiento de las partículas del medio transversal a la dirección de propagación de los frentes, con su velocidad de propagación de:

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (\text{A.31})$$

La energía asociada a la radiación sísmica se libera en forma de dos tipos de ondas como mencionamos anteriormente: ondas compresionales (conocida como onda P, cuya P denota su calidad de Fase Primaria en el registro sísmico) y ondas de cizalle o corte (conocida como onda S, cuya S denota su calidad de Fase Secundaria en el registro sísmico). Cada una de estas fases (P y S) contienen parte de la energía sísmica radiada desde la fuente de un evento sísmico. Su razón, E_s/E_p , se puede interpretar como un estimador del estilo dominante de fractura en la fuente sísmica, pudiendo ser predominantemente de corte (mayor concentración de la energía radiada en la fase de corte S) o de tracción (mayor concentración de la energía radiada en la fase compresional P) (Belmonte, 2011).

Estos dos tipos de ondas son llamados ondas de cuerpo que se propagan por el interior del medio. Cabe mencionar, que la velocidad de la onda-P es mayor que la velocidad de la onda-S. Al considerar límites o discontinuidades en el medio, se debe tener en cuenta la generación de ondas superficiales que se propagan en un entorno de esos límites. La energía de estas ondas superficiales se deriva directamente de las ondas de cuerpo que le dieron origen. Sólo son importantes a distancia apreciable de la fuente cuando una cantidad considerable de energía originalmente en forma de ondas de cuerpo se ha traspasado a ondas superficiales. Por lo que, en general, no tienen relevancia para el caso de sismicidad inducida por minería (Dunlop & Gaete, 1999).

A.2. Localización de Fuentes Sísmicas

La localización de un evento sísmico implica derivar de la información recogida por una red sísmica, básicamente en este caso, se extrae la serie de tiempo correspondiente a la velocidad de las partículas del medio, la información de las coordenadas de localización de la fuente sísmica (x_0, y_0, z_0) , y el tiempo origen del evento (t_0) . De esta manera obtenemos el hipocentro $h(x_0, y_0, z_0, t_0)$, y su proyección en superficie se conoce como epicentro. La estimación de los otros parámetros sísmicos dependerá en algún grado de la localización de la fuente de ahí la importancia de ésta.

Este parámetro de localización es básico para caracterizar un evento sísmico, en la perspectiva de entender la respuesta sísmica del macizo en función de la minería realizada. Se pueden considerar tres factores que dependen directamente de la calidad con la que se obtiene esta localización.

- ❖ El cálculo de los parámetros de la fuente sísmica.
- ❖ La interpretación de los eventos relativos a la minería desarrollada.
- ❖ La interpretación de gradientes espacio-temporales de la sismicidad y criterios de estabilidad del macizo rocoso en que estos eventos participen.

El algoritmo usado por el sistema ISS consiste en minimizar la función siguiente:

$$\text{LOC}(\mathbf{h}) = \sum_j w_j |V_j \{t_j - t_a - [T_j(\mathbf{h}) - T_a(\mathbf{h})]\}| \quad (\text{A.32})$$

Esta función es la suma de los residuos, es decir las diferencias en tiempo entre los tiempos de llegada observados y los calculados para las j estaciones que participan en el registro de un evento. Los valores de V_j son los valores medios de las velocidades de las ondas P o S definidas como datos de entrada para el sistema. Los valores t_a y T_a son promedios de los tiempos de llegada, y de los tiempo de viaje, tales que el tiempo origen del evento t_0 , es igual a la diferencia $(t_a - T_a)$. Los valores de los pesos w_j son estimados por el sistema en función de la calidad de la determinación de los tiempos de llegada.

En general la localización depende del algoritmo utilizado para la determinación de la localización del foco sísmico. A una mayor densidad de estaciones y a una mayor precisión de los datos, menor es la influencia del algoritmo seleccionado. Como un ejemplo específico para el caso del sistema ISS, el error del algoritmo debería ser del orden del 3% de la distancia promedio entre el foco sísmico y las estaciones que participan en la determinación (Dunlop & Gaete, 1999).

Como todo cálculo está sujeto a desaciertos, de los factores que influyen en el error de localización para un evento dado esta en el error en la determinación de los tiempos de llegadas sea onda P u onda S. Otro factor, está en la desviación de las velocidades del macizo respecto de las velocidades medias de las ondas P y S definidas para el sistema. También, de la suposición de trayectorias rectas de los frentes de ondas desde la fuente a las estaciones. Y por último, de la geometría de la distribución de estaciones sísmicas respecto de la fuente sísmica (Dunlop & Gaete, 1999).

A.3. Parámetros de Fuentes Sísmicas

A.3.1. Modelo de Fuente Sísmica

Entre los modelos de fuentes existentes que pueden usarse en la estimación de los parámetros de la fuente, el Instituto de Sismología Minera, *IMS (Institute of Mine Sismology)*, utiliza el *Modelo Cinemático de Brune (1970)* (Dunlop & Gaete, 1999).

Entre sus características y prioridades se puede destacar lo siguiente:

- ❖ Cinemático, la fuente se considera una dislocación.
- ❖ Fallamiento es solamente por cizalle en un área circular plana.
- ❖ Iniciación del deslizamiento en todos los puntos de la superficie (no considera propagación de la ruptura con velocidad finita).
- ❖ Desplazamiento es función del tiempo y la posición en el área fallada.
- ❖ Se asume 100% de caída de esfuerzos.
- ❖ Ondas de corte se propagan perpendiculares a la falla.
- ❖ Los parámetros de fuente no son función del ángulo entre la normal a la falla y el punto de observación.

A.3.2. Momento Sísmico

Los parámetros como el momento sísmico escalar y energía radiada pueden ser considerados los parámetros básicos para la caracterización de un evento sísmico asociado a un proceso de ruptura, proceso que requiere a lo menos dos parámetros para una adecuada caracterización. El parámetro momento sísmico es una estimación de las dimensiones geométricas de la fuente, sin dependencia del modelo de fuente. En primer

lugar, para el caso de una ruptura plana por corte, entonces el momento sísmico puede ser estimado por la expresión:

$$M_0 = \mu S u \text{ [N-m]} \quad (\text{A.33})$$

Donde S es el área fallada, u el desplazamiento medio en el área S y μ es la constante de rigidez del medio. Además, el momento es proporcional a la integral del pulso de desplazamiento en el campo lejano, y por lo tanto puede ser derivado directamente de las formas de ondas (sismogramas) registradas. Para estimar este parámetro, el sistema ISS usa la **Ecuación A.16** (Mendecki, 1997).

$$M_0 = 4\pi\rho V^3 DOR \quad (\text{A.34})$$

Donde ρ es la densidad del medio, V es la velocidad de ondas P o S, D es la distancia de registro a la fuente, O es el valor de la asíntota al tender la frecuencia a cero en el espectro de frecuencias de la fuente y R es el patrón de radiación de las ondas P o S, es decir la amplitud de la onda en función de la dirección de propagación desde la fuente.

A.3.3. Energía Radiada

Y en segundo lugar, tenemos que la energía radiada es una estimación de la energía total radiada por la fuente como ondas elásticas. Se considera que la energía sísmica es proporcional a la integral del cuadrado del espectro de velocidades en el campo lejano y se puede obtener de las formas de las ondas registradas. La estimación de este parámetro usado por el sistema ISS descrito e la **Ecuación A.17**.

$$E_c = 4\pi\rho V S_v \quad (\text{A.35})$$

Donde S_v es la integral del cuadrado del espectro de velocidad de la fuente. La energía radiada total se obtiene de la suma de las energías calculadas para las ondas P y S. En general, sus valores varían en un rango de 0,1% a 5% de la energía total usada para generar la ruptura. La mayor parte de la energía radiada por los eventos ocurridos en la mina tiende a concentrarse en las ondas de corte, efecto más marcado en la medida que el mecanismo de generación se aproxima a un fallamiento sólo por corte, es decir, a un mecanismo de doble cupla (Dunlop & Gaete, 1999).

A.3.4. Frecuencia de Esquina

Corresponde a la frecuencia predominante radiada desde la fuente (f_0). Para una onda S en roca competente, f_0 se puede relacionar con el momento sísmico y la caída de tensión a través de la expresión de la **Ecuación A.18** (Mendecki et al. A. , 1999).

$$f_0 = 1815^3 \sqrt{\frac{\Delta\sigma}{M_0}} \text{ [Hz]} \quad (\text{A.36})$$

Además se relaciona directamente con el tamaño del evento sísmico:

$$r_0 = \frac{KV_s}{2\pi f_0} \quad K=1.4 \quad (\text{A.37})$$

Con V_s velocidad de onda S y r_0 Radio de Brune. El rango de frecuencia recomendado (ancho de banda) varía entre $\frac{f_0}{2}$ y $5f_0$.

A.3.5. Radio de Ruptura

El radio de la ruptura (modelo de Brune), puede ser estimado por la expresión siguiente:

$$r = 2.34V_s/2\pi f_c \quad (\text{A.38})$$

Donde V_s es la velocidad de ondas S y f_c es la frecuencia esquina del espectro en frecuencia de los sismogramas, que marca una brusca caída en el contenido de frecuencias de la señal sísmica.

A.3.6. Caída de Esfuerzos

En cuanto al parámetro de caída de esfuerzos, este determina la disminución de los esfuerzos en la zona de la fuente sísmica por efecto de la generación de la ruptura, y se calcula mediante la expresión:

$$\Delta\sigma = cM_0 f_0^3 \quad [\text{Pa}] \quad (\text{A.39})$$

Donde $c = 1.8 \times 10^{-10}$ para una estimación basada en las ondas S, en un macizo competente primario confinado, M_0 corresponde al momento escalar, y f_0 es la frecuencia esquina. Si se considera que los eventos sísmicos liberan energía de deformación acumulada cerca de la zona de fallamiento, se puede utilizar la energía sísmica radiada para estimar la caída de esfuerzos (o caída de tensión), obteniéndose, de esta manera, otra expresión para definir la caída de tensión, donde se muestra que ésta es proporcional al momento sísmico e inversamente proporcional a las dimensiones de la falla (Stein & Wysession, 2003).

$$\Delta\sigma = \frac{cM_0}{L^3} \quad [\text{Pa}] \quad (\text{A.40})$$

La constante c depende de la forma de la falla y la dirección de ruptura. Para el caso de una falla circular, modelo utilizado por el sistema sísmico IMS, se considera que $c = 7/16$ y $L = R$, con R el radio circunferencial. Tomando en cuenta la expresión anterior, la energía total de deformación (W) (**Ecuación A.23**), es igual al producto del esfuerzo promedio (σ) durante el fallamiento, el deslizamiento medio (ε) y el área de falla (S). Además, la energía sísmica radiada es igual a la diferencia entre la energía total W y cierta cantidad de energía H perdida como fricción (**Ecuación A.24**). Un límite inferior para la energía sísmica radiada E_0 es proporcional a la caída de tensión y el momento sísmico (**Ecuación A.25**) (Belmonte A. , Sismología Aplicada a Minería Subterránea, DERK Ingeniería y Geología Ltda., 2005).

$$W = \sigma \varepsilon S \quad (\text{A.41})$$

$$E = W - H \quad (\text{A.42})$$

$$E_0 = \frac{\Delta\sigma}{2\mu} M_0 \quad (\text{A.43})$$

Combinando estas ecuaciones, se obtienen expresiones aplicables al problema sísmico-minero:

$$E_0 = \frac{1}{2\mu} \frac{cM_0^2}{L^3} \quad (\text{A.44})$$

$$\frac{E_0}{D} \propto \frac{1}{L} \quad (\text{A.45})$$

En términos globales, se considera que la energía sísmica radiada E_0 es idéntica a E . Esta condición se da siempre y cuando el esfuerzo final, en el momento que el fracturamiento se ha detenido, es igual al esfuerzo friccional, asociado a la energía perdida H (Belmonte, Sismología Aplicada a Minería Subterránea, DERK Ingeniería y Geología Ltda., 2005).

Considerando la **(Ecuación A.26)**, esta indica que la energía sísmica radiada por unidad de deformación inelástica co-sísmica es inversamente proporcional a la dimensión característica de la falla. Es posible inferir que altos valores de energía liberada estarán relacionados con bajos valores de dimensión característica de falla y viceversa. Dado esto, es posible introducir entonces la calidad del macizo rocoso, en términos de macizo competente, “duro”, altamente confinado o intacto, o bien, poco competente, “blando”, desconfinado o degradado. En el primer caso (roca competente) se espera que la roca esté sometida a altos esfuerzos locales de tal forma que una ruptura esté asociada con valores altos de energía radiada, por tanto, alta caída de tensión, mientras que en el segundo caso (roca poco competente) una ruptura tendrá asociado valores bajos de energía radiada, y así también baja caída de tensión (Belmonte, Sismología Aplicada a Minería Subterránea, DERK Ingeniería y Geología Ltda., 2005).

A.3.7. Tensor de Momento

El tensor de momento busca una aproximación a la física de la fuente sísmica supuesta puntual. Para esto, la fuente se aproxima por un sistema de fuerzas equivalentes. De esta forma, los desplazamientos en el medio debido a las fuerzas equivalentes $f(r, t)$, pueden escribirse como:

$$d(x, t) = \iint G(x, t; r, t) f(r, t) dV(r) dt \quad (\text{A.46})$$

Donde $G(x, t; r, t)$ es la función de Green del medio, las integrales son sobre la duración t de la fuente y sobre el volumen V de la fuente donde se definen esas fuerzas equivalentes. Esta expresión puede simplificarse como:

$$\mathbf{d}(x, t) = \mathbf{M}_{kj}[\mathbf{G}_{nkj} * s(t)] \quad (\text{A.47})$$

Si la función de tiempo de la fuente $s(t)$, se asume como una función delta, entonces el término entre paréntesis describe nueve cuplas (**Figura A.110**), y M_{kj} las componentes de un tensor de segundo orden denominado tensor de momento sísmico (Dunlop R. , FUNDAMENTOS PARA LA CONDUCCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA A UN MÉTODO DE CAVING, CODELCO-CHILE División El Teniente, 2001).

a) Aproximación de Doble Cupla y Desarrollo

Para el caso de una ruptura que puede modelarse como un deslizamiento en las caras de un plano de falla, las fuerzas equivalentes en la fuente sísmica pueden modelarse como una doble cupla actuando en dos planos ortogonales (Dunlop R. , FUNDAMENTOS PARA LA CONDUCCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA A UN MÉTODO DE CAVING, CODELCO-CHILE División El Teniente, 2001).

La inversión del tensor de momento puede ser realizada tanto en tiempo como en frecuencia. El tensor puede obtenerse a partir de invertir el sistema lineal de ecuaciones:

$$\mathbf{u} = \mathbf{G} * \mathbf{m} \quad (\text{A.48})$$

En el dominio temporal, \mathbf{u} puede formarse con observaciones de desplazamientos en n estaciones, \mathbf{m} es el vector con las 6 componentes independientes del tensor, y \mathbf{G} es una matriz de $[n \times 6]$ que contiene las funciones de Green acordes al modelo del medio en uso. Las determinaciones de desplazamiento a partir de los sismogramas y el cálculo de las funciones de Green, permitirán la obtención del tensor. Para el caso de la aproximación de doble cupla, del tensor de momento obtenido pueden derivarse los parámetros geométricos de un par de planos conjugados, llamados planos nodales, de entre los cuales podría seleccionarse el plano de ruptura más probable con alguna información, por ejemplo, información estructural en el volumen de ocurrencia del evento.

Para una aproximación de doble cupla, se pueden derivar los parámetros geométricos de un par de planos conjugados, llamados planos nodales, de entre los cuales podría seleccionarse el plano de ruptura más probable con alguna información, por ejemplo, información estructural en el volumen de ocurrencia del

evento. Es posible representar los planos nodales mediante proyección en una red estereográfica en el hemisferio inferior (Romero, 2012). En la **Figura A.111** se muestran las proyecciones para cuatro casos.

b) Descomposición del Tensor

El tensor de momento sísmico, real y simétrico, puede descomponerse en una componente isotrópica y en una deviatórica.

$$M = aS + bD = \frac{1}{3} \left\{ Tr(M) * I + [M - \frac{1}{3} * I] \right\} \tag{A.49}$$

Donde a y b son constantes, y Tr es la traza del tensor, S es la componente isotrópica, y se asocia a un cambio de volumen en la fuente, el cual es producido por implosión o explosión, dependiendo del signo de la traza del tensor, y D es la componente deviatórica, este puede interpretarse como un movimiento de corte puro en el plano de falla más un movimiento residual (Dunlop R. , FUNDAMENTOS PARA LA CONDUCCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA A UN MÉTODO DE CAVING, CODELCO-CHILE División El Teniente, 2001).

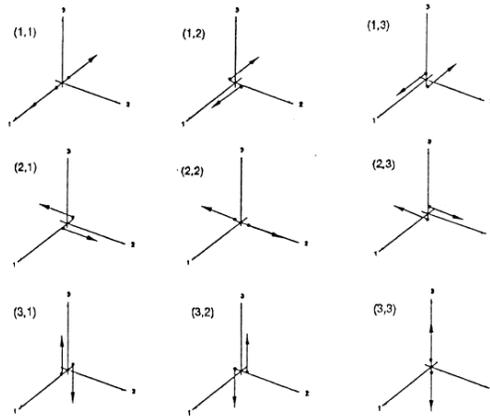


Figura A.110. Fuerzas equivalentes a la fuente sísmica.

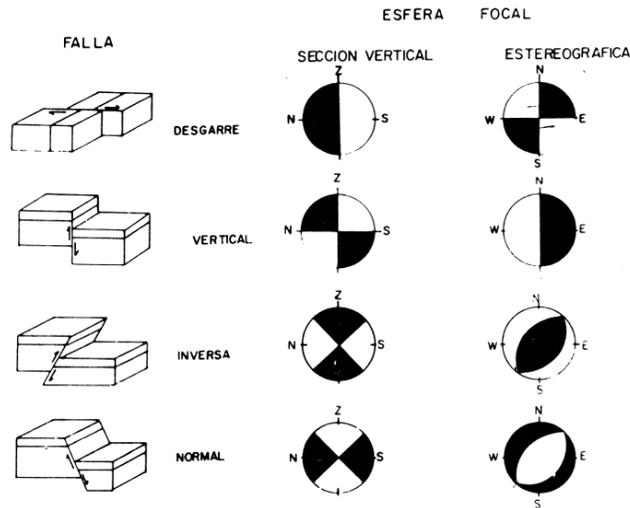


Figura A.111. Proyección de mecanismos focales.

c) Mecanismos de Eventos Inducidos y Tectónicos

Se ha planteado que los mecanismos de ruptura son similares tanto para los eventos tectónicos como para los eventos inducidos en minería. Sin embargo, existe una diferencia dada por la escala y la geometría de las rupturas. En general, en sismicidad tectónica, un evento corresponde a la ruptura parcial de una discontinuidad geológica, o a la reactivación de una discontinuidad preexistente ya fallada, en la corteza superior terrestre. No se observan fenómenos asociados a los extremos de la ruptura que ocurran por el deslizamiento sólo en una porción de la discontinuidad donde la existencia de asperezas no ha permitido un deslizamiento asísmico en la estructura. Luego, los mecanismos de ruptura corresponden en mayor grado a mecanismos mejor aproximados por rupturas planas con mecanismos de doble cupla.

Por el contrario, una ruptura a escala local en la mina, es un proceso que no se da aislado sino que forma parte de un proceso de formación de bloques, en particular para todos los procesos de ruptura que tienen lugar en el macizo sobre el nivel de hundimiento correspondiente a un sector de explotación. Esto significa que mientras una ruptura correspondiente a la formación de una cara de un bloque pudiera asociarse a un efecto de corte puro, al mismo tiempo se puede generar otra ruptura correspondiente a una cara adyacente a la anterior, que deberá tener una componente de extensión. Por lo tanto, esto podría reflejarse, por ejemplo, en que los mecanismos en los eventos inducidos pueden tener con mayor frecuencia una componente isotrópica no despreciable, que en el caso tectónico no es tan común (Figura A.112) (Dunlop R., FUNDAMENTOS PARA LA CONDUCCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA A UN MÉTODO DE CAVING, CODELCO-CHILE División El Teniente, 2001).

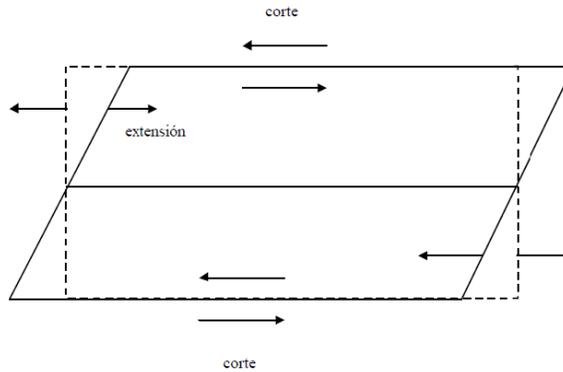


Figura A.112. Corte y extensión en formación de un bloque.

A.4. Parámetros de la Sismicidad Inducida

Se han desarrollado algunos parámetros que permiten caracterizar estadísticamente el “flujo sísmico” en el macizo, es decir, la evolución en el tiempo de la deformación del macizo hacia las cavidades generadas por la minería. Los parámetros básicos para esta caracterización son el esfuerzo y la deformación sísmica.

A.4.1. Deformación Sísmica

La deformación sísmica τ estima la deformación co-sísmica acumulada en el volumen ΔV durante un período Δt , que fue producida al momento de generarse el evento (Dunlop R. , FUNDAMENTOS PARA LA CONDUCCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA A UN MÉTODO DE CAVING, CODELCO-CHILE División El Teniente, 2001).

$$\tau(\Delta V, \Delta t) = \frac{\sum M_0}{2\mu\Delta V} \quad (A.50)$$

A.4.2. Esfuerzo Sísmico

El esfuerzo sísmico estima la variación de esfuerzo asociada a la ocurrencia de la actividad sísmica en un volumen ΔV .

$$\sigma(\Delta V, \Delta t) = 2\mu \frac{\Sigma E}{\Sigma M_0} \quad (\text{A.51})$$

A.4.3. Estabilidad del Flujo Sísmico

La estabilidad del flujo sísmico permite analizar la estabilidad del macizo, para ello se definen otros parámetros en función de la deformación y esfuerzo sísmico. La difusividad Sísmica corresponde a un parámetro que representa la rapidez con la que el flujo de eventos sísmicos se propaga dentro de un volumen y período dado. La difusividad es inversamente proporcional a la viscosidad sísmica, esta última, representa la resistencia del macizo a la propagación de la deformación inelástica co-sísmica a partir de una fuente sísmica (Belmonte, Sismología Aplicada a Minería Subterránea, DERK Ingeniería y Geología Ltda., 2005). Estadísticamente la difusividad se expresa como una relación de la distancia promedio entre eventos consecutivos y el tiempo medio entre ellos.

$$d = \frac{x_p^2}{t_p} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (\text{A.52})$$

Valores bajos de viscosidad implican un flujo más dúctil de deformación sísmica inelástica y una mayor transferencia de esfuerzos asociados a la actividad sísmica.

Una extensión de la difusividad sísmica la constituye el denominado *Número de Schmidt Sísmico* (*Sch*), el cual es proporcional a la viscosidad e inversamente proporcional a la difusividad sísmica. El Número de Schmidt representa una estimación de la dispersión sísmica, corresponde a la complejidad espacio-temporal de la actividad sísmica (su grado de turbulencia).

A.4.4. Volumen Minado

Si un volumen de roca V_m , es minado en el tiempo t_0 y si el campo de esfuerzos y campo de deformación pueden ser reajustados a un estado de equilibrio a través de movimientos sísmicos solamente, la suma de los momentos sísmicos liberada dentro de un periodo dado de tiempo sería proporcional a la excavación a la realizada y en el largo plazo ($t=t_\alpha$).

$$\sum_{t_0}^{\infty} \mathbf{M}_0 \cong \mathbf{u} \mathbf{V}_m \quad (\text{A.53})$$

El nivel de esfuerzo relativo en el instante t , en un volumen dado de roca alrededor de la excavación, puede ser calculado de la diferencia entre V_m y la liberación de momentos acumulados a la fecha.

$$\sigma_r(t) = (\mu \mathbf{V}_m - \sum_{t_0}^t \mathbf{M}_0) / \Delta V \quad (\text{A.54})$$

A.4.5. Ley de Gutenberg – Richter

La ley Gutenberg-Richter corresponde a una curva (frecuencia-magnitud) la cual estima el número de eventos N , por cierta unidad de tiempo, con magnitud mayor o igual a un valor M dado, nos permite estimar una magnitud máxima para eventos ocurridos en un macizo sometido a una cierta condición de esfuerzo dada por la actividad minera.

$$\log(N) = a - bM \quad (\text{A.55})$$

Donde a y b son constantes a determinar. El valor de b , es decir, la pendiente de la curva, se reconoce como valor b (*b-value*). El valor b se encuentra influenciado por las características geomecánicas del sistema en consideración, como la capacidad de resistir deformación “*Stiffness*”, el estado de esfuerzos y la heterogeneidad de la masa de roca (Belmonte, Sismología Aplicada a Minería Subterránea, DERK Ingeniería y Geología Ltda., 2005).

Anexo B: Glosario de Términos Mineros

Este anexo contempla parte del vocabulario utilizado por los mineros y gran parte del área de Geomecánica en sus labores diarias, para un mayor entendimiento de ciertas explicaciones mencionadas en esta tesis.

Abutment stress: Contornos de esfuerzos inducidos por la influencia del hundimiento de un bloque de mineral.

Air blast: Golpe de aire producido por el colapso repentino de grandes volúmenes de rocas, que por efecto pistón puede generar importante daño en la infraestructura minera.

Andesita: Tipo de roca ígnea volcánica, de composición intermedia y textura afanítica y/o porfírica. Su nombre se deriva de la cordillera de los Andes y se presenta en gran proporción en los yacimientos de cobre chilenos.

APD: Abreviatura de *Alto Poder Detonante*, que identifica un tipo de explosivo usado generalmente para reducción secundaria de rocas.

Anfo: *Ammonium Nitrate - Fuel Oil*, es un explosivo utilizado en la minería y consiste en una mezcla de nitrato de amonio y un combustible derivado del petróleo.

Arcilla: Material natural que está constituido por minerales en forma de granos, principalmente silicatos de aluminio hidratados y que se produce por descomposición de las rocas. El diámetro de las partículas es inferior a 0,002 mm.

Batea o embudo de extracción: Cavidad construida en la roca, bajo el mineral a extraer, que permite el tránsito de éste hacia el nivel de producción de la mina.

Block caving: Método de explotación masivo subterráneo en el que a un bloque de mineral se le realiza un corte en su base y luego, producto de la extracción, se produce la propagación del hundimiento en altura.

Blocosidad: Define la forma de fracturamiento que presenta un macizo rocoso en términos de la conformación de bloques regulares o trozos de varias caras angulosas.

Bolón: Trozo de roca (colpa) cuyas dimensiones hacen necesaria su reducción de tamaño para que siga el curso del flujo productivo.

Broquera: Sector donde se encuentran los aceros de perforación (brocas y bits) y actual modem central del sistema sísmico 2012-2013.

Cachorro: Actividad minera que consiste en la reducción de tamaño de bolones o colpas de mineral.

Cámara estanca: Habitáculo hermético que puede contener totalmente al objeto (en el caso del FH, agua) y que puede presurizarse o vaciarse para crear una diferencia de presión entre el volumen que lo conforma y su exterior.

Cara libre: Espacio vacío que se perfora o excava en forma previa a una tronadura de explosivo y que permite la acción rompedora de éste produciendo la expansión del material quebrado.

Caving: Hundimiento, derrumbe.

Cebo: Carga explosiva de alto poder usada para iniciar la detonación de una carga mayor de explosivo.

Celdas HI: Celdas "*Hollow Inclusion*", son instrumentos que se utilizan para la medición en tres dimensiones de la condición de esfuerzos in situ en el macizo rocoso.

Coligüe: Madera en forma de caña perteneciente a una sub familia de bambúes. Crece en zonas húmedas de los bosques templados del suroeste de Argentina y del sur de Chile. En minería se usa para suspender cargas explosivas en altura.

Colpa: Trozo de roca de grandes dimensiones que hacen necesaria su reducción de tamaño para que siga el curso del flujo productivo.

Confinamiento: En minería se refiere a una situación en que un bloque de mineral no tiene caras libres en su entorno. También se aplica a un estado de aislamiento de una labor minera o sector para evitar el ingreso de personas o equipos por motivos de seguridad.

Cota: Se refiere a la altura geográfica en metros sobre el nivel del mar.

Crown pillar (Pilar corona): Corresponde a la porción de macizo ubicado entre el nivel de producción y el nivel de hundimiento en una explotación por block o panel caving.

Debilitamiento dinámico con explosivos (DDE): Método de pre-acondicionamiento mediante explosivos para promover la generación de nuevas fracturas en el macizo rocoso.

Desconfinamiento: Estado opuesto al confinamiento.

Destressing: Eliminar o disminuir el estado de esfuerzos (stress) en un macizo rocoso.

Dilución lateral: Ingreso de mineral de bajo contenido mineralógico, de interés por la periferia del bloque de mineral en explotación. Fenómeno debido al tiraje del mismo.

Empotramiento lateral (límite de panel): Un macizo rocoso intacto o virgen colindante con un sector hundido, condición que dificulta el hundimiento gravitacional.

Esponjamiento: Aumento de volumen que sufre un macizo rocoso al fragmentarse.

Filosilicatos: Subclase del grupo de minerales de los silicatos que presentan, como rasgo común, un hábito hojoso o escamoso. Son en general muy blandos y de peso específico bajo.

Fracturamiento hidráulico (FH): Método de pre-acondicionamiento que consiste en presurizar un tramo de perforación o de una fractura preexistente con un fluido determinado, comúnmente agua, el cual se inyecta a presión hasta vencer la resistencia a la tracción de la roca, para así iniciar una fractura de tensión y su propagación al interior del macizo.

Granodiorita: Tipo de roca ígnea plutónica creada debido a una gran intrusión de material fundido en la corteza de la Tierra.

GSI: *Geological Strength Index*, corresponde a un sistema de caracterización de propiedades de rocas usado para diseño de túneles, fundaciones en roca y taludes.

Guirnalda: Tira de detonadores usada para la iniciación de tiros de tronadura.

Hardening: Activación del macizo rocoso debido a los procesos de deformación y ruptura de un macizo rocoso, que en una primera fase consumen altos niveles de energía. Sin embargo, producto del desconfinamiento así generado, los niveles energéticos presentes en el medio decrecen, produciendo una disminución proporcional en la ruptura y deformación, hasta eventualmente lograr su detención.

Hundibilidad: Concepto que indica la mayor o menor disposición de un macizo rocoso a fragmentarse al quedar sin su área basal de soporte.

Hundimiento avanzado o previo: Método de explotación en el que se realiza el hundimiento del mineral antes de desarrollar el nivel de producción, para trabajar en un ambiente de menor esfuerzo.

Lajamiento: Formación de fragmentos alargados de roca (lajas).

Micro retardos: Tiempo de retardo en milisegundos que puede proporcionar por diseño un detonador usado para iniciar explosivos. En el caso de los detonadores eléctricos, los micro retardos están seriados y no pueden modificarse; los detonadores electrónicos en cambio pueden ser programados in-situ con retardo desde 1 milisegundo.

MRMR: Mining Rock Mass Rating, corresponde al índice RMR modificado para definir un índice de calidad geotécnico-minera.

P80: Dimensión medida en unidades de longitud, para la cual el 80% de las partículas tienen un diámetro menor a su valor.

Packers: Dispositivos inflables usados en el fracturamiento hidráulico para confinar un tramo del pozo donde se generará una fractura.

Panel Caving: Variante del método de hundimiento en que bloques consecutivos se hunden en forma continua de modo de evitar la dilución lateral y los esfuerzos de relajación producidos en el método convencional de block caving.

Pentolita: Explosivo constituido por una mezcla de otras sustancias explosivas de gran poder, como PETN (tetranitrato de pentaeritritol) y TNT (trinitrotolueno), usado para iniciar explosivos muy insensibles, como el Anfo, por su característica de desarrollar alta presión de detonación.

Polvorazo: Proceso de tronadura, donde se realiza el carguido de explosivos para dar avance al desarrollo de una frente de Hundimiento donde el área involucrada es más grande que una quemada.

Pórfido dacítico: Roca ígnea volcánica con una textura porfírica que presenta cristales de grano grueso incluidos en una matriz de granos más finos. Se caracteriza por generar fragmentación de clastos gruesos al ser extraída.

Pre-acondicionamiento (PA): Conjunto de procesos mineros implementados antes de iniciar el caving, cuyo objetivo es alterar las características mecánicas del macizo rocoso a fin de mejorar sus condiciones de hundibilidad y de fragmentación, logrando de esta forma aplicar métodos por hundimiento de forma exitosa en macizos competentes.

Pre-corte: En tronadura, se refiere a la realización de un corte en el macizo rocoso antes de realizar una tronadura masiva, con el objeto de generar una cara libre y evitar la sobreexcavación.

Quemada: En minería, sinónimo de detonación de explosivo, que en mina subterránea se refiere al avance del desarrollo de un túnel.

Ramp up: Corresponde a un periodo de incrementos progresivos de producción de un sector o mina, comprendido entre el inicio de la producción hasta que alcanza el régimen proyectado.

Retardo: En tronadura de explosivos, es la diferencia de tiempo de iniciación de dos detonadores consecutivos.

RMR: *Rock Mass Rating*, es un sistema que provee una medida de la calidad de la roca para propósitos de diseño preliminar de fortificación de túneles según la clasificación de Bieniawski (1976).

Roca competente: Roca que, debido a sus características físicas y geológicas, puede sostener aperturas, como túneles o galerías, sin ningún o con poco soporte estructural (fortificación). Es una roca fuerte y compacta, con alta resistencia a la deformación.

Sarta: Columna de barras de perforación que, en el caso del fracturamiento hidráulico, se utilizan para posicionar los packers en el lugar donde se generará una fractura.

Sobre excavación: En un túnel, se refiere a la excavación que se produce más allá de lo diseñado.

Softening: Relajación del macizo rocoso, producto de los procesos de desestabilización normales de la minería, con un incremento en la energía disponible para deformar el macizo y eventualmente romper este medio. Esto siempre depende de los niveles de energía, los cuales a su vez obedecen al grado de confinamiento de la masa rocosa.

Stockwork: En geología, masas rocosas complejas con gran cantidad de fracturas o vetillas orientadas en múltiples direcciones.

Straddle packer: Elemento compuesto por dos obturadores inflables y cámara central de inyección que se utiliza para presurizar un tramo de pozo e iniciar desde ese lugar una fractura hidráulica.

Subsónico (régimen): En este régimen la velocidad de detonación de un explosivo es menor que la velocidad de las ondas S y de las ondas P en un medio rocoso.

Supersónico (régimen): Cuando la velocidad de detonación de un explosivo es mayor que la velocidad de las ondas P y de las ondas S en un medio rocoso.

TDR: *Time Domain Reflectometry*, técnica de medida utilizada para determinar las características de líneas eléctricas por observación de las formas de ondas reflejadas. En minería se utiliza para detectar desplazamiento del macizo rocoso mediante el monitoreo de deformación de cables cementados dentro de perforaciones efectuadas en la roca.

Transónico (régimen): En este régimen la velocidad de detonación del explosivo tiene un valor menor que la velocidad de las ondas P y mayor que la velocidad de las ondas S.

Tronadura masiva: Detonación de una cantidad mayor de explosivo ya sea en forma simultánea o con retardo entre los pozos de tronadura.

Tronadura modular: Detonación de un conjunto menor de pozos de tronadura, del orden entre dos y cinco.

Up-hole: Iniciador cilíndrico para agentes de tronadura a granel, compuesto por explosivo de alta potencia (APD).

Zanja: Túnel del nivel de producción desde el cual se generarán bateas o puntos de extracción del mineral.

Zonas de sombra: Indica una zona que queda bajo la influencia de un proceso o evento ocurrido sobre ella.

Anexo C: Instrucciones Básicas Para Utilización del *Run Time System* (RTS)

C.1. Opciones de Configuración

El sistema de configuración RTS, utiliza reglas de configuración dentro de los comandos para la facilidad del usuario. En general, se emplean letras minúsculas para cambiar el valor de un parámetro y algunas letras mayúsculas son comunes a todos los programas, en general se aplican funciones como “*Add*” (Añadir), “*Delete*” (Borrar), “*Quit*” (Abandonar), “*Exit*” (Salir) y “*Help*” (Ayuda) en la siguiente tabla se ilustran las funciones con su respectiva letra que generalmente se utilizan para activar la función (**Tabla C.27 y C.28**) (*Institute of Mine Seismology, Agosto 2004*).

Tabla C.27. Caracteres de apoyo para la configuración de programas en el RTS. (Gentileza ISS)

Letra	Función
a-z	Cambia el valor del parámetro.
A	Añadir una nueva configuración al registro.
D	Elimina una configuración del actual registro.
Q	Salir del programa sin guardar en el disco.
E	Salir del programa una vez guardados todos los registros en el disco.
I	Importa una configuración al registro.
O	Exporta una configuración al registro.
T	Imprime un informe con todos los registros de configuración.
P	Imprime el registro actual de configuración.
M	Genera una plantilla con el actual registro.
U	Actualiza el actual registro en el disco.
R	Restaura el actual registro del disco.
H	Ayuda contextual.

Tabla C.28. Símbolos de apoyo para la configuración de programas en el RTS. (Gentileza ISS)

Símbolo	Función
+	Siguiente registro de configuración. NEXT
-	Registro anterior de configuración. PREVIOUS
>	Página siguiente de la actual configuración.
<	Página anterior de la actual configuración.



Figura C.114. Uso del comando “sitectl -x”, la letra -x verifica que las configuraciones se realizarán en el disco “DISK”, visible en la esquina superior derecha, todos los cambios que se realicen aquí, serán permanentes.

Para realizar abandono de cualquier comando que se ejecute en la pantalla, se puede teclear “Shift – q” o “Ctrl –c”.

C.2. Comandos de Visualización

- **ASCOMON:** Muestra la información recibida por el computador central en tiempo real, respecto a la asociación que se realiza a los sensores que capturan eventos y aquellos que están en proceso de ser asociados por el sistema (Figura C.115). Cabe mencionar, que se visualizan sólo los últimos eventos que capturó el sistema y el status respecto al asociado del sistema (Institute of Mine Seismology, Site Visit Report Codelco Andina Mine, December 2011).

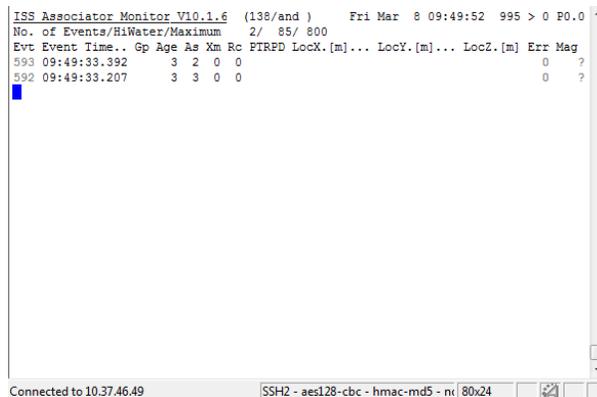


Figura C.115. Uso del comando “ascmon”, la segunda línea muestra el número de eventos en la cola para ser procesados en el momento luego el número máximo de eventos en cola y el número máximo de eventos permitidos en la cola a la espera de ser procesados (“No of events/HiWater/Maximum”). Por otro lado las iniciales “As” corresponde al número de sensores que captaron el evento, “Rc” el número de sensores recibidos para procesar y la suma de ambos es el número total de triggers del registro.

- LOGMON:** Corresponde al monitor de mensajes donde se despliega la secuencia de mensajes intercambiados entre los distintos módulos que integran el programa principal del sistema. Estos pueden ser de advertencia o de error y generalmente se muestran con palabras como “WARN” o “ERROR” e incluyen la hora, módulo de origen (*Institute of Mine Seismology, Site Visit Report Codelco Andina Mine, December 2011*). Es posible visualizar estas situaciones en las **Figuras C.116, C.117 y C.118**.

```

ISS Logging Monitor V10.1.6 (138/and ) Fri Mar 8 09:31:28 995 Page 0
Main Log /home/iss/iss/log/000138/system 172378 PRINT OFF

Fri 09:31:17 cntrl > Check timeouts
Fri 09:31:17 cntrl > Timeout ID 7. Resend SET_DATETIME (1).
Fri 09:31:17 cntrl > User request for all stations - CHR_TIMEOUT
Fri 09:31:18 pulse > Sending pulse to associator
Fri 09:31:18 assoc > Checking for timeouts
Fri 09:31:21 pulse > Sending pulse to control
Fri 09:31:21 cntrl > Check timeouts
Fri 09:31:21 cntrl > Timeout ID 7. Recover CLEAR_BUFFER (2).
Fri 09:31:21 cntrl > ID 7 not responding. Attempting Status.
Fri 09:31:21 cntrl > User request for all stations - CHR_TIMEOUT
Fri 09:31:22 pulse > Sending pulse to associator
Fri 09:31:22 assoc > Checking for timeouts
Fri 09:31:25 pulse > Sending pulse to control
Fri 09:31:25 cntrl > Check timeouts
Fri 09:31:25 cntrl > Timeout ID 7. Resend SET_DATETIME (1).
Fri 09:31:25 cntrl > Timeout ID 7. Recover SET_DATE (1).
Fri 09:31:25 cntrl > ID 7 not responding. Attempting Status.
Fri 09:31:25 cntrl > User request for all stations - CHR_TIMEOUT
Fri 09:31:26 pulse > Sending pulse to associator
Fri 09:31:26 assoc > Checking for timeouts
    
```

Figura C.116. Uso del comando “logmon”, despliegue de mensajes ocurridos durante el día en tiempo real, luego de la fecha y la hora se indica el módulo de origen y el mensaje.

```

ISS Logging Monitor V10.1.6 (138/and ) Fri Mar 8 09:27:06 980 Page 1
Warning log /home/iss/iss/down/000138/warn 418388 PRINT OFF

ssion of buffer 1.1
Tue Feb 26 19:03:37 cntrl > WARN : Restarted transmission of buffer 1.1
Tue Feb 26 19:04:10 cntrl > WARN : Wrong block from ID 1. Expected 1 Got 4
Tue Feb 26 19:04:37 cntrl > WARN : Restarted transmission of buffer 1.1
Tue Feb 26 19:05:48 cntrl > WARN : RESULTS_DATA received from inactive ID 1
Tue Feb 26 19:05:48 cntrl > WARN : TRIGGER_DATA received from inactive ID 4
Tue Feb 26 19:05:48 cntrl > WARN : RESULTS_DATA received from inactive ID 4
Tue Feb 26 19:05:48 cntrl > WARN : RESULTS_DATA received from inactive ID 1
Tue Feb 26 19:05:48 cntrl > WARN : RESULTS_DATA received from inactive ID 1
Tue Feb 26 19:05:48 cntrl > WARN : RESULTS_DATA received from inactive ID 1
Tue Feb 26 19:05:48 cntrl > WARN : RESULTS_DATA received from inactive ID 1
    
```

Figura C.117. Uso del comando “logmon”, tecleando “1” (página 1), muestra los mensajes de advertencia ocurridos durante el último tiempo, este muestra que durante el día 26 de febrero hubo restauración del sistema, lo cual coincide con las configuraciones realizadas por el área de geomecánica en esa fecha.

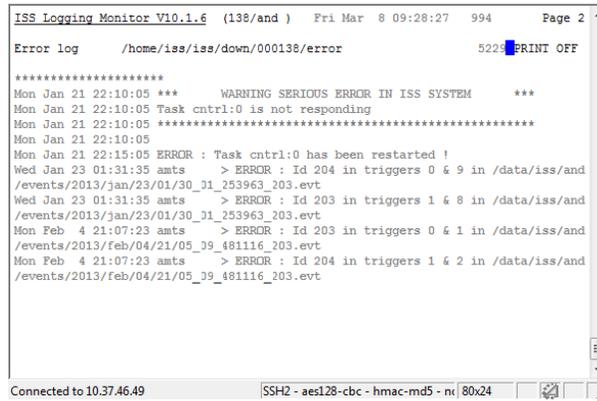


Figura C.118. Uso del comando “logmon”, tecleando “2” (página 2), muestra los mensajes de error ocurridos durante el último tiempo, este muestra que durante el día 21 de febrero hubo un serio problema con el sistema sísmico, el cuál coincide con la restauración de cables en la vía de comunicación de los sensores que fueron estropeados por equipos de la mina.

- **PRDAYSUM:** Este comando se emplea para visualizar un resumen de los eventos diarios, sin necesidad de abrir el procesador de eventos *Jmts* (Figura C.119). Mayor información utilizar “prdaysum -h” (IMS, January 2013).

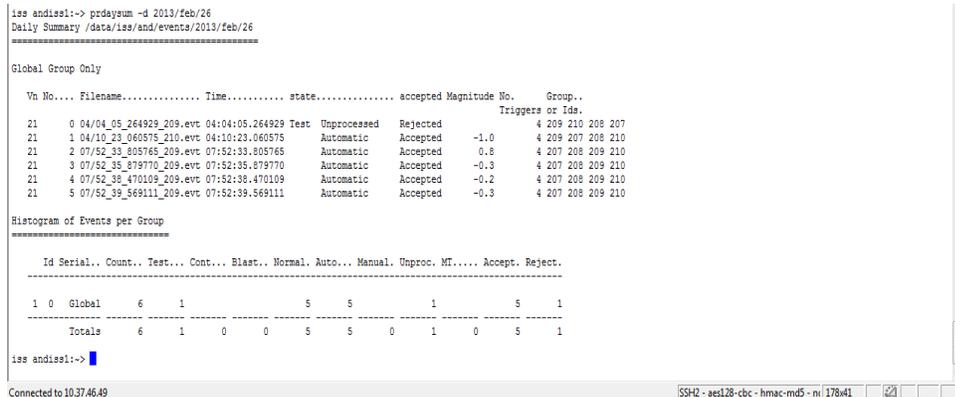


Figura C.119. Uso del comando “prdaysum -d 2013/feb/26”, se ilustra la información de los eventos ocurridos el día 26 de Febrero del 2013, los cuales fueron procesados automáticamente por el sistema, en este día ocurrieron 6 eventos, lo cual corresponde al día en el cual el sísmico se restauró completamente.

- **PRMTHSUM:** Este comando se emplea para visualizar un resumen de los eventos mensual, el cual, muestra el día del mes y los eventos por día que han ocurrido, sin necesidad de abrir el procesador de eventos *Jmts* (Figura C.120) (IMS, January 2013).

```
lsc andina1-> prmthsum
Monthly Summary /data/lsc/and/ventas/2013/mar
-----
Day No.  No.  No.  No.  No.  No.
of      of      of      of      of
Events Processed Processed De-  of      of
Auto   Manual Processed Accepted Rejected
-----
1  45  44      1  44  1
2  66  65      1  65  1
3  57  56      1  56  1
4  216 215     1  215  1
5  135 134     1  134  1
6   30  30      0    0  0
7  104      103  1   31  73
8   78  77      1   77  1
9  108 105     3  105  3
10  24  23      1   23  1
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
-----
Totals  671  757  103  11  788  83
-----
Connected to 10.37.46.49
```

Figura C.120. Uso del comando “prmthsum”, despliega el número de eventos por día que han ocurrido en el mes de marzo del 2013, se muestran valores hasta el día 10 ya que ese día fue tomada la imagen.

- **QUALMON:** Se utiliza para supervisar la sincronización de la hora (ATU delay) y los parámetros más específicos asociados a cada estación (Figura C.121) (Institute of Mine Seismology, Site Visit Report Codelco Andina Mine, December 2011).

```
ISS Quality Monitor V10.1.6 (138/and ) Fri Mar 8 09:57:46 997
Started Tue Feb 26 19:06:58 2013 No external ATU Page 0 Row 1
Adj ATU delay. ATU start. len.. Updated.
GS 001.1 QS040051 Yes -3206.4 -3206.4 244.3 09:55:05 OK
GS 003.1 QS040053 Yes -3206.5 -3206.5 246.6 09:55:05 OK
GS 004.1 QS040054 Yes -3206.4 -3206.4 245.2 09:55:05 OK
GS 005.1 QS040011 Yes -3206.5 -3206.5 246.6 09:55:05 OK
GS 007.1 GS100243 Yes
2 Init
Init
-----
Connected to 10.37.46.49
```

Figura C.121. Uso del comando “qualmon”.

- STATMON:** Se utiliza para supervisar el estado en tiempo real de las estaciones y de las comunicaciones. Para realizar cambios en la fila para visualizar sensores “Site id” o cajas sísmicas “Box id” o identificar el canal “Chn id” se debe teclear “s” en la pantalla una vez abierta esta aplicación. La ayuda puede ser obtenida tecleando “u” cuando la aplicación está abierta. En la pantalla se despliega información destacando lo siguiente, si en la fila “State” muestra una “X” indica que la unidad de adquisición de datos esta en óptimo funcionamiento, “R” cuando la unidad no está realizando traspaso de comunicación adecuado, “r” cuando se está realizando el intento de comunicación, “s” cuando la caja esta caída o no esta energizada y finalmente cuando hay un espacio en blanco significa que no existe comunicación entre la unidad de adquisición de datos y el “host central”, lugar donde se ubican los módems de comunicación (**Figura C.122**). Además, es posible visualizar la fecha y la hora con la cual está configurada la red sísmica (*Institute of Mine Seismology, Configuring the ISS Run Time System (RTS)*, Agosto 2004).

```

ISS Station Monitor V10.1.6 (138/and ) Fri Mar 8 09:53:46 971 Page 0.1.1
Started Tue Feb 26 19:06:58 2013 Polling Open sgrams C
Site_id 20202120202020202020
 1 2 1 6 7 8 9 0 3 4
Xmitter... 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5
Port..... 1-- 2-- 3-- 4--
Enabled... 1-- 2-- 3-- 4-- X--
Type..... Q-- Q-- Q-- Q-- G--
State..... X-- X-- X-- X--
Activity...
Level.....39393939393939393939
Last Tran...3b 3b 3b 3b 3d
Last Recv...3b 3b 3b 3b 3c
Triggers...
Buffer....
Block.....
Pending...
Timeouts... 3
Failures... 3
Version...62--62--62--62--49--
Short.... | G G G G S S R R G G
Name..... | H H H H o o e e H H
          | 7 7 8 8 c c F F 7 7
          v S 5 1 3 _ _ u u 7 7
          _ _ _ _ O O G g _ _
          B T D T e e i i B T
          o o o o s s o o o o
          t p w p _ _ _ _ t p
          t n B T B T t
          o o o o o o
          m t p t p m
    
```

Figura C.122. Uso del comando “statmon”, donde la fila “Site_id” corresponde a los sensores numerados desde 201-211, la fila “Port” despliega los puertos de entradas de las unidades de adquisición de datos, luego la fila “Type” muestra el tipo de unidad si es Qs (QS o SAQS) o GS, una de las filas más importantes es “State” que ilustra el estado de cada caja, en donde “X” significa que hay una óptima transmisión entra la caja y el host central y “s” o “r” en el caso que exista una falla en la comunicación, y “R” cuando no existe comunicación, en este caso se recomienda informar al personal del área para poder realizar el chequeo técnico respectivo y solucionar el problema.

- **TRIGGER:** Permite obtener la calidad de respuesta de los sensores, a través de la generación de pulsos electrónicos de calibración, estos se comparan con la respuesta esperada y pueden ser visualizados posteriormente en el *Jmts*. Este procedimiento se realiza para todos los sensores tecleando en el monitor “trigger -i0” (*IMS, January 2013*).

C.3. Comandos de Configuración

- **ASSCON:** Este comando es utilizado para realizar la configuración del número de asociación en el sistema (letra [a]). Para ejecutar y realizar cambios de forma permanente en esta configuración es necesario teclear “asscon -x” (**Figura C.123**). Se recomienda una vez realizado el cambio teclear “Shift -e” para guardar el cambio y luego restablecer el sistema para que los cambios queden estables (*Institute of Mine Seismology, Configuring the ISS Run Time System (RTS), Agosto 2004*).

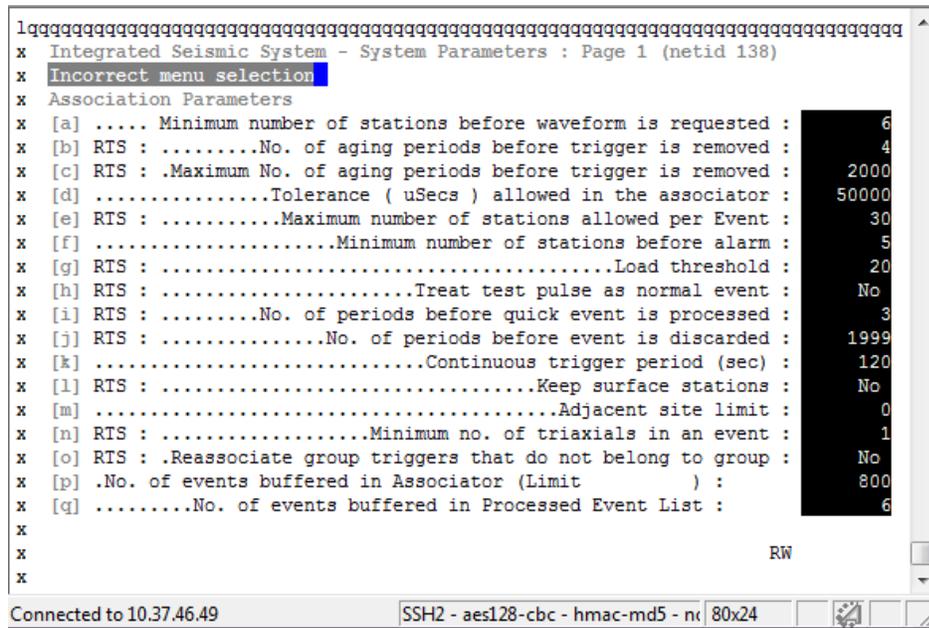


Figura C.123. Uso del comando “asscon”, fila [a] número mínimo de estaciones para que el evento sea registrado. En este caso, el número de asociación se encuentra en 6 estaciones, dicho de otro modo, para que un evento sea registrado se necesitan al menos 6 sensores.

- **CHNCON:** Este comando se ejecuta para obtener un registro de los sitios, cajas y sensores. Más aún, cual caja está conectada a cada sensor y donde se emplazan estos, dicho de otro modo, en cada canal queda configurado el sitio al cual pertenece, a cual caja está conectado, a que sensor corresponde y a la componente que resguarda.

- **CRONCON:** Comando el cual se pueden establecer funciones automáticas para ciertas horas del día, dicho de otro modo son script que se configuran para que se ejecuten en un día y hora específico.
- **DATE:** Funciona para realizar cambios permanentes en la fecha y hora con la que trabaja el sistema de red sísmica, esta automáticamente sincronizada al servidor local de Codelco (*IMS, January 2013*). Para el caso de querer modificarla se debe abrir el terminal RTS y se debe seguir los siguientes pasos:
 - 1) Teclar “su”
 - 2) Ingresar la contraseña de usuario administrador: m@x1muS
 - 3) Teclar lo siguiente con la hora la cual se quiere modificar “date -s HH:MM:SS” (Hora:Minuto:Segundo)
 - 4) Teclar el comando “Exit”.
- **PORTCON:** Se utiliza para realizar las configuraciones de entrada y salida de los puertos de comunicación en el host central y los sensores (*Institute of Mine Seismology, Configuring the ISS Run Time System (RTS), Agosto 2004*).
- **RTSCON:** Funciona para establecer la configuración general del sistema RTS (*Run Time System*), como por ejemplo, cambios en la configuración inicial del ATU (Actualizaciones horarios analógicos), etc.
- **SITECON:** Se utiliza para configurar los sitios en donde se encuentran ubicados los sensores.
- **STARTRTS/STARTSERVER:** Se utiliza para restablecer el sistema, luego que se ha realizado un cambio de configuración del sistema en el disco (DISK) y sea necesario volver a encender el sistema.
- **STDCON:** Con este comando es posible configurar los parámetros base del sistema, para realizar los cambios del sistema de coordenadas para los sitios, el sistema posee una configuración por defecto que corresponde a la (Sur, Oeste, Abajo), por lo que en este caso es necesario cambiarlo. Para este sistema es vital tener en cuenta que nos encontramos con un sistema geográfico (Este, Norte, Arriba),

además se debe tener en cuenta la entrada de los datos (coordenadas de los sitios) y también las salidas de datos (localizaciones de eventos y coordenadas de cada uno.)

- **STOPRTS/STOPSERVER:** Se utiliza para desconectar el sistema, luego que se ha realizado un cambio de configuración del sistema en el disco (DISK).

C.4. Comandos de Control

- **A2DCTL:** El Control de parámetros A/D permiten al cliente seleccionar la frecuencia de muestreo a un sitio en particular.
- **BOXCTL:** Permite configurar los parámetros de control para cada sismómetro ISS (caja) que se establecen mediante este programa de control.
- **SITCTL:** Este comando se utiliza para modificar los parámetros de control de los sitios, en donde podemos realizar cambios del nivel de *trigger*, períodos, entre otros (**Figura C.124**).

```

Integrated Seismic System - Site Control : Page 1 (netid 138)
x [a] Site Id 209 ( #0001::0001 ) Box : 5 A/D : 1 Comp : 1
x ....Site Label: Refugio Bot Name : Refugio Bottom Sensor
x +East +North +Up
x [b] ....Components enabled : Yes [c] Yes [d] Yes
x
x [e] .....Closest site alarm enabled : No
x [f] .Decimation - Minimum no. of samples in dominant period : 30
x [g] .....Golden : No [h] .....Continuous : No
x [i] .....Trigger Level : 39
x [j] ...Auto adjust : No [k] .....Auto ratio : 2.0
x [l] ...Short period : 4 [m] .....Long period : 5
x [n] ...Seismic SGM : No [o] ...S SGM Alarm id : 1
x [p] .....Seismic SGM level : 0.01083 m/s
x [q] .....End Level : 19 [r] ...Max. pretrigger : 50
x [s] Min. pretrigger : 5 [t] Min. pretrig (dec) : 5
x [u] Post trig blcks : 3 [v] .....QS logging : No
x
x Groups :
x
x +ic -ic Quit Exit Print >pgUP <pgDN [a-z] report Help
Connected to 10.37.46.49 SSH2 - aes128-cbc - hmac-md5 - nx | 80x24

```

Figura C.124. Uso del comando “sitectl -x”, fila [i] configura el nivel de trigger de cada sensor, en este caso los sensores se encuentra con un nivel de trigger de 39. Luego de realizado el cambio en la configuración, se aconseja después de realizar estos cambios guardar con “shift -e” y restablecer el sistema.

Bibliografía

- [1] Baros Mancilla, M. C. (2012). *Río Blanco y Andina, Visión de Chilenos*.
- [2] Belmonte et al., A. (2005). Curso Sismología Aplicada a Minería. En *Parte 4. Fricción, Inestabilidad y Energía*.
- [3] Belmonte, A. (2005). Curso Sismología Aplicada A Minería – Parte 3 – Deformación – Elasticidad.
- [4] Belmonte, A. (2005). Curso Sismología Aplicada a Minería, Parte 5, Hundimiento - Pre Acondicionamiento - Riego - Talud.
- [5] Belmonte, A. (2005). *Sismología Aplicada a Minería Subterránea, DERK Ingeniería y Geología Ltda.*
- [6] Belmonte, A. (2011). *Resumen de Inicio de Actividades y Análisis de Datos –Áreas 16 y 17- Mina Andina, Informe 1.*
- [7] Belmonte, A. (2011). *Resumen Inicio Actividades y Análisis de Datos-ANDINA, Informe I.*
- [8] Belmonte, A. (2012). *Estimación de la Sensibilidad y Resolución Asociada al Sistema Sísmico de Monitoreo Sísmico 2013.*
- [9] Belmonte, A. (2012). *Informe 4 - Instalación Sistema de Monitoreo Sísmico.*
- [10] Belmonte, A. (2013). *Informe 18 - Instalación y Calibración Sistema Monitoreo Sísmico 2013-Andina-Udec.*
- [11] Cavieres, P. (2008). *Introducción a los métodos de Explotación Block Caving/ Panel Caving y sus variantes.*
- [12] Cerutti. (2008).
- [13] Chacón et al. (2003).
- [14] Corporación Nacional del Cobre de Chile CODELCO - CHILE, C. (2012). *API Minería Continua, VALIDACIÓN INDUSTRIAL TECNOLOGÍA. GERENCIA PROYECTO MINERÍA SUBTERRÁNEA, VICEPRESIDENCIA DE DESARROLLO Y SUSTENTABILIDAD.*
- [15] Dunlop et al., R. (1999). *Sismicidad Inducida Y Estallidos de Roca en Mina el Teniente.*

- [16] Dunlop, R. (2001). *FUNDAMENTOS PARA LA CONDUCCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA A UN MÉTODO DE CAVING, CODELCO-CHILE División El Teniente.*
- [17] Dunlop, R. (2001). *FUNDAMENTOS PARA LA CONDUCCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA A UN MÉTODO DE CAVING, CODELCO-CHILE División El Teniente.*
- [18] Dunlop, R., & Gaete, S. (1994). Bases para un Criterio de Alerta. *Informe Area Geomecánica, Dpto. Estudios y Métodos Operacionales Div. El Teniente CODELCO.*
- [19] Dunlop, R., & Gaete, S. (1999). *Sismicidad Inducida y Estallidos de Roca en Mina el Teniente.*
- [20] Dunlop, R., & Gaete, S. (1999). *Sismicidad Inducida y Estallidos de Roca en Mina el Teniente.*
- [21] Flores, & Karzulovic. (2004). Evaluation of the Likelihood of Cave Propagation in Mining Engineering Practice.
- [22] Gallardo, A. (2005). Geología para operadores Mina Rajo. *Nota interna GRMD-SGO-085-05, emitida en Octubre de 2005, Superintendencia de Geología, División Andina – Codelco Chile.*
- [23] Hanks, T., & Kanamori, H. (1979). A Moment Magnitude Scale. *JGR, 10, vol. 84 No. B5.*
- [24] IMS, I. o. (January 2013). *Site Visit Report, Andina Mine, Chile.*
- [25] Institute of Mine Seismology, I. (Agosto 2004). *Configuring the ISS Run Time System (RTS).*
- [26] Institute of Mine Seismology, I. (December 2011). *Site Visit Report Codelco Andina Mine.*
- [27] Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, I. S. (2012). Módulo de Minería Continua, Validación Industrial- División Andina, CODELCO –CHILE, versión 1.7.
- [28] Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, I. S. (2012). Pre-acondicionamiento del Macizo Rocosó 1999-2012.
- [29] Intitute of Mine Seismology, I. (s.f.). Sensor fault-finding and test trigger analysis for IMS manufactured geophones.
- [30] Intituto de Innovación en Minería y Metalurgia, IM2 S.A. (2009). Conceptos básicos sobre Sismicidad Inducida.
- [31] Jeremy, M. L. (1987). *Mining, Ground Mechanics in Hard Rock.*
- [32] Karzulovic, & Goodman. (1988).
- [33] Karzulovic, A. (2001). Altura de Roca Primaria en Minería por Panel Hundimiento.
- [34] Martinez, C. (2013). Presentación Modelo Minería Continua, Tecnología y Geociencia Limitada.

- [35] Mendecki et al. (2010). Routine Micro-Seismic Monitoring in.
- [36] Mendecki et al., A. (1999). A Handbook on Rock Engineering Practice for Tabular Hard Rock Mines. En *Cap. 9 A GUIDE TO ROUTINE SEISMIC MONITORING IN MINES*. Cape Town: Creda Communications.
- [37] Mendecki, A. J. (1997). *Seismic Monitoring in Mines*.
- [38] Mendecki, D. A. (1997). Seismic Monitoring In Mines. En *Quantitative seismology and rockmass stability* (págs. 178-213). CHAPMAN & HALL.
- [39] Ortiz, F. (2011). Caracterización Geológica-Geomecánica Áreas 14, 15, 16 y 17 Nivel 16 Hundimiento y 16 ½ Producción III Panel.
- [40] Ortiz, F. (2012). Caracterización Geotécnica Áreas 18 y 19 Sector LHD Norte, Tercer Panel.
- [41] Peter M., S. (2009). Introduction to Seismology, Cap. 3 The Seismic wave equation. Cambridge University Press.
- [42] Romero, D. (2012). *Análisis de Sismicidad Inducida en Mina Subterránea Río Blanco Sector Norte III Panel Áreas 15, 16 y 17 Nivel 16 Hundimiento CODELCO División Andina*.
- [43] Stein, S., & Wysession, M. (2003). An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure, Blackwell Publishing Ltd.
- [44] Villegas, D. (2008). ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE NUEVO DISEÑO DE CROWN PILLAR MEDIANTE EL ESTUDIO DE ESFUERZOS INDUCIDOS EN ROCA PRIMARIA, TERCER PANEL MINA RIO BLANCO.
- [45] Villegas, D. (2012). Plan de Instalación y Monitoreo Sísmico Área 18, Nivel 16 Hundimiento –III Panel.