

REPORTE DE MONITOREO MICROSÍSMICO Y PELIGRO SÍSMICO ASOCIADO A EVENTOS TECTÓNICOS APLICADO EN MINERA AURÍFERA RETAMAS S.A.

Ing. Eduardo Bustamante T.

Jefe de Geomecánica – Minera Aurífera Retamas S.A.





INTRODUCCION



MONITOREO MICROSÍSMICO

1. Monitoreo Microsísmico

El monitoreo microsísmico es una herramienta muy útil en la prevención y control de inestabilidades potenciales en el macizo rocoso que podrían resultar en eventos sísmicos (Mendecki et. al., 2007).

El estudio presentado por MARSA de la Mina, el monitoreo consistió en 2 partes: (1) un sistema permanente que viene operando continuamente desde Agosto 2018 y (2) un equipo portátil temporal que fue instalado en diferentes niveles.

1. Monitoreo Microsísmico

Detalle de la instalación del equipo portátil:

Chilcas Bajo

Fechas: 04-09-2018 al 28-09-2018

Valeria II

Fechas: 15-10-2018 al 23-10-2018

Valeria III

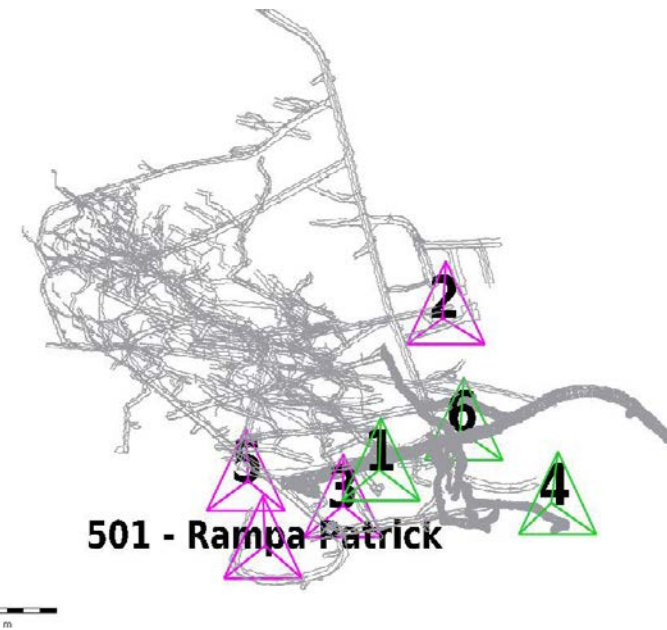
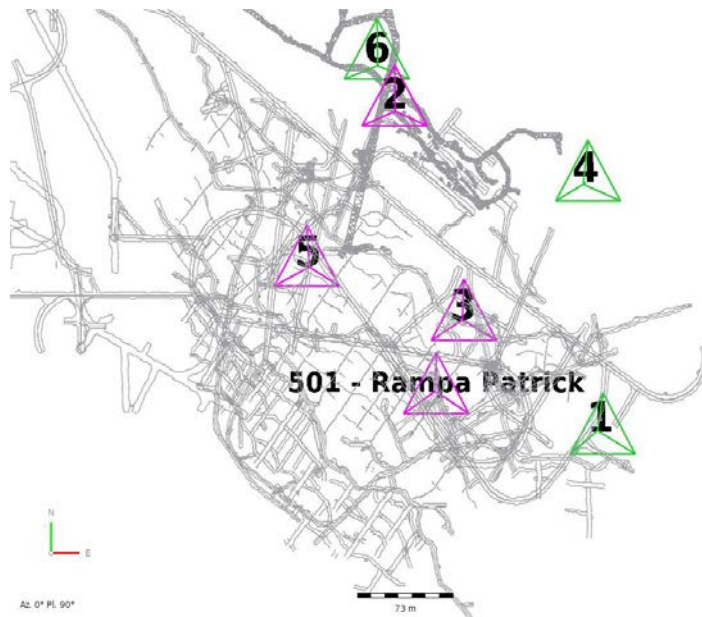
Fechas: 23-10-2018 al 07-11-2018

Valeria V - Rampa Patrick

Fechas: 03-08-2018 al 03-09-2018 (funcionó con el sistema permanente)

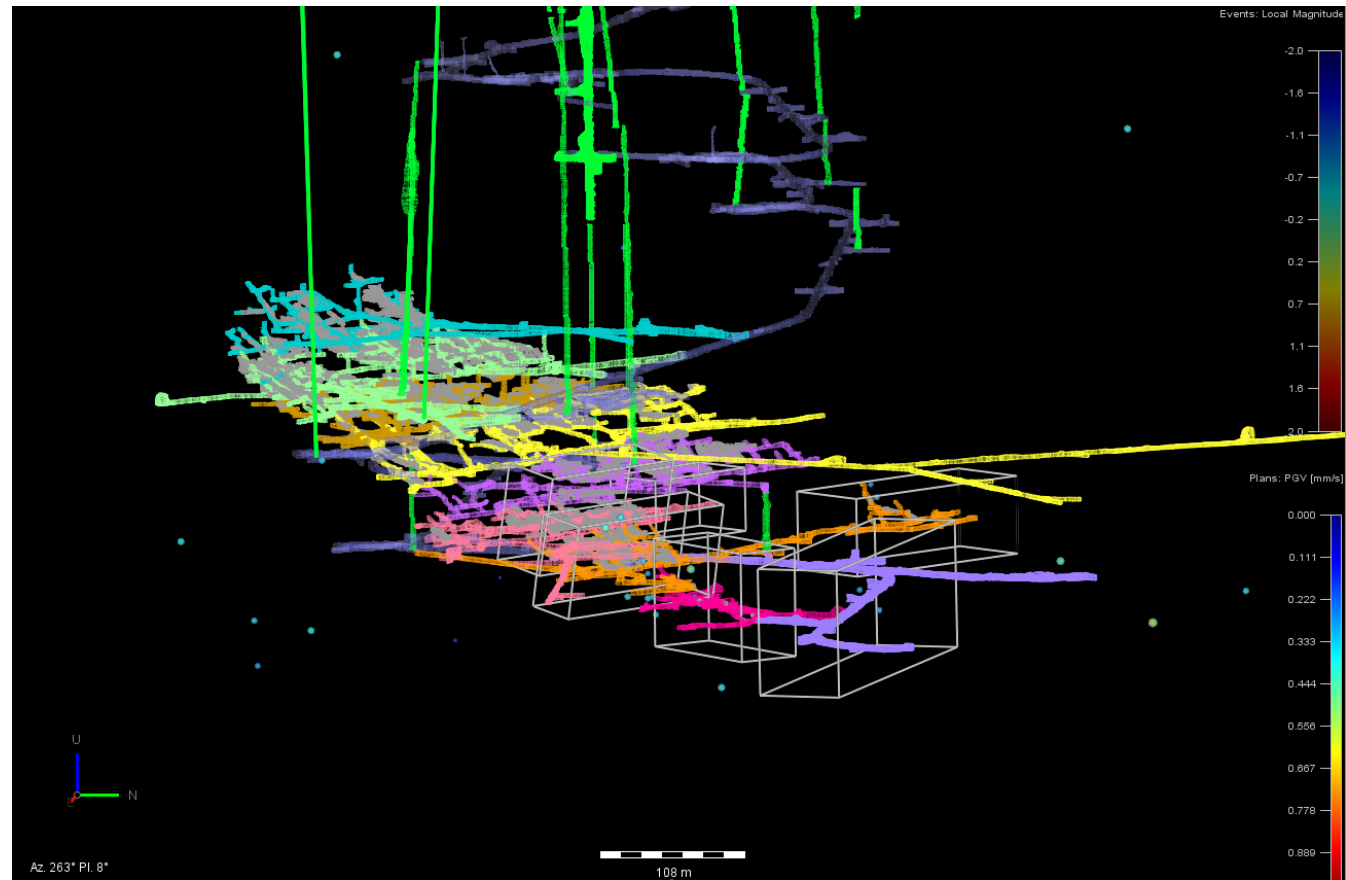
Adicionalmente a este reporte también se presenta los resultados de la evaluación del peligro sísmico asociado a eventos tectónicos para un punto en interior mina de Marsa.

2. Sistema Permanente



Sistema permanente con 3 geófonos triaxiales(1, 4 y 6) y 3 uniaxiales (2, 3 y 5). También se muestra el punto de instalación del geófono 501 (estación portátil) que funcionó como parte del sistema permanente entre 03 Agosto a 03 Septiembre 2018.

2. Sistema Permanente



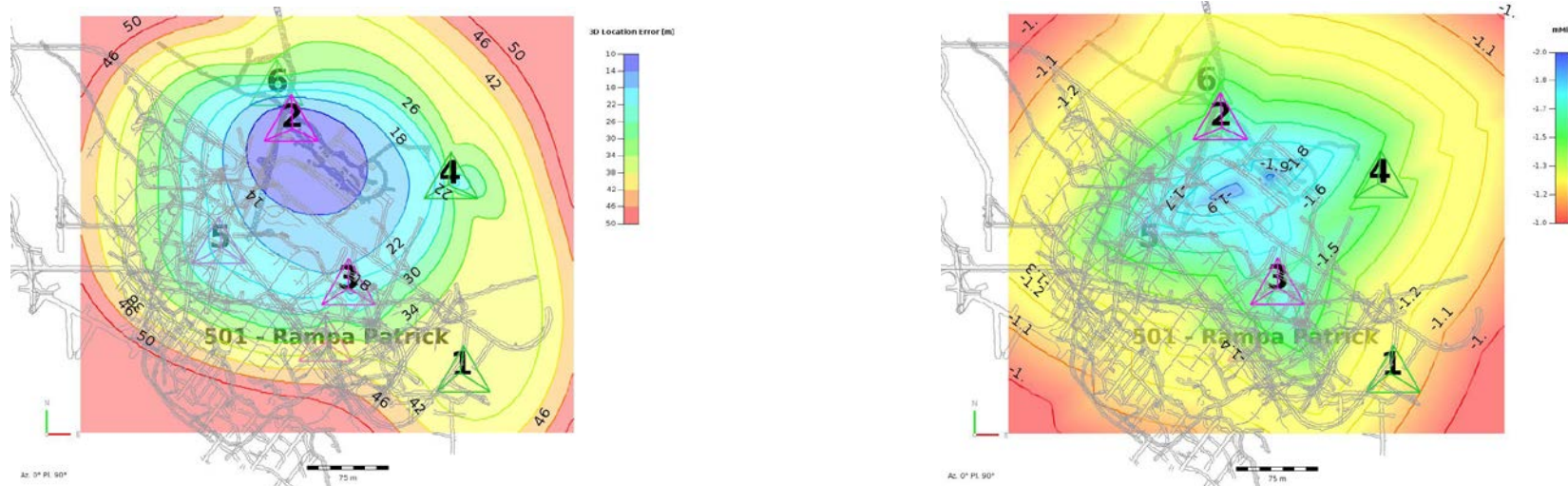
2. Sistema Permanente

El objetivo de este análisis es tener una idea de la cobertura proveída tomando en cuenta la distribución geométrica de los geófonos y las incertidumbres intrínsecas en ciertos parámetros tomados por el sistema.

Error en localización: Considerando los 6 geófonos del sistema permanente, una incertidumbre de 5% en V_p y V_s (velocidades de las ondas P y S) y un error de identificación de los tiempos de arribo de las ondas P y S de 0.5 ms y 1.0 ms, respectivamente.

Magnitud mínima detectable: Se asume una ecuación de atenuación estándar que describe la vibración producida por un potencial evento en función de la magnitud y distancia al geófono ($\log_{10}(\text{PPV}) = 0.98(m) - 1.80\log_{10}(R) + 3.80$).

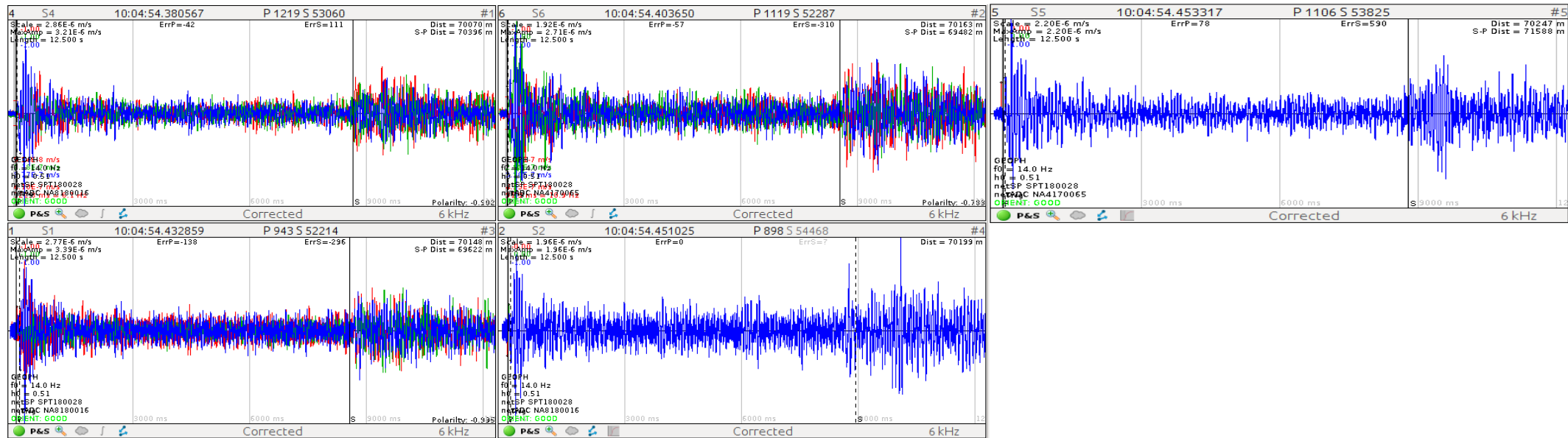
2. Sistema Permanente



Error en localización (izquierda): Muestra que la zona de cobertura del sistema en el nivel 2270 la incertidumbre es menor a 50 m, incluso llegando cerca a 10 m en el mejor de los casos. Esto se considera como una cobertura adecuada.

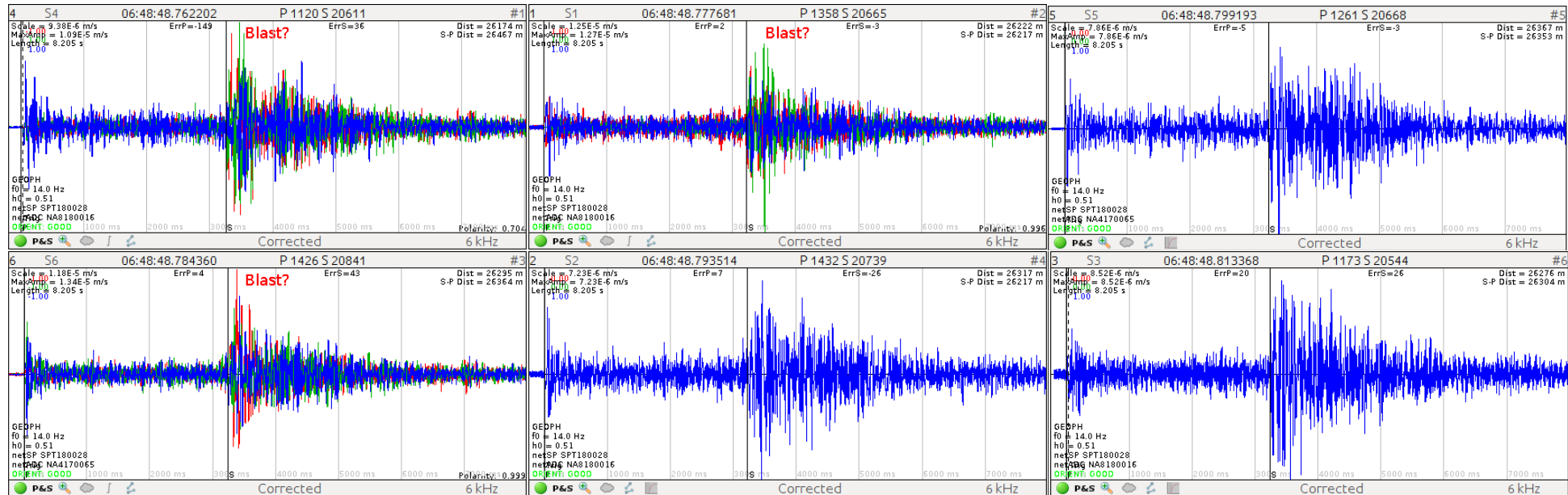
Magnitud mínima detectable (Derecha): El sistema permanente puede detectar sin problemas eventos pequeños ($\sim m-2.0$) en la zona de cobertura. De hecho se detectaron eventos más pequeños ($m-3.0$) por la buena calidad de señales debido a la excelente instalación de los geófonos por parte de MARSA.

2. Sistema Permanente



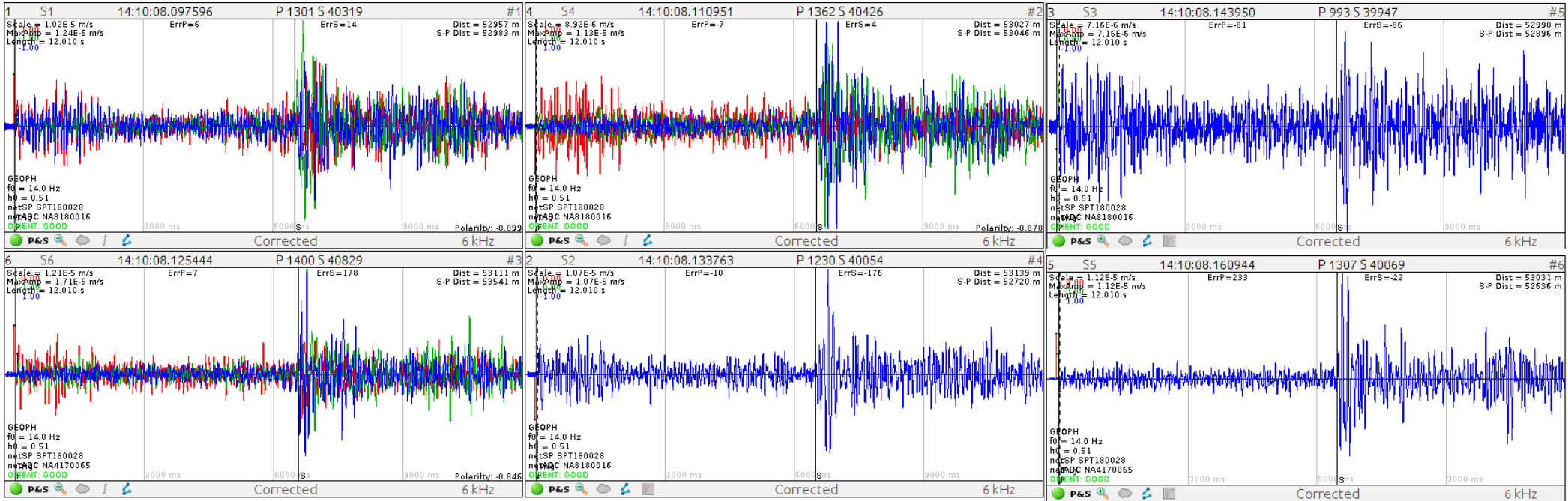
El sistema sísmico detectó algunos eventos regionales, ya que las vibraciones generadas y contenido de frecuencia de las señales fueron suficiente para gatillar los geófonos. Las vibraciones generadas, del orden de 10^{-5} m/s y 10^{-6} m/s son muy bajas, incluso no son perceptibles por humanos. Se presentan 3 ejemplos: M2.3, 10 Sep 2018, 10:04:54, ocurrido a más de ~70 km de distancia.

2. Sistema Permanente



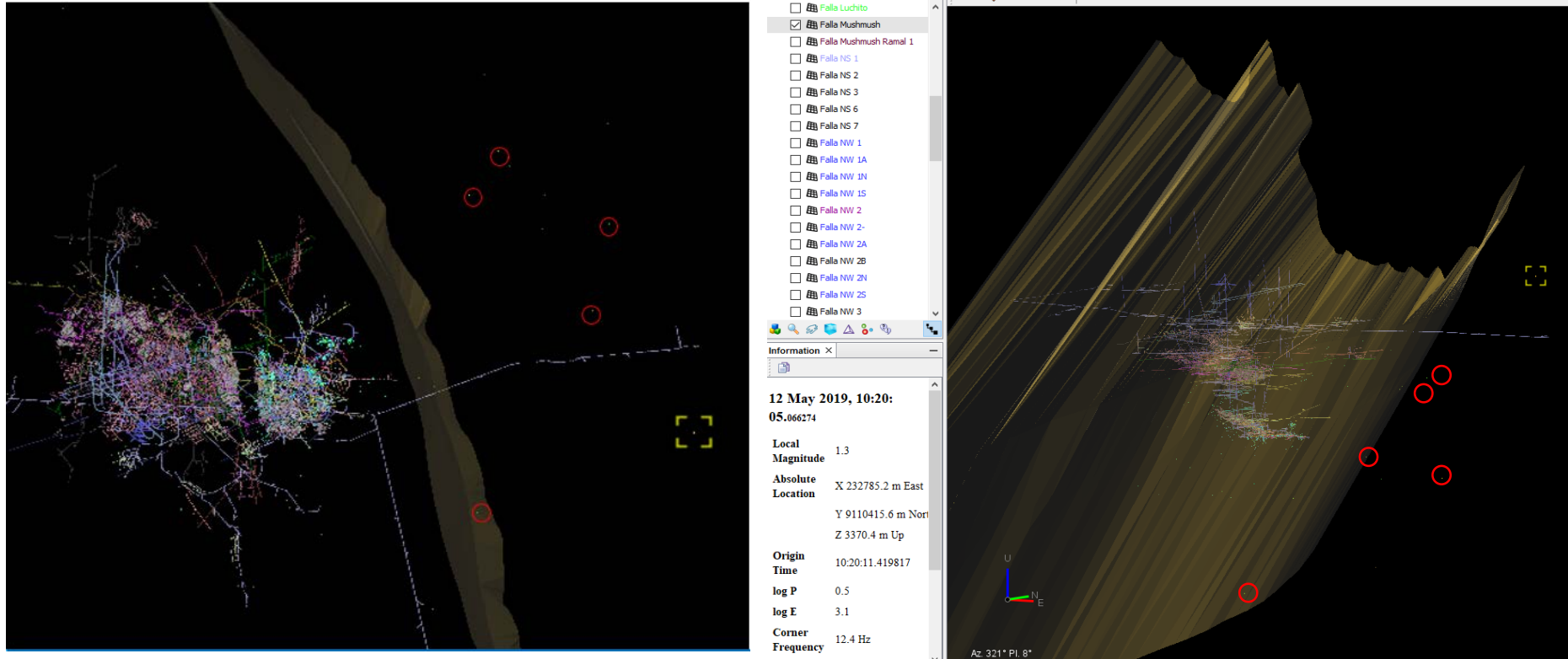
M2.0, 30 Oct 2018, 06:48:48, ocurrido a más de ~26 km de distancia. Es muy probablemente una voladura de una mina cercana.

2. Sistema Permanente

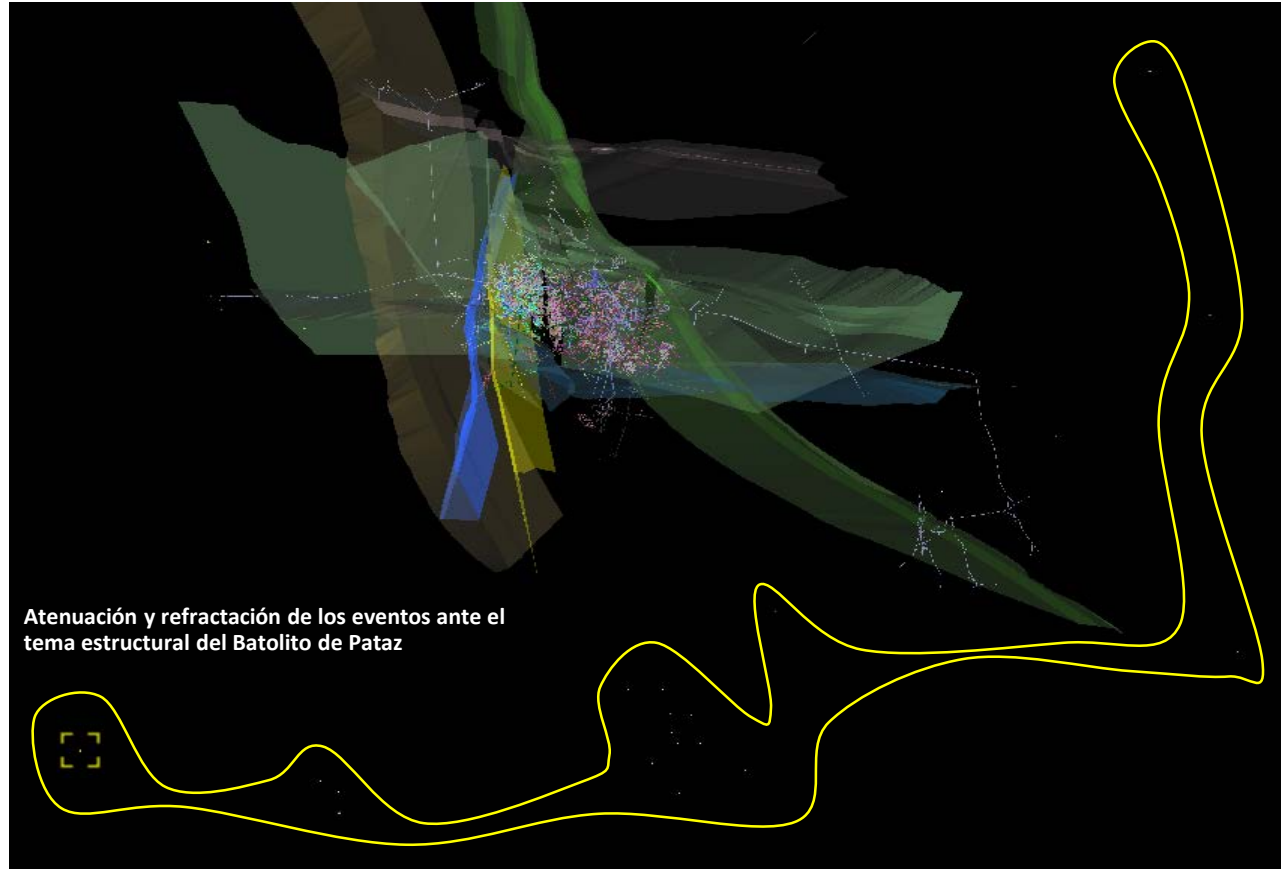


M2.5, 14 Nov 2018, 14:10:08, ocurrido a más de ~53km de distancia.

2. Sistema Permanente

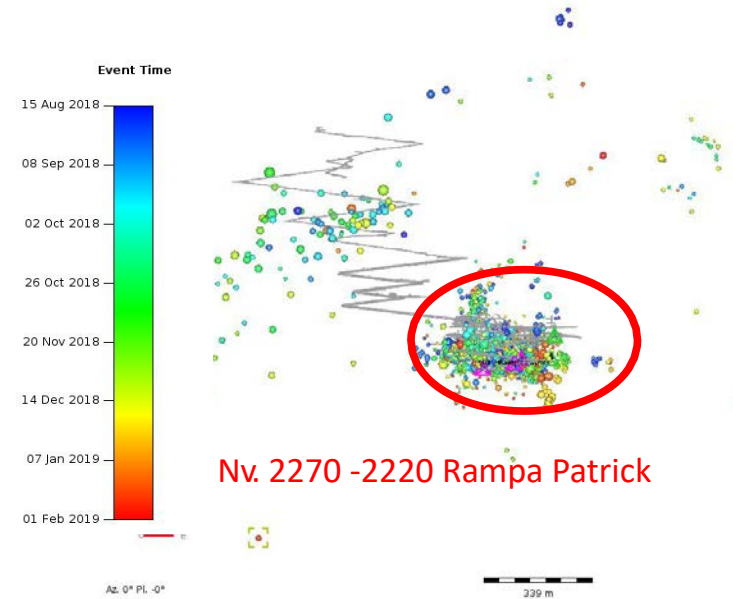
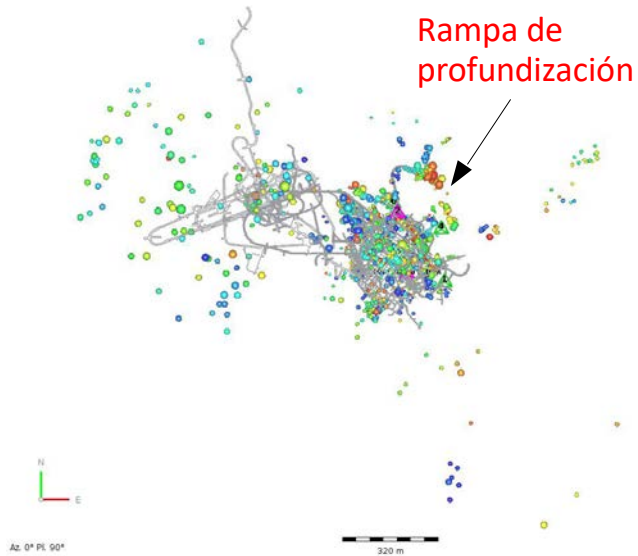


2. Sistema Permanente



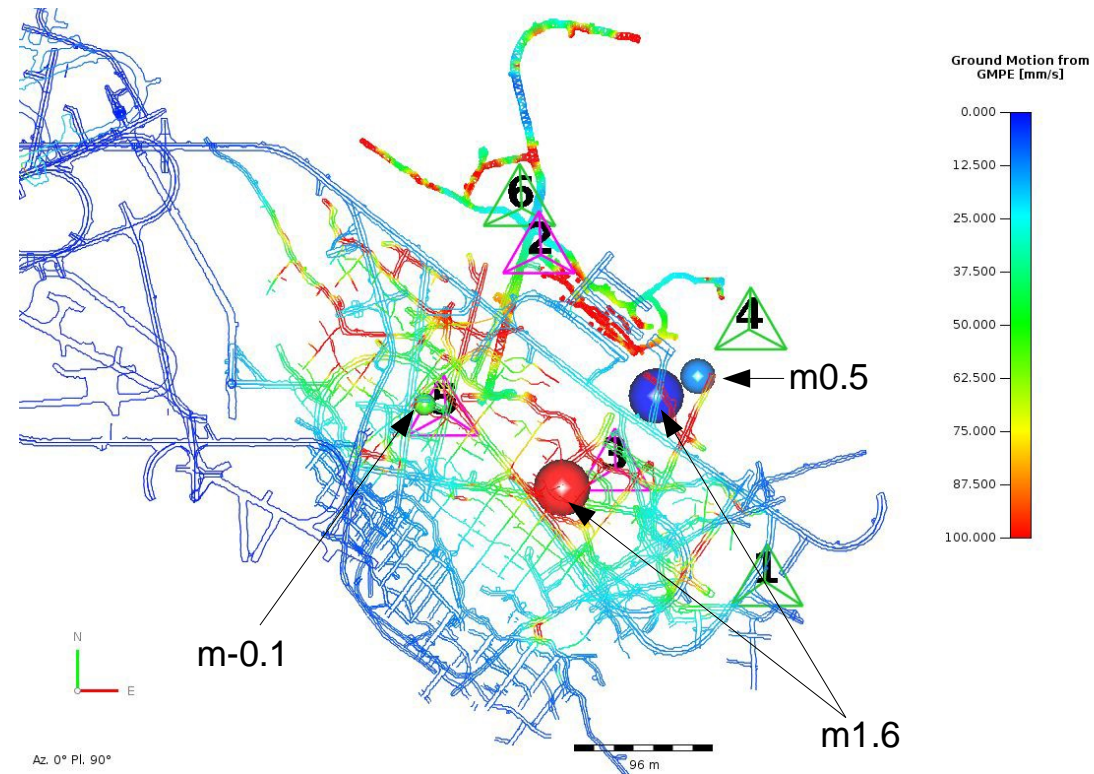
2. Sistema Permanente

2877 eventos (m-3.0 a m1.6) fueron registrados por el sistema de monitoreo permanente dentro del volumen de Marsa entre 15 Agosto 2018 y 31 Enero 2019. Note que la zona de mejor cobertura está en la rampa Patrick. Fuera de esta zona sólo se detectan eventos medianos a grandes pero sin localización confiable. Algunos eventos reales se observan en el nivel 2270 – que entendemos es una zona de minado actual y en relleno.



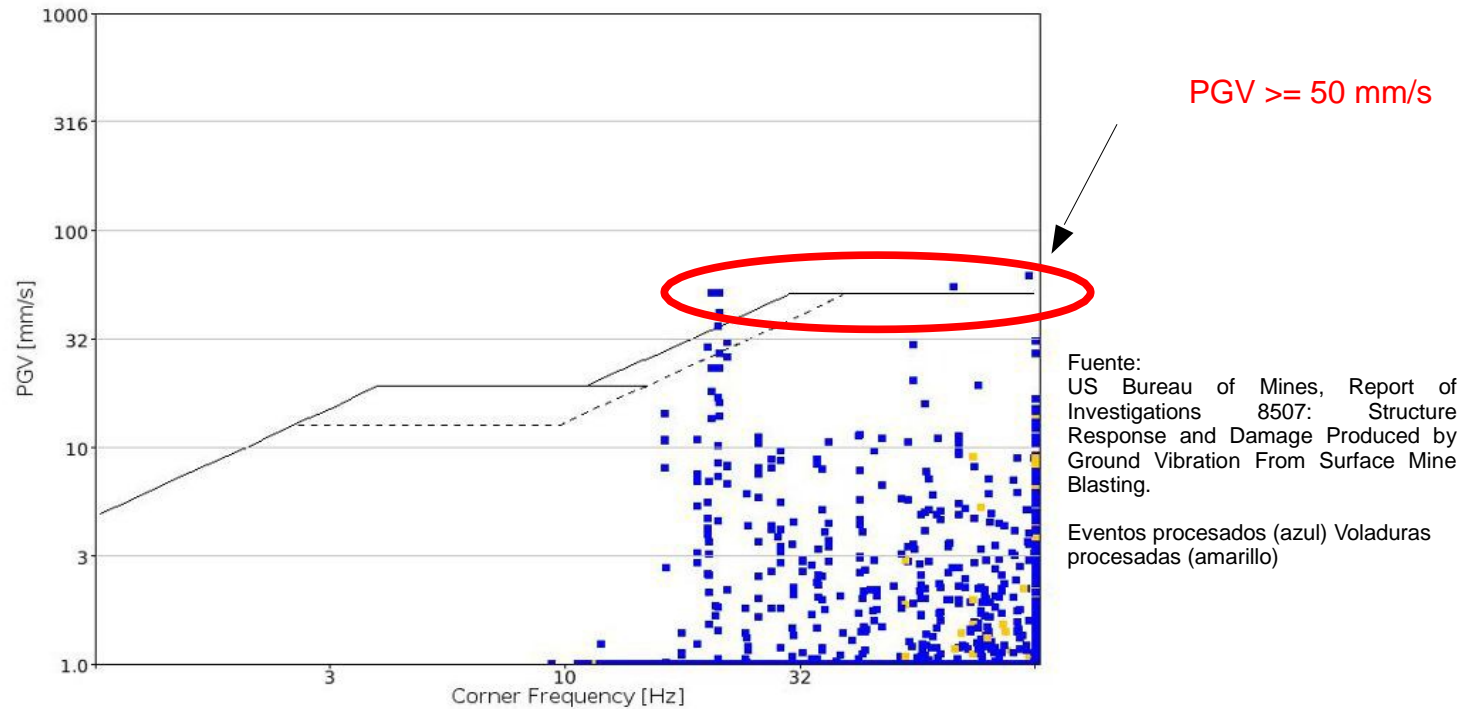
2. Sistema Permanente

Mapa PGV considerando una ecuación de vibración estándar en función de la magnitud y distancia al evento. Las zonas de color rojo estuvieron bajo un nivel de vibración alto. Se muestran los cuatro eventos que generaron PGVs mayores a 50 mm/s.



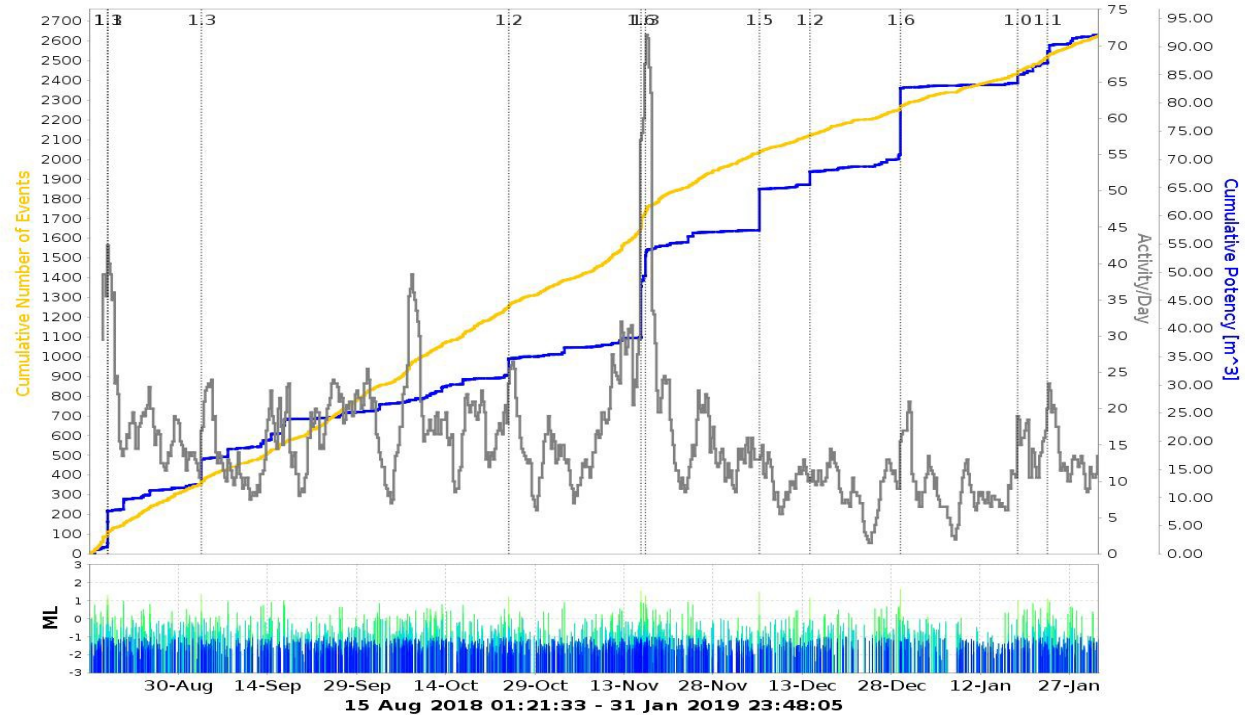
2. Sistema Permanente

Estándar de vibración debido a voladuras desarrollado por la oficina de minas de Estados Unidos (USBM). Se muestran los niveles seguros de vibración para casas de drywall (línea sólida) y yeso (línea punteada). Los resultados nos permiten evaluar el potencial para daño en términos del nivel de vibración (PGV) y frecuencia.



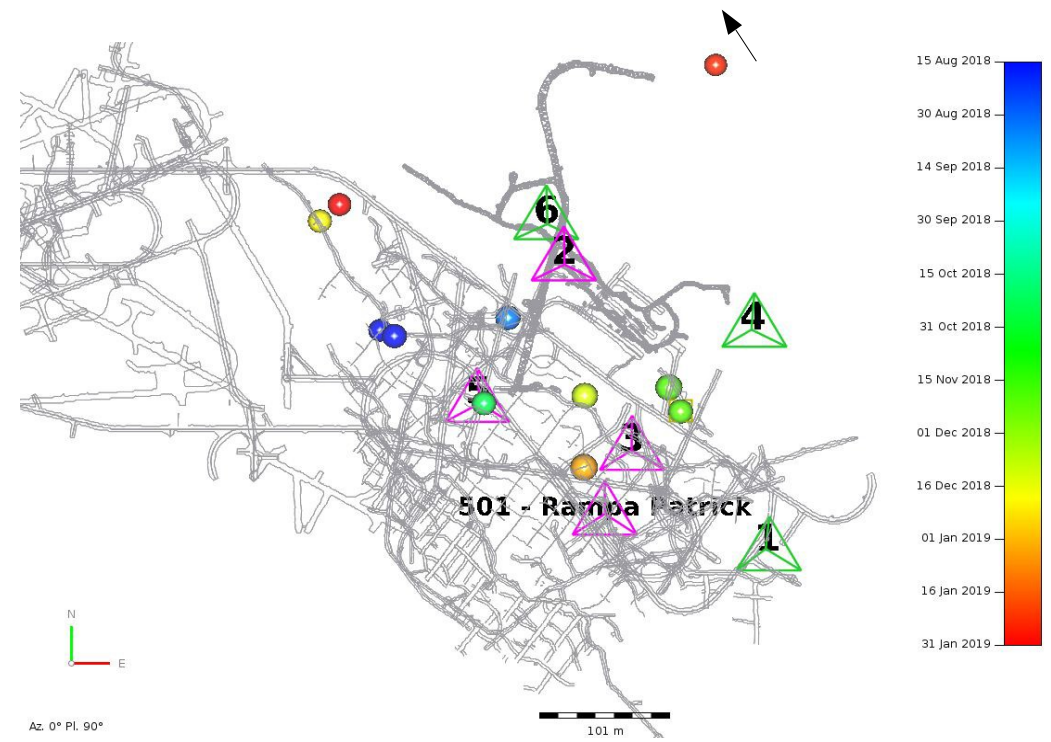
2. Sistema Permanente

Hubo un pico de actividad en Noviembre 2018 debido a las réplicas asociadas a dos eventos de magnitud m1.6 y m1.3



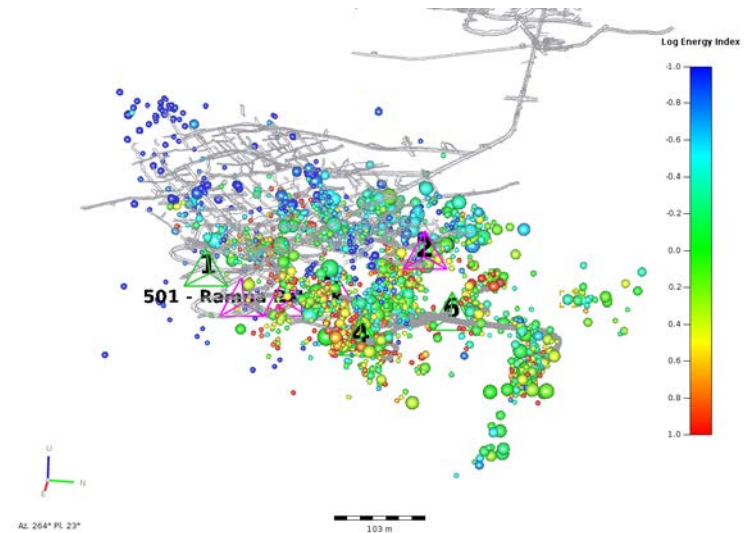
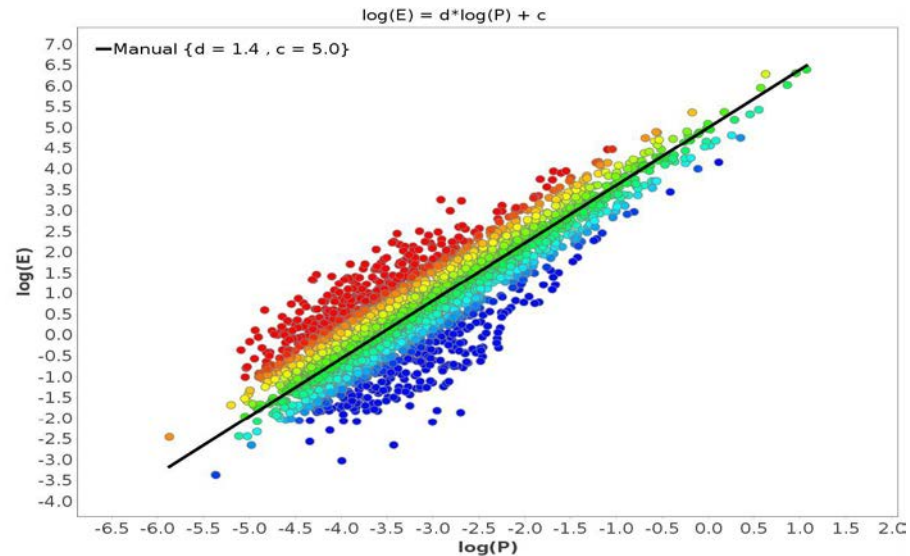
2. Sistema Permanente

Distribución espacial de eventos con magnitud mayor o igual a m1.0. La mayoría ocurren en zonas de producción o zonas aledañas a estas. Uno de magnitud m1.0 ocurrió en la rampa de profundización el 18 de Enero 2019.



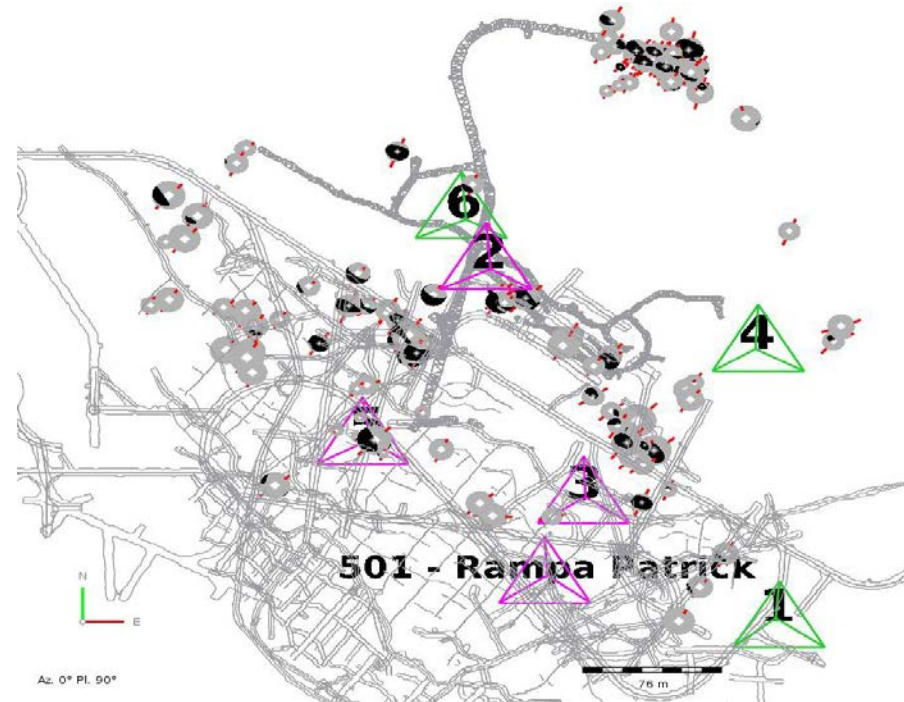
2. Sistema Permanente

Distribución de eventos en función de los parámetros de fuente: energía sísmica (E) y potencia sísmica (izquierda). Distribución espacial de los eventos en función del parámetro índice de energía o IE (derecha). Eventos con bajo o alto IE tienden a ocurrir en zonas de menor o mayor acumulación de esfuerzos, respectivamente. Se observa que eventos con IE positivo tienden a ocurrir en zonas más profundas y de producción activa actualmente.



2. Sistema Permanente

Los mecanismos de fuente varían entre implosivos y de tipo falla reversa. Los ejes P (paralelos a Sigma 1) mayormente están orientados hacia el NNE, perpendiculares al cuerpo de minerales cerca a las zonas de producción, pero casi horizontales en la rampa de profundización (asumimos similar a la dirección del esfuerzo in situ).



2. Sistema Permanente

Distribución de orientaciones del eje P (paralelo a Σ_1) de los mecanismos de fuente obtenidos. Se concentran en la dirección NNE-SSW.

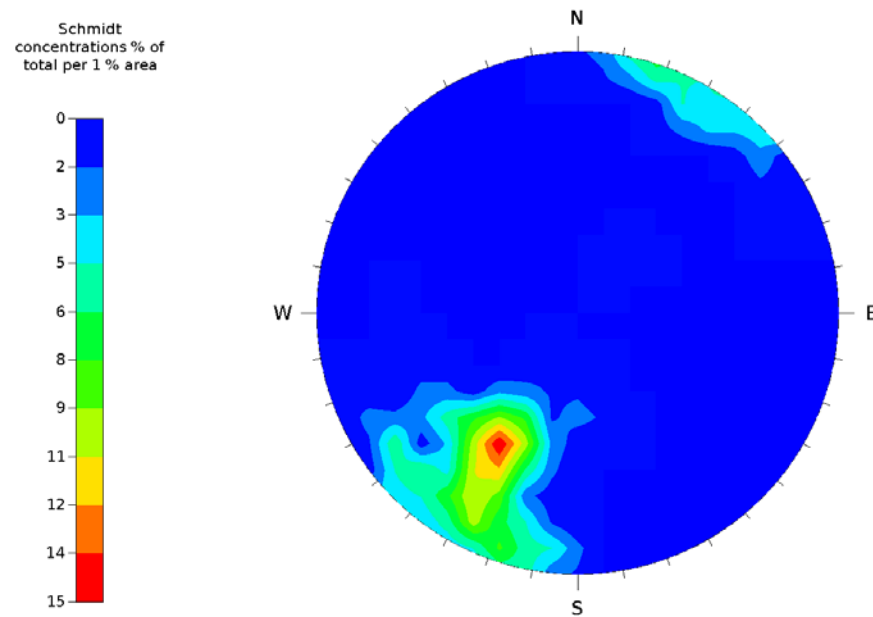
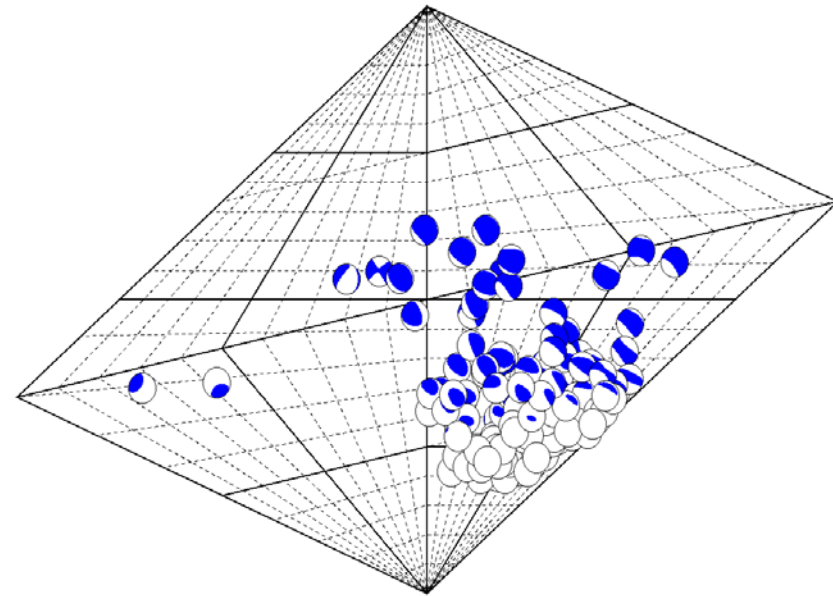
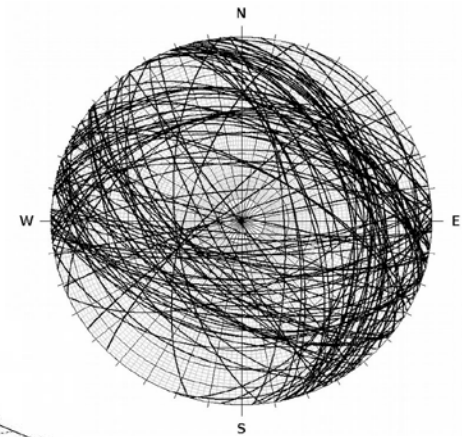
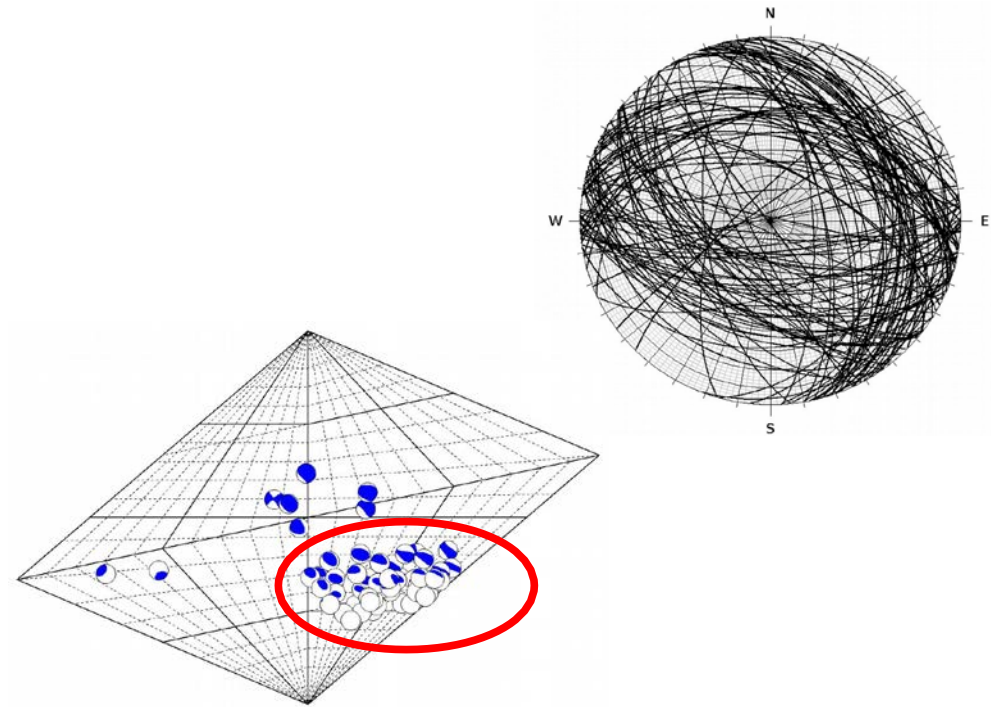


Diagrama de Hudson donde se observa la distribución de mecanismos entre mayormente implosivos y de falla reversa.



2. Sistema Permanente

La intersección de los planos nodales en la zona de profundización correlaciona, en cierta medida, con la orientación de la rampa. Los mecanismos en su mayoría tienen una combinación de componentes implosivas y de deslizamiento de corte. Los ejes P son mayormente perpendiculares a la labor.



3. Estación Sísmica Portátil

En Chilcas Bajo sólo detectaron 2 eventos durante horario de voladura el 04 Sep 2018, 08:13:50. Estos eventos ocurrieron a distancias entre 260 y 280 m de la estación portátil. El primer tuvo magnitud Mw 0.2

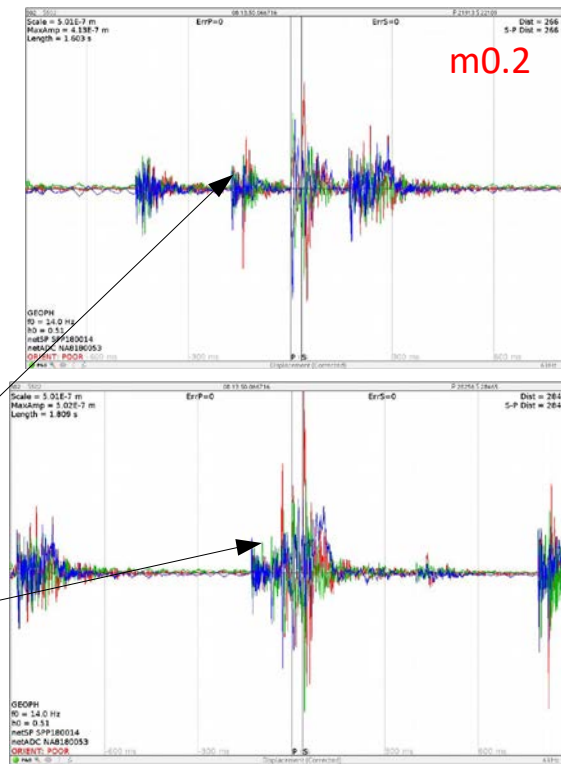
Debido al ruido de las voladuras, no se pudo estimar la magnitud del segundo evento.



estación portátil 04-09-2018 al 28-09-2018

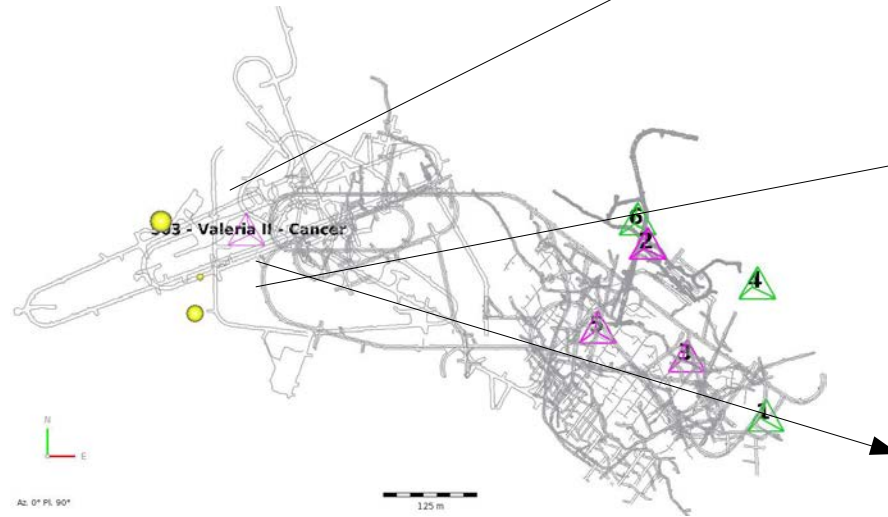


302 - Chilcas Bajo

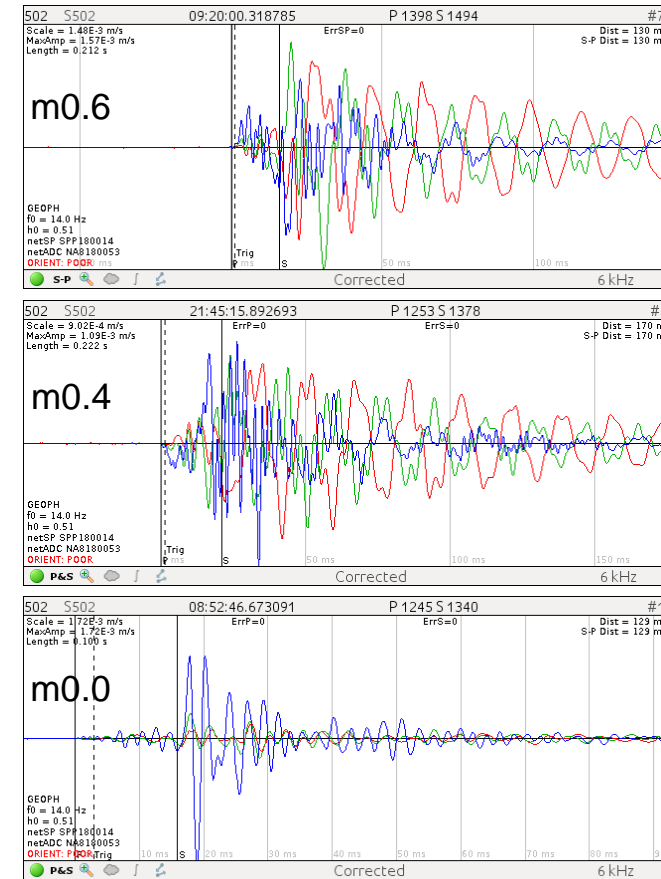


2. Sistema Permanente

En Cáncer (15-10-2018 al 23-10-2018) sólo detectaron 3 eventos. El m0.6 también fue detectado por el sistema permanente.

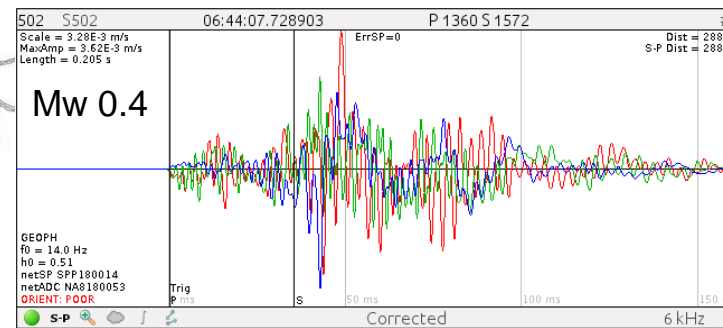
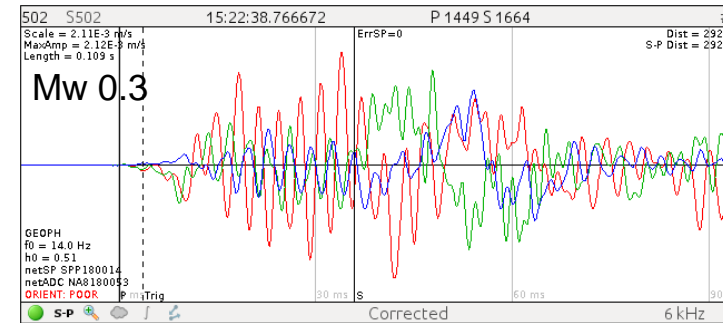
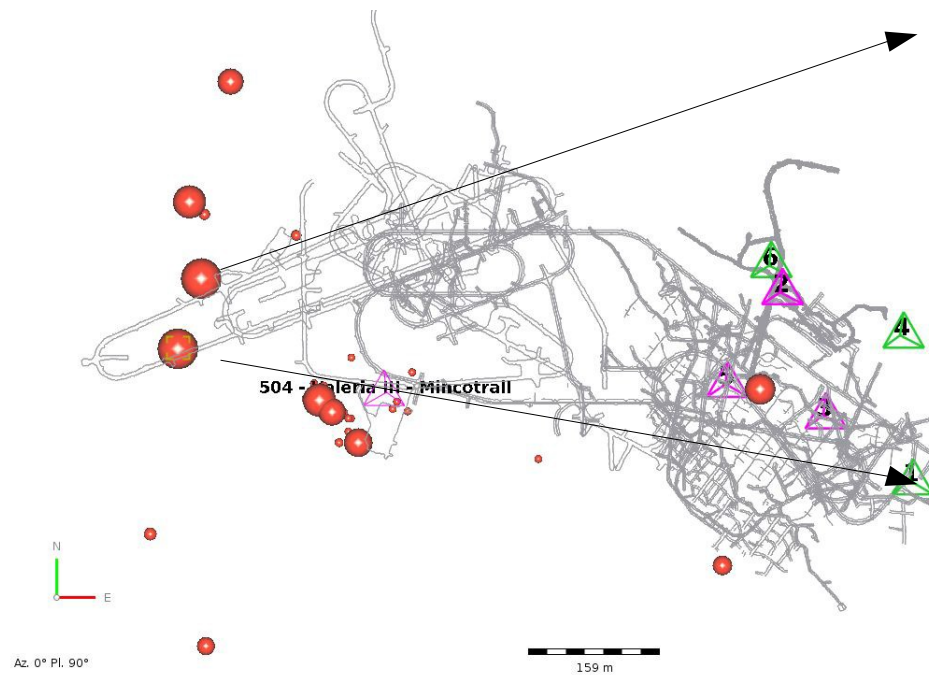


El geófono de la estación portátil midió 1.57 mm/s de vibración a 130 m de la fuente.



3. Estación Sísmica Portátil

En Mincotrall (23-10-2018 al 07-11-2018) se detectaron 35 eventos. Muchos de estos alrededor del nivel 2720. Un par en los niveles adyacentes a la rampa Patrick. Las magnitudes de los eventos están en el rango Mw-1.9 a Mw0.4. Los eventos más grandes también fueron detectados por el sistema permanente. Pero la estación portátil permitió medir vibraciones más cercanas a la fuente (2.12 mm/s a 292 m) y mejorar las localizaciones.





PELIGRO SÍSMICO

4. Peligro Sísmico

- El peligro sísmico se puede definir como una propiedad de los eventos sísmicos de producir daño y pérdida (Mc Guire, 2004). Esta propiedad se caracteriza inherentemente por tener muchas incertidumbres como la localización, tamaño y vibraciones que pueden producir eventos futuros (Baker, 2015) por lo que el peligro sísmico se expresa como probabilidades de excedencia de un nivel de vibración para un periodo de tiempo determinado, 1 año, en el presente caso. Lo descrito corresponde, gráficamente, a una curva de peligro sísmico.
 - El peligro sísmico en Marsa tiene dos componentes. El primero es el peligro sísmico netamente tectónico o natural sin tomar en cuenta la actividad minera. El segundo es el peligro sísmico debido a eventos sísmicos inducidos o gatillados por actividad minera. En este trabajo se presenta la primera componente. El peligro sísmico debido a actividad minera será evaluado una vez que se hayan registrado suficientes datos para obtener resultados estadísticamente significativos (al menos 6 meses de monitoreo continuo). Es importante cuantificar y comparar estas dos componentes.
-

4. Peligro Sísmico Tectónico

En Chilcas Bajo sólo detectaron 2 eventos durante horario de voladura el 04 Sep 2018, 08:13:50. Estos eventos ocurrieron a distancias entre 260 y 280 m de la estación portátil. El primer tuvo magnitud Mw 0.2

zona de subducción



corteza continental estable



corteza continental activa



Fuente: <https://platform.openquake.org/hrde/>

4. Peligro Sísmico Tectónico

Se considera el punto con coordenadas -77.44519 (Oeste), -8.040101 (Sur) como el punto de interés de la mina MARSA.



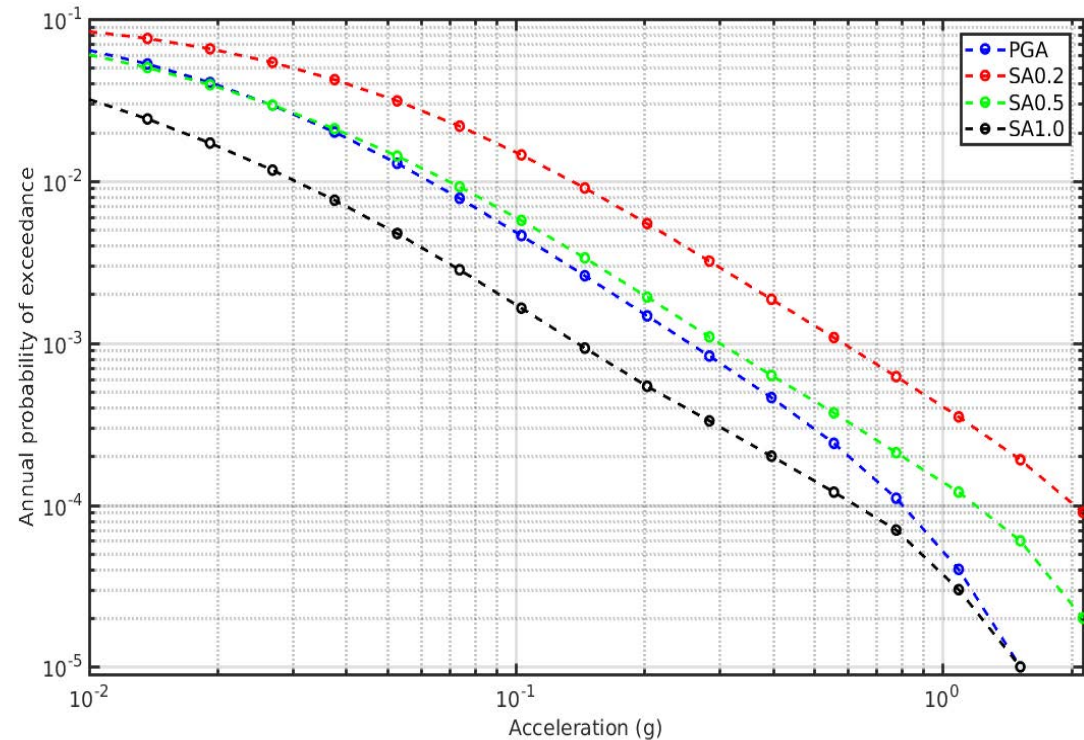
Modificado de Google maps.

4. Peligro Sísmico Tectónico

Los cálculos se hicieron usando el software openquake (Pagani et. al., 2014). Se usaron los siguientes parámetros:

- Punto de interés: -77.44519 (Oeste)
-8.040101 (Sur).
- $V_{s30} = 3303$ m/s (de acuerdo a la calibración para interior mina).
- Tiempo de investigación = 1.0 año
- Distancia máxima = 100 km.

Curvas de peligro sísmico para aceleración máxima (PGA) y aceleración espectral para periodos de 0.2 s (SA0.2), 0.5 s (SA0.5) y 1.0 s (SA1.0).



4.4. Peligro sísmico tectónico: Ecuaciones de atenuación

Para corteza superficial activa:

- Boore y Atkinson, 2008. Peso: 0.333
- Campbell y Bozorgnia, 2008. Peso: 0.333
- Chiou y Youngs, 2008. Peso: 0.333

Para corteza continental estable:

- Toro et. al., 1997. Peso: 0.25
- Frankel et. al., 1996. Peso: 0.125
- Campbell, 2003. Peso: 0.125
- Atkinson y Boore, 2006 (caída de esfuerzos de 140 bar). Peso: 0.125
- Atkinson y Boore, 2006 (caída de esfuerzos de 200 bar). Peso: 0.125
- Tavakoli y Pezeshk, 2005. Peso: 0.125
- Silva et. al. 2002. Peso: 0.125

Zona de subducción:

- Zhao et. al., 2006. Peso: 0.5
- Atkinson and Boore, 2003. Peso: 0.25
- Youngs et. al., 1997. Peso: 0.25

Cuña de subducción (intraslab):

- Geomatrix, 1994. Peso: 0.5
- Atkinson y Boore, 2003 (Modelo global). Peso 0.5

5. Conclusiones

- En Chilcas Bajo sólo se detectaron dos eventos, pero como respuestas inmediatas a voladuras.
- En Valeria II – Cáncer se detectaron 3 eventos de mediana magnitud, relacionados a replicas de voladuras.
- En Valeria III. Aquí se detectó zonas adyacentes a Marsa sujetos a una leve actividad sísmica, debido a estructuras geológicas próximas.
- En Valeria IV y V, el sistema permanente está monitoreando adecuadamente la rampa Patrick y niveles aledaños.

El análisis de los eventos detectados sugiere que las zonas más profundas y las zonas de producción están sujetos a mayor actividad. Esto correlaciona con el nivel de vibración (ver mapa PGV), mayor índice de energía (posiblemente asociados a una mayor acumulación de esfuerzos debido a la profundización) y mayor deformación en las fuentes sísmicas (potencia sísmica).

5. Conclusiones

- Se obtuvieron curvas de peligro sísmico que relacionan la aceleración máxima (PGA) y aceleración espectral para periodos de 0.2 s (SA0.2), 0.5 s (SA0.5) y 1.0 s (SA1.0), con las probabilidades anual de excedencia (POE).
 - Este cálculo se realizó para un punto de interés (rampa Patrick) y se consideró valores de V_s medidos en interior mina (3303 m/s). Por lo que los POE son menores a los que se obtendrían en superficie donde se debe usar un V_s menor (e.g. 760 m/s) para así tomar en cuenta el efecto de sitio que causa amplificaciones debido a sedimentos en superficie.
-

6. Recomendaciones

Se recomienda lo siguiente:

- Continuar con el monitoreo en la rampa Patrick con el sistema permanente. Es importante mantener el sistema funcionando en su totalidad. IMS confirma que éste fue el caso salvo algunos cortes de energía eléctrica y/o cables debido a actividades propias de la minería, lo cuales fueron subsanados rápidamente por MARSA.
 - Continuar con el monitoreo del nivel 2270 con el sistema permanente actual para determinar cambios en la tasa de sismicidad de eventos de magnitud intermedia y alta, los cuales pueden modificar la distribución de esfuerzos en otras zonas de la mina.
 - Los resultados del cálculo del peligro sísmico asociado a eventos tectónicos deben ser comparados con el peligro sísmico debido a eventos inducidos por la actividad minera. Esto con el objetivo de evaluar el impacto de la minería en Marsa en relación al peligro sísmico
-



CONTROLES APLICABLES

7. Aportes

1. Soporte preventivo con sostenimiento de sacrificio
2. Voladura de Desestresing (preacondicionamiento)
3. Taladros de Alivio Escalonado
4. Cámaras de disipación de energía.
5. Sistema de Monitoreo Microsísmico

1. Soporte preventivo con sostenimiento de sacrificio
2. Voladura de Desestresing (preacondicionamiento)
3. Taladros de Alivio Escalonado
4. Sistema de Monitoreo Microsísmico

7. Aportes

Controles Implementados de Mitigación en la Unidad Retamas

1a. Sostenimiento del Frente con Malla electrosoldada de sacrificio



7. Aportes

Controles Implementados de Mitigación en la Unidad Retamas

1b. Sostenimiento del Frente con Shotcrete de Sacrificio

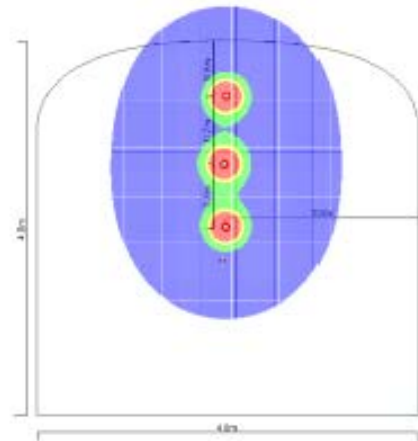
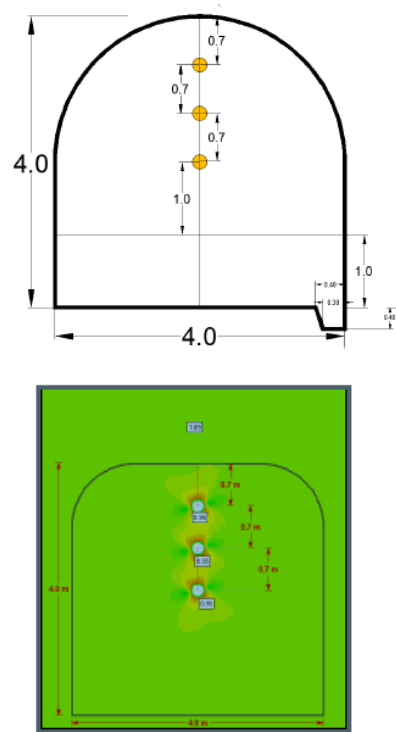


7. Aportes

Controles Implementados de Mitigación en la Unidad Retamas

2. Voladura de Preacondicionamiento.

Frente disparado con voladura de preacondicionamiento



7. Aportes

Controles Implementados de Mitigación en la Unidad Retamas

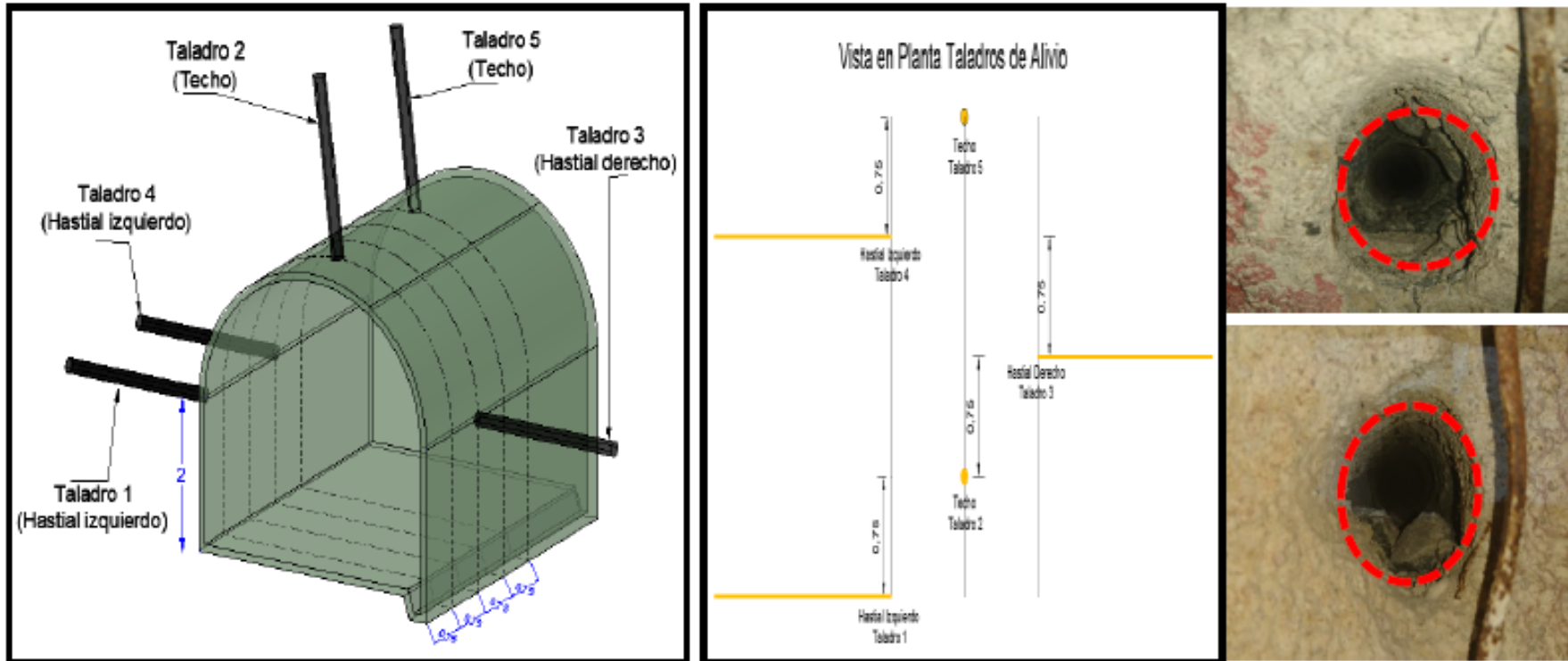
2. Voladura de Preacondicionamiento.

Frente disparado con voladura de preacondicionamiento



7. Aportes

Controles Implementados de Mitigación en la Unidad Retamas 3. Taladros de Alivio escalonado



7. Aportes

Controles Implementados de Mitigación en la Unidad Retamas

3. Taladros de Alivio escalonado



7. Aportes

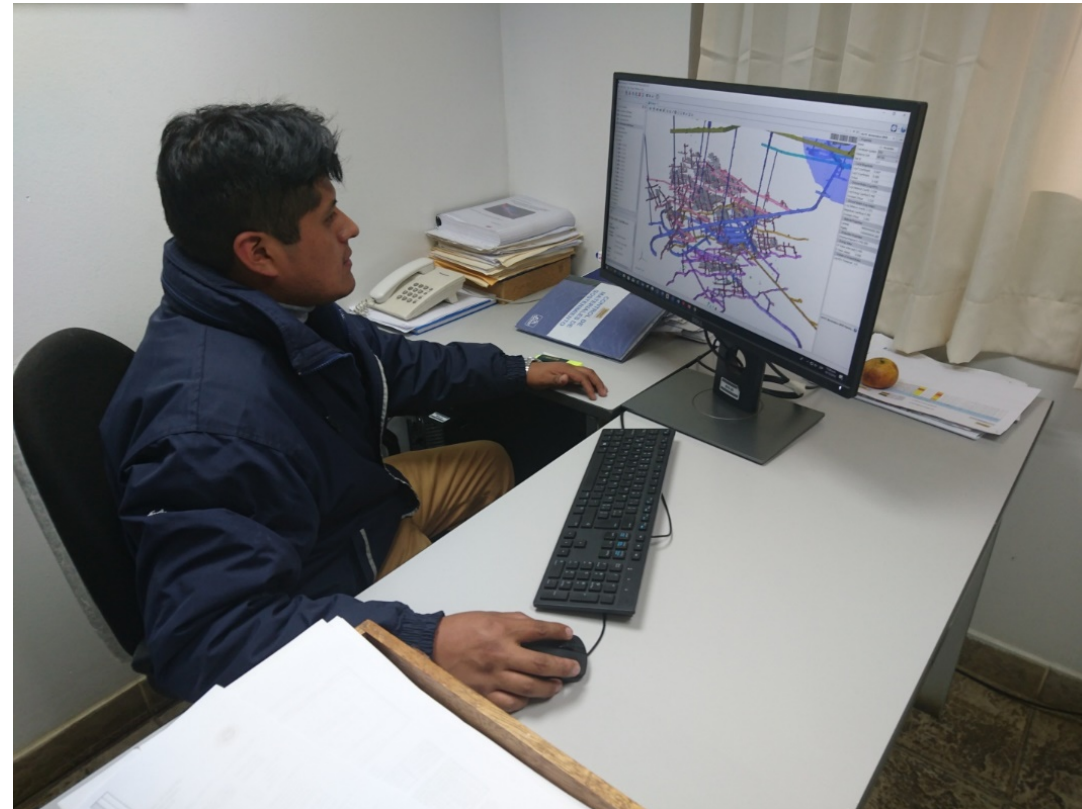
Controles Implementados de Mitigación en la Unidad Retamas

3. Taladros de Alivio escalonado



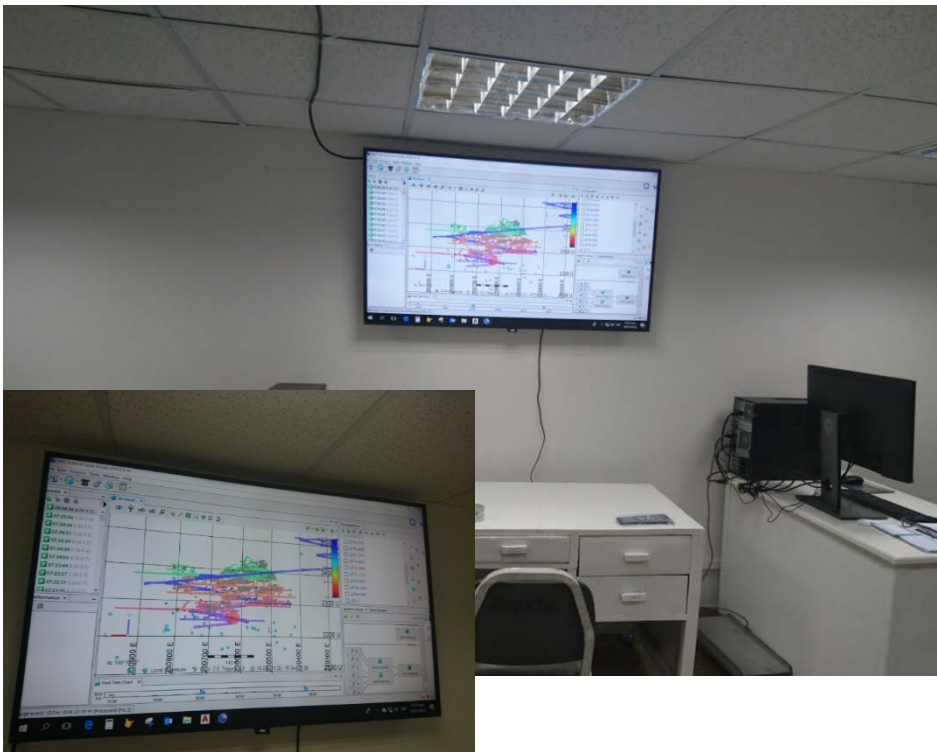
7. Aportes

4. Sistema de Control y Monitoreo Microsísmico

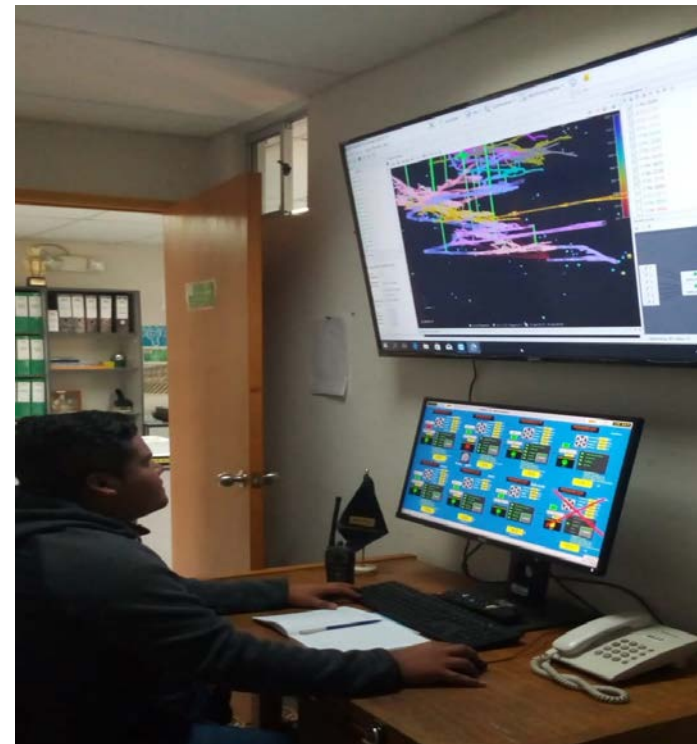


7. Aportes

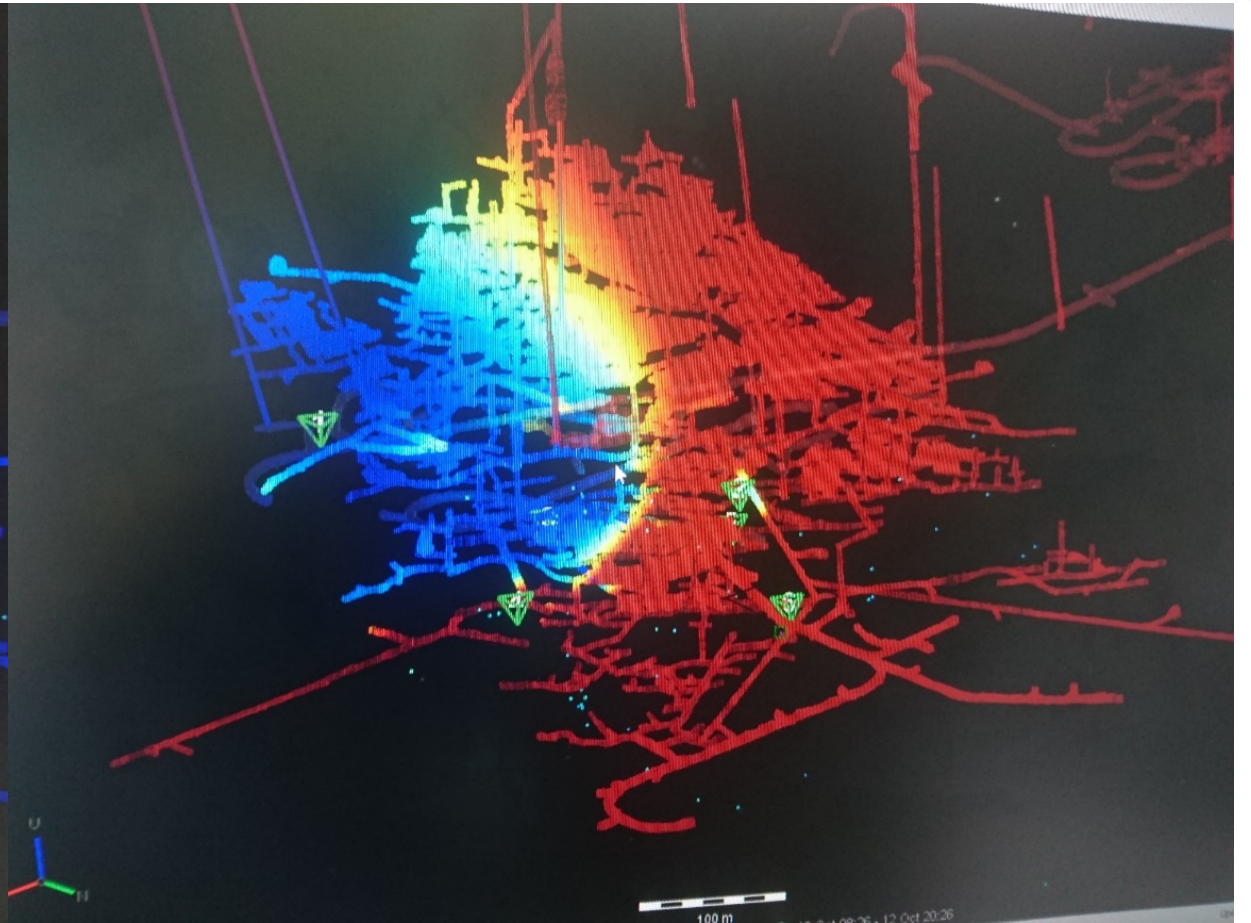
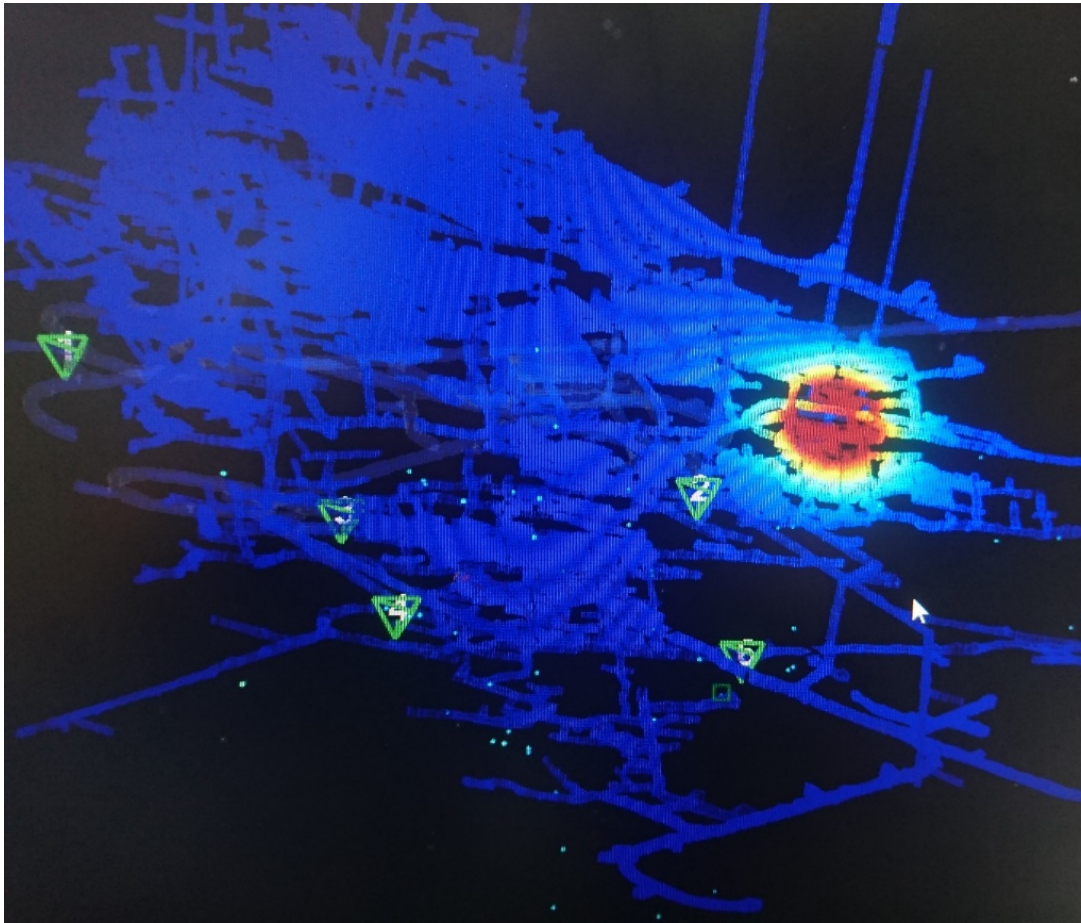
**A. Pantalla de visualización en tiempo real N° - 01
Oficina de Geomecánica**



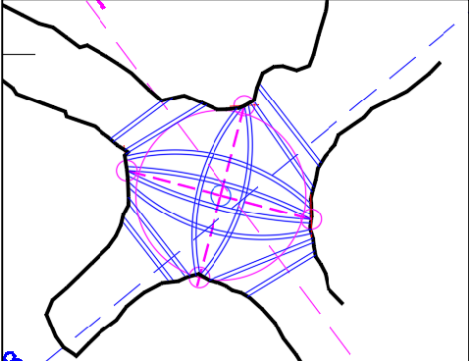
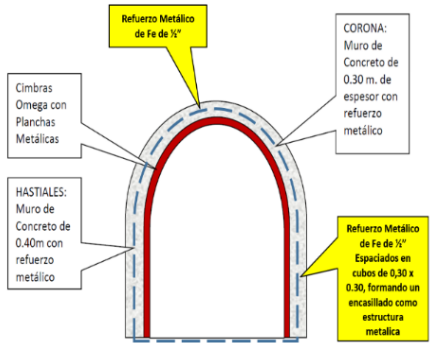
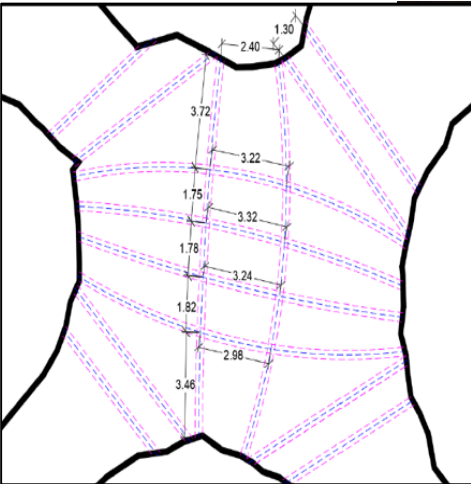
**B. Pantalla de visualización en tiempo real N° - 02
Superintendencia Mina**



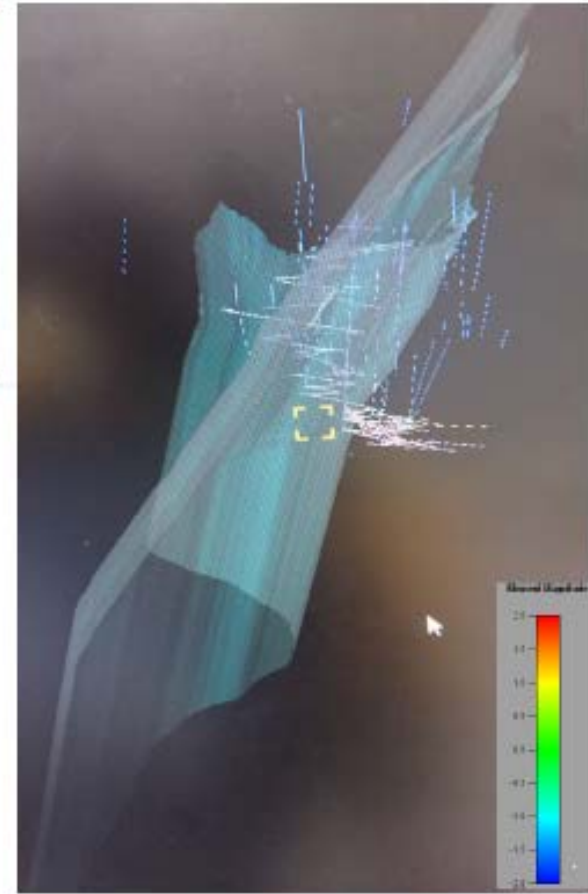
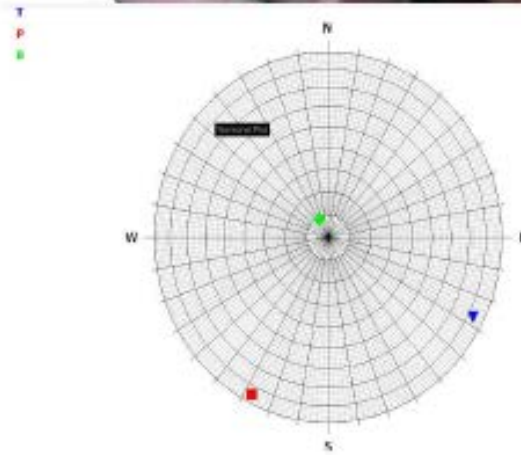
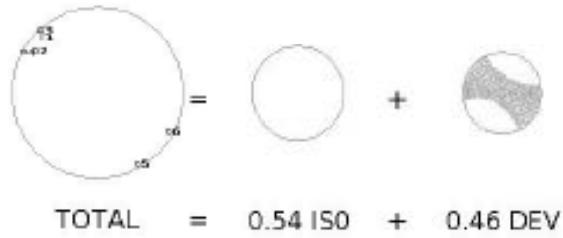
7. Aportes



7. Aportes



7. Aportes





Gracias

