



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS**

**IMPACTO DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN EL MECANISMO
DE PROPAGACIÓN DEL CAVING Y FRAGMENTACIÓN**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

MARCOS GUILLERMO GAETE TORO

**PROFESOR GUÍA:
JAVIER VALLEJOS MASSA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS
KIMIE SUZUKI MORALES
ANDRÉS BRZOVIC PÉREZ**

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN

El preacondicionamiento (PA), sea a través de la técnica de fracturamiento hidráulico (FH) y/o debilitamiento dinámico con explosivos (DDE), busca reducir la competencia del macizo rocoso al generar nuevas fracturas. Mejorando las condiciones de extracción del mineral en minería de caving, pudiendo disminuir la granulometría de los bloques de roca, potenciar la hundibilidad, reducir la frecuencia de colgaduras y la magnitud de los eventos sísmicos durante el quiebre de la columna. Sin embargo, los impactos no se encuentran completamente identificados. Esta tesis busca determinar el efecto del PA en el mecanismo de propagación del caving y fragmentación, teniendo como foco principal el FH.

Para determinar el impacto del FH se utilizan mediciones de granulometría y colgaduras de los puntos de extracción de las minas El Teniente y El Salvador, a través de tres análisis principales, junto con una reinterpretación de los resultados de simulaciones con la técnica Synthetic Rock Mass (SRM) obtenidas de otro trabajo asociado.

El primer análisis, realizado para ambas minas, consiste en la generación de modelos empíricos que correlacionan el porcentaje de sobretamaños mayores a 1 y 2 [m³] en función de la altura extraída y calidad geotécnica en sectores sin presencia de PA. El modelo se comparan con mediciones de terreno asociadas a FH y FH+DDE. En El Teniente, no es posible concluir el efecto del FH por la baja cantidad de datos para analizar. Sin embargo, se confirma que el FH junto al DDE es efectivo si se desea disminuir la fragmentación en los puntos de extracción. En cambio para El Salvador, se observa una reducción significativa de la fragmentación al aplicar FH o FH+DDE.

El segundo análisis, realizado para El Teniente y El Salvador, contrasta las tendencias de frecuencia de colgaduras por cada 1,000 [ton] extraídas en función de los sobretamaños mayores a 1 [m³] para sectores sin y con PA. Los análisis permiten concluir que la implementación de las técnicas, tanto FH como FH+DDE, logran reducir el número de colgaduras que se producen a medida que se extrae el mineral.

El tercer análisis, realizado para El Teniente, estudia el momento sísmico y energía sísmica de los eventos que ocurren al aumentar la altura de mineral extraído, identificando cambios en el comportamiento por efecto del FH. Los resultados indican que los mayores efectos del FH en el momento sísmico y energía sísmica se ven reflejados en los primeros 30 metros de extracción donde se encuentran los eventos de mayor magnitud, los que se ven reducidos con la aplicación del FH. Para el caso del momento sísmico, los valores de logaritmo van de $1e+13$ a $1e+11$, disminuyendo las grandes acumulaciones que se pueden traducir en estallidos de roca.

Se realiza, además, una reinterpretación de los resultados de un estudio en el cuál con la técnica de SRM se modela la fragmentación en condiciones de caving con FH. Se evidencia que el efecto del FH en la distribución de bloques se ve afectado por la trayectoria de esfuerzos impuesta, la cual está asociada a la geometría del caving.

Los objetivos de la tesis se cumplen parcialmente en base a la mina considerada. En El Teniente se concluye que el FH reduce la frecuencia de colgaduras y la magnitud de los eventos sísmicos. Mientras en El Salvador, se observa una reducción del sobretamaño a extraer como consecuencia del FH.

ABSTRACT

The preconditioning (PA in spanish), either through the technique of hydraulic fracturing (FH in spanish) and/or blasting under confined conditions (DDE in spanish), seeks to reduce the competition of the rock mass by generating new fractures improving the conditions of extraction of the mineral in caving mining, being able to reduce the granulometry of the rock blocks, promote the sagging, reduce the frequency of hangings and the magnitude of the seismic events during the break of the column. However, the impacts are not completely identified. This thesis seeks to determine the effect of PA on the propagation mechanism of caving and fragmentation, with FH as its focus.

To determine the impact of the FH, measurements of granulometry and hangings of the extraction points of the El Teniente and El Salvador mines are used, through three main analyzes, together with a reinterpretation of the results of simulations with the Synthetic Rock Mass technique (SRM) obtained from other associated work.

The first analysis, carried out for both mines, consists of the generation of empirical models that correlate the percentage of oversize's greater than 1 and 2 [m^3] depending on the extracted height and geotechnical quality in sectors without the presence of PA. The model is compared with terrain measurements associated with FH and FH + DDE. In El Teniente, it is not possible to conclude the effect of the FH due to the low amount of data to analyze. However, it is confirmed that the FH together with the DDE is effective if it is desired to reduce the fragmentation at the extraction points. On the other hand, for El Salvador, a significant reduction in fragmentation is observed when applying FH or FH + DDE.

The second analysis, carried out for El Teniente and El Salvador, contrasts the trends of the frequency of hangings per 1,000 [ton] extracted based on oversize's greater than 1 [m^3] for sectors with and without PA. The analyzes allow us to conclude that the implementation of the techniques, both FH and FH + DDE, manage to reduce the number of drapes that occur as the ore is extracted.

The third analysis, carried out for El Teniente, studies the seismic moment and seismic energy of the events that occur when increasing the extracted mineral height, identifying changes in the behavior due to the effect of the FH. The results indicate that the greater effects of the FH in the seismic moment and seismic energy are reflected in the first 30 meters of extraction where the events of greater magnitude are found, which are reduced with the presence of FH. For the case of the seismic moment, the logarithm values go from $1e+13$ to $1e+11$, decreasing the large accumulations that can be translated into bursts of rock.

In addition, a reinterpretation of the results of a study is carried out in which, with the SRM technique, the fragmentation is modeled in caving conditions with FH. It is evident that the effect of the FH on the distribution of the blocks is affected by the imposed stress trajectory, which is associated with the geometry of the caving.

The objectives of the thesis are partially met based on the mine considered. In El Teniente, it is concluded that the FH reduces the frequency of hangings and the magnitude of seismic events. While in El Salvador, there is a reduction of the oversize to be extracted because of the FH.

A mis padres

AGRADECIMIENTOS

El tema de tesis fue identificado y desarrollado a lo largo del proyecto IM2 02/14 “Mejoramiento de la Fragmentación, Fase Dos”, dirigido por el Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia S.A. (IM2).

Al finalizar esta etapa quiero darme el tiempo de agradecer a todos los que han influenciado mi vida y me han permitido obtener los logros necesarios que me han traído a este momento. Sin ellos, sin su apoyo, no hubiera sido un viaje tan grato y las situaciones difíciles podrían haber concluido de otra manera.

Quiero comenzar por agradecer a mi familia, en especial a mis padres, por la formación que me entregaron tanto a mi como a mis hermanos, por los malos ratos que tuvieron que soportar, y por todos los buenos recuerdos que poseo gracias a ellos. A mis hermanos, por la compañía de toda la vida con una relación que ha mejorado con los años. Los quiero mucho.

Agradezco también a todos mis amigos por el apoyo y entretenimientos durante las distintas etapas de mi vida; en la Patagonia, en el intercambio, en la universidad y en Santiago en general. No hubiera sido todo tan ameno sin su presencia en mi vida. Espero seguir teniéndolos cerca en el futuro. Además, quiero agradecer a los que por distintas vueltas de la vida se han alejado, pero dejaron algo en mí.

A mis compañeros del AMTC (*Advanced Mining Technology Center*), muchas gracias por la buena onda durante la realización de mi tesis y los almuerzos. Además, quisiera agradecer a mi profesor guía, Javier Vallejos, por considerarme para este trabajo y por el apoyo entregado durante todo este proceso.

Gracias a los establecimientos que me acogieron, con todos los profesores y funcionarios, tanto en el Colegio Alianza Austral como en la Universidad de Chile, con una mención especial al Departamento de Minas, donde todos tuvieron la mejor disposición de ayudar.

Muchas gracias a todos.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1.	<i>Motivación</i>	1
1.2.	<i>Objetivos</i>	2
1.1.1.	Objetivo General	2
1.1.2.	Objetivos Específicos	2
1.3.	<i>Metodología</i>	2
1.4.	<i>Alcances</i>	2
1.5.	<i>Contenidos de la tesis</i>	3
2.	Antecedentes	4
2.1.	<i>Sismicidad</i>	8
2.2.	<i>Preacondicionamiento</i>	9
2.2.1.	Debilitamiento Dinámico con Explosivos (DDE)	9
2.2.2.	Fracturamiento Hidráulico (FH)	11
2.2.3.	Respuesta del Macizo Rocosó	12
2.3.	<i>Métodos discontinuos de modelamiento numérico</i>	13
2.3.1.	UDEC y 3DEC	15
2.3.2.	PFC2D y PFC3D	15
3.	Base de datos	19
3.1.	<i>Mina El Teniente</i>	19
3.1.1.	Recopilación de datos	19
3.1.2.	Discusión	26
3.2.	<i>Mina El Salvador</i>	27
3.2.1.	Recopilación de datos	27
3.2.2.	Discusión	31
4.	Metodología	32
4.1.	<i>Modelo Sobretamaño</i>	32
4.1.1.	Mina El Teniente	32
4.1.2.	Mina El Salvador	33
4.2.	<i>Modelo Colgadas</i>	33
4.2.1.	Mina El Teniente	33
4.2.2.	Mina El Salvador	33
4.3.	<i>Sismicidad</i>	34
4.4.	<i>SRM</i>	35
5.	Análisis y discusión de resultados	39
5.1.	<i>Modelo Sobretamaño</i>	39
5.1.1.	Mina El Teniente	39
5.1.2.	Mina El Salvador	44
5.2.	<i>Modelo Colgadas</i>	48
5.2.1.	Mina El Teniente	48
5.2.2.	Mina El Salvador	49

5.3.	<i>Sismicidad</i>	50
5.3.1.	Momento Sísmico	50
5.3.2.	Energía Sísmica	53
5.3.3.	Momento Sísmico vs Energía Sísmica	55
5.4.	<i>SRM</i>	57
5.4.1.	Resultados sin FH	57
5.4.2.	Resultados con FH	58
6.	Conclusiones y Recomendaciones	60
6.1.	<i>Base de Datos y Análisis</i>	60
6.2.	<i>Modelo Sobretamaño</i>	60
6.3.	<i>Modelo Colgaduras</i>	61
6.4.	<i>Sismicidad</i>	61
6.5.	<i>SRM</i>	62
7.	Bibliografía	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Métodos de Minería Subterránea (Brady, 2004)	4
Figura 2: Diseño Panel Caving.....	5
Figura 3: Panel caving con hundimiento convencional (Trueman et al., 2002)	6
Figura 4: Panel caving con hundimiento previo (Trueman et al., 2002)	7
Figura 5: Panel caving con hundimiento avanzado (Trueman et al., 2002).....	7
Figura 6: Variación parámetros en Ley de Omori Modificada	9
Figura 7: Esquema general debilitamiento dinámico con explosivos (DDE) (Chacón et al., 2003)	10
Figura 8: Zonas generadas al detonar una carga explosiva.....	11
Figura 9: Esquema fracturamiento hidráulico (FH) (Cerrutti, 2008).....	11
Figura 10: Orientación fracturas del FH	12
Figura 11: Solución explícita modelamiento con elementos discretos (ITASCA, 2008)	14
Figura 12: Representación roca intacta con UDEC (izq.) y PFC ^{2D} (der.) (Mas Ivars, 2011)	15
Figura 13: Generación modelo SRM (Vallejos & Suzuki, 2014)	17
Figura 14: Efecto ancho probeta en tiempo de simulación SRM (Vallejos & Suzuki, 2014)	18
Figura 15: Complejo Máfico El Teniente (CMET) (Hurtado & Brzovic, 2014).....	19
Figura 16: Planta modelo de bloques P ₃₂ [m ² /m ³], cota 1880, El Teniente (Millan et al., 2015).....	22
Figura 17: Valores promedios P ₃₂ por cota indicando nivel de producción	22
Figura 18: Correlación altura extraída y quiebre de la columna de mineral (Gaete, 2015)	23
Figura 19: Datos sobretamaño > 1 [m ³] para datos sin FH, El Teniente	24
Figura 20: Datos sobretamaño > 2 [m ³] para datos sin FH, El Teniente	24
Figura 21: Datos colgaduras por litología, El Teniente.....	25
Figura 22: Datos colgaduras por malla, El Teniente.....	25
Figura 23: Andesita, El Salvador (Zamora et al., 2006).....	27
Figura 24: Datos sobretamaño > 1 [m ³] sin PA, El Salvador	28
Figura 25: Datos sobretamaño > 2 [m ³] sin PA, El Salvador	28
Figura 26: Datos colgaduras, El Salvador	29
Figura 27: Límites línea base y área con PA, El Salvador	30
Figura 28: Ubicación Pozos FH, El Salvador	30
Figura 29: Ubicación Pozos DDE, El Salvador.....	31
Figura 30: Puntos de extracción y eventos sísmicos, El Teniente	34
Figura 31: Metodología SRM (Vallejos & Suzuki, 2014).....	36
Figura 32: Vetillas Dacita (Vallejos & Suzuki, 2014)	36
Figura 33: Esquema de trayectoria de Esfuerzos (Vallejos & Suzuki, 2014).....	37
Figura 34: Trayectorias de Esfuerzos utilizadas para estudio en dacita, SRM (Vallejos & Suzuki, 2014)	37
Figura 35: Muestras de SRM con y sin FH (Vallejos & Suzuki, 2014).....	38
Figura 36: Modelo sobretamaño > 1 [m ³], RENO sin PA.....	39
Figura 37: Modelo sobretamaño > 2 [m ³], RENO sin PA.....	40
Figura 38: Modelo sobretamaño > 1 [m ³], 4Sur sin PA	40
Figura 39: Modelo sobretamaño > 2 [m ³], 4Sur sin PA	41

Figura 40: Modelo sobretamaño > 1 [m ³], El Teniente con FH.....	42
Figura 41: Modelo sobretamaño > 2 [m ³], El Teniente con FH.....	42
Figura 42: Modelo sobretamaño > 1 [m ³], El Teniente con FH+DDE.....	43
Figura 43: Modelo sobretamaño > 2 [m ³], El Teniente con FH+DDE.....	43
Figura 44: Modelo sobretamaño > 1 [m ³], El Salvador sin PA.....	45
Figura 45: Modelo sobretamaño > 2 [m ³], El Salvador sin PA.....	45
Figura 46: Modelo sobretamaño > 1 [m ³], El Salvador con FH	46
Figura 47: Modelo sobretamaño > 2 [m ³], El Salvador con FH	46
Figura 48: Modelo sobretamaño > 1 [m ³], El Salvador con FH+DDE.....	47
Figura 49: Modelo sobretamaño > 2 [m ³], El Salvador con FH+DDE.....	47
Figura 50: Modelo colgaduras, Mallas sin PA, El Teniente	48
Figura 51: Modelo colgaduras, Malla 15x17.32, El Teniente.....	49
Figura 52: Modelo colgaduras, El Salvador.....	50
Figura 53: Momento sísmico máximo, El Teniente	51
Figura 54: Momento sísmico suma, El Teniente	51
Figura 55: Momento sísmico promedio, El Teniente	52
Figura 56: Momento sísmico promedio logaritmo, El Teniente	52
Figura 57: Energía sísmica máxima, El Teniente.....	53
Figura 58: Energía sísmica suma, El Teniente.....	54
Figura 59: Energía sísmica promedio, El Teniente	54
Figura 60: Energía sísmica promedio logaritmo, El Teniente.....	55
Figura 61: Momento sísmico vs energía sísmica (Máximos), El Teniente.....	56
Figura 62: Comparación trayectorias de esfuerzos SRM (Vallejos & Suzuki, 2014) ...	57
Figura 63: Curvas granulométricas trayectorias de esfuerzo SRM (Vallejos & Suzuki, 2014).....	57
Figura 64: Comparación trayectorias de esfuerzo SRM con FH (Vallejos & Suzuki, 2014)	58
Figura 65: Curvas granulométricas SRM con FH trayectoria SP1 (Vallejos & Suzuki, 2014).....	59
Figura 66: Curvas granulométricas SRM con FH trayectoria SP2 (Vallejos & Suzuki, 2014).....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos sobretamaño y colgaduras (GRMD-SGL-INF-069-2014)	20
Tabla 2: Información sectores, El Teniente (1).....	21
Tabla 3: Información sectores, El Teniente (2).....	21
Tabla 4: Tipo de PA, valores P_{32} in-situ y malla por sector productivo.....	23
Tabla 5: Actividades por División	32
Tabla 6: Parámetros modelos sobretamaño, El Teniente	39
Tabla 7: Variabilidad parámetros Ley de Omori Modificada.....	41
Tabla 8: Rangos P_{32} , Ley de Omori Modificada	42
Tabla 9: Parámetros modelos sobretamaño, El Salvador	44
Tabla 10: Parámetros modelo colgaduras, Mallas sin PA, El Teniente.....	48
Tabla 11: Parámetros modelo colgaduras, 15x17.32, El Teniente.....	49
Tabla 12: Parámetros modelo colgaduras, El Salvador	49

1. INTRODUCCIÓN

El rubro de la minería, a diferencia de otras ciencias o áreas productivas, no puede seleccionar el principal material a manipular, el macizo rocoso, la cual además de ser explotada, es el elemento más importante de soporte de las excavaciones por lo que sus características permiten acotar los posibles métodos de explotación, diseño y operación. Bajo este contexto, la rama de la geomecánica es la encargada de caracterizar el macizo rocoso, identificando las variables y parámetros a utilizar para que la producción sea segura para las personas y equipos, además de lo más continua posible, evitando inconvenientes que puedan ocurrir.

Dentro de la minería subterránea, los métodos de explotación por hundimiento, como son el Block y Panel Caving, utilizan la fuerza de gravedad para que el mineral se fracture y fluya a medida que se extrae, siendo una de las mayores incertidumbres la fragmentación que se obtendrá en los puntos de extracción, la que impacta en el diseño de estos, piques de traspaso y bateas, mientras que operacionalmente se relaciona con las potenciales colgaduras que puedan ocurrir, requerimientos de tronadura secundaria, dimensiones de los equipos a utilizar con su factor de carga asociado, entre otros, afectando directamente el rendimiento del método de explotación seleccionado.

Actualmente, la minería se está movilizando a yacimientos de mayor profundidad con rocas cada vez más competentes y de menor ley de mineral, lo que atenta contra la implementación de métodos de explotación por hundimiento, a pesar de ser los de menor costos y deseables para estas condiciones, salvo por la calidad del macizo. Con el fin de contrarrestar esta situación, se utilizan técnicas para precondicionar la roca, para disminuir así su calidad de manera artificial, obteniendo granulometrías más finas y favorecer la propagación del caving verticalmente. Sin embargo, no existen conclusiones definitivas al respecto en la literatura.

El fracturamiento hidráulico es una de técnicas utilizadas para precondicionar el macizo rocoso. Consiste en la inyección de agua a presión a altas presiones para generar discontinuidades que se orienta de manera perpendicular al esfuerzo principal menor, afectando la fragmentación, hundibilidad y sísmica asociada al método de explotación. Sin embargo, faltan análisis que permitan cuantificar el impacto real en estos aspectos y justificar su implementación.

Otra técnica de precondicionamiento es el debilitamiento dinámico con explosivos, la que consiste en utilizar cargas cilíndricas para detonarlas en una secuencia adecuada que permita la aprovechar la interacción de las ondas expansivas para producir la movilización o apertura de estructuras naturales junto con activación y propagación de micro-cavidades de la matriz, disminuyendo la resistencia del macizo rocoso.

1.1. MOTIVACIÓN

Existen muchos supuestos respecto al efecto real del precondicionamiento, en especial del fracturamiento hidráulico, sobre la fragmentación del macizo rocoso, lo que corresponde a un elemento crítico de la explotación minera, incluso cuando se trata de un método por hundimiento. Dentro de las operaciones minera que lo han implementado se encuentran: Northparkes, Ridgeway, Newcrest, El Teniente, El Salvador, entre otras.

Por esta razón, el IM2 decidió hacer un proyecto para estudiar y cuantificar los efectos del preacondicionamiento con información de El Teniente como base y apoyado con datos de El Salvador, ambas de Codelco. Esta tesis se enmarca en este trabajo, denominado Proyecto IM2 02/14 *“Mejoramiento de la Fragmentación, Fase Dos”*, dirigido por el Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia S.A. en colaboración con el Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC).

1.2. OBJETIVOS

El trabajo presentado en esta tesis busca cuantificar el efecto de estas técnicas, teniendo como foco principal el fracturamiento hidráulico, sobre la fragmentación, frecuencia de colgaduras y sismicidad, utilizando modelos empíricos y análisis de datos con información de las minas El Teniente y El Salvador. Además, se toman resultados de otro trabajo obtenidos a través en modelamiento numérico con la herramienta Synthetic Rock Mass para reinterpretar los datos y ver el efecto del fracturamiento hidráulico en las simulaciones.

1.1.1. Objetivo General

- Cuantificar el impacto del fracturamiento hidráulico en la fragmentación obtenida en los puntos de extracción, frecuencia de colgaduras y sismicidad inducida en función de datos empíricos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo empírico para determinar el comportamiento de los sobretamaños en función de la altura extraída y estudiar el impacto generado por el fracturamiento hidráulico y su acompañamiento con debilitamiento dinámico con explosivos.
- Identificar la frecuencia de colgaduras en función de sobretamaños en los puntos de extracción y analizar las implicancias del preacondicionamiento.
- Estudiar los eventos sísmicos en función de la altura de mineral extraída diferenciando zonas con fracturamiento hidráulico para identificar su efecto.

1.3. METODOLOGÍA

Para poder lograr los objetivos planteados se considera la siguiente metodología, desarrollada en más detalle en la sección 3, que permitirá cuantificar el efecto del fracturamiento hidráulico en la fragmentación, colgaduras y sismicidad:

- Recopilación, limpieza y análisis de la base de datos
- Ajuste de modelos de fragmentación, colgaduras y sismicidad en base de datos empíricos de información sin presencia de preacondicionamiento
- Análisis de datos asociados a sectores con efecto de preacondicionamiento con respecto a los modelos ajustados

1.4. ALCANCES

Este trabajo se realiza con bases de datos entregadas por el IM2 que consideran 2 divisiones de Codelco, El Teniente y El Salvador, de los años.

1.5. Contenidos de la tesis

Se presenta a continuación una breve descripción de cada uno de los capítulos de este trabajo.

La introducción al tema de investigación y el contexto en el cual se desarrolla este trabajo, se presentan en el **Capítulo 1**. Además, se incluye la motivación, alcances y objetivos.

El **Capítulo 2** resume antecedentes bibliográficos, relacionados a sismicidad, preacondicionamiento y métodos discontinuos de modelamiento numérico.

El **Capítulo 3** presenta las bases de datos utilizadas durante el trabajo de esta tesis.

La metodología utilizada para el desarrollo de la tesis se encuentra en el **Capítulo 4**, considerando la generación de modelos de sobretamaños y colgaduras, además de los análisis de sismicidad y evaluación del modelo realizado con SRM.

Los resultados generados por la implementación de la metodología y su discusión se encuentran en el **Capítulo 5**.

Las conclusiones de esta investigación y recomendaciones para trabajos futuros se incluyen en el **Capítulo 6**.

2. ANTECEDENTES

Los métodos de explotación en minería subterránea pueden ser clasificados en función del tipo de soporte de la cavidad desde la que se extrae el mineral en tres grandes grupos: soporte natural, soporte artificial y sin soporte, como se observa en la Figura 1, realizada por Brady y Brown (2004).

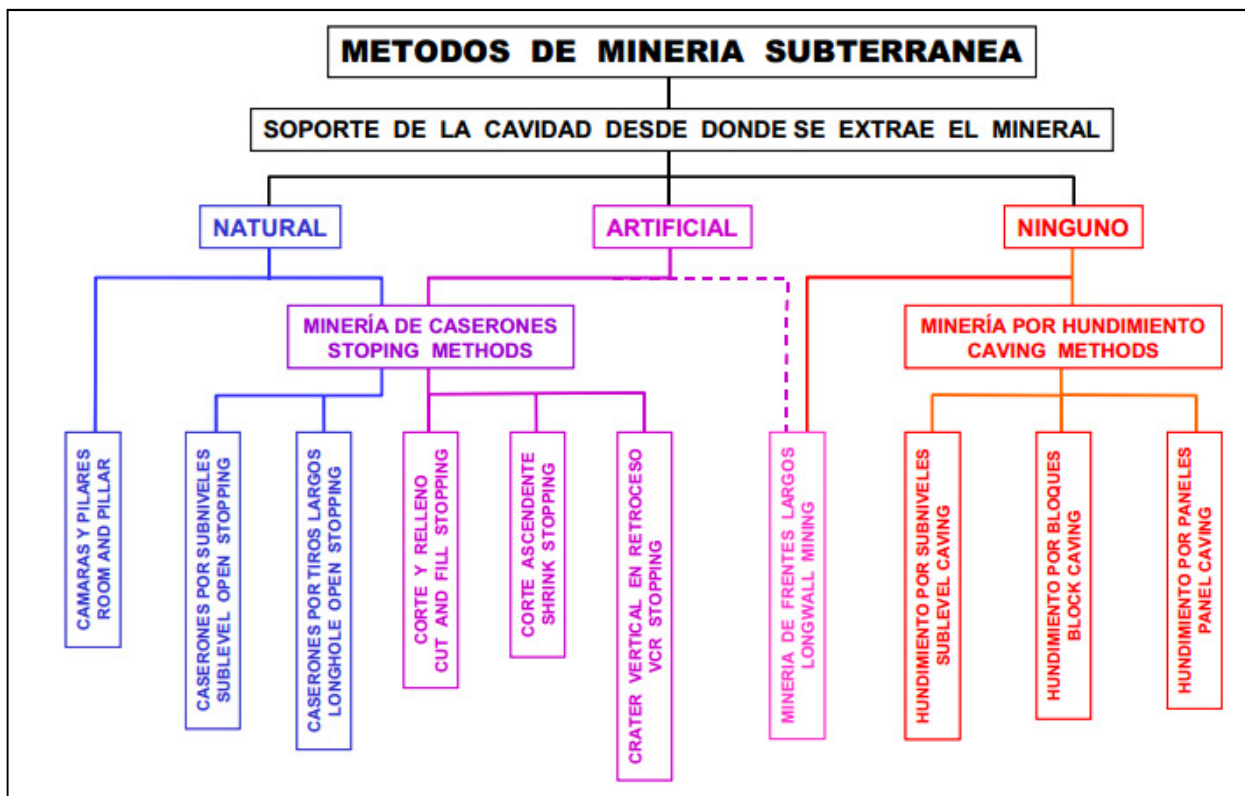


Figura 1: Métodos de Minería Subterránea (Brady, 2004)

Dentro del último grupo se encuentran los métodos por hundimiento o *caving*. Estos son definidos por Laubscher (1994) como las operaciones mineras en que la base del cuerpo mineralizado es socavada, con técnicas convencionales de perforación y tronadura, para inducir la falla de la roca y producir grandes desplazamientos de masa.

Como resultados, el macizo rocoso se comporta como un material discontinuo y fluye naturalmente por efecto de la gravedad al ser extraído por los puntos de extracción permitiendo que el hundimiento se siga propagando verticalmente.

Particularmente relevante es el *panel caving* o hundimiento por paneles, que para su óptima aplicabilidad requiere de un macizo rocoso relativamente poco competente con una gran cantidad de fracturas que permitan la formación de fragmentos más pequeños, favoreciendo la extracción y transporte del mineral. El diseño minero de este método posee varios elementos, observables en la Figura 2. Este método posee dos niveles principales, el de hundimiento y el de producción. El primero se encuentra sobre el segundo, en función de la calidad del macizo y permite realizar el corte basal para comenzar la socavación. El de producción, en cambio, permite coleccionar el mineral fracturado a través de bateas y zanjas que actúan como embudos transportándolo del nivel superior al inferior. Al disminuir la cantidad de roca fracturada en la columna de

mineralizada se generan inestabilidades que propagan el hundimiento hasta la superficie formando la subsidencia del terreno.

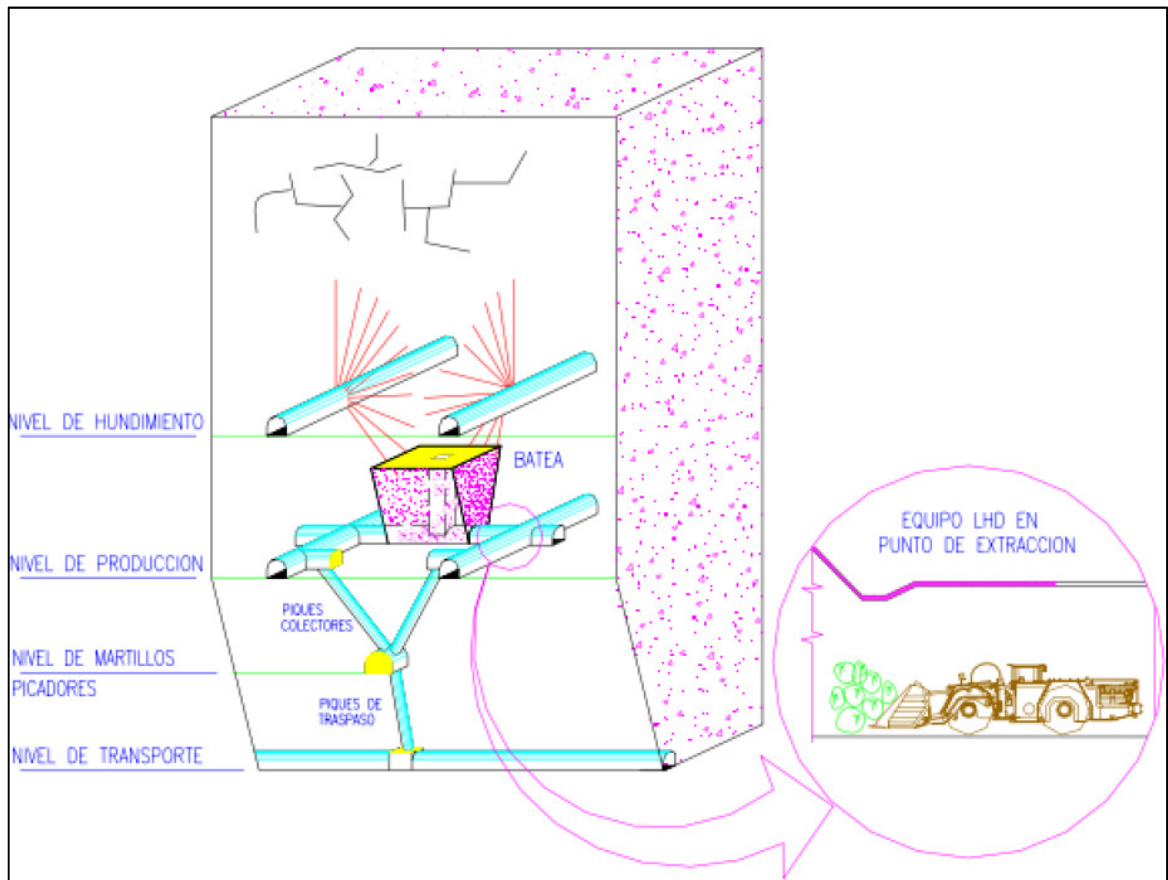


Figura 2: Diseño Panel Caving

La implementación de este método produce una modificación en el campo de esfuerzos preexistentes, donde los nuevos esfuerzos, conocidos como inducidos, poseen cambios tanto de orientación como de magnitud con respecto a los iniciales. La intensidad de estas variaciones depende del tamaño de las excavaciones y cercanía a las mismas.

Existen tres variantes del *panel caving* que se caracterizan por tener secuencias de desarrollo distintas y distribuciones variadas de esfuerzos, por lo que la selección óptima de una variante está asociada en parte por la minimización del riesgo de estallidos de roca, principalmente, en sectores con entrada de personal y equipos al operar la mina. Sin embargo, la redistribución de esfuerzos ocurre dentro de un área de influencia que afecta todas las direcciones, variando la magnitud y orientación.

Cada variante se discute a continuación:

a) Hundimiento convencional

Es el método de hundimiento más antiguo. Se caracteriza por la coincidencia en el avance del frente de hundimiento y producción. Las principales ventajas son que: no requiere ningún tipo de instalación para el manejo del mineral, las galerías en el nivel de hundimiento pueden estar espaciadas por 30 [m], requiriéndose sólo para perforación y tronadura, además la probabilidad de que el mineral se compacte es muy baja. Por otro

lado, la mayor desventaja es que la roca entre los niveles de hundimiento y producción se encuentra sometida a esfuerzos altos y variables, por lo que se requiere la instalación de soporte restringiendo el avance del nivel de hundimiento (Trueman, Pierce, & Wattimena, 2002).

La Figura 3 muestra un esquema de esta variante con sus principales características. D2 se refiere a la franja de seguridad con fortificación definitiva y D3 a la distancia relativa detrás del frente de socavación.

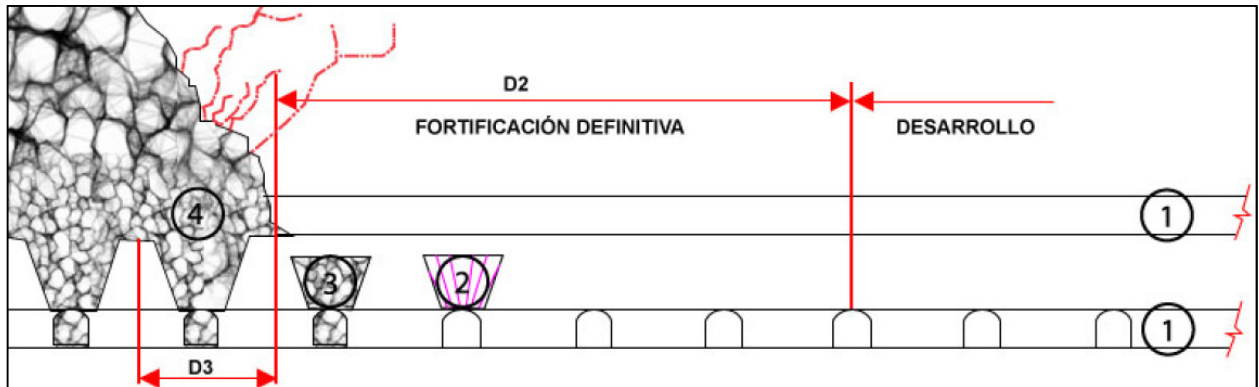


Figura 3: Panel caving con hundimiento convencional (Trueman et al., 2002)

- En (1) se observa que el nivel de hundimiento y el de producción con las zanjas están adelantadas con respecto a la socavación.
- En (2) se desarrollan las bateas levemente por delante del frente de socavación.
- En (3) se produce la tronadura de las bateas dejando una losa entre estas y el UCL.
- En (4) se completa la batea y se da inicio a la extracción del mineral.

b) Hundimiento Previo

En esta variante el nivel de hundimiento se encuentra adelantado con respecto al nivel de producción, el que se encuentra retrasado de tal forma que se forme un ángulo cercano a los 45° entre estos. Las ventajas incluyen que el nivel de producción se genera en un ambiente con bajos esfuerzos por lo que requiere poco soporte, el nivel de hundimiento puede ser explotado independientemente del de producción y el mineral quebrado en el UCL genera un soporte reduciendo esfuerzos inducidos en el frente. Las desventajas incluyen un manejo extra de mineral del nivel de hundimiento, las galerías en el UCL deben encontrarse a 15 [m] para remover efectivamente el esponjamiento y existe la posibilidad de problemas por compactación de mineral (Trueman et al., 2002).

La Figura 4 muestra un esquema de esta variante con sus principales características.

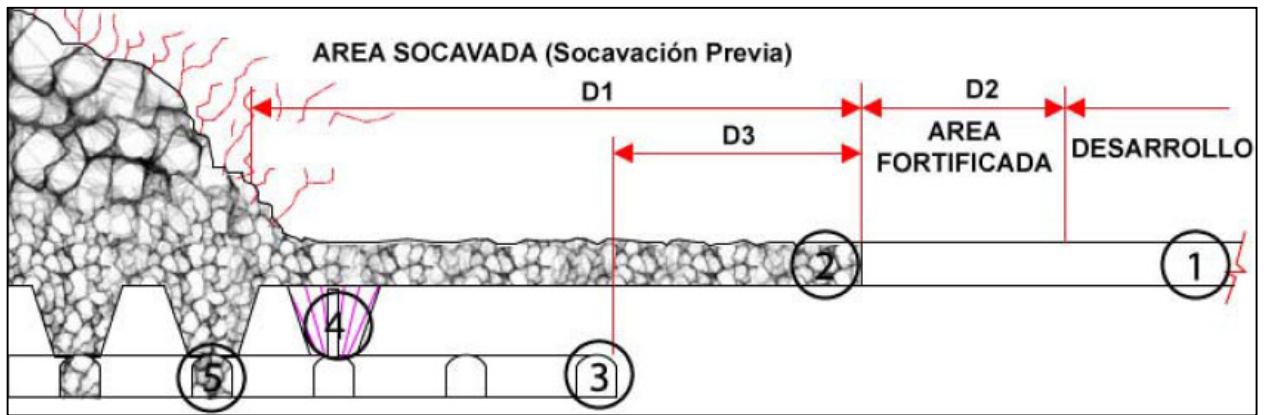


Figura 4: Panel caving con hundimiento previo (Trueman et al., 2002)

- En (1) se observa el avance del nivel de hundimiento con una separación respecto a la fortificación.
- En (2) se aprecia el desarrollo de la socavación estando delante de los frentes de extracción y preparación.
- En (3) se indican las labores del nivel de producción ubicadas completamente bajo el área socavada.
- En (4) se desarrollan las bateas bajo el área socavada.

c) Hundimiento Avanzado

Esta variante busca alejar la concentración de esfuerzos del frente de extracción. Dentro de sus principales ventajas se encuentran requerir un limitado manejo de material en el UCL y que las zanjas junto con el nivel de producción retrasado necesitan poca fortificación por encontrarse en un sector en sombra con bajos esfuerzos. Mientras que las desventajas son que problemas en el UCL pueden afectar el NP y viceversa, se puede compactar el mineral si no se avanza a una velocidad adecuada y las bateas se desarrollan desde el nivel de producción a roca quebrada del nivel de hundimiento.

La Figura 5 muestra un esquema de esta variante con sus principales características. D1 se refiere a la distancia socavada previa a la extracción, D2 a la franja de seguridad con fortificación definitiva, y D3 a la distancia desde la última zanja desarrollada con respecto al frente socavación.

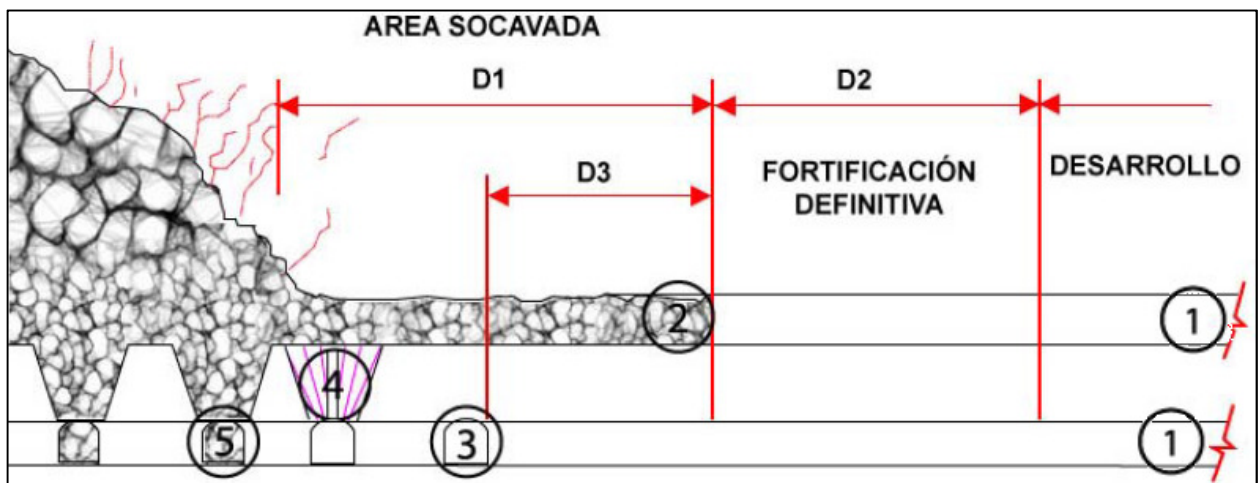


Figura 5: Panel caving con hundimiento avanzado (Trueman et al., 2002)

- En (1) se observa el desarrollo nivel de hundimiento y de producción.
- En (2) se aprecia la socavación por delante del frente de extracción.
- En (3) se producen las zanjas del nivel de producción bajo el área socavada.
- En (4) se desarrollan las bateas bajo el área socavada.
- En (5) se da inicio a la extracción del mineral.

Esta sección presenta las nociones básicas requeridas dentro de esta tesis, referente a los métodos de explotación minera por hundimiento. Se incluyen conceptos básicos sobre sismicidad, preconditionamiento y modelamiento numérico utilizando macizos rocosos sintéticos.

Los modelos numéricos permiten replicar los comportamientos de la roca bajo distintos escenarios de esfuerzos y sus efectos, por ejemplo, en fragmentación y sismicidad. Siendo dicho comportamiento afectado por la implementación de técnicas de preconditionamiento.

2.1. SISMICIDAD

Un evento sísmico se define como un movimiento de la tierra por causas internas de esfuerzos y puede tener como consecuencias grandes liberaciones de energías por fracturas del medio y partes de esta, que pueden ocurrir de manera muy violenta, como son los estallidos de roca en minería. Es por esto que, Alcott (1998) sugiere como dos de los tres parámetros principales a monitorear en una mina: la energía sísmica y momento sísmico, por ser parámetros escalares simples de manejar y permiten desarrollar análisis rutinarios.

Por un lado, la energía sísmica (E) se define como la cantidad de energía liberada o trabajo realizado en la fuente como ondas sísmicas. Su valor es proporcional a la integral del espectro de velocidad al cuadrado en el campo lejano y puede ser derivado de las formas de onda registradas. Su valor incrementa con la caída de *stress* y momento sísmico (Mendecki, Van Aswegen, Durrheim, & Ortlepp, 2001). Por otro lado, el momento sísmico (M_o) permite estimar la fuerza de un evento en función de la deformación inelástica de la fuente. Dado que es proporcional a la integral del pulso de desplazamiento de campo lejano, puede ser obtenido de las formas de onda registradas (Mendecki et al., 2001), es decir, de manera muy precisa con un sismograma (Kanamori, 1983).

Kanamori (1977) basado en diversos estudios (Aki, 1967, 1972; Hanks, 1977; Kanamori & Anderson, 1975; Thatcher & Hanks, 1973) y el modelo propuesto por Orowan (1960) desarrolla una relación entre la energía irradiada (E) y el momento sísmico (M_o):

$$E[J] = (\Delta\sigma/2\mu) \times M_o[Nm] \quad (1)$$

Donde $\Delta\sigma$ es la caída de *stress* promedio de un terremoto y μ es la rigidez del medio cercano a la falla. Como $(\Delta\sigma/\mu)$ es aproximadamente 10^{-4} , la relación deriva a:

$$E[J] = \left(\frac{1}{2 \times 10^4}\right) \times M_o[Nm] \quad (2)$$

También es relevante la Ley de Omori Modificada, porque permite identificar patrones en las réplicas de los eventos sísmicos en el tiempo. Omori (1894; 1894) propuso una

fórmula para representar el decaimiento temporal de la frecuencia de réplicas, la que fue modificada por (Utsu & Ogata, 1995):

$$n(t) = \frac{K}{(c + t)^{-p}} \quad (3)$$

Donde K es la amplitud; p es la tasa de decaimiento, la que típicamente va de 0.9 a 1.5 (Utsu & Ogata, 1995); y c es un parámetro de compensación temporal que considera el comportamiento observado brevemente después del evento sísmico principal. La Figura 6 presenta visualmente el efecto de cada parámetro en el comportamiento la curva.

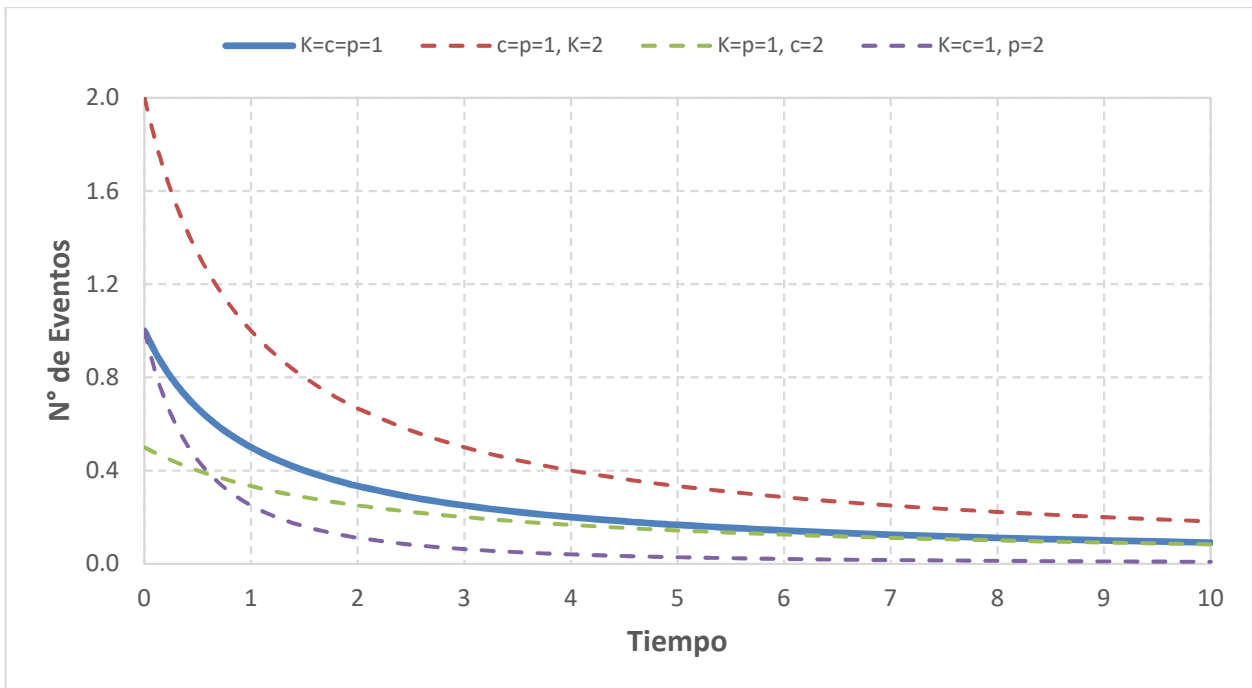


Figura 6: Variación parámetros en Ley de Omori Modificada

2.2. PREACONDICIONAMIENTO

El preconditionamiento (PA) tiene como finalidad intervenir la roca en las condiciones más cercanas a las de confinamiento natural antes de iniciar la explotación para aumentar el número de discontinuidades, reduciendo los estados tensionales en zonas cercanas a la actividad minera para evitar estallidos de roca, generando zonas con esfuerzos menores y un mayor grado de fragmentación durante la extracción del mineral. Esto permite enfrentar la minería de roca primaria que se caracteriza por poseer pocas fracturas abiertas o fisuras selladas con rellenos cohesivos con un nuevo enfoque, para que responda de buena manera el proceso de *caving*, optimizando la productividad, eficiencia económica y estándares de seguridad de las personas.

Se utilizan básicamente dos técnicas, las cuales son discutidas a continuación.

2.2.1. Debilitamiento Dinámico con Explosivos (DDE)

El debilitamiento dinámico con explosivos (DDE) es un método para preconditionar la roca en ambientes subterráneos utilizado en un contexto sin caras libres. La detonación de explosivos provoca la movilización o apertura de estructuras

naturales, o activación y propagación de micro-cavidades de la matriz de la roca, disminuyendo la resistencia al fracturamiento natural que es sometido por quiebre gravitacional en métodos de explotación por hundimiento (Cerrutti, 2008). El método utiliza cargas cilíndricas (...) que son detonadas en una secuencia apropiada para aprovechar la interacción entre las ondas de esfuerzos generadas por la tronadura (Chacón, Apablaza, & Quiñones, 2003). La Figura 7 presenta un esquema general del DDE.

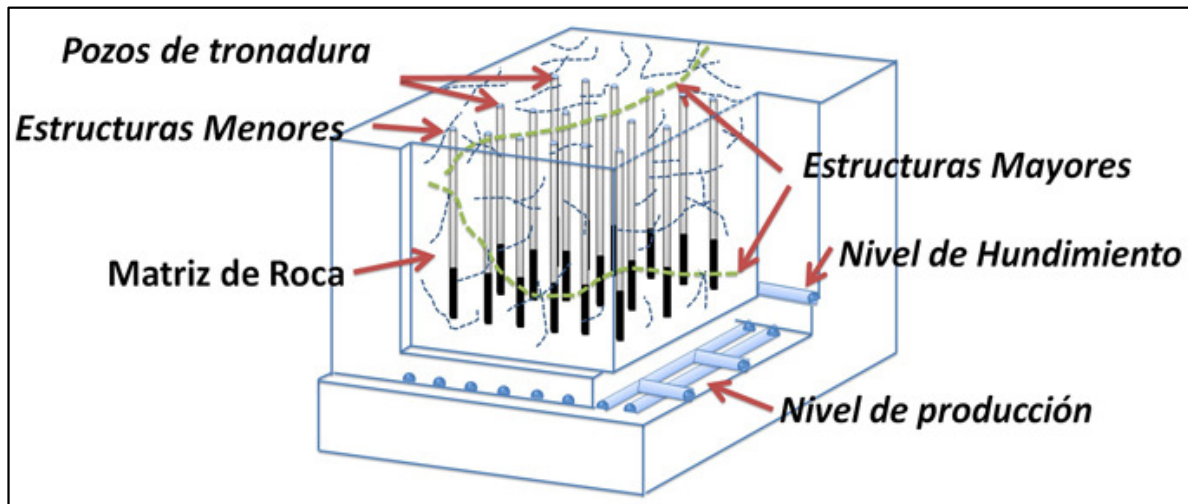


Figura 7: Esquema general debilitamiento dinámico con explosivos (DDE) (Chacón et al., 2003)

El efecto se produce por un intenso pulso de presión tras la detonación del orden de 1,000 [MPa], actuando directamente en las paredes de la perforación, la que inicialmente se expresa como una poderosa onda de choque que luego decae irradiándose hacia el interior del macizo como una onda elástica (Chacón et al., 2003). Al comienzo la presión es mucho mayor que la resistencia de la roca produciéndose una zona triturada y de manera radial a esta una zona fracturada (Figura 8). El pulso de esfuerzo, que viaja alejándose de la zona triturada, se propaga bajo un estado elástico, conformando un conjunto de esfuerzos tanto radiales (compresivos) como tangenciales (tensión) decayendo de manera inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la distancia radial a partir de la frontera exterior de la zona triturada.

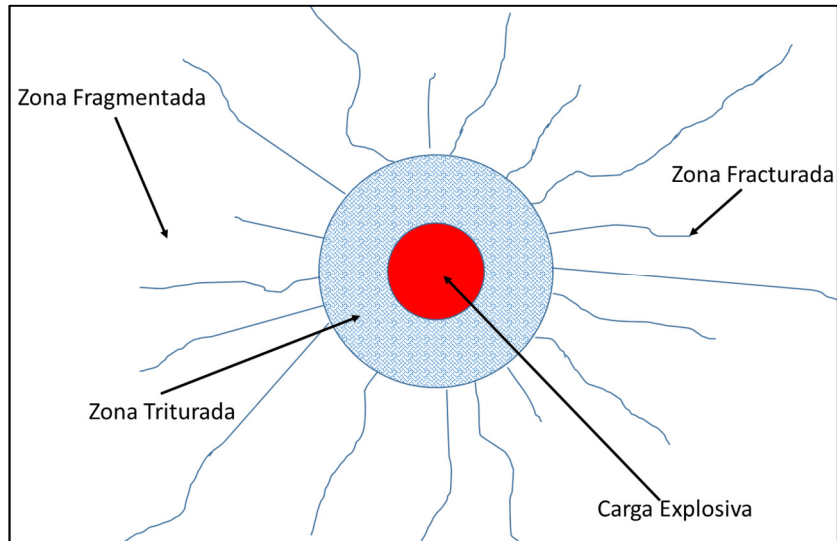


Figura 8: Zonas generadas al detonar una carga explosiva

2.2.2. Fracturamiento Hidráulico (FH)

El fracturamiento hidráulico (FH) consiste en presurizar un sector de una perforación comúnmente con agua, aunque se puede utilizar otro fluido, para producir una fractura por tensión (Valderrama & Sáez, 2011). Para un buen desarrollo de esta técnica es necesario cubrir el volumen de interés con perforaciones espaciadas en función del alcance de las fracturas, las que actúan como superficies libres que facilitan o aumentan la formación de bloques (Cerrutti, 2008). La Figura 9 presenta un esquema general del desarrollo del FH en minería de *caving*.

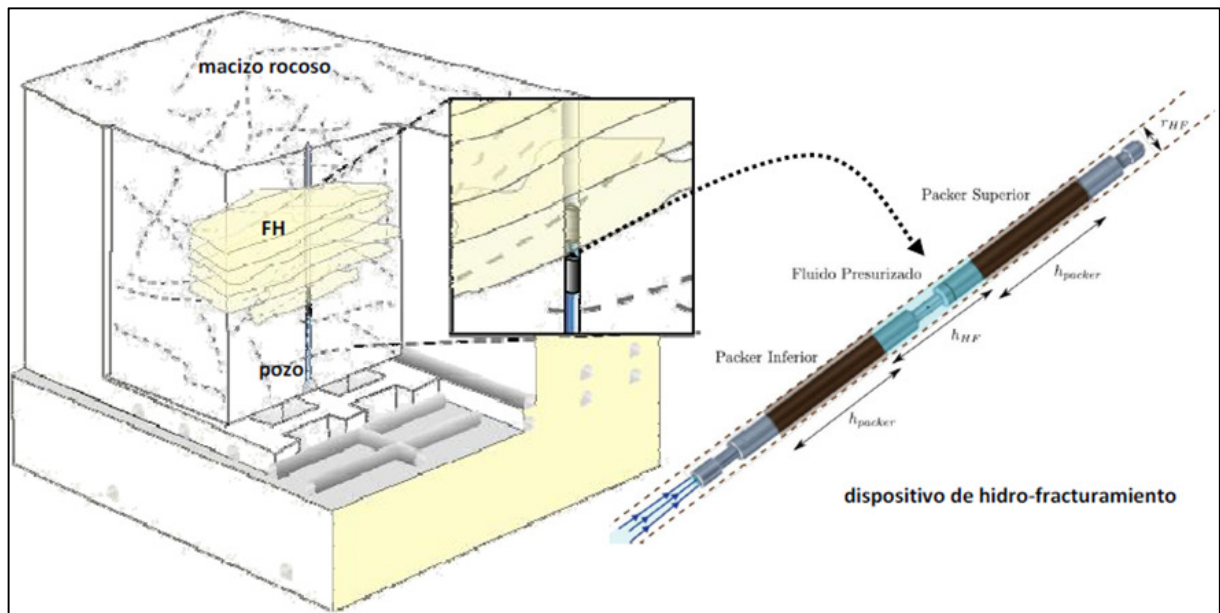


Figura 9: Esquema fracturamiento hidráulico (FH) (Cerrutti, 2008)

La orientación de fracturas generadas es en el plano principal del esfuerzo principal mayor y medio (σ_1 - σ_2), es decir, de manera perpendicular al esfuerzo principal menor (σ_3) (Nolte & Economides, 1991), como se esquematiza en la Figura 9. Los resultados óptimos para la propagación del hundimiento ocurren cuando la fractura se ubica de

manera horizontal. Otros beneficios de esta orientación son que la extensión es máxima de esta manera y no varía la separación aparente entre las fracturas producidas.

Al realizar el FH se puede caracterizar la fractura en función de la presión hidráulica aplicada menos la carga hidrostática. Generalmente la presión para vencer la resistencia inicial de la roca (presión de quiebre) es mayor que la requerida para extender la grieta (presión de propagación).

La etapa de crecimiento finaliza cuando se detiene la inyección y en ese momento la fractura se mantiene abierta sólo por inercia, siendo posible calcular el valor del esfuerzo principal menor actuando sobre el macizo en ese sector, la que es levemente menor que la presión de propagación (Cerrutti et al., 2006).

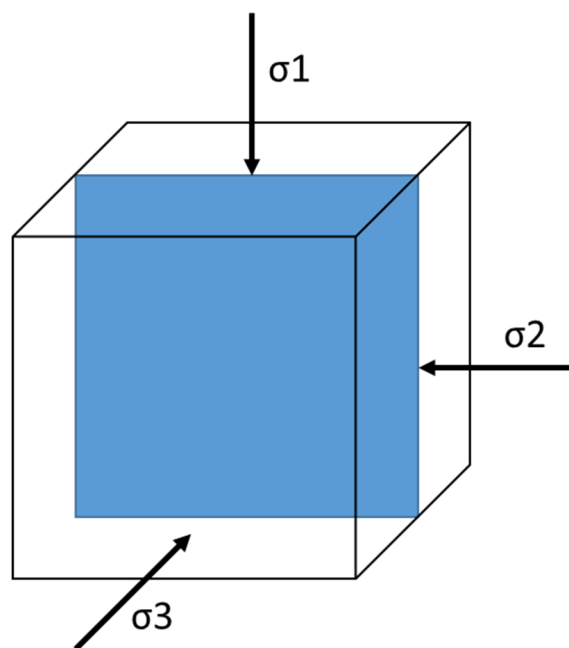


Figura 10: Orientación fracturas del FH

2.2.3. Respuesta del Macizo Rocoso

El efecto principal del PA, como se indicó anteriormente, es el debilitamiento del macizo rocoso favoreciendo: el grado de fragmentación, el proceso de hundimiento, la propagación gravitacional y la respuesta sísmica (Cerrutti et al., 2006), generando implicancias directas en la producción minera:

- a) **Fragmentación:** Los fragmentos de roca que se generan por acción del caving se encuentran asociados principalmente por estructuras geológicas con una resistencia relativa menor, como fallas y vetillas con relleno blando. El FH introduce nuevas fracturas que pueden ser más débiles que las estructuras mencionadas y de fácil activación, permitiendo el quiebre del macizo. Sin embargo, el impacto depende de la separación entre las nuevas fracturas por lo que no se ve reflejado necesariamente en la reducción de tamaños en el punto de extracción. Por otro lado, El DDE debilita las estructuras preexistentes y produce

nuevas microfracturas que interactúan entre ellas aumentando la probabilidad de formar bloques de menor tamaño.

- b) **Hundibilidad:** El PA al generar nuevas fracturas o debilitar las preexistentes reduce la resistencia al corte y la tracción, aumentando el efecto de los campos de esfuerzos inducidos, fuerza de gravedad y desconfinamiento asociado a las caras libres. Esto tiene como consecuencias: un mayor quiebre de la columna de roca in-situ, aumento de la velocidad de propagación del hundimiento y disminución de la probabilidad de generar arcos estables que pueden producir explosiones violentas de aire (Cerrutti, 2008).
- c) **Respuesta Sísmica:** El macizo rocoso, sobre todo el primario por su mayor rigidez y resistencia es capaz de acumular grandes cantidades de energía en un proceso de *caving* a altos esfuerzos. Si ésta excede la resistencia de la roca, se produce un colapso y se libera en forma sísmica, produciendo eventos de magnitud proporcional a la cantidad de energía liberada. En cambio, si se realiza el PA, el debilitamiento de la roca no permite que se acumule tanta energía, teniendo como resultados eventos de menor magnitud, disminuyendo el riesgo de originar estallidos de roca.

2.3. MÉTODOS DISCONTINUOS DE MODELAMIENTO NUMÉRICO

En minería, la rama de geomecánica tiene la tarea de comprender y predecir de la mejor manera posible el comportamiento del macizo rocoso para trabajar de manera segura y evitar fallas que pueden significar, en el peor de los casos, fatalidades. Para esto, existen distintas herramientas que se pueden utilizar, como lo son los métodos empíricos, analíticos y numéricos. Los últimos mencionados son representaciones físico-matemáticas simplificadas de la realidad, por lo que utiliza los *inputs* (datos de entrada) entregados por el usuario para analizar la situación modelada y complementar conocimientos con los resultados que entrega (Bull, 2003). Esta herramienta permite obtener mejores resultados que los métodos empíricos porque considera una mayor interacción de los elementos asociados, permitiendo mejorar las decisiones ingenieriles utilizadas en etapas de diseño (Barbour & Krahn, 2004).

El modelamiento numérico ha aumentado su alcance apoyado de las mejoras computacionales de las últimas décadas que permiten confeccionar modelos cada vez más complejos, eliminando cada vez más las simplificaciones necesarias obteniendo resultados en tiempos menores. Además de existir una variedad más amplia de códigos en función de las simplificaciones a considerar y objetivos específicos del análisis.

Jing (2003) resume los métodos numéricos más aplicados en mecánica de rocas como:

- **Métodos Continuos:** Los métodos continuos separan el medio en estudio en un número finito de sub-dominios descritos matemáticamente con un número finito de grados de libertad. Ej: Diferencias finitas (FDM), elementos finitos (FEM) y elementos de borde (BEM).
- **Métodos Discontinuos:** Los métodos discontinuos describen la interacción entre bloques o partículas permitiendo un comportamiento general como dominios deformables o elásticos (Jing, 2003). Ej. Elementos discretos (DEM), redes de fracturas discretas (DFN).
- **Métodos Híbridos:** FEM/BEM, FEM/DEM, entre otros.

Dentro de los elementos discontinuos se encuentra el método de elementos distintos o DEM (*Discrete Element Method*) utilizados por Cundall (1971) por primera vez en análisis de problemas relacionados con geomecánica. Para que un programa se considere de métodos distintos debe cumplir que (P. Cundall & Hart, 1992):

1. Permite que los cuerpos discretos (bloques o partículas) se sometan a desplazamientos finitos y rotaciones, incluyendo su completa separación.
2. Automáticamente identifica nuevos contactos que se generan mientras ocurre el cálculo.

El DEM trabaja con pasos de tiempo muy pequeños, en los cuáles, las perturbaciones generadas por una partícula no pueden propagarse más allá de sus vecinos inmediatos. Luego, las fuerzas que actúan en una partícula se determinan exclusivamente por la interacción de las partículas con las posee contactos en común. La base teórica del método y la solución de las ecuaciones de movimiento, de cuerpos rígidos y/o deformables, pueden obtenerse de una formulación implícita o explícita.

La solución explícita, alterna la segunda Ley de Newton aplicada a los elementos discretos y la Ley de Fuerza y Desplazamiento, a los contactos Figura 11. Se determina el movimiento de cada elemento como resultado de las fuerzas aplicadas en sus contactos junto con las fuerzas de los cuerpos asociado, mientras que las fuerzas de los contactos se obtienen como producto de los desplazamientos de los elementos.

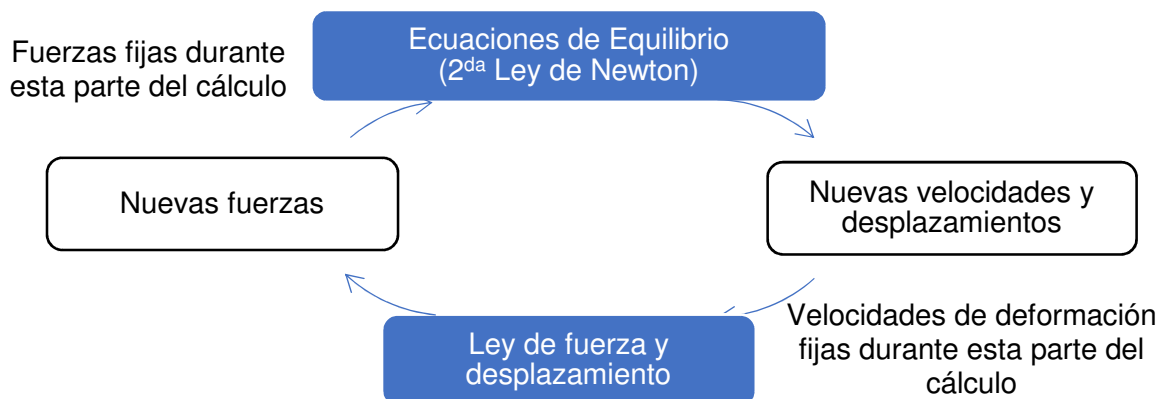


Figura 11: Solución explícita modelamiento con elementos discretos (ITASCA, 2008)

La principal desventaja del método explícito es la duración de las simulaciones, debido a la cantidad de pasos requeridos para el cálculo. Sin embargo, los avances tecnológicos en el área de la computación han quitado importancia a este punto con el pasar de los años. Dentro del método explícito, el más representativo es el de elementos distintos, término acuñado por Cundall y Strack (1979) para referirse a aquellos que usan contactos deformables y está en el dominio de tiempo de las ecuaciones de movimiento.

Como el método se basa en la simulación de la interacción entre bloques, se pueden representar macizos de roca fracturados. Sin embargo, la representación queda sesgada por la información geológica recolectada en terreno, limitando así sus aplicaciones en roca, dado que, la geometría de sistemas de discontinuidades sólo puede ser estimada.

Los principales códigos disponibles hoy en día son:

2.3.1. UDEC y 3DEC

Actualmente, este método se encuentra implementado en dos y tres dimensiones en los códigos UDEC (*Universal Distinct Element Code*) y 3DEC (*Three-Dimensional Distinct Element Code*) (Israelsson, 1996), respectivamente. Donde los elementos pueden ser rígidos o deformables. Estos bloques están formados por discontinuidades que se caracterizan por sus orientaciones, espaciamiento y apertura. Dentro de los campos de aplicación de UDEC y 3DEC destacan los análisis de mecanismos de falla potencial de un macizo rocoso fracturado, estático y dinámico, análisis de estabilidad de taludes y estudios en minería subterránea.

2.3.2. PFC2D y PFC3D

Para el modelamiento del comportamiento de materiales granulares se utiliza la misma teoría básica de bloques, pero con la simplificación de que las partículas son cuerpos rígidos y su forma es regular (circular en 2D y esférico en 3D). Los contactos entre las partículas se representan como resortes y, además, se debe considerar la fricción existente. Uno de los códigos más utilizados para resolver problemas de este tipo es *Particle Flow Code* (PFC) en dos y tres dimensiones (ITASCA, 2008).

Un modelo general de flujo de partículas simula el comportamiento mecánico de un sistema compuesto por un grupo de partículas con formas arbitrarias. En este caso, se debe notar que el término partícula que se utiliza difiere de las definiciones más comunes utilizadas en el área de la mecánica, en donde se considera que es un cuerpo con dimensiones despreciables que ocupa sólo un punto en el espacio. En el contexto presente, el término partícula significa que un cuerpo ocupa una cantidad finita de espacio.

Además de las aplicaciones tradicionales de flujo de partículas, PFC^{3D} también puede ser aplicado al análisis de sólidos determinando las condiciones de borde e iniciales correspondientes. En estos modelos, el comportamiento se aproxima creando un arreglo compacto de muchas partículas. La Figura 12 muestra la representación de una roca utilizando UDEC y PFC^{2D}; en UDEC, las partículas se representan con bloques y zonas, y las interfaces con discontinuidades, mientras que en PFC^{2D} las partículas son discos unidos por contactos y las interfaces, *smooth joints* (Mas Ivars, Potyondy, Pierce, & Cundall, 2008).

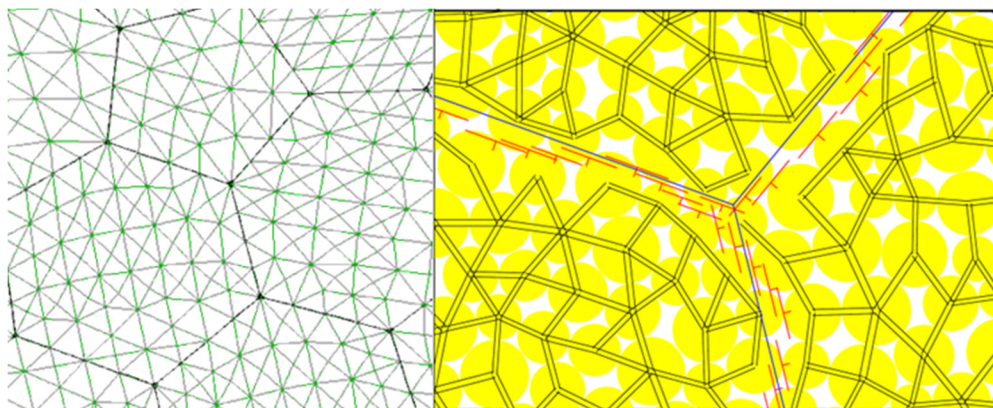


Figura 12: Representación roca intacta con UDEC (izq.) y PFC^{2D} (der.) (Mas Ivars, 2011)

En resumen, los supuestos del modelamiento con elementos distintos en PFC^{3D} son los siguientes (ITASCA, 2008):

1. Las partículas se comportan como cuerpos rígidos.
2. Los contactos ocurren sobre un área infinitamente pequeña (un punto).
3. El comportamiento entre los contactos usa una herramienta de contacto suave, en donde se permite a las partículas rígidas superponerse a otras en los puntos de contacto.
4. La magnitud de esta superposición se relaciona a la fuerza de contacto en función de la Ley de fuerza desplazamiento, y todas son pequeñas en relación al tamaño de las partículas.
5. Pueden existir contactos entre partículas.
6. Todas las partículas son esféricas. Sin embargo, los *clumps* permiten la creación de partículas de cualquier forma, generándose de la superposición de un grupo de éstas, los que actúan como un cuerpo rígido con un borde deformable.

Basado en PFC3D, se desarrolla la metodología del *Synthetic Rock Mass* (SRM) o, en español, macizos rocosos sintéticos (Mas Ivars, 2010) para estudiar el efecto de incluir discontinuidades en el macizo rocoso a gran escala (10 – 100 [m]). Esta técnica utiliza PFC^{3D} como un laboratorio virtual para someter muestras de roca sintéticas a trayectorias de esfuerzos de interés, permitiendo estudiar el modo de falla y el comportamiento del macizo rocoso.

El modelamiento con SRM considera tres componentes para representar el comportamiento de la roca (Figura 13). Estos se definen como:

- **Roca intacta (Bonded particle model, BPM):** Se compone de partículas esféricas (granos) y contactos entre ellas (cemento) para simular el comportamiento de la roca intacta, existiendo hasta el momento de la falla.
- **Arreglo estructural (Discrete fracture network, DFN):** Herramienta estocástica para crear geometrías realistas del medio fracturado en base a información obtenida en terreno. Se genera en base a mapeo dentro de un dominio estructural en base a información de terreno como sondajes, túneles, líneas de detalle y ventanas de mapeo. Actualmente es la mejor opción disponible para crear geometrías más realistas que consideran la naturaleza heterogénea de un modelo de macizo rocoso fracturado (Elmo, 2006).
- **Discontinuidades (Smooth joint contact model, SJCM):** Incorpora las propiedades que determinan el comportamiento mecánico de las discontinuidades, como la resistencia y rigidez.

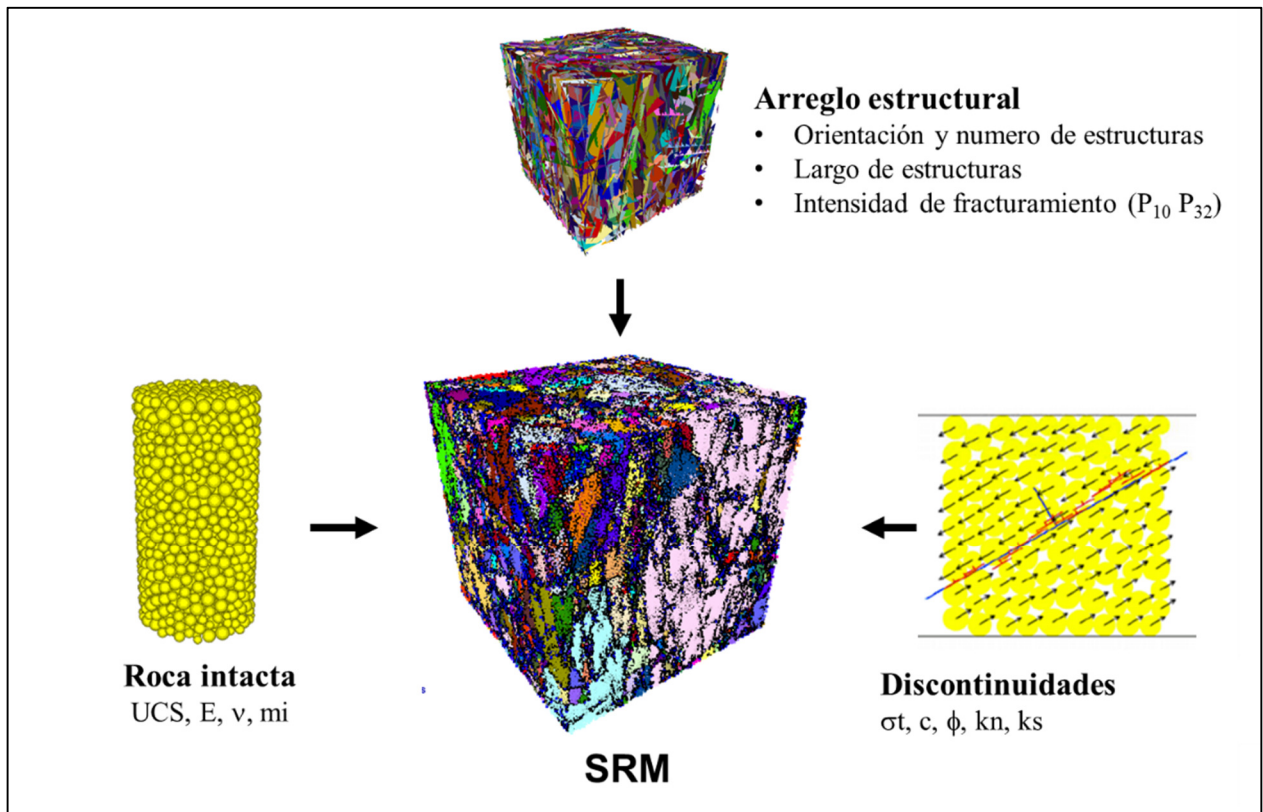


Figura 13: Generación modelo SRM (Vallejos & Suzuki, 2014)

El SRM posee ciertas limitaciones y desventajas, dentro de estas se puede destacar:

1. No permite representar todas las discontinuidades existentes. Debido a esto las propiedades de la roca intacta son escaladas al tamaño de bloque promedio de la muestra.
2. Las simulaciones consideran largos tiempos, los que incrementan significativamente al aumentar las dimensiones de la muestra, como se observa en la Figura 14.
3. La técnica ha sido aplicada para algunos casos de estudio, sin embargo, a la fecha, no se encuentra 100% validada.

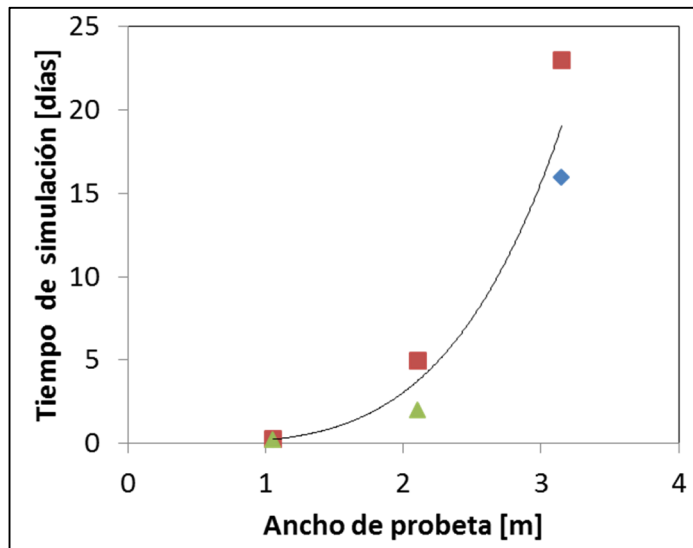


Figura 14: Efecto ancho probeta en tiempo de simulación SRM (Vallejos & Suzuki, 2014)

3. BASE DE DATOS

El trabajo se enfoca en el desarrollo de análisis que relacionan sobretamaños, colgaduras y sismicidad en función de la información recopilada para dos divisiones específicas de Codelco, El Teniente y El Salvador. Ambos casos son relevantes al considerar el universo de minas que trabajan con métodos de hundimiento en el punto que incluyen preacondicionamiento. Sin embargo, existen diferencias claras entre ambos casos, principalmente asociada a la litología y condición de esfuerzos de las divisiones.

El siguiente capítulo revisa la construcción de la base de datos y la discusión relacionado con estos.

3.1. MINA EL TENIENTE

La División El Teniente es el yacimiento de cobre subterráneo más grande del planeta. Se ubica a 50 kms. de la ciudad de Rancagua, en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. Su explotación comenzó en 1905.

La roca analizada en El Teniente es CMET, y ha sido descrita previamente como competente y masiva, con muy pocas discontinuidades abiertas y con una gran cantidad de vetillas a pequeña escala (Brzovic & Herrera, 2011; Brzovic & Schachter, 2013; Brzovic & Villaescusa, 2007) tal como se presenta en la Figura 135.



Figura 15: Complejo Máfico El Teniente (CMET) (Hurtado & Brzovic, 2014)

3.1.1. Recopilación de datos

Los datos utilizados corresponden a los presentados en el informe GRMD-SGL-INF-069-2014 (Hurtado & Brzovic, 2014). Este informe incorpora información del sobretamaño en función de la altura extraída para distintos sectores productivos de la mina con su respectiva malla de extracción, número de colgaduras por cada 1,000 [ton], altura de éstas y número de puntos considerados. Además, se presentan algunos parámetros geotécnicos, como: frecuencia de fracturas por unidad de volumen [FF/m^3] (estimada en terreno utilizando sondajes, túneles, líneas de detalle y ventanas de mapeo), *Rock Mass Rating* (RMR), *Resistencia a la compresión uniaxial* (UCS), *In-Situ Rock Mass Rating* (IRMR), y Frecuencia de vetillas blandas (FVB) mayores a 2 [mm].

Los sectores productivos considerados en el estudio son 4 Sur (4Sur), Reservas Norte (RENO) y Sur Andes Pipa (SUAPI). La Tabla 1 muestra como son presentados los datos de sobretamaño y colgaduras dentro de la base de datos señalada. Por otro lado, las Tablas 2 y 3 poseen las principales características señaladas anteriormente de los sectores incluidos en el estudio. Se debe notar que las mediciones de sobretamaño en algunos casos son medidas directamente desde los puntos, mientras otras son proyectadas.

Tabla 1: Datos sobretamaño y colgaduras (GRMD-SGL-INF-069-2014)

Unidad Geotécnica		CMET Hw - ZONA 1	
Sector Productivo		<i>Ten4Sur</i>	
Sobretamaño (%) (medido hasta 1 m eje mayor: estos valores son proyectados)	> 1 m ³	0-15m	28%
	> 2 m ³	0-15m	20%
	> 1 m ³	15-30m	24%
	> 2 m ³	15-30m	17%
	> 1 m ³	30-44m	12%
	> 2 m ³	30-44m	7%
	> 1 m ³	38-51m	36%
	> 2 m ³	38-51m	27%
	> 1 m ³	51-64m	9%
	> 2 m ³	51-64m	5%
	> 1 m ³	64-77m	15%
	> 2 m ³	64-77m	9%
Altura colgadura promedio (m)		0 - 15	3.80
		15 - 30	4.70
		30 - 44	3.80
		38 - 51	6.60
		51 - 64	5.30
		64 - 77	5.80
Tonelaje promedio entre colgadura (ton)		0-15m	224
		15-30m	264
		30-44m	336
		38-51m	108
		51-64m	258
		64-77m	709
Nº colgaduras/1000 ton		0-15m	4.46
		15-30m	3.79
		30-44m	2.98
		38-51m	9.26
		51-64m	3.88
		64-77m	1.41

Tabla 2: Información sectores, El Teniente (1)

Año Inicio Estudio	1993-1994				CMET Hw	1999		2007		
	CMET Hw Zona 1	CMET Fw Zona 2	CMET Fw Zona 3	BX Hidrot.+Porfido A- ZONA 4		BX Ignea Esmeralda	CMET Fw	Tonalita	CMET Hw	CMET Fw
Sector Productivo	Teniente 4 Sur				Esmeralda			Ten4Sur	RENO (Sub - 6)	
Malla de Extracción (Dc ² -c/2 x Dz//c), m	15 x 17.32	15 x 17.32	15 x 17.32		15 x 17.32		15 x 17.32	15 x 20	15 x 17.32	15 x 17.32
Duración estudio (meses)	6	6	6		2	2	2	4	4	4
ff/m3	Mínimo	5	6.5	8	5.6	2.3	8	4	5	8
	Máximo	8	9.5	11	6.4	3	11	9	8	11
Número de Puntos	2	4	2	2	70	70	15	28	67	99
Área Estudiada	520	1039	520	520	18186	18186	3897	8400	17407	25720
Naturaleza Sobre tamaño	Proyectado	Proyectado	Proyectado	Proyectado	Medido	Medido	Medido	Proyectado	Proyectado	Proyectado
RMRLaubscher1990	Mínimo	50	48	42	49	53	42	55	50	42
	Máximo	60	55	53	58	63	53	65	60	53
UCS (MPa)	120	110	105		120		105	125	115	115
GSI								75 - 90	75 - 90	70 - 80
IRMRLaubscher&Jacubek 2001								59 - 62	53 - 65	52 - 58
FVB > 2 mm										

Tabla 3: Información sectores, El Teniente (2)

Año Inicio Estudio	2007	2010			2010-2013	
	CMET Hw	CMET Fw (FH)	CMET Hw (FH)	Dacita Sur (FH)	Dacita Norte (FH+DDE)	Mezcla C4 (Brx Ignea Dacita (FH))
Sector Productivo	Diablo Regimiento	RENO (Sub-6)	RENO (Sub-6)	SUAPI		
Malla de Extracción (Dc ² -c/2 x Dz//c), m	17 x 20	15 x 17.32	15 x 17.32	15 x 17.32	15 x 17.32	15 x 17.32 15 x 13.25
Duración estudio (meses)	19	4	4	33	33	33
ff/m3	Mínimo	5				
	Máximo	8				
Número de Puntos	60	10	12	10	9	4
Área Estudiada	18000	2598	3118	2598	2338	917
Naturaleza Sobre tamaño	Proyectado	Proyectado	Proyectado	Proyectado	Proyectado	Proyectado
RMRLaubscher1990	Mínimo	50		72	72	74
	Máximo	60		77	77	75
UCS (MPa)	110			110	110	120-135
GSI				75-90	75-90	75-90
IRMRLaubscher&Jacubek 2001				58-63	58-63	62-65
FVB > 2 mm				1.22-2.5	1.22-2.5	3.7-5.4

Como complemento a la base de datos, se posee el modelo de bloques de los sectores en estudio para conocer la superficie de vetillas blandas con espesores mayores a 2 [mm] por unidad de volumen de manera más específica, representada por el parámetro P₃₂ [m²/m³], presentado por Dershowitz (1985). El P₃₂ se define como el área de fracturas por metro cúbico de roca. La Figura 16 presenta como ejemplo una vista en planta del modelo mencionado proporcionado por División El Teniente (Millan, Brzovic, & Seguel, 2015).

La Figura 17 presenta el valor promedio del parámetro P₃₂ para cada sector productivo en función de la cota, donde cada serie de datos corresponde a una litología diferente, mientras la línea vertical indica la cota del nivel de producción. Es posible observar que el valor promedio del P₃₂ de cada sector no posee grandes variaciones por sobre el nivel de producción. Por lo que se considera para las actividades posteriores como valor representativo el promedio. Se debe apreciar el modelo de bloques en el sector Teniente 4 Sur no aporta información sobre el nivel de producción, por lo que el promedio para sus litologías se obtiene con toda la información existente bajo esa cota.

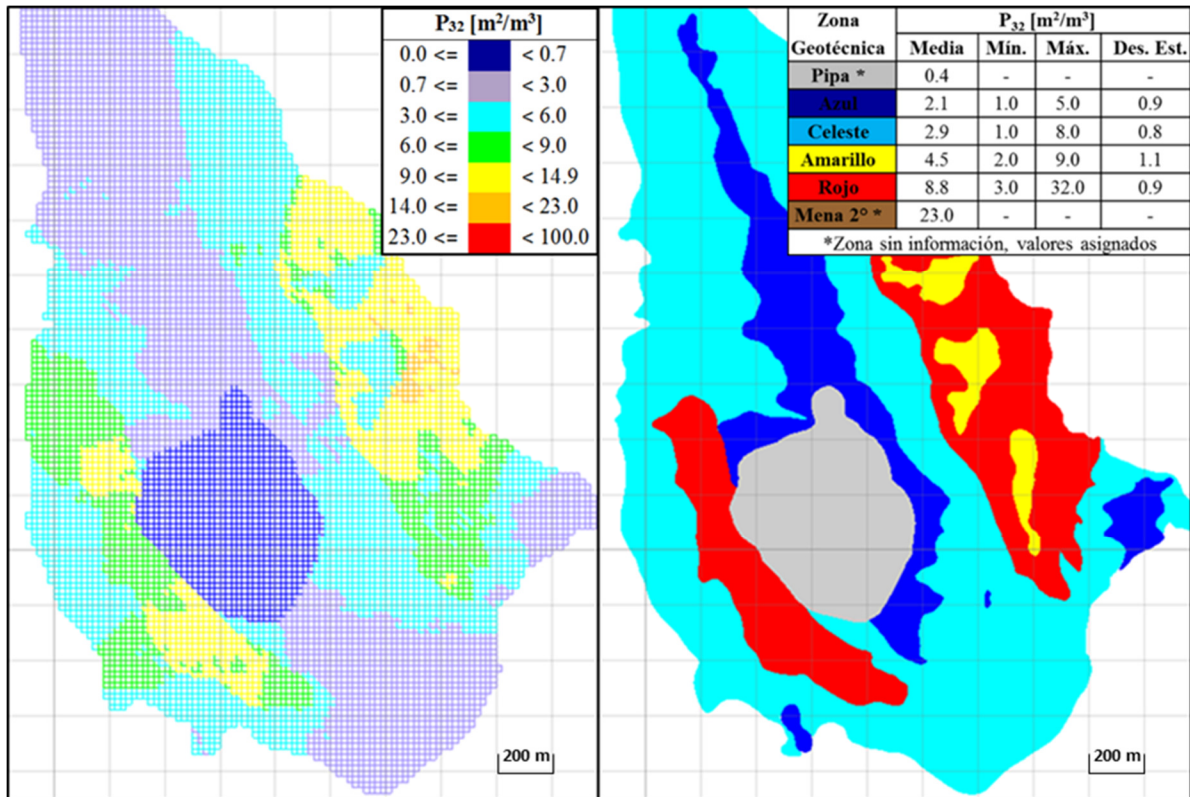


Figura 16: Planta modelo de bloques P₃₂ [m²/m³], cota 1880, El Teniente (Millan et al., 2015)

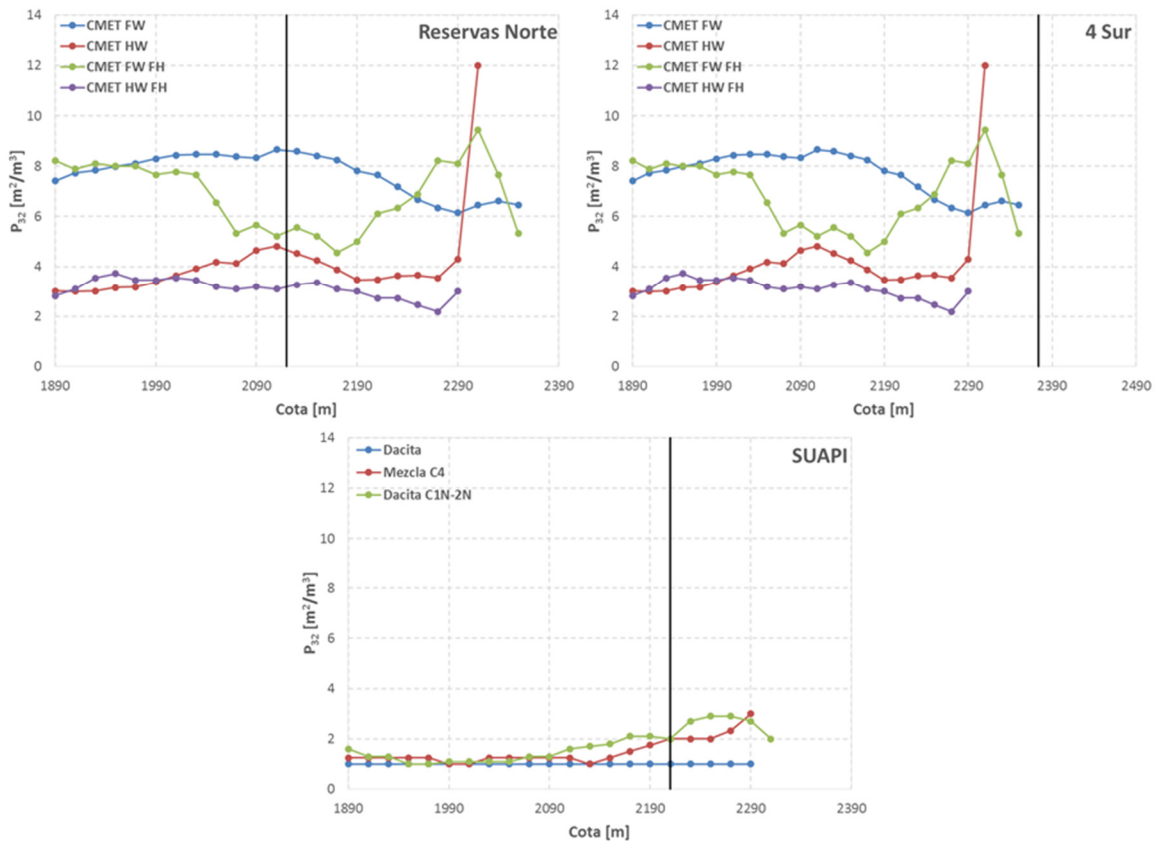


Figura 17: Valores promedios P₃₂ por cota indicando nivel de producción

La Tabla 4 presenta los valores de P32 in-situ asignados para cada litología en función explicado anteriormente y la malla de extracción presentada en la base de datos. Es necesario comenzar por estudiar la información de los sectores sin PA, para tener un caso base que sea comparable posteriormente con los que sí lo poseen, los que se pueden identificar en la misma tabla.

Tabla 4: Tipo de PA, valores P₃₂ in-situ y malla por sector productivo

PA	Unidad Litológica	Sector	P32 In-Situ [m ² /m ³]	Malla [m x m]
Sin PA	Tonalita	4SUR	2.2	15 x 20
	CMET HW	RENO	4.0	15 x 17.32
	CMET HW	4SUR	4.4	15 x 17.32
	CMET FW Zona 2	4SUR	5.3	15 x 17.32
	CMET FW Zona 3	4SUR	6.5	15 x 17.32
	BX Hidrot. +Pórfido A	4SUR	5.6	15 x 17.32
	CMET FW	RENO	7.3	15 x 17.32
FH	Mezcla C4	SUAPI	2.1	15 x 17.32
	CMET HW	RENO	2.9	15 x 17.32
	CMET FW	RENO	6.5	15 x 17.32
FH+DDE	Dacita Sur	SUAPI	1.0	15 x 17.32
	Dacita Norte C1N-2N	SUAPI	2.6	15 x 17.32

Utilizando los datos recopilados es posible analizar el comportamiento del sobretamaño, más específicamente el porcentaje mayor a 1 y 2 [m³], en función de la altura de primario extraída, diferenciando entre las mediciones asociadas al quiebre de la columna y en las que el quiebre conecta la altura total del mineral primario. Esta diferenciación considera que la extracción del 30% de la altura del mineral primario, logra que el *caving* conecte con la parte superior de la columna, como se esquematiza en la Figura 18.

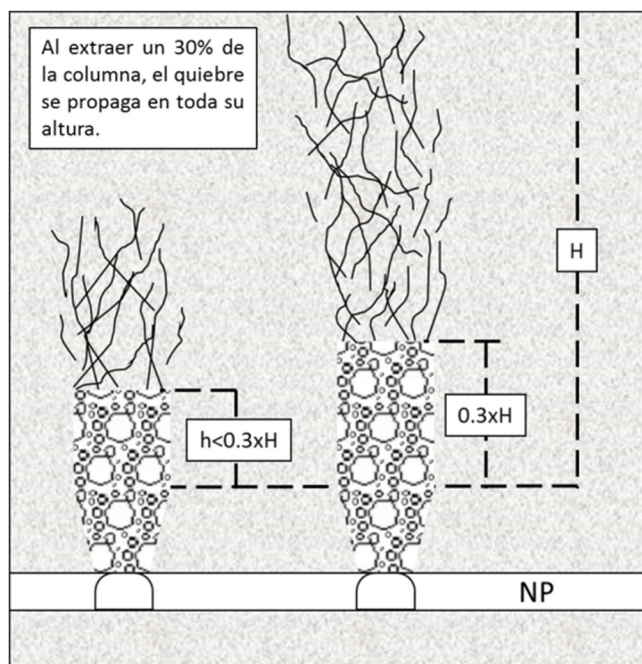


Figura 18: Correlación altura extraída y quiebre de la columna de mineral (Gaete, 2015)

Las Figura 19 y 20 presentan los datos de sobretamaño mayores para 1 y 2 [m³], respectivamente, junto con una línea de tendencia para datos sin FH. Cabe destacar que cada color representa un valor de P₃₂, mientras que el cambio de puntos en la serie indica los que se encuentran en quiebre y conectados.

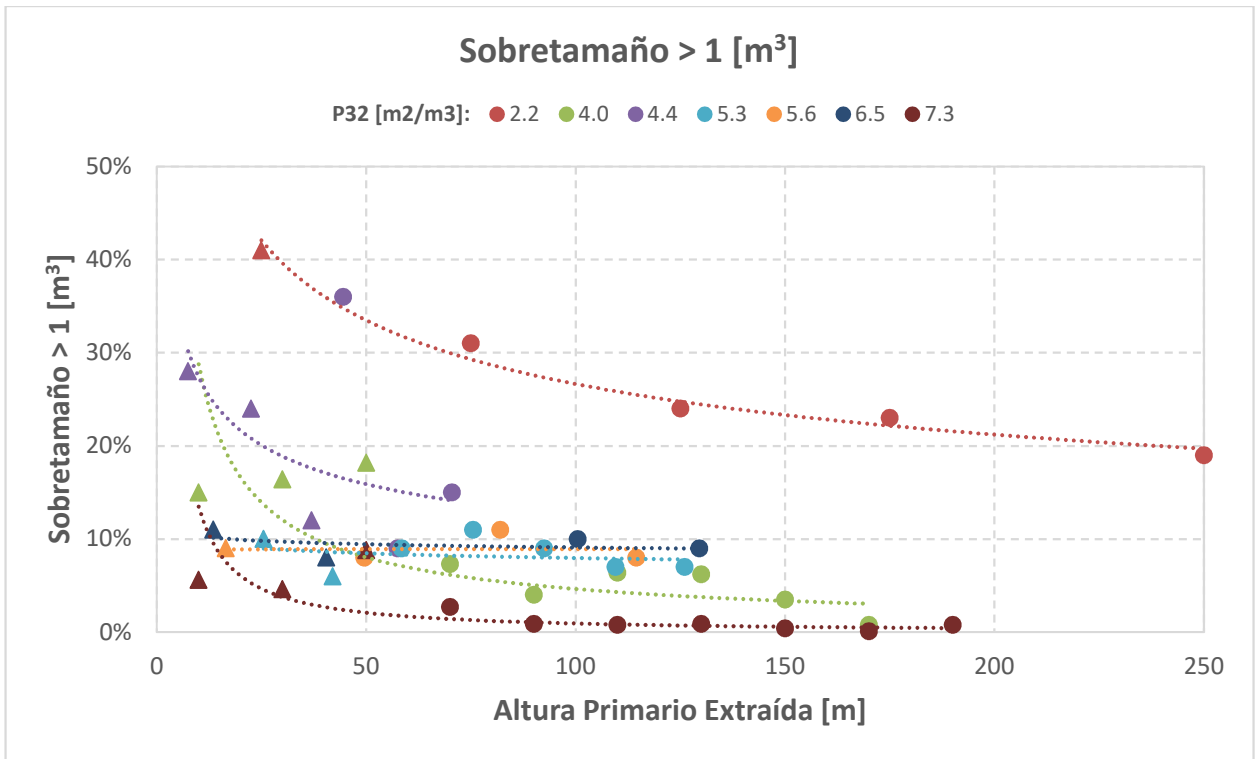


Figura 19: Datos sobretamaño > 1 [m³] para datos sin FH, El Teniente

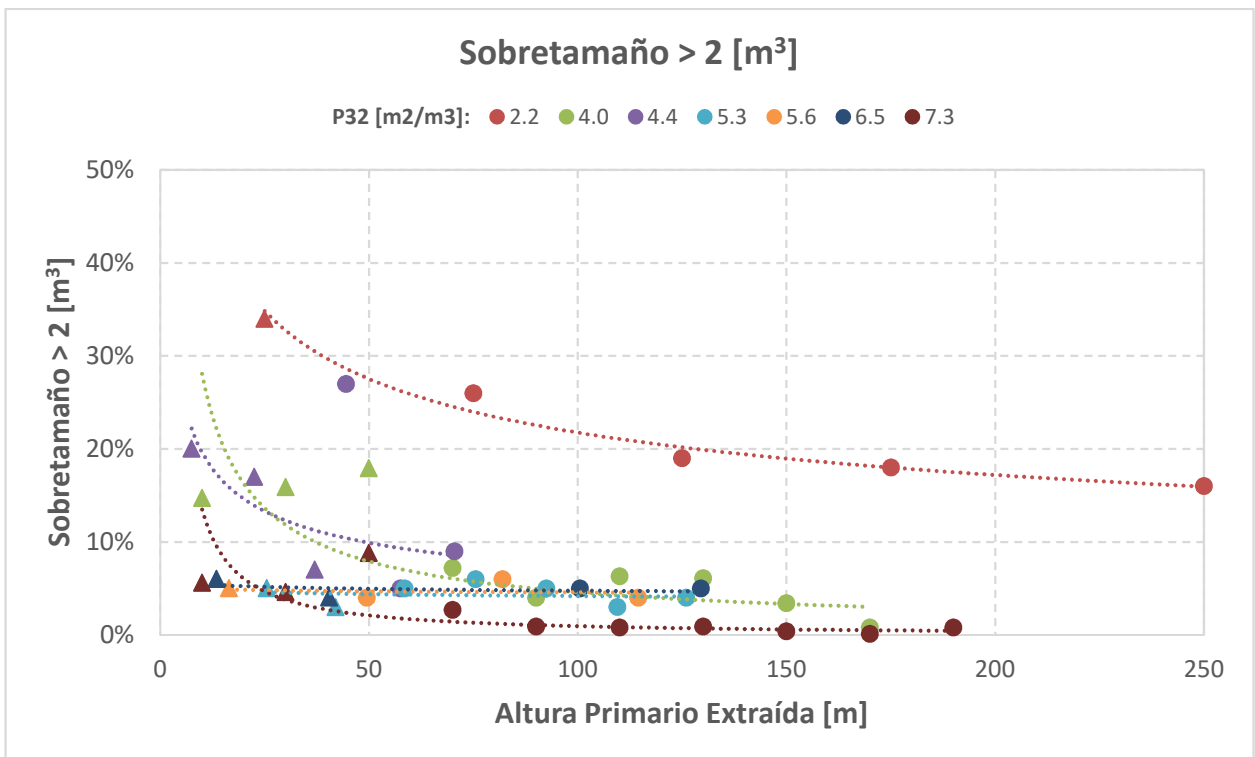


Figura 20: Datos sobretamaño > 2 [m³] para datos sin FH, El Teniente

Para presentar una visión más amplia de la frecuencia de colgaduras y poder identificar el efecto del PA, se estudian, un caso base donde la extracción se realiza sin la influencia de FH ni DDE. Se relaciona la frecuencia de colgaduras por cada 1,000 [ton] con el porcentaje de sobretamaño mayor a 1 [m³] para cada una de las litologías en la Figura 21. La Figura 22 agrupa las mediciones en función de la malla de extracción.

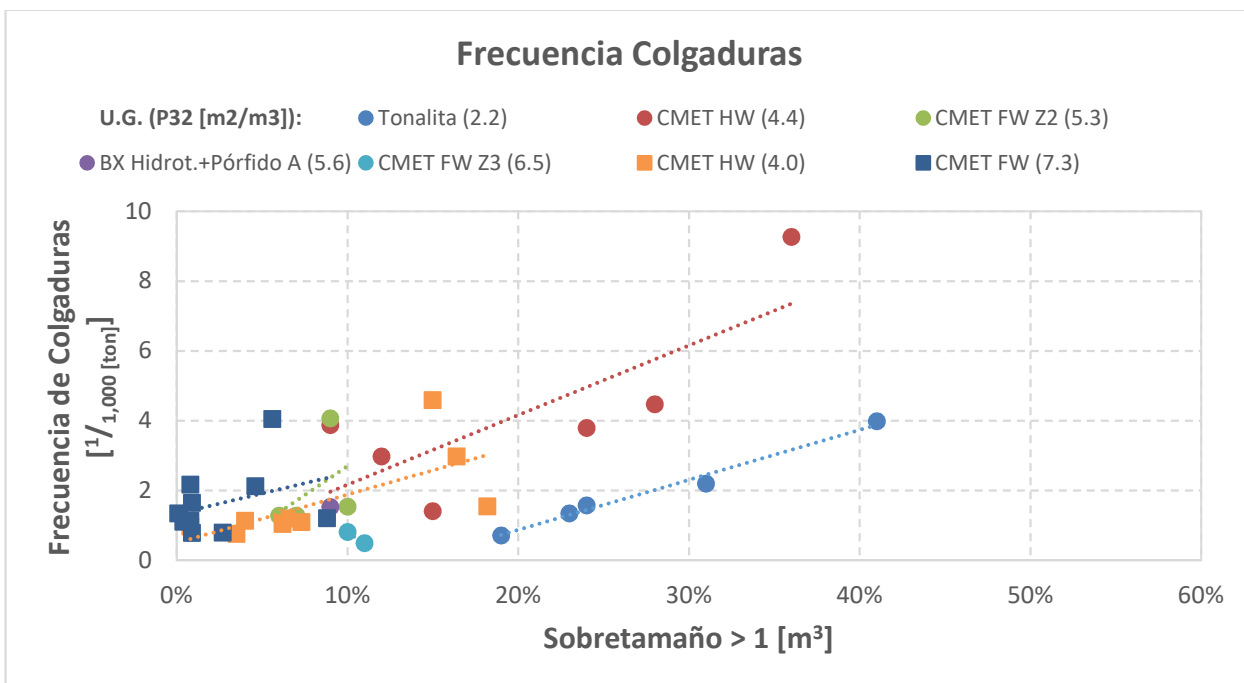


Figura 21: Datos colgaduras por litología, El Teniente

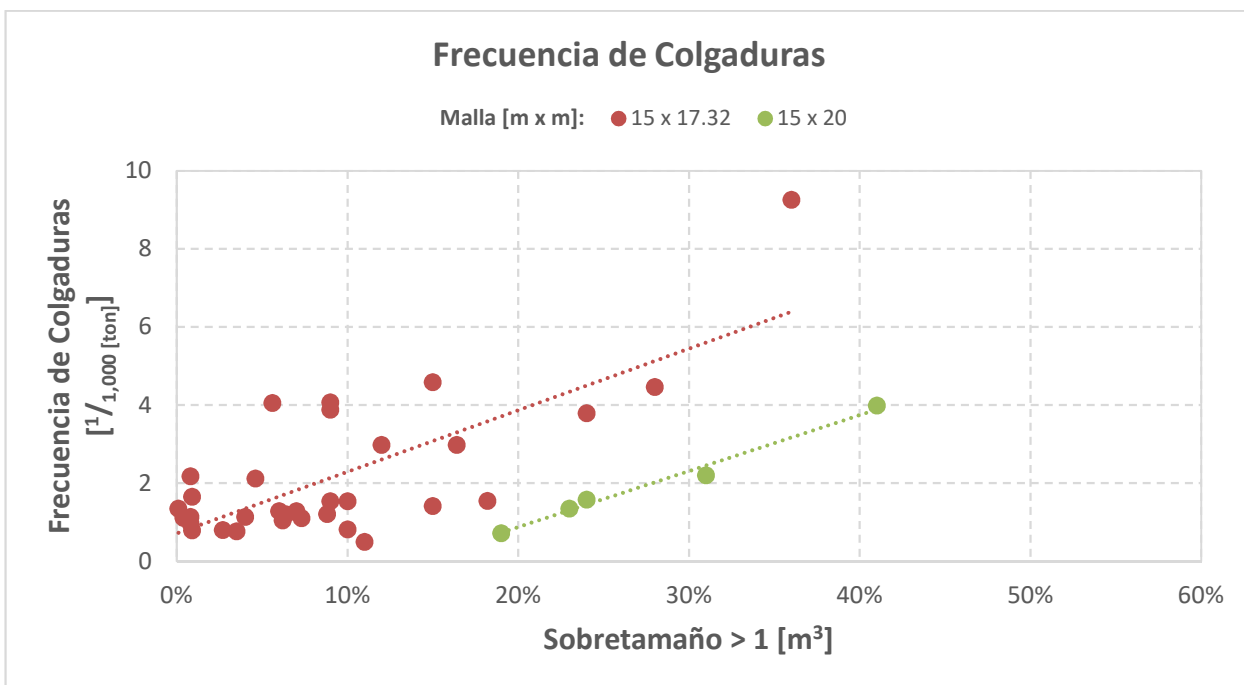


Figura 22: Datos colgaduras por malla, El Teniente

A pesar de que existe información de la altura extraída de mineral en para algunas mediciones, se trabaja con el catálogo de extracción del sector RENO, donde se indica de manera mensual:

1. Punto de extracción con sus respectivas coordenadas y área de influencia
2. Fecha (año y mes)
3. Tonelaje extraído (total a la fecha y diferencial del mes)
4. Ley
5. Turnos operados

Como el objetivo del trabajo es identificar el impacto de FH, se utiliza las notas de su desarrollo para identificar los puntos de extracción afectados, considerando la ubicación del collar, radio de influencia de las fracturas e inclinación de pozo. Por otro lado, se incluye a la base de datos los catálogos sísmicos desde principios del año 2000 hasta febrero de 2014, en estos se presentan los siguientes elementos por evento sísmico:

1. Fecha y hora
2. Ubicación (coordenadas norte, este y altura, junto con el error)
3. Momento sísmico (total, ondas S y P)
4. Energía sísmica (total, ondas S y P)
5. Número de sensores asociados a la medición del evento
6. Frecuencia esquina
7. Caída stress (estático y dinámico)
8. Desviación (momento y energía)

Para complementar la base de datos se utiliza el informe final del Contrato N° 4501380227 (Vallejos & Suzuki, 2014), desarrollado para la División El Teniente, con el fin de reinterpretar los resultados y conjugarlos con las otras actividades desarrolladas en esta tesis. A pesar de tratarse de un trabajo desarrollado previamente por un grupo distinto de trabajo, se expone la metodología utilizada más adelante en esta sección.

3.1.2. Discusión

El análisis del sobretamaño para los datos sin PA para los distintos valores de P_{32} presentados en las Figuras 19 y 20 tiene las siguientes implicancias:

1. A mayor altura extraída existe una disminución del sobretamaño, lo que está asociado a la combinación de los efectos de la fragmentación primaria y secundaria.
2. A menores valores del parámetro P_{32} , existe un mayor sobretamaño.
3. Para valores altos del parámetro P_{32} (mayores a 6 [m²/m³]), prácticamente no existe sobretamaño (porcentaje menor al 10%).
4. El impacto de la altura extraída en el sobretamaño es menor a mayores valores del P_{32} .
5. En el proceso de quiebre, cuando la extracción de la columna de primario es menor al 30%, el efecto de la altura extraída en la reducción del sobretamaño es mayor.

Por otro lado, al considerar el comportamiento de la frecuencia de colgaduras de los datos sin PA en función del porcentaje de sobretamaño > 1 [m³] como se presenta en las Figuras 21 y 22 se puede concluir que:

1. La frecuencia de colgaduras puede ser representada por una recta.

2. La malla de extracción del sector productivo parece tener un efecto significativo, sin embargo, se debe considerar que el sector que posee una malla distinta está asociado al menor P32, por lo el efecto puede derivar de este factor.

3.2. MINA EL SALVADOR

La División de Salvador se encuentra en la región de Atacama, Chile. Sus operaciones datan de 1959.

La información recolectada corresponde a la litología predominante del sector Inca Central Oeste (ICO), definida como una andesita competente de color gris oscuro (Figura 23). Esta litología tiene textura afanítica a porfídica fina con abundantes vetillas de cuarzo-anhidrita y una frecuencia de fracturas entre 5 y 7 por metro, con una mena principalmente primaria (Toro, 2003; Zamora, Catro, & Contreras, 2006).

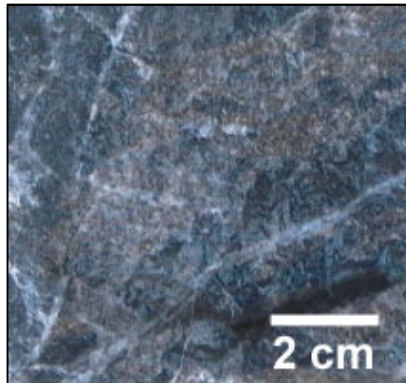


Figura 23: Andesita, El Salvador (Zamora et al., 2006)

3.2.1. Recopilación de datos

La base de datos de la mina El Salvador es utilizada en el proyecto IM2-IC14-04 (Zamora et al., 2006). El catálogo de extracción incorporado a la base de datos presenta por turnos:

1. Punto de extracción
2. Fecha
3. Tonelaje extraído (total a la fecha y diferencial del turno)
4. Estado del punto de extracción
5. Dentro del estado del punto de extracción existen las siguientes clasificaciones:
6. Largado (L)
7. Bolones en el piso (B)
8. Colgado con bolones en el piso (CB)
9. Colgado a 1 coligüe (C1, 3 a 3.2 [m])
10. Colgado a 2 coligües (C2, 6 a 6.4 [m])
11. Colgado a 3 coligües (C3, 9 a 9.6 [m])

Además, existen mediciones generadas a través de un registro fotográfico y su procesamiento generando curvas granulométricas, desde las que se extraen los porcentajes de sobretamaño mayores a 1 y 2 [m³], para producir información que se pueda contrastar con la recopilada para la mina El Teniente, de ser posible. Las Figuras 24 y 25 muestran estas mediciones del sector “Línea Base” (LB) correspondiente al que

se encuentra libre de la influencia de PA, donde las curvas segmentadas indican el valor de la media móvil considerando 100 datos.

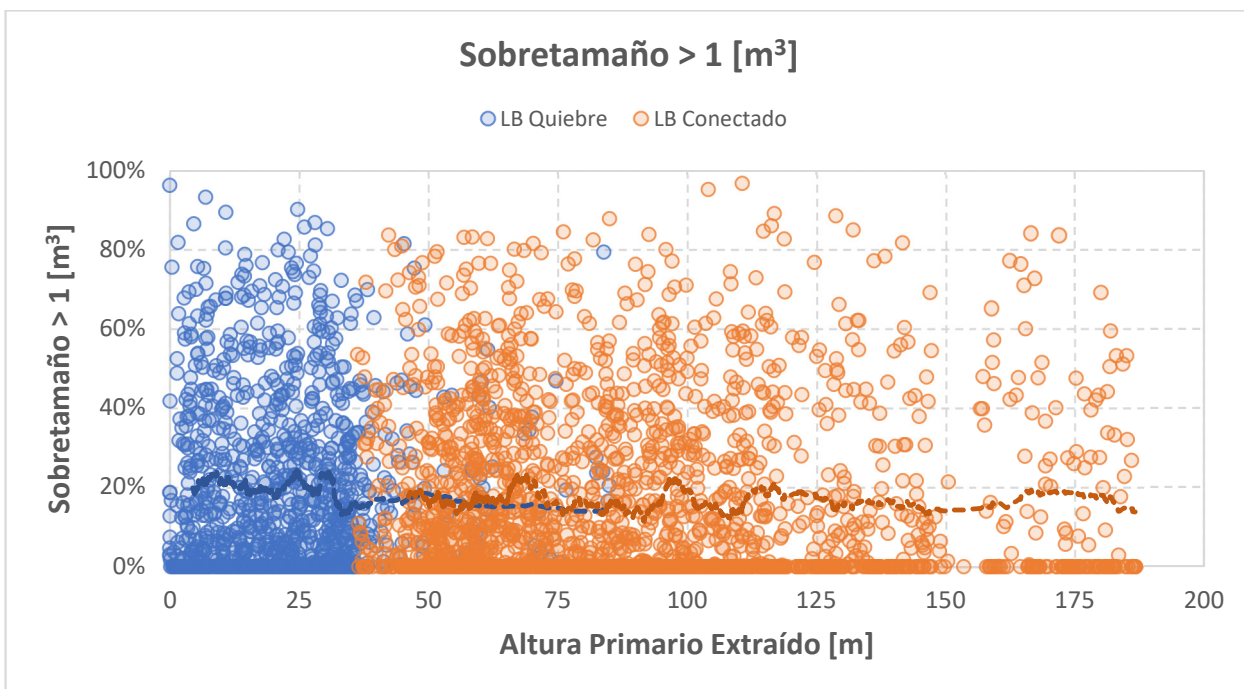


Figura 24: Datos sobretamaño > 1 [m³] sin PA, El Salvador

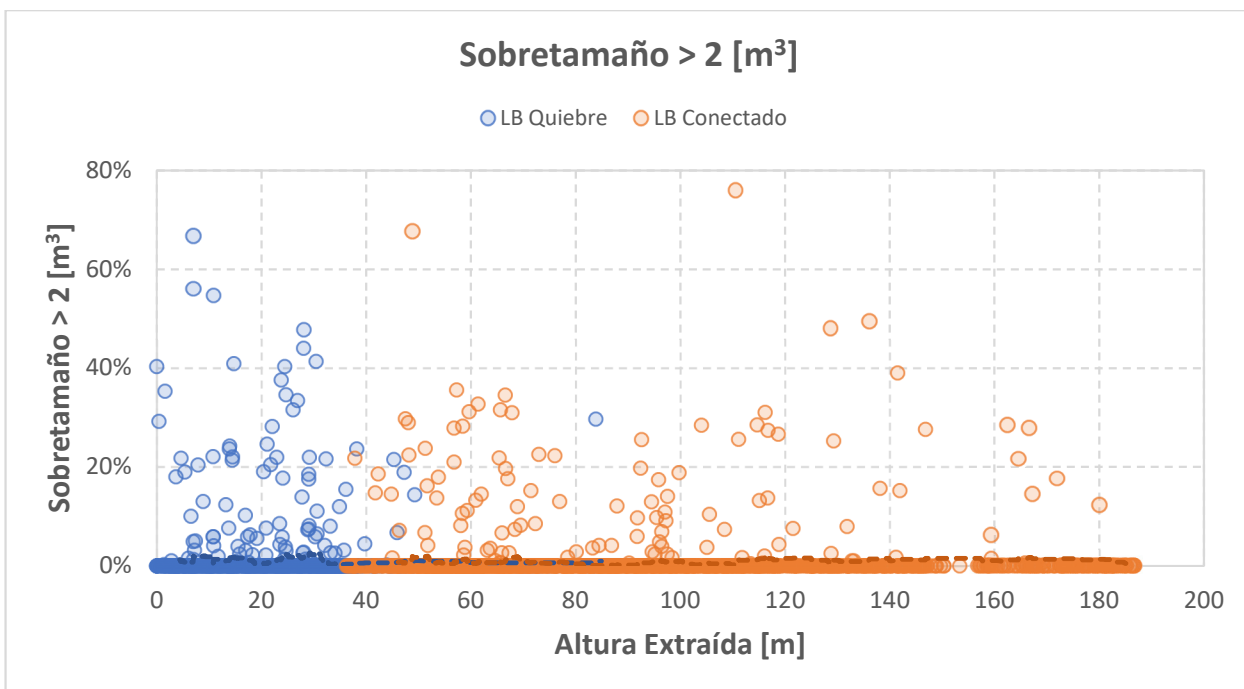


Figura 25: Datos sobretamaño > 2 [m³] sin PA, El Salvador

Para evaluar las colgadas en función de su frecuencia para El Salvador en función del sobretamaño mayor a 1 [m³], de manera análoga a la realizada en El Teniente, destacan ciertas diferencias. Estas son la existencia de una sola litología y sólo una malla de producción en el nivel de extracción, correspondiente a 15 x 15 [m x m]; además al generarse una colgadura, sin importar su clasificación, no se realiza la medición de sobretamaño, dado que estas son realizadas de manera aleatoria, por lo que se trabaja

con ambas bases de datos para identificar la información de sobretamaño más cercana a la ocurrencia del evento, obteniéndose la Figura 26.

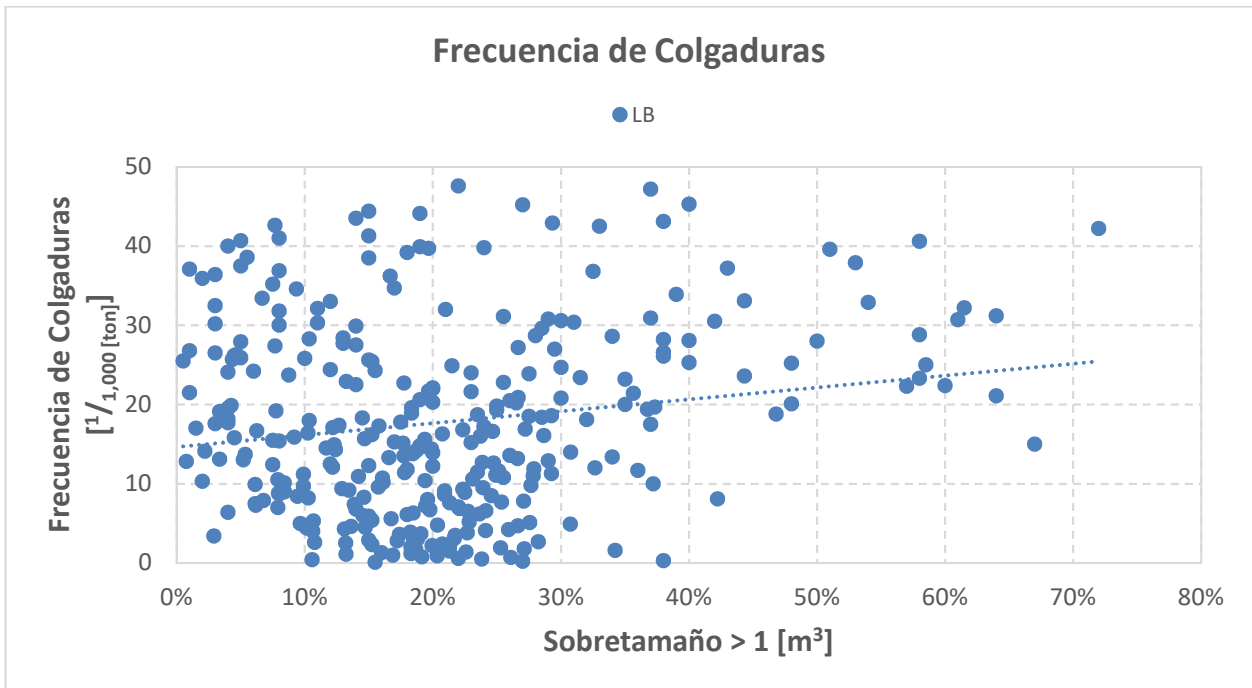


Figura 26: Datos colgadas, El Salvador

El objetivo del informe mencionado previamente es la evaluación del preacondicionamiento en la roca primaria, por lo que la información se encuentra asociada al sector LB y otro con PA (FH o FH con DDE). La Figura 27 presenta la ubicación de estos sectores, el primero se extiende desde el cruzado 4W al 8E, mientras que el segundo va desde el cruzado 8W al 11W, abarcando un área preacondicionada de 10,000 [m²] (100 [m] x 100 [m]).

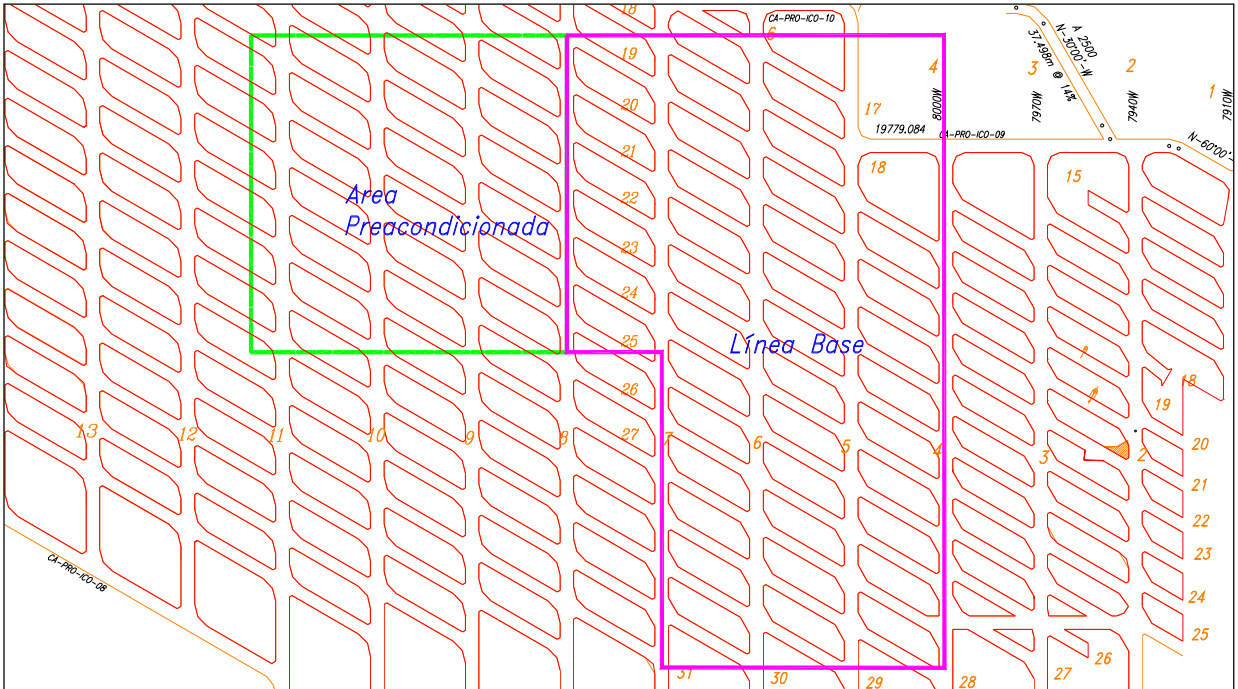


Figura 27: Límites línea base y área con PA, El Salvador

Dentro del área preconditionada existen 11 perforaciones de FH y 14 de DDE, su ubicación se puede observar en las Figuras 28 y 29, respectivamente . Por la distribución y orientación de las perforaciones se define el sector con FH como el acotado por los cruzados 8 y 9, entre las zanjas 27W a 21W y 26E a 20E y entre zanjas 26W a 20W, respectivamente; mientras el con FH+DDE, por los cruzados 11 y 10, entre zanjas 29W a 23W y 28E a 23E y entre zanjas 28W a 22W y 27E a 22E, respectivamente (Zamora et al., 2006).

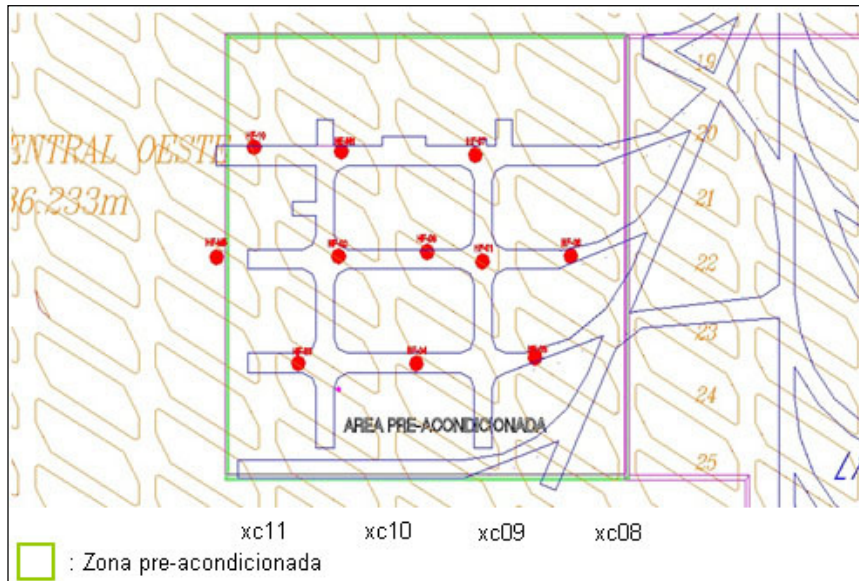


Figura 28: Ubicación Pozos FH, El Salvador

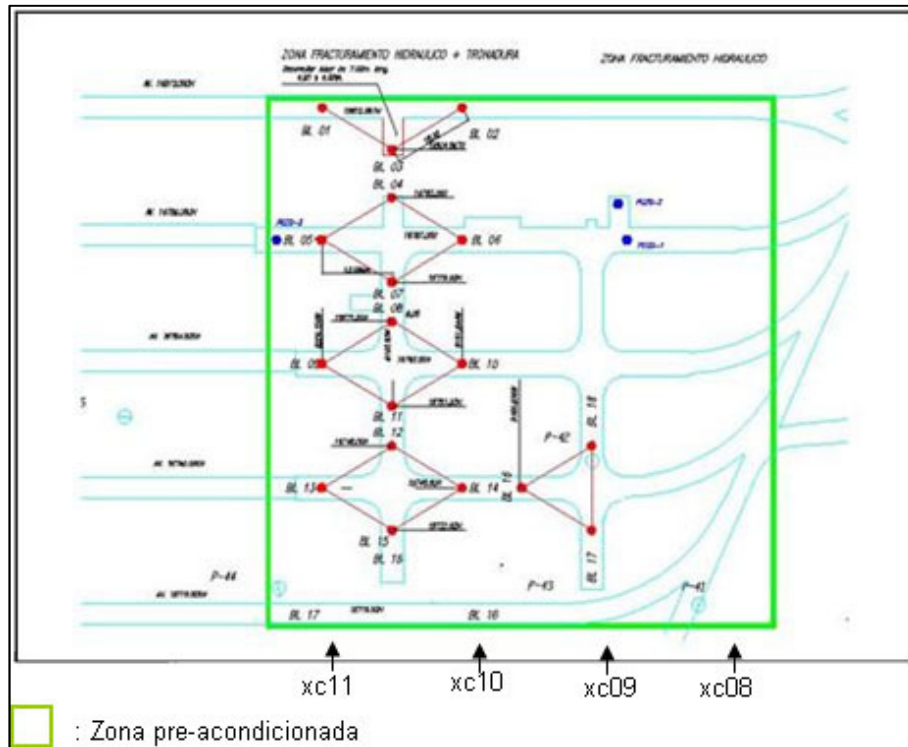


Figura 29: Ubicación Pozos DDE, El Salvador

3.2.2. Discusión

Observando las mediciones de sobretamaño en función de la altura de primario extraída para la mina El Salvador (Figuras 24 y 25), a diferencia de El Teniente, no se logra identificar una tendencia clara que permita comprender el comportamiento de estos. Existiendo un valor casi constante cercano a la media aritmética de cada conjunto, correspondiendo a 17.4% y 0.9% para los mayores a 1 y 2 [m³], respectivamente. Además, si se realiza una comparación con la situación de El Teniente la diferencia entre ambos grupos no es tan notoria como en El Salvador, donde destaca la gran disminución del porcentaje al considerar ambos segmentos.

Respecto a la frecuencia de colgaduras, se observa una gran dispersión de los datos, pero con una clara tendencia a relacionar mayores porcentajes de sobretamaño a un aumento de la frecuencia de colgaduras, como es esperable, además de corresponderse con el comportamiento identificado para la mina El Teniente.

4. METODOLOGÍA

El objetivo general de este trabajo es determinar en efecto del preacondicionamiento en la fragmentación del macizo rocoso. Para cumplir con cada objetivo específico se realiza un estudio del sobretamaño, un estudio de colgaduras, sismicidad y modelamiento numérico usando SRM, para determinar otros efectos y con distintas metodologías el impacto de estas técnicas. Para esto se utilizan las bases de datos analizadas en el capítulo anterior.

En resumen, se presenta la metodología para cada una de las actividades específicas señalándose en la Tabla 5 a cuál de las faenas es aplicable considerando los datos disponibles.

Tabla 5: Actividades por División

Actividad	El Teniente	El Salvador
Base Datos	Sí	Sí
Modelo Sobretamaño	Sí	Sí
Modelo Colgaduras	Sí	Sí
Sismicidad	Sí	No
Synthetic Rock Mass	Sí	No

4.1. MODELO SOBRETAMAÑO

Esta sección indica el procedimiento y consideraciones utilizadas para desarrollar los modelos de sobretamaño asociados tanto a la mina El Teniente como a la mina El Salvador. La diferencia en las bases de datos hacen que se ajusten distintos modelos, dado el contexto de geológico diferenciado de las divisiones.

4.1.1. Mina El Teniente

Considerando el comportamiento de los datos de sobretamaño de El Teniente en función de la altura de primario extraída y el efecto del parámetro P_{32} , presentados en la sección 3.1.1 con su respectivo análisis en la sección 3.1.2, se procede a ajustar un modelo con la siguiente estructura:

$$\text{Sobretamaño } [\%] = (a + b \times P_{32}) \times (\text{Altura}_{\text{Extraída}} [m] + c)^{(d+e \times P_{32})} \quad (4)$$

El ajuste se genera minimizando la suma de las diferencias al cuadrado entre el valor real y el propuesto. Además, se deben cumplir las siguientes restricciones:

3. El valor del sobretamaño debe ser mayor a 0% y menor a 100%.
4. El sobretamaño mayor a 1 [m³] debe ser mayor o igual al sobretamaño mayor a 2 [m³].
5. Para un P_{32} mayor otro, el sobretamaño asociado debe ser menor.

Los modelos con sus respectivos parámetros ajustados se presentan en la sección 5.1.1, donde se contrastan con los datos de sectores con FH y FH en conjunto con DDE, para analizar los efectos de cada una de las formas de PA.

4.1.2. Mina El Salvador

De igual manera que el modelo de sobretamaño para El Teniente, se propone un modelo que permita representar el comportamiento de los datos, la principal diferencia es que la base de datos de El Salvador, no presenta distintas calidades de macizo rocoso en el estudio, por lo que no se diferencia en función de las discontinuidades existentes, generándose un modelo exclusivo para un sector en particular, con la siguiente estructura:

$$\text{Sobretamaño [\%]} = a \times (\text{Altura}_{\text{Extraída}}[\text{m}] + b)^c \quad (5)$$

El ajuste, como en el caso anterior, se produce minimizando la suma de las diferencias al cuadrado entre el valor real y el propuesto. Requiriéndose solamente las siguientes restricciones:

6. El valor del sobretamaño debe ser mayor a 0% y menor a 100%.
7. El sobretamaño mayor a 1 [m³] debe ser mayor o igual al sobretamaño mayor a 2 [m³].

Los modelos de sobretamaño para El Salvador y los respectivos parámetros, junto con el análisis de efecto del FH y FH junto con DDE se encuentran en la sección 4.1.2.

4.2. MODELO COLGADURAS

Esta sección indica el procedimiento y consideraciones utilizadas para desarrollar los modelos de colgaduras asociados tanto a la mina El Teniente como a la mina El Salvador. Como se mencionó anteriormente, dado las diferencias del contexto geológico y estructura de las bases de datos, se ajustan distintos modelos por División.

4.2.1. Mina El Teniente

Esta sección busca correlacionar la frecuencia de colgaduras por cada 1,000 [ton] en función del porcentaje de sobretamaño mayor a 1 [m³], considerando los distintos sectores productivos de El Teniente, los que se pueden clasificar de dos maneras, según la malla de extracción utilizada y la presencia o no de PA.

El análisis previo en la sección 3.1 y posteriormente en la 4.1, permite identificar una tendencia lineal de la frecuencia de colgaduras al utilizar el sobretamaño. Es por esto que el modelo de colgaduras posee estructura indicada en la Ecuación (6, mientras que los parámetros ajustados y efectos del PA, se encuentran en la sección 5.2.1.

$$\text{Frecuencia de Colgaduras [1/1,000[ton]]} = a \times ((\text{Sobretamaño} > 1[\text{m}^3])[\%]) + b \quad (6)$$

4.2.2. Mina El Salvador

Los datos de la mina El Salvador, posee una clasificación más específica de las colgaduras como me menciona en la sección 3.2.1, sin embargo, para generar un modelo comparable al de El Teniente, se agrupan las categorías CB, C1, C2 y C3 en una sola una general de colgaduras. Además, se mantiene la estructura del modelo, como

una recta presentada en la Ecuación (6), al considerar los análisis en los puntos 3.2.1 y 3.2.2.

Los parámetros ajustados se encuentran en la sección 5.2.2, junto con el respectivo análisis del modelo.

4.3. SISMICIDAD

Como esta actividad es exclusiva de El Teniente, se explica de manera específica. Para evaluar el comportamiento de la sismicidad se consideran dos parámetros relevantes, el momento sísmico y la energía sísmica (Alcott et al., 1998), correlacionados con la altura de mineral extraída obtenida del catálogo de extracción de manera mensual desde enero de 2000 hasta febrero de 2014.

El primer paso es asignar los eventos sísmicos ocurridos sobre el nivel de producción a los distintos puntos de extracción en estudio. Para esto se asigna un radio en función del área de influencia del punto para delimitar un círculo que se proyecta hasta superficie encerrando los eventos que se considerarán generados por la explotación del mismo, con lo que se obtiene la suma del momento y energía por mes, como se observa en la Figura 30, donde los círculos grandes en azul y rojo corresponden a puntos de extracción con distintas litologías y los círculos pequeños eventos sísmicos registrados durante el año 2005. Cabe señalar que existen eventos que se asociarán a dos puntos de extracción¹, sin embargo, se acepta esta condición para no determinar de manera arbitraria la mayor influencia de uno sobre el otro.

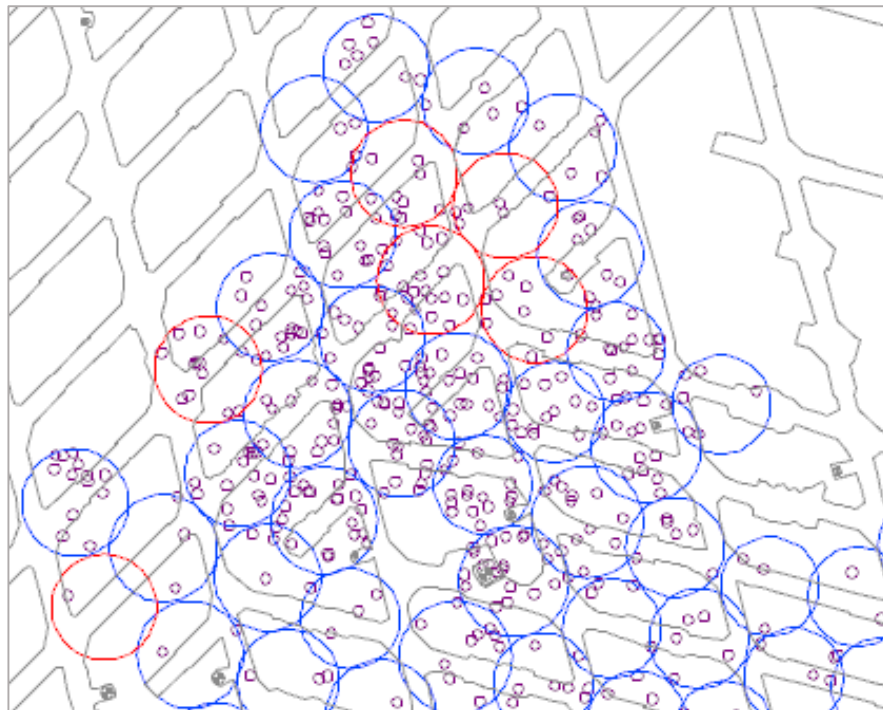


Figura 30: Puntos de extracción y eventos sísmicos, El Teniente

¹ La cantidad de datos corresponde a un 6,7% del total de las mediciones utilizadas.

Para cada uno de los puntos y meses en estudios se asigna la altura de mineral extraída en función del tonelaje indicado a la fecha en el catálogo como indica la Ecuación (7):

$$Altura [m] = \frac{Tonelaje [ton]}{\text{Área Influencia [m}^2] \times Densidad \left[\frac{ton}{m^3} \right]} \quad (7)$$

Posteriormente, se agrupan los datos de los distintos puntos en función de dos litologías existentes en la zona estudiada y si presentan o no FH, generándose cuatro clasificaciones: CMET FW, CMET FW FH, CMET HW, CMET HW FH. Las siglas de HW y FW hacen referencia a pared colgante y yacente respectivamente, proveniente de su traducción en inglés, *Hanging Wall* y *Foot Wall*, dado que poseen distinta cantidad de frecuencia de fracturas por metro, siendo mayor en el FW.

La base de datos de cada una de las categorías es ordenada según la altura de manera creciente y utilizando una media móvil se determinan los siguientes valores, tanto para el momento sísmico como la energía sísmica:

- **Máximo:** De todos los datos dentro de la media móvil se selecciona el mayor.
- **Suma:** Se suman los valores dentro de la media móvil.
- **Promedio Simple:** Se promedian los valores utilizando la media aritmética.
- **Promedio Logaritmo:** Se calcula la media aritmética del logaritmo de los datos, dada la gran variabilidad de los valores.

4.4. SRM

Esta actividad corresponde a una reinterpretación de los resultados obtenidos por Vallejos y Suzuki (2014) para la División El Teniente de Codelco Chile, por lo que no se considera la División El Salvador. El trabajo analizado fue desarrollado con las siguientes etapas para la obtención de resultados, las que se pueden apreciar en la Figura 31:

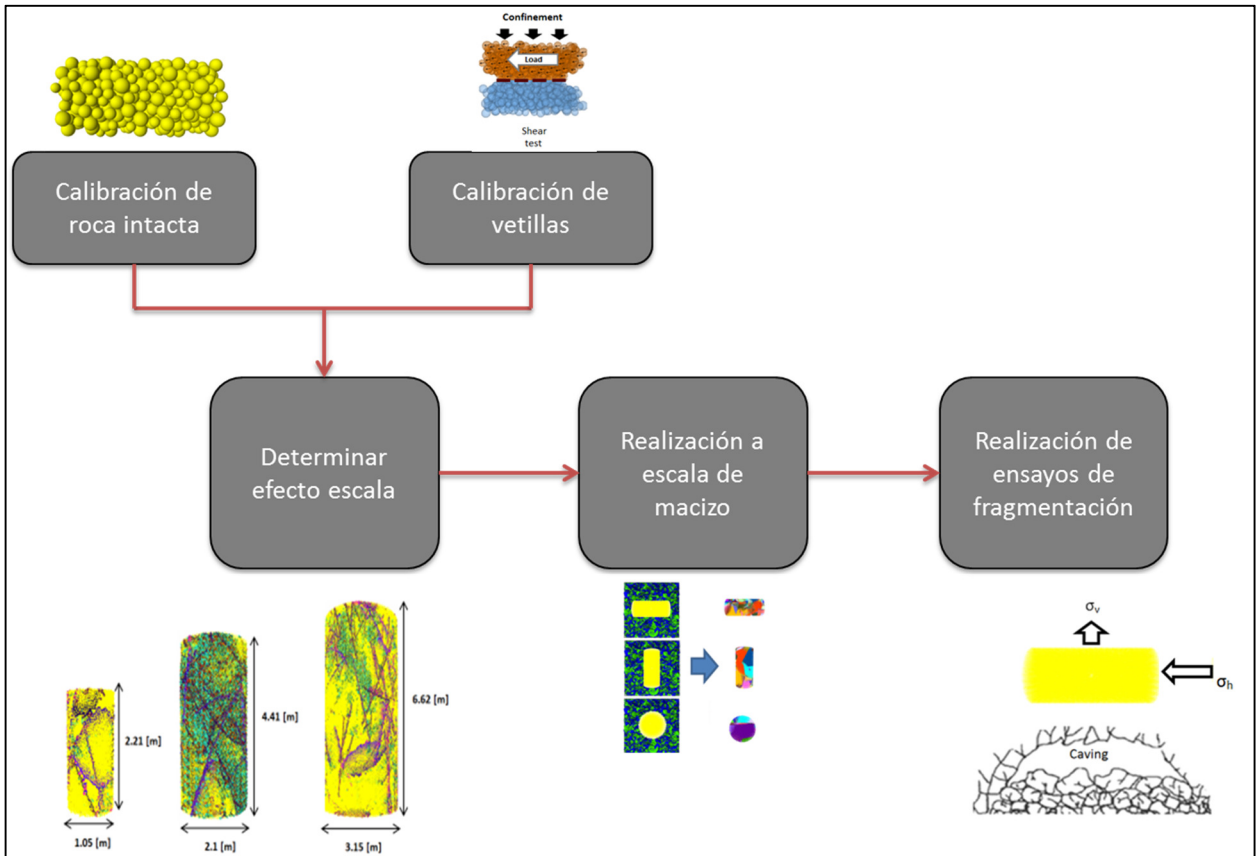


Figura 31: Metodología SRM (Vallejos & Suzuki, 2014)

El estudio analizado considera la unidad geotécnica Dacita de la mina El Teniente. La Figura 32 presenta la cantidad de vetillas existentes, junto con los parámetros P_{10} y P_{32} , que representan la frecuencia de estas por metro y su superficie por unidad de volumen, respectivamente.

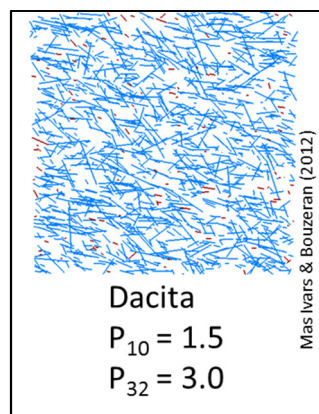


Figura 32: Vetillas Dacita (Vallejos & Suzuki, 2014)

Al momento de realizar ensayos de fragmentación sintéticos es necesario ingresar una trayectoria de esfuerzos a la que es sometido el macizo rocoso para determinar la fragmentación, la cual se encuentra esquematizada en la Figura 33, donde se observa que consta de tres partes:

- a. Se lleva la roca a un estado de esfuerzos equivalente a los esfuerzos in-situ.

- b. Se disminuye el esfuerzo lateral y aumenta el axial para replicar las condiciones existentes en el *cave-back*.
- c. Se obtienen esfuerzos posteriores a la falla de la probeta.

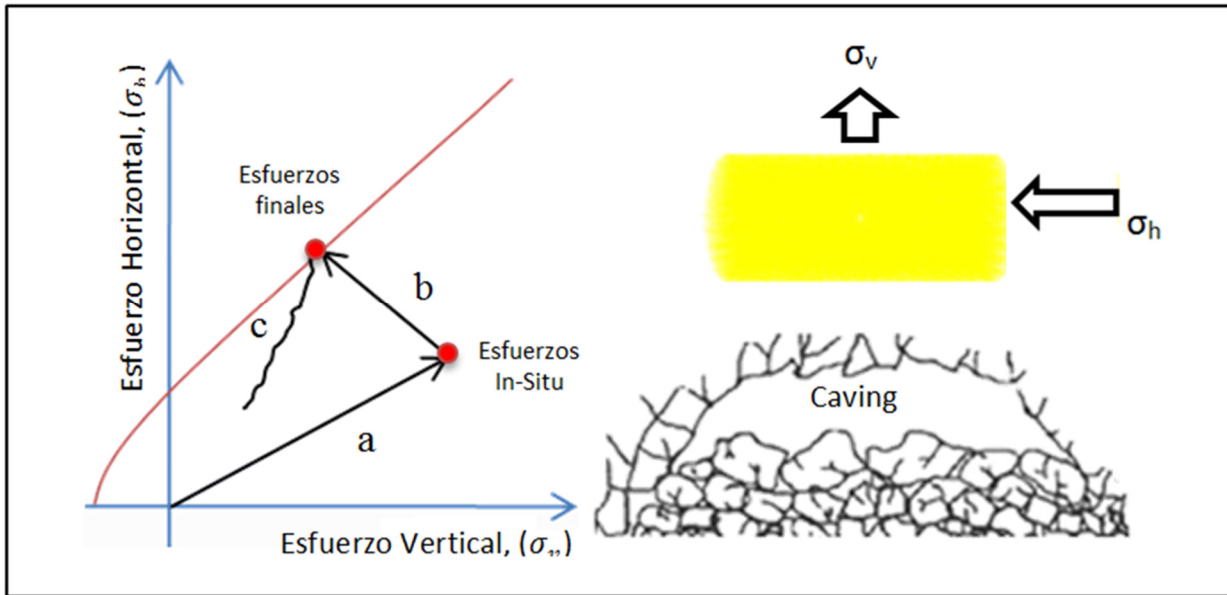


Figura 33: Esquema de trayectoria de Esfuerzos (Vallejos & Suzuki, 2014)

Para determinar el efecto de la trayectoria de esfuerzos se utilizan dos escenarios distintos. La Figura 34 indica las dos trayectorias a considerar, denominadas SP1 y SP2.

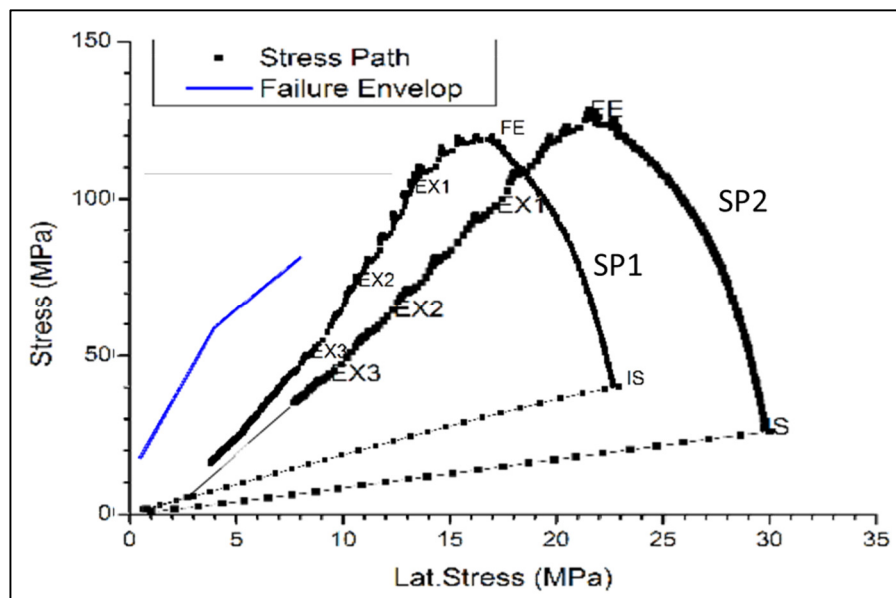


Figura 34: Trayectorias de Esfuerzos utilizadas para estudio en dacita, SRM (Vallejos & Suzuki, 2014)

Además, como el objetivo del estudio es cuantificar el impacto del FH, el macizo sintético es sometido a las trayectorias en base a su DFN original, el que posteriormente es modificado al incorporar un nuevo set de discontinuidades horizontales equi-espaciadas correspondientes al FH, para ser nuevamente sometida a los esfuerzos previamente definidos, como se aprecia en la Figura 35.

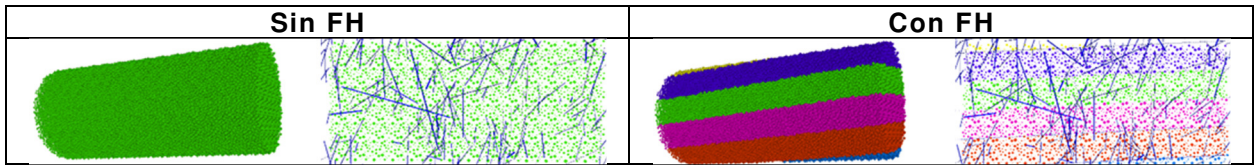


Figura 35: Muestras de SRM con y sin FH (Vallejos & Suzuki, 2014)

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados generados con el desarrollo de la metodología de la sección previa y su discusión.

5.1. MODELO SOBRETAMAÑO

5.1.1. Mina El Teniente

Una vez ajustado el modelo se sobretamaño con los datos sin FH, se obtuvieron los parámetros indicados en la Tabla 6, junto con el correspondiente R^2 del ajuste.

$$\text{Sobretamaño [\%]} = (a + b \times P_{32}) \times (\text{Altura}_{\text{Extraída}}[\text{m}] + c)^{(d+e \times P_{32})} \quad (8)$$

Tabla 6: Parámetros modelos sobretamaño, El Teniente

Parámetro	Sobretamaño > 1 [m ³]	Sobretamaño > 2 [m ³]
a	22.84	7.07
b	0.36	0.60
c	80.47	56.49
d	0.67	0.45
e	0.09	0.12
R ²	0.72	0.81

Las Figura 36 y Figura 37 muestran el comportamiento de los modelos para las litologías sin PA de RENO, mientras las Figura 38 y Figura 39 lo hacen para de Teniente 4Sur.

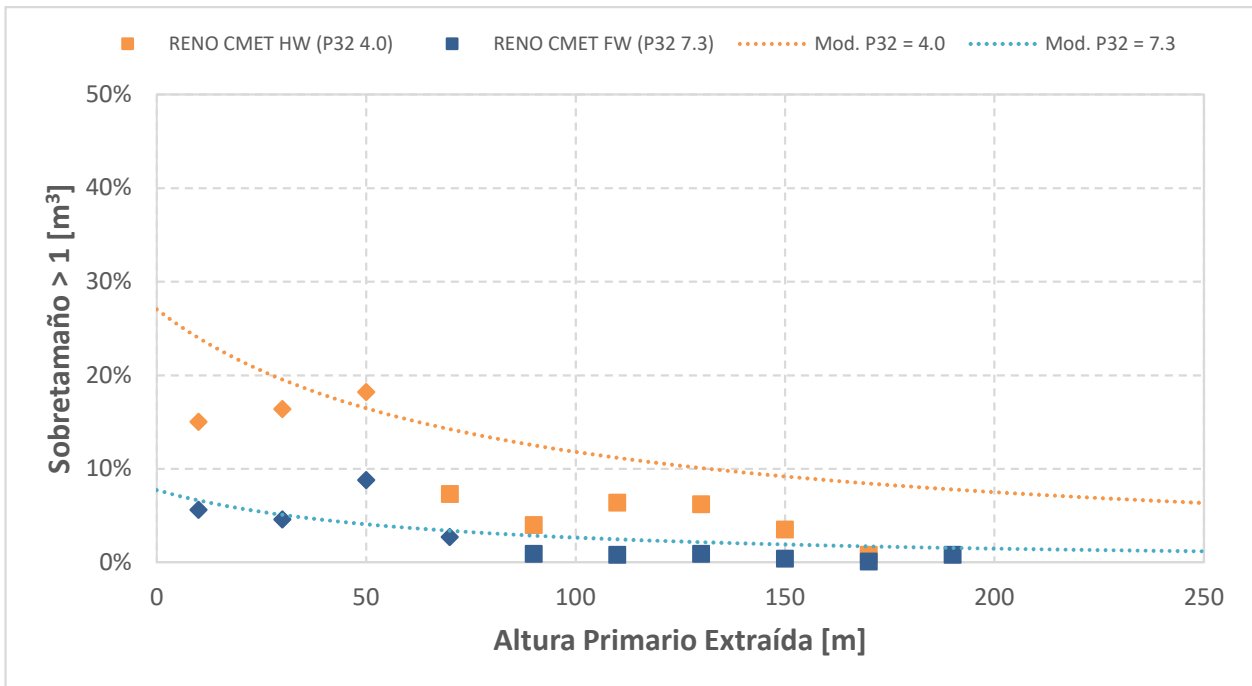


Figura 36: Modelo sobretamaño > 1 [m³], RENO sin PA

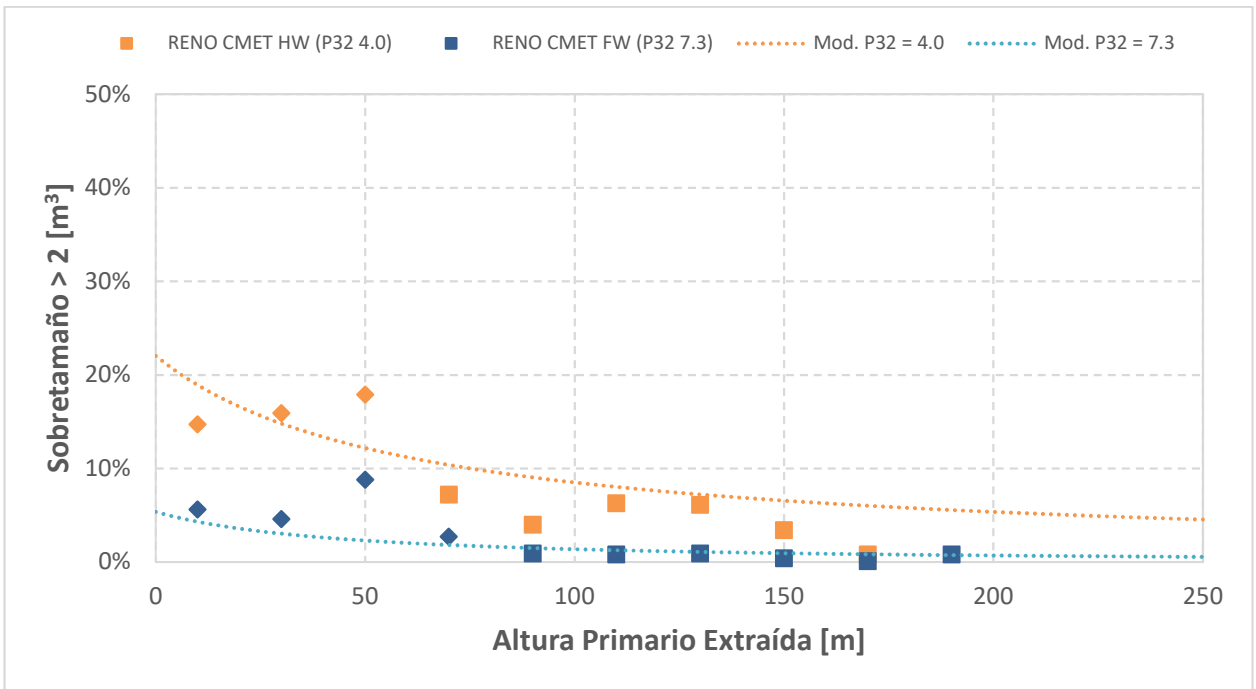


Figura 37: Modelo sobretamaño > 2 [m³], RENO sin PA

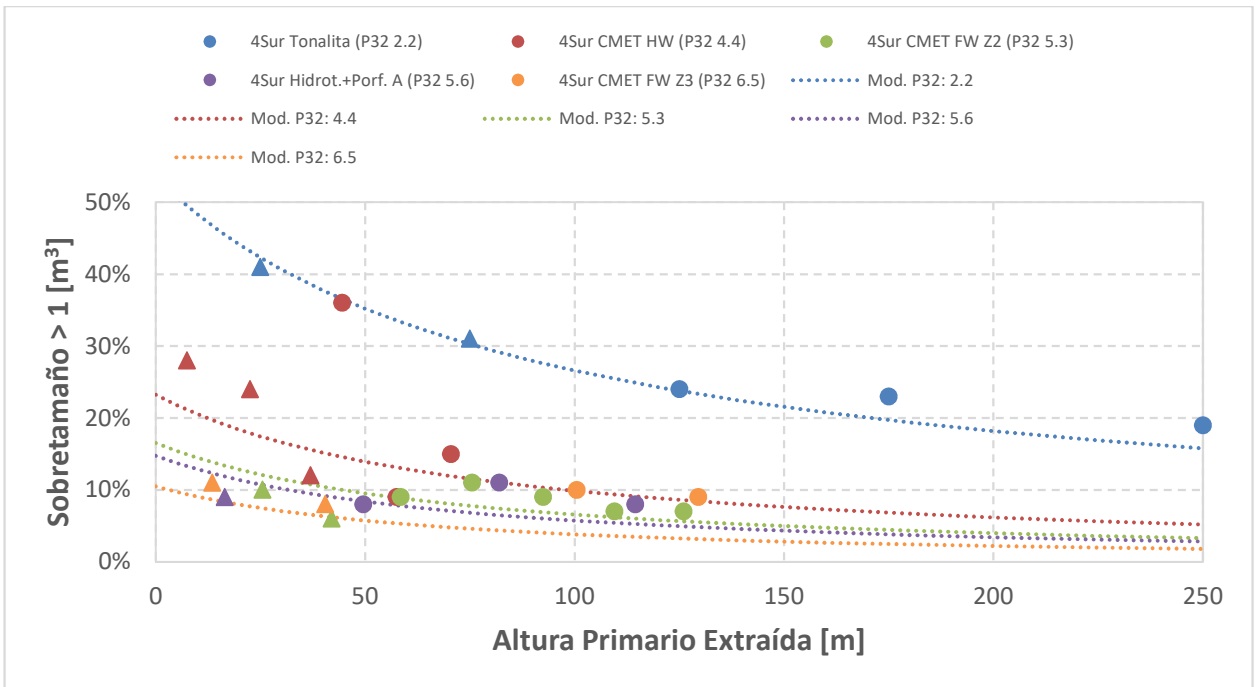


Figura 38: Modelo sobretamaño > 1 [m³], 4Sur sin PA

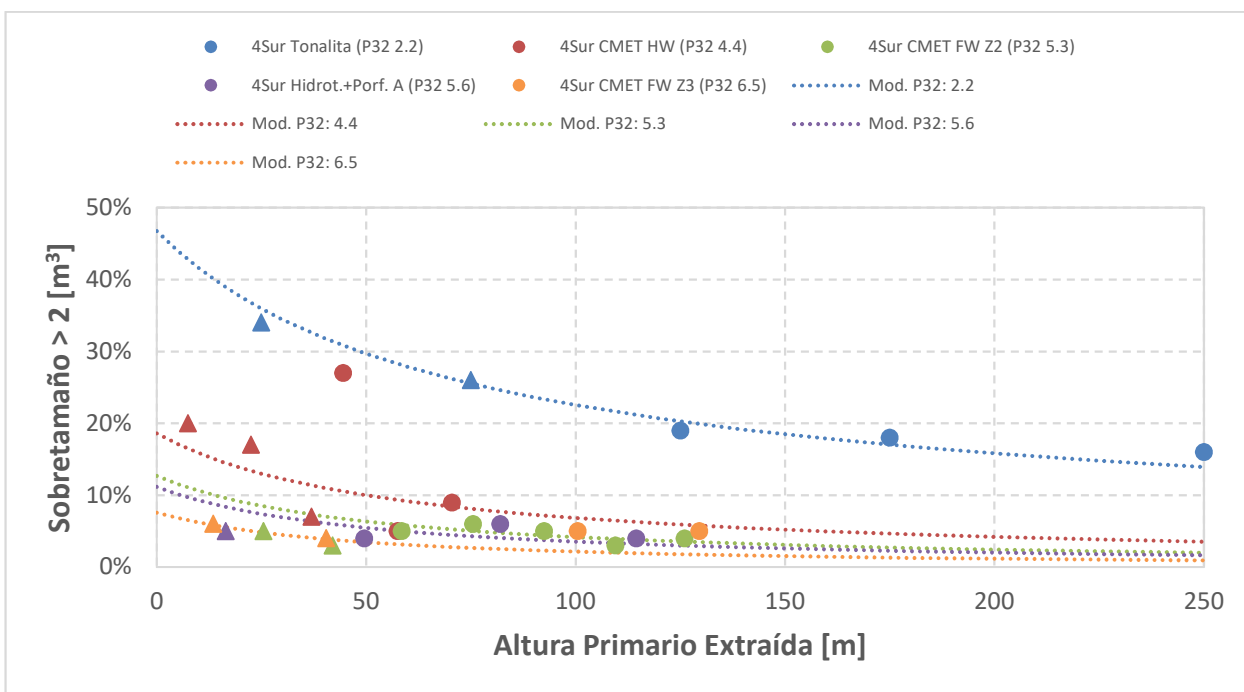


Figura 39: Modelo sobretamaño > 2 [m³], 4Sur sin PA

Es posible destacar que los modelos logran representar los datos empíricos de manera adecuada, ubicándose la gran mayoría de los puntos muy cerca de las curvas en los gráficos presentados previamente.

La estructura del modelo de sobretamaño permite visualizarla como la correspondiente a la Ley de Omori Modificada (Utsu & Ogata, 1995), la que es utilizada en sismología, con la diferencia que los parámetros K y p varían en base al valor del P_{32} . La Tabla 7 presenta sus valores para el rango P_{32} asociado a los sectores productivos sin PA.

Tabla 7: Variabilidad parámetros Ley de Omori Modificada.

Modelo	Sobretamaño > 1 [m3]		Sobretamaño > 2 [m3]	
	$K = (a + b \cdot P_{32})$	$p = (d + e \cdot P_{32})$	$K = (a + b \cdot P_{32})$	$p = (d + e \cdot P_{32})$
2.2	23.6	0.9	8.4	0.7
4.0	24.3	1.0	9.5	0.9
4.4	24.4	1.1	9.7	1.0
5.3	24.7	1.1	10.3	1.1
5.6	24.9	1.2	10.4	1.1
6.5	25.2	1.3	11.0	1.2
7.3	25.5	1.3	11.5	1.3

El factor K expresa la amplitud asociada a la curva, para la cual existe una menor variación en el modelo de sobretamaño mayor a 1 [m³], que el mayor a 2 [m³]. Por el otro lado, el parámetro p corresponde al decaimiento de la curva, él que en la Ley de Omori Modificada se encuentra generalmente entre los valores 0.9 y 1.5 (Utsu & Ogata, 1995), dentro de los obtenidos en los sectores sin PA, sólo se escapa de este rango el caso de P_{32} igual a 2.2 [m²/m³]. La similitud en el decaimiento se puede deber a que parte de la fragmentación se asocia a la energía acumulada y liberada en el techo de la cavidad, la que podría relacionarse con la energía sísmica. La Tabla 8 presenta el rango de valores de P_{32} en que el decaimiento se mantiene dentro del rango típico para cada modelo.

Tabla 8: Rangos P_{32} , Ley de Omori Modificada

Modelo	Sobretamaño > 1 [m ³]	Sobretamaño > 2 [m ³]
P_{32} [m ² /m ³]	2.0 a 9.7	3.4 a 9.1

Para determinar el efecto del FH en el sobretamaño, se presentan en las Figura 40 y Figura 41 las litologías influenciadas por este tipo de PA junto con el modelo asociado a sus P_{32} in-situ, por lo que representaría el comportamiento sin la incorporación de las nuevas fracturas hidráulicas.

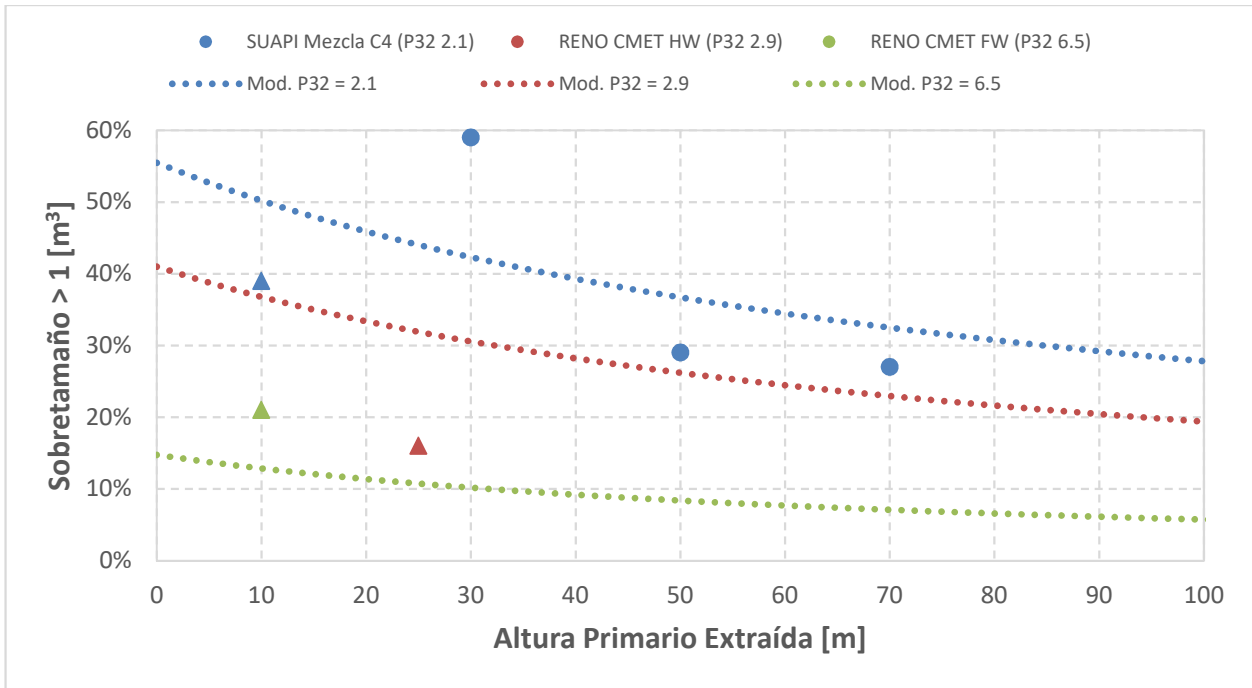


Figura 40: Modelo sobretamaño > 1 [m³], El Teniente con FH

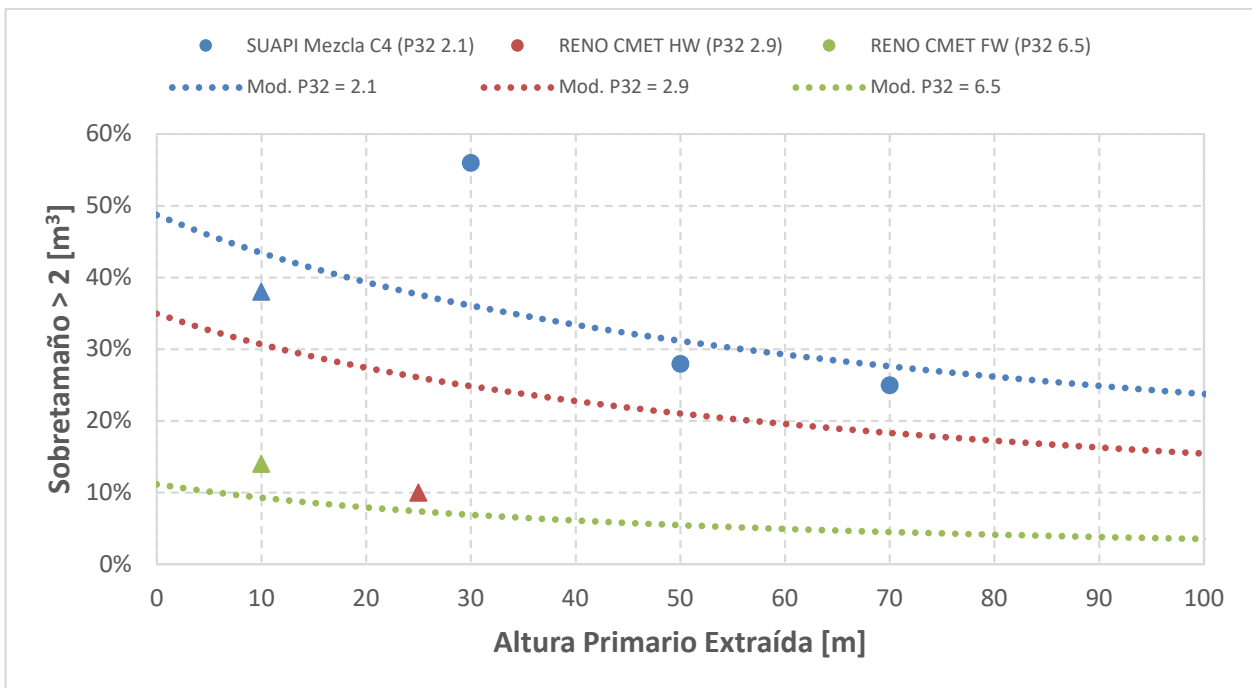


Figura 41: Modelo sobretamaño > 2 [m³], El Teniente con FH

En función de las figuras previas no es posible determinar un efecto en específico del FH en el sobretamaño, debido a que existen datos que se encuentra sobre el comportamiento esperado y otros bajo este. Un factor por considerar es la cantidad de mediciones existentes, las cuales de ser mayores podrían permitir la obtención de una conclusión más acertada.

De manera homóloga se presentan los datos de sectores afectados tanto por FH y DDE, indicando las curvas asociadas a su P₃₂ in situ, en las Figura 42 y Figura 43.

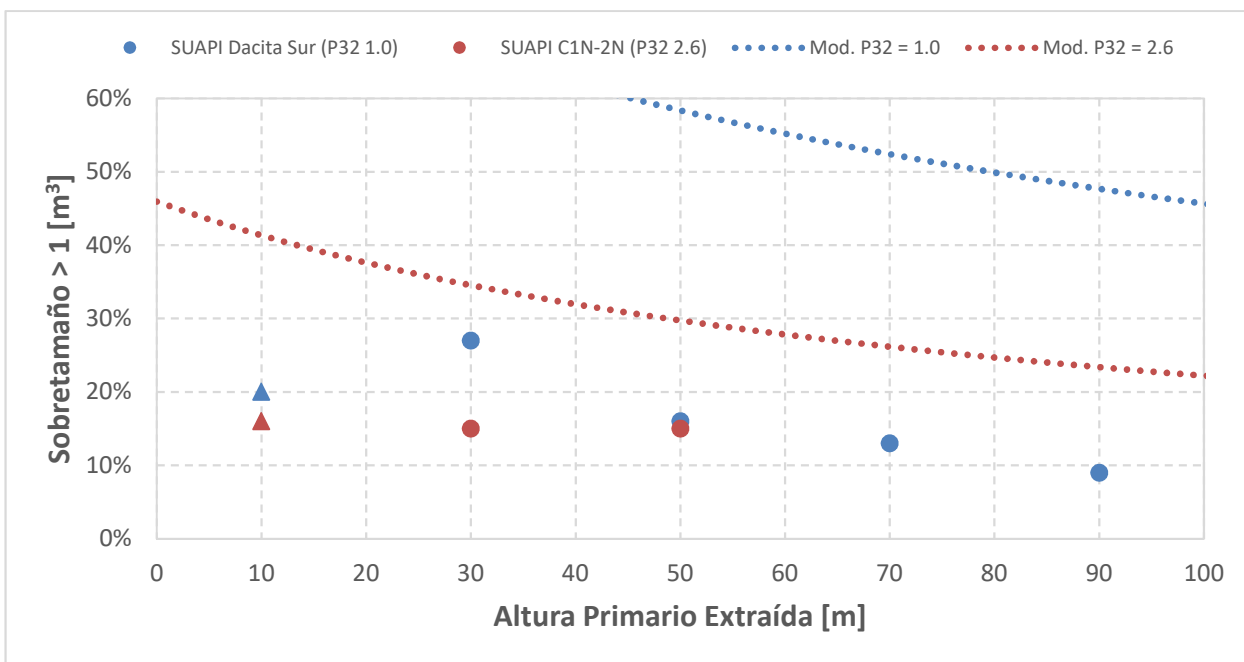


Figura 42: Modelo sobretamaño > 1 [m³], El Teniente con FH+DDE

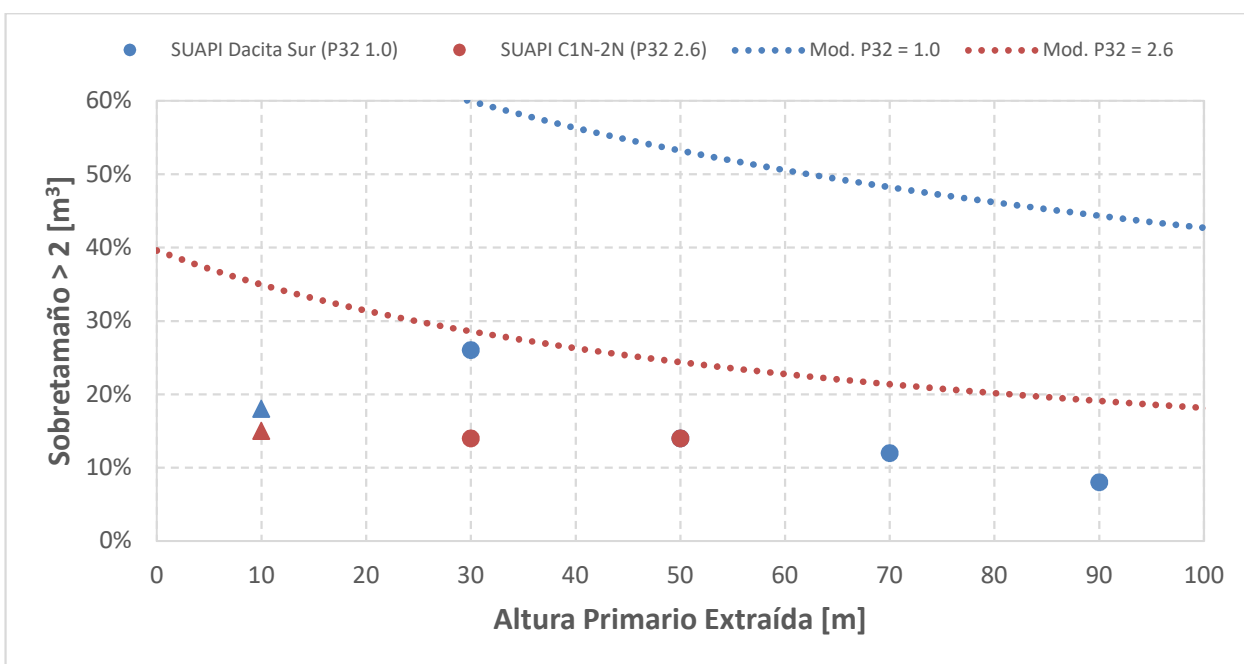


Figura 43: Modelo sobretamaño > 2 [m³], El Teniente con FH+DDE

Al analizar los sectores con impacto de FH y DDE, se observa una clara disminución del sobretamaño con respecto a lo esperado en función del P_{32} in situ, como fue indicado por Brzovic, Hurtado y Marin (2014). Por lo que el efecto de esta combinación para preacondicionar el macizo rocoso es influyente.

Por otro parte, el mecanismo en que se desarrolla el *caving* se ve afectado por la realización del PA. Esta conclusión se fundamenta en el hecho que la disminución de sobretamaño en la zona de quiebre es similar a la de las mediciones en que la columna conectó con el techo del mineral (sobre el 30% de columna extraída). En base a esto se puede suponer que el mineral queda principalmente influenciado por un mecanismo más gravitacional que uno de *caving*, es decir, asociado a fragmentación secundaria, por sobre primaria, debido la disminución de la calidad del macizo rocoso, tanto por las nuevas fracturas del FH como las discontinuidades generadas por el DDE.

5.1.2. Mina El Salvador

Los parámetros ajustados para el modelo de sobretamaños para El Salvador se pueden encontrar en la Tabla 9. Dada la gran variabilidad de las mediciones existentes mientras se extrae la columna de mineral primario, no es factible representar los datos empíricos adecuadamente con el modelo, como se aprecia al observar el valor del R^2 , sin embargo, se continúa con el análisis en base al estudio de la sección 4.1.2 de El Teniente.

$$\text{Sobretamaño } [\%] = a \times (\text{Altura}_{\text{Extraída}} [m] + b)^c \quad (9)$$

Tabla 9: Parámetros modelos sobretamaño, El Salvador

Parámetro	Sobretamaño > 1 [m ³]	Sobretamaño > 2 [m ³]
a	307.96	20.30
b	569.11	190.05
c	1.16	1.39
R²	0.004	0.001

A pesar de la deficiente correlación presentada por el coeficiente R^2 , se puede apreciar en las Figura 44 y Figura 45 que el modelo se asemeja bastante a la tendencia decreciente de la media móvil, la que considera 100 datos. Sin embargo, dada las condiciones entregadas por las mediciones de la mina El Salvador, no genera un gran impacto el análisis de los sobretamaños mayores a 2 [m³], donde solamente el 6.4% del total son valores distintos de 0%, implicando que no es un tema relevante dentro del sector en estudio. Se puede agregar que para el caso de los sectores con PA, la cantidad de valores distintos a 0% disminuye al 2.9% y 0.5%, para los sectores FH y FH+DDE, respectivamente.

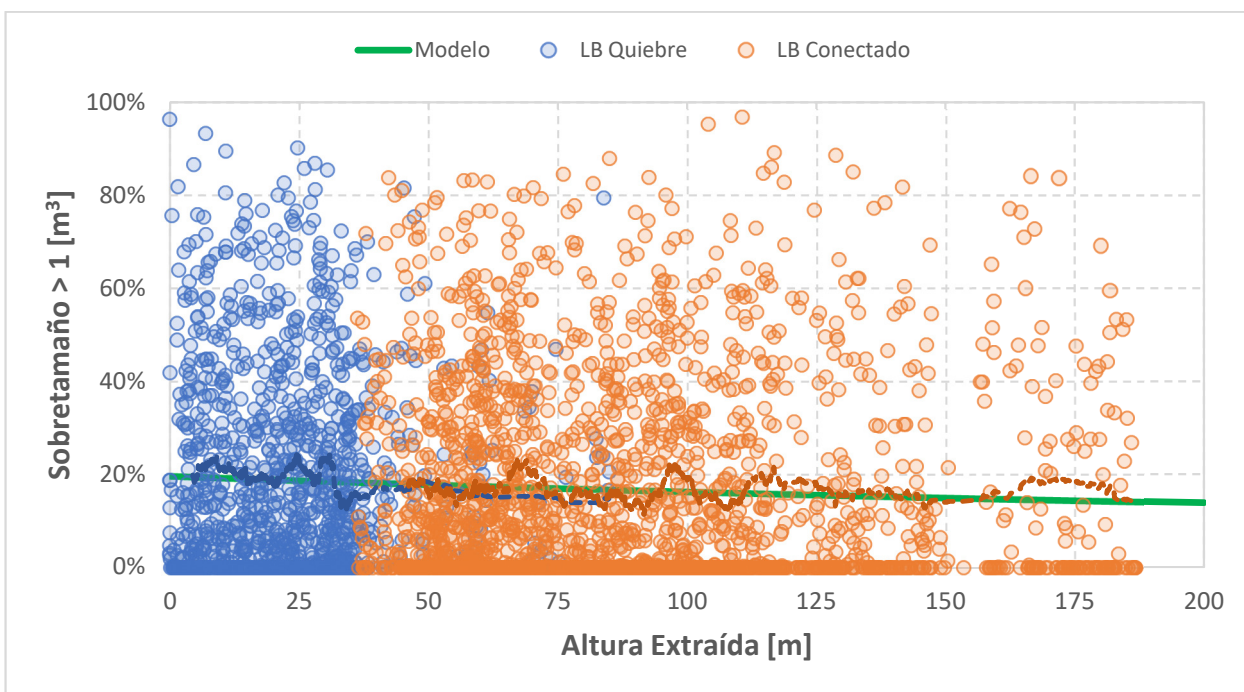


Figura 44: Modelo sobretamaño > 1 [m³], El Salvador sin PA

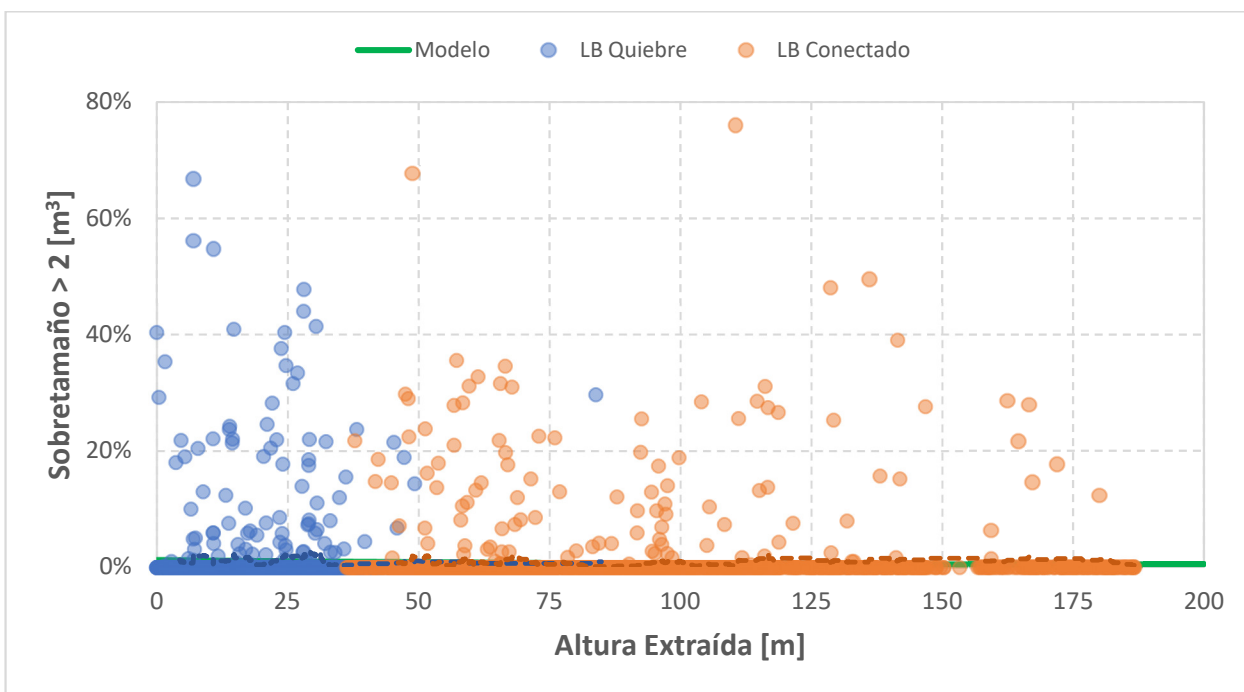


Figura 45: Modelo sobretamaño > 2 [m³], El Salvador sin PA

Para evaluar el efecto del preacondicionamiento en el sobretamaño se presentan las mediciones de los sectores con PA con su media móvil en las Figura 46, Figura 47, Figura 48 y Figura 49, junto con el modelo ajustado para El Salvador, para poder contrastar la tendencia general y el impacto de la implementación del FH y FH+DDE, teniendo en consideración que el modelo se asemeja a la media móvil del sector LB.

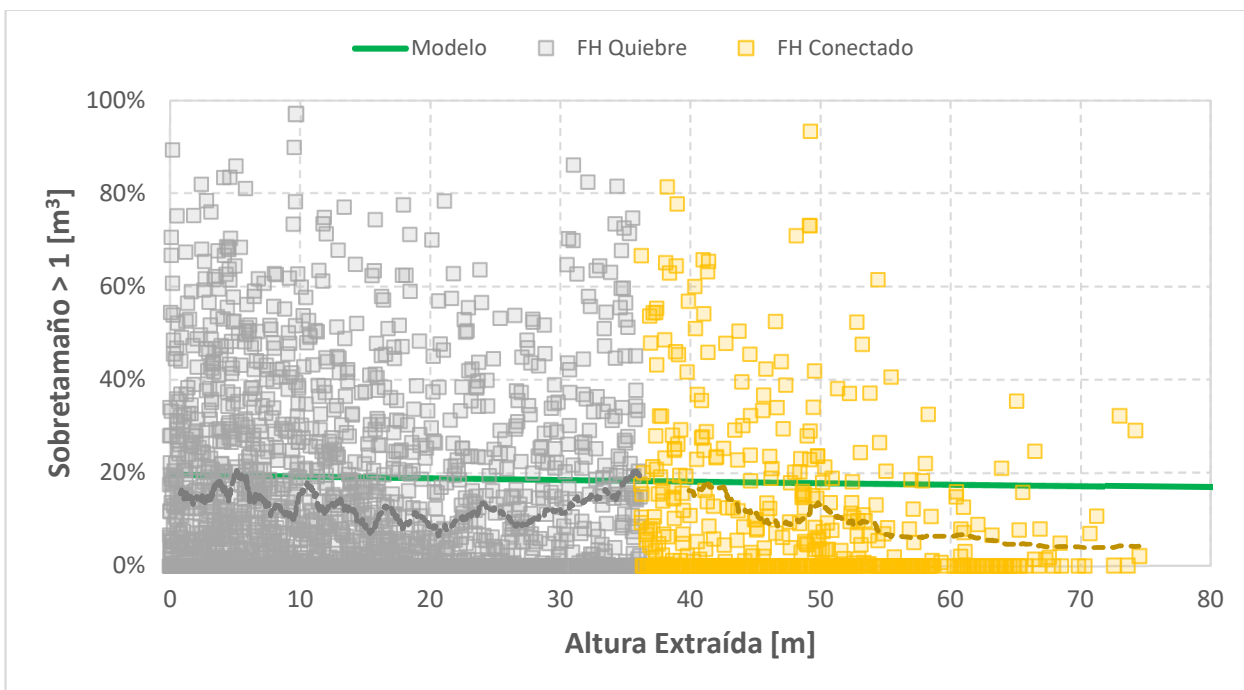


Figura 46: Modelo sobretamaño > 1 [m³], El Salvador con FH

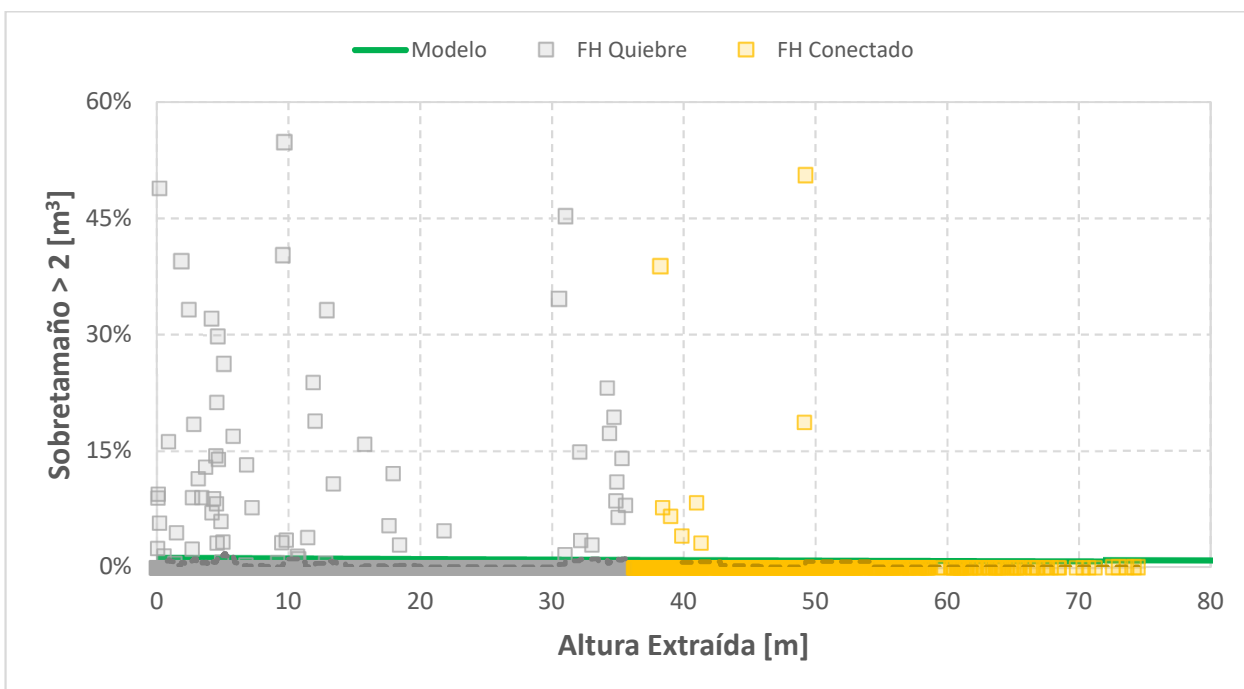


Figura 47: Modelo sobretamaño > 2 [m³], El Salvador con FH

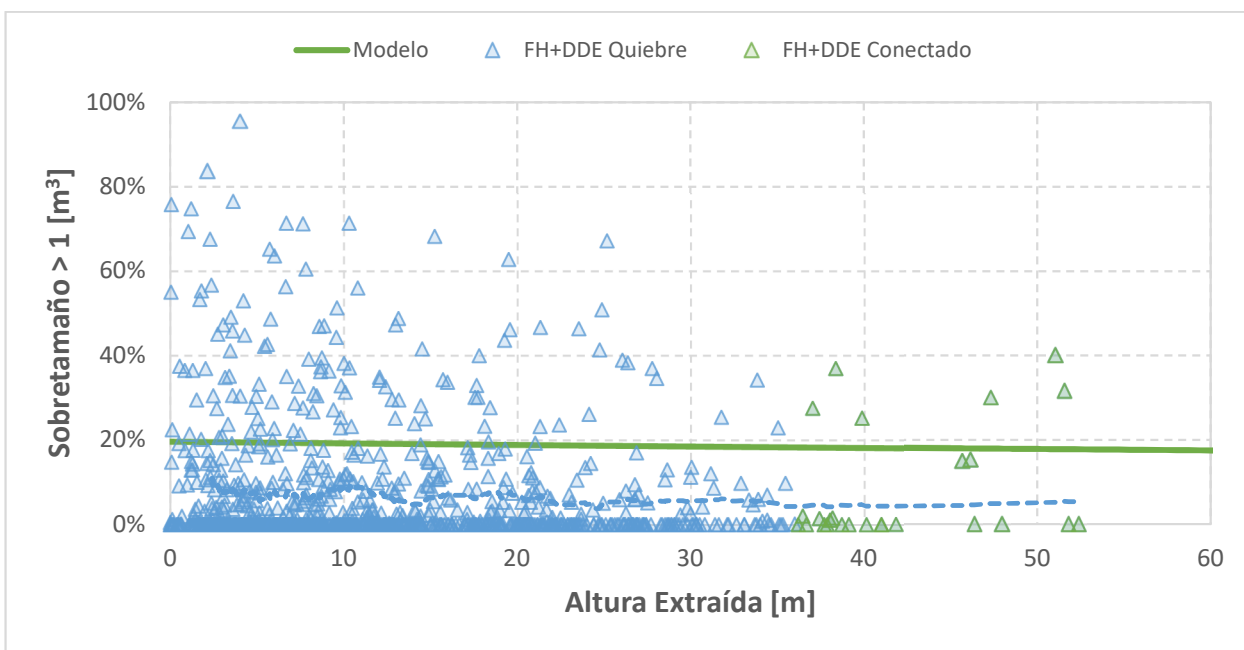


Figura 48: Modelo sobretamaño > 1 [m³], El Salvador con FH+DDE

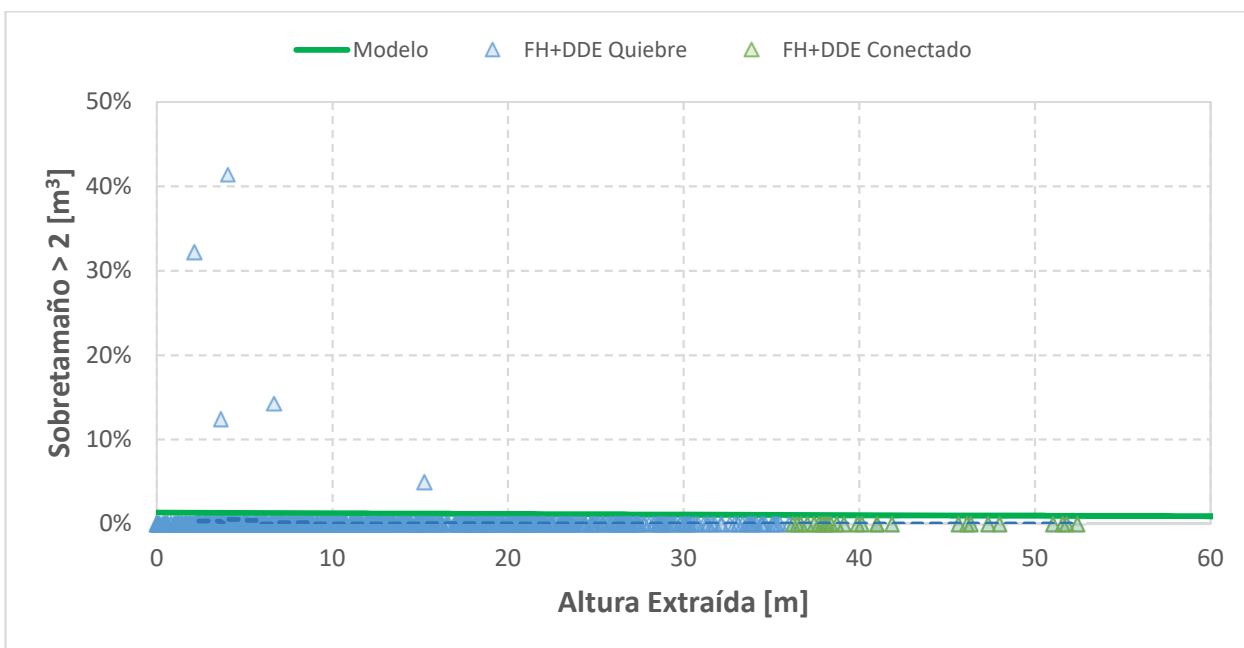


Figura 49: Modelo sobretamaño > 2 [m³], El Salvador con FH+DDE

Dado que el porcentaje de sobretamaños tamaños mayores a 2 [m³] son casi inexistentes para los sectores con PA, el análisis se concentra en el impacto dentro del sobretamaño mayor a 1 [m³], sin embargo, cabe señalar que existe una reducción para estas granulometrías también.

Es fácil identificar la existencia de una reducción de los sobretamaños mayores a 1 [m³] al aplicar técnicas de precondicionamiento, siendo más efectiva la combinación de fracturamiento hidráulico en conjunto con debilitamiento dinámico con explosivos que su implementación individual. Además, considerando el análisis de la sección 5.1.1, para El Salvador es claro el efecto del FH en la fragmentación, siendo que, para El Teniente, no quedaba del todo determinado.

5.2. MODELO COLGADURAS

5.2.1. Mina El Teniente

Las distintas procedencias de los datos de El Teniente, permite no sólo analizar el efecto del PA, sino que también el efecto de la malla del nivel de producción. La Tabla 10 posee los parámetros del modelo de colgaduras para los sectores sin técnicas de preacondicionamiento agrupados por malla de producción.

$$\text{Frecuencia de Colgaduras [1/1,000[ton]]} = a \times ((\text{Sobretamaño} > 1[\text{m}^3])[\%]) + b \quad (10)$$

Tabla 10: Parámetros modelo colgaduras, Mallas sin PA, El Teniente

Ajuste	Pendiente (a)	Coefficiente de Posición (b)	R ²
Malla 15 x 17.32 Sin PA	16.06	0.68	0.56
Malla 15 x 20 Sin PA	14.48	-2.04	0.98

La Figura 50 presenta gráficamente los modelos, junto con los elipsoides con un 90% de confiabilidad. Es posible apreciar que las pendientes de ambas rectas son bastante similares, pareciendo prácticamente paralelas, pero la variación en el coeficiente de posición hace que para un mismo sobretamaño, la frecuencia colgaduras se vea disminuida en 3 unidades por cada 1,000 [ton]. Aunque el resultado no se puede considerar como determinante ni absoluto, bajo este escenario se recomendaría extraer el mineral utilizando una malla de 15 x 20 [m x m] por sobre una de 15 x 17.32 [m x m].

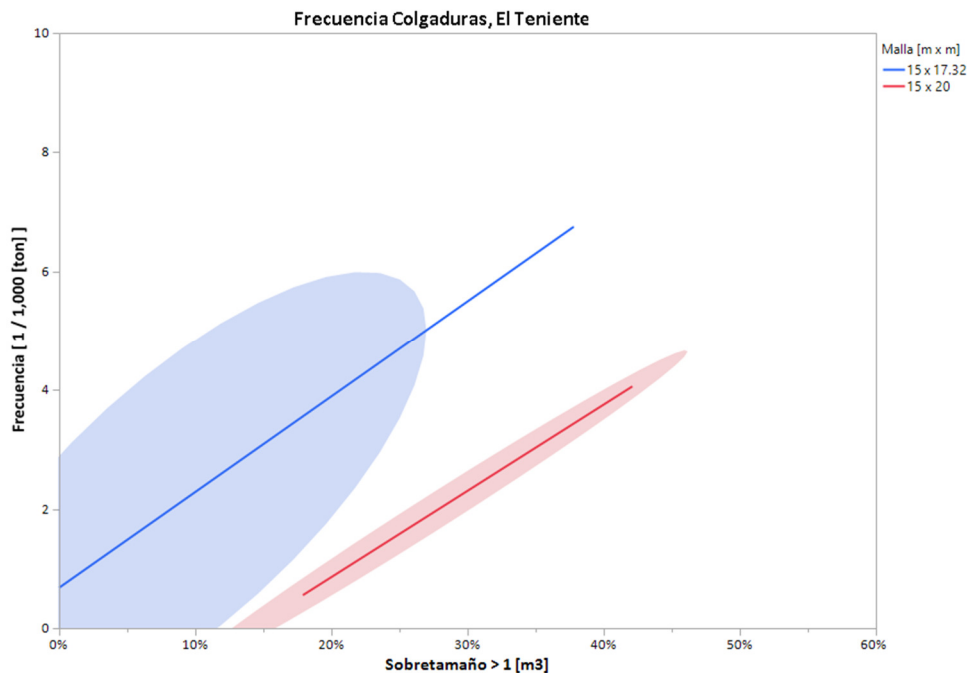


Figura 50: Modelo colgaduras, Mallas sin PA, El Teniente

Para analizar el efecto del preacondicionamiento, se excluyen los datos de la malla de 15 x 20 [m x m], por no poseer valores con influencia de FH o FH+DDE. Los parámetros de los modelos para la malla de 15 x 17.32 [m x m] se pueden ver en la Tabla 11. Mientras que el gráfico con los modelos y los elipsoides del 90%, como en el análisis previo se observa en la Figura 51.

Tabla 11: Parámetros modelo colgaduras, 15x17.32, El Teniente

Ajuste	Pendiente (a)	Coficiente de Posición (b)	R ²
Malla 15 x 17.32 Sin PA	16.06	0.68	0.56
Malla 15 x 17.32 Con PA	1.42	1.55	0.07

Los modelos permiten apreciar que, por un lado, para una roca sin PA el aumento en el sobretamaño impacta fuertemente en la frecuencia de colgaduras, mientras que, por el otro lado, para una roca preacondicionada, se mantiene prácticamente constante. Bajo estas condiciones se recomendaría fuertemente la realización de PA, porque la reducción en el número colgaduras permitiría una producción mucho más constante y eficiente.

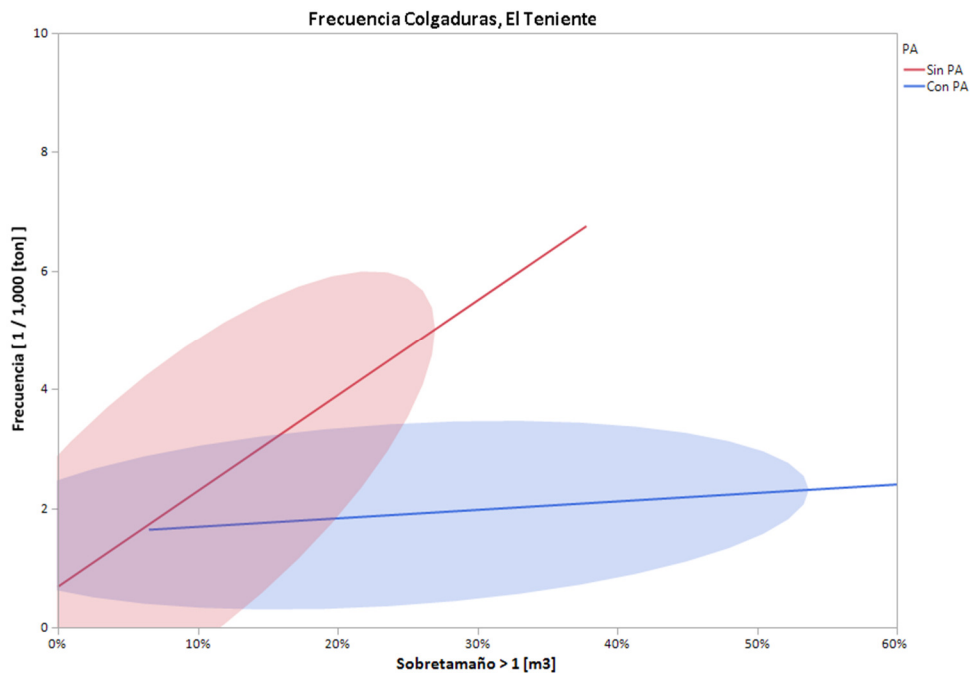


Figura 51: Modelo colgaduras, Malla 15x17.32, El Teniente

5.2.2. Mina El Salvador

Los valores de los parámetros ajustados para modelo de frecuencia de colgaduras de El Salvador se encuentran en la Tabla 12, al igual que los datos de fragmentación, las mediciones de colgaduras poseen gran variabilidad, como se parecía en el valor del coeficiente R² del ajuste.

$$Frecuencia\ de\ Colgaduras\ [1/1,000[ton]] = a \times ((Sobretamaño > 1[m^3])[\%]) + b \quad (11)$$

Tabla 12: Parámetros modelo colgaduras, El Salvador

Ajuste	Pendiente (a)	Coficiente de Posición (b)	R ²
Malla 15 x 15 Sin PA	15.08	14.63	0.03
Malla 15 x 15 Con PA	14.22	11.52	0.05

La Figura 52 presenta gráficamente los modelos para los sectores sin y con PA, junto con un elipsoide de un 90% de confiabilidad de los datos, para cada uno.

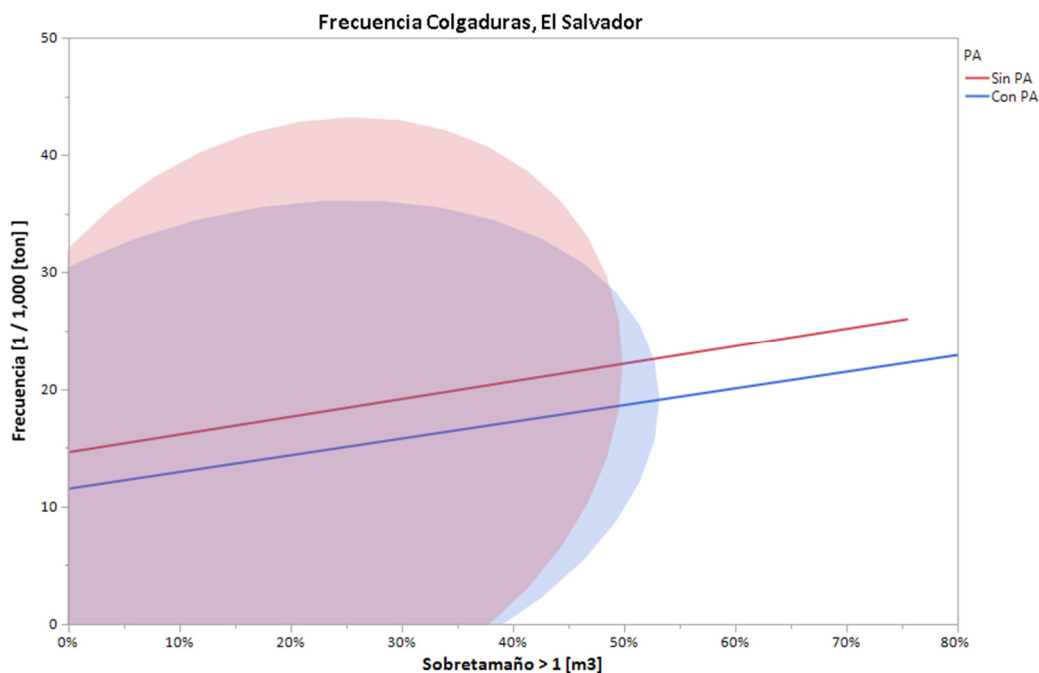


Figura 52: Modelo colgadas, El Salvador

A pesar de no existir grandes diferencias entre los modelos, se presenta una situación semejante a la estudiada en las mediciones de sobretamaños, donde el efecto del PA, sin ser determinante, producía una disminución, así como ocurre con la frecuencia de colgadas. Considerando estas condiciones, no se recomendaría la aplicación de PA, dado que significa una inversión que posiblemente no se vería reflejada en la producción como se desearía.

Dejando de lado la comparación de los modelos, al enfocarse en los valores que entregan; se observa que la frecuencia de colgadas comienza en valores mayores a una por cada 100 [ton] de extraídas lo que operativamente hablando es muy alto. Esto puede venir de la base de datos, sin embargo, no se posee información de su generación. Otra opción es que la metodología implementada para correlacionar los sobretamaños con las colgadas no sea la adecuada. Es por esto que se recomienda un análisis cualitativo, sobre uno cuantitativo de esta sección.

5.3. SISMICIDAD

Esta sección presenta el análisis de sismicidad para la mina El Teniente, a través de la metodología mencionada en la sección 4.3, considerando dos de los tres factores recomendados por Alcott (1998), el momento sísmico y la energía sísmica.

5.3.1. Momento Sísmico

El análisis de momento sísmico a través de la metodología propuesta en la sección 4.3, se presenta con cuatro mediciones para cada una de las litologías sin o con presencia de FH, correspondiente al valor máximo, suma, promedio y promedio de los logaritmos, esto porque se trabaja con valores de gran magnitud y el comportamiento real se puede ver opacado por la variabilidad de los datos.

Las Figura 53, Figura 54, Figura 55 y Figura 56 indican el comportamiento de las mediciones, en el orden indicado anteriormente, a medida que aumenta la altura extraída en los puntos de producción. Se mantiene la escala en los gráficos para una comparación más adecuada entre las distintas mediciones.

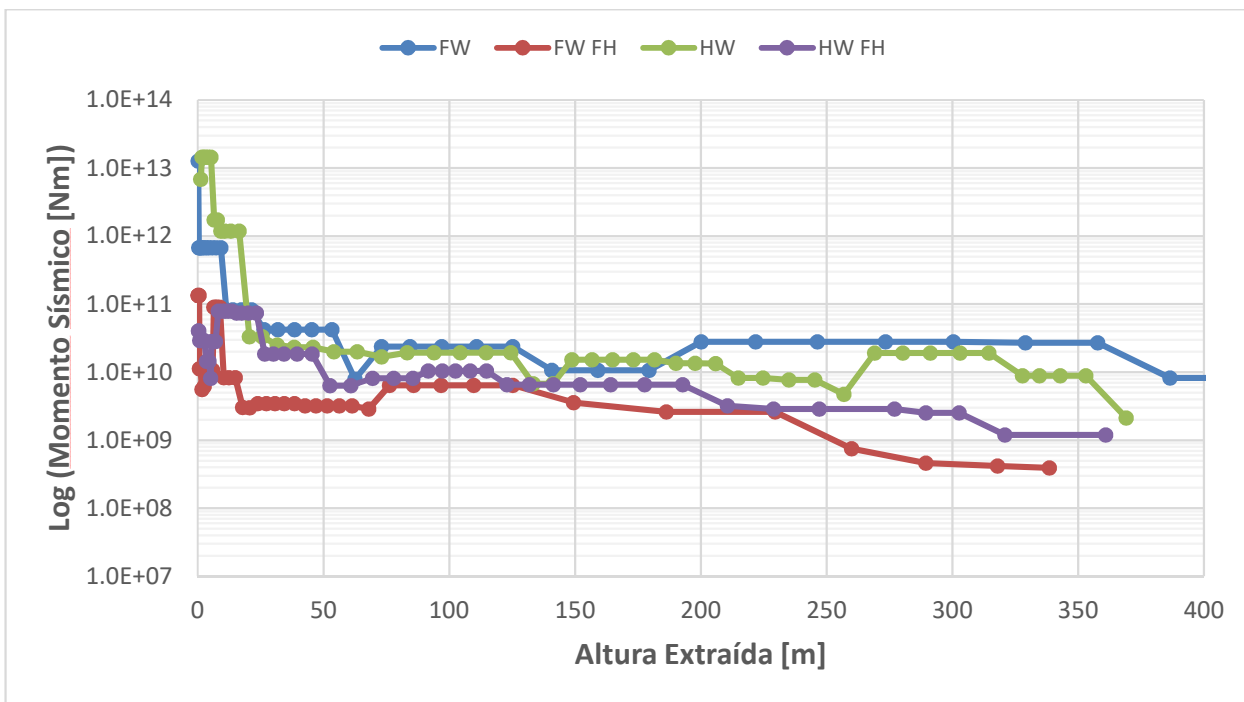


Figura 53: Momento sísmico máximo, El Teniente

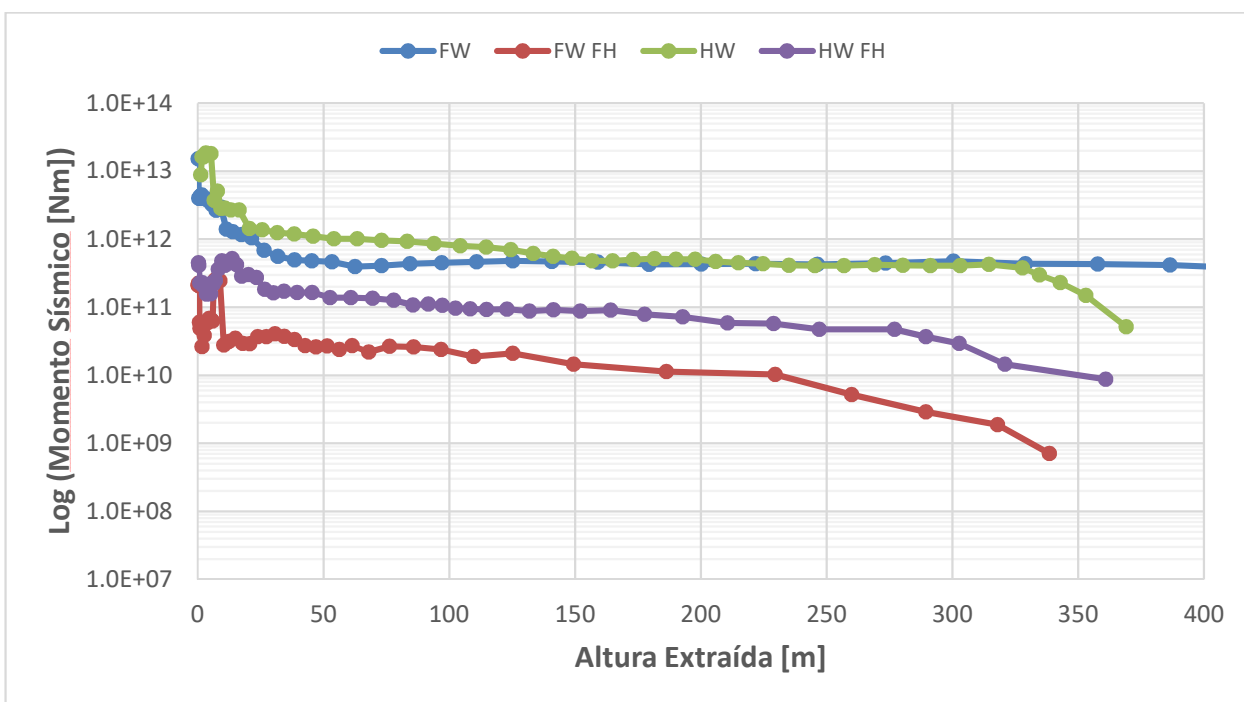


Figura 54: Momento sísmico suma, El Teniente

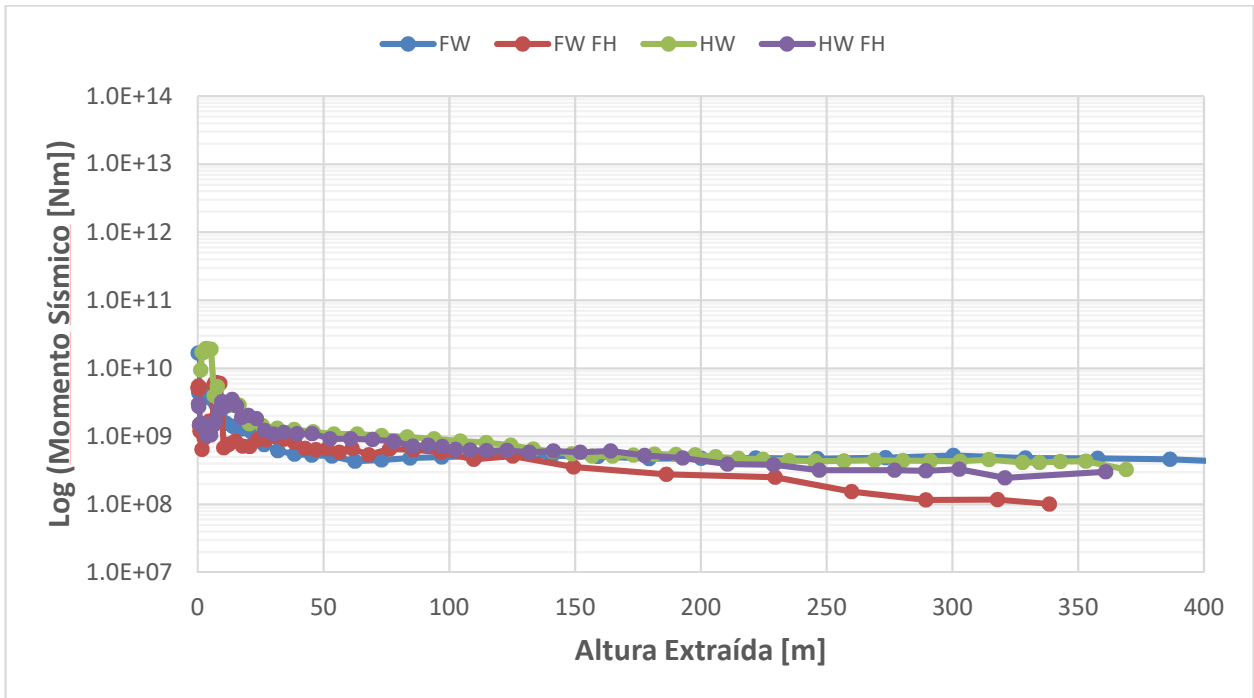


Figura 55: Momento sísmico promedio, El Teniente

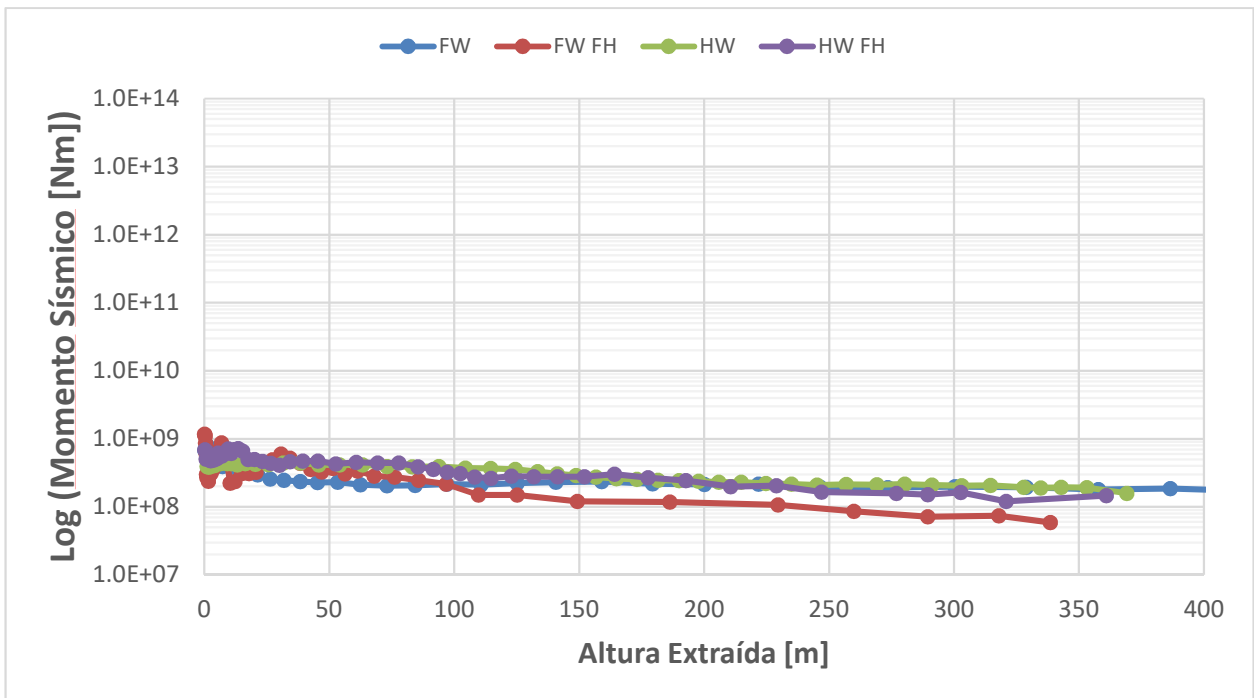


Figura 56: Momento sísmico promedio logaritmo, El Teniente

Los gráficos presentados anteriormente permiten identificar ciertos comportamientos claros:

1. Eventos con mayor momento sísmico son generados al comenzar la extracción decayendo rápidamente en los primeros 30 [m], para luego mantenerse

prácticamente constantes en las litologías sin FH, mientras que las con FH siguen disminuyendo los valores, pero de forma leve.

2. La suma de los momentos sísmicos es mayor para la roca sin presencia de FH, lo que es congruente con la teoría, que indica que las nuevas fracturas generadas permiten que el mineral se comporte de manera menos violenta.
3. Tanto el promedio de las mediciones, como el promedio de los logaritmos de éstas, es muy similar sin importar la presencia de FH, aunque las curvas que poseen terminan levemente bajo las que no.

Considerando los puntos expuestos al analizar el momento sísmico, se recomienda la técnica de fracturamiento hidráulico si el fin es disminuir la magnitud de los eventos, lo que significa menores riesgos para la seguridad de las personas y equipos, junto con disminución problemas operacionales.

5.3.2. Energía Sísmica

La energía sísmica es analizada de igual manera al momento sísmico considerando la misma metodología. Las Figura 57, Figura 58, Figura 59 y Figura 60, presentan las mediciones de energía máxima, suma, promedio y promedio de los logaritmos, respectivamente, manteniendo la misma escala entre las figuras.

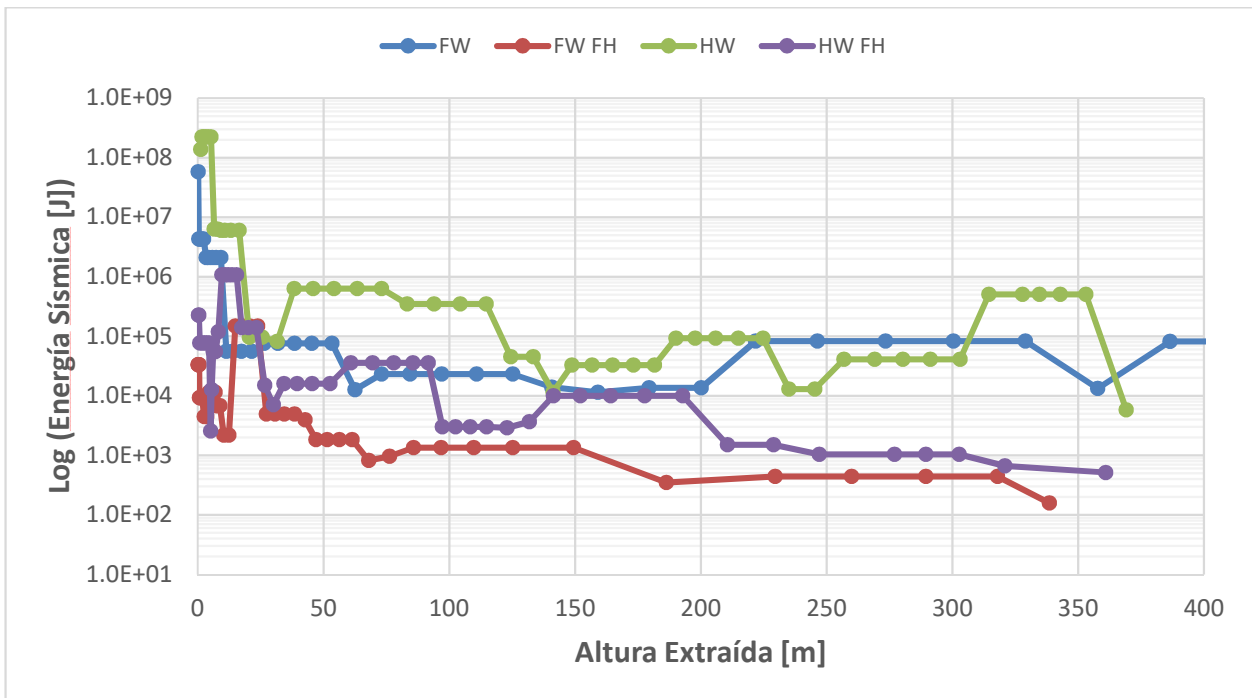


Figura 57: Energía sísmica máxima, El Teniente

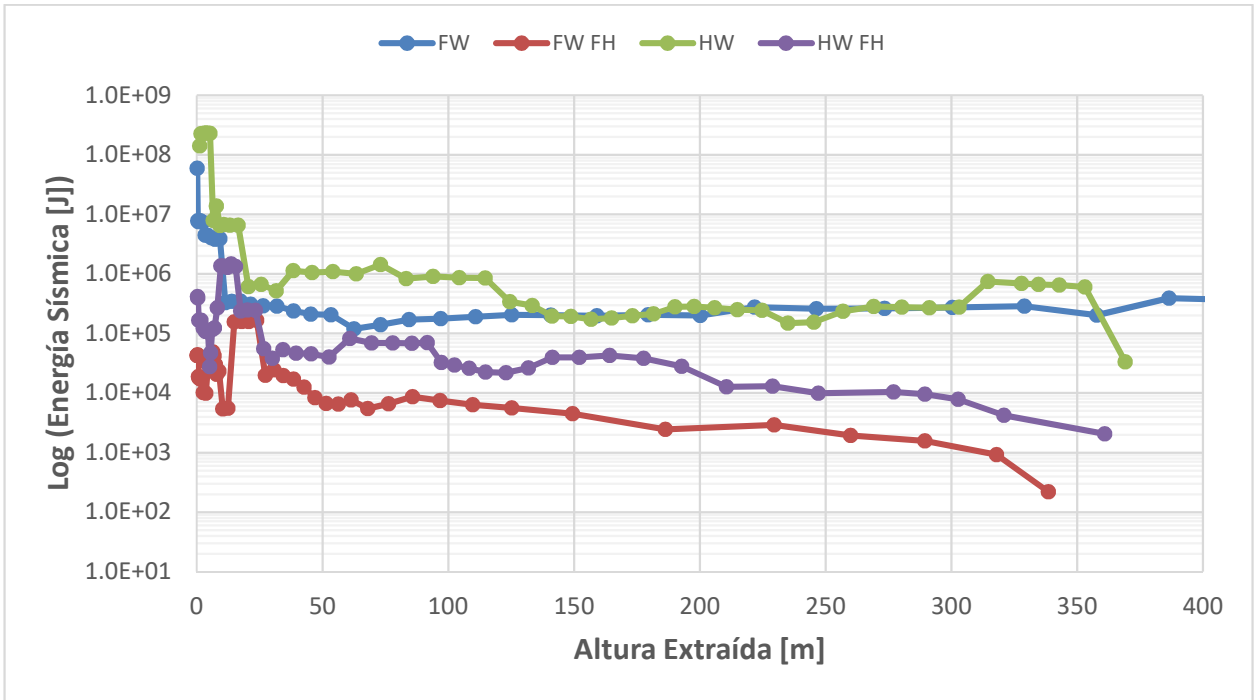


Figura 58: Energía sísmica suma, El Teniente

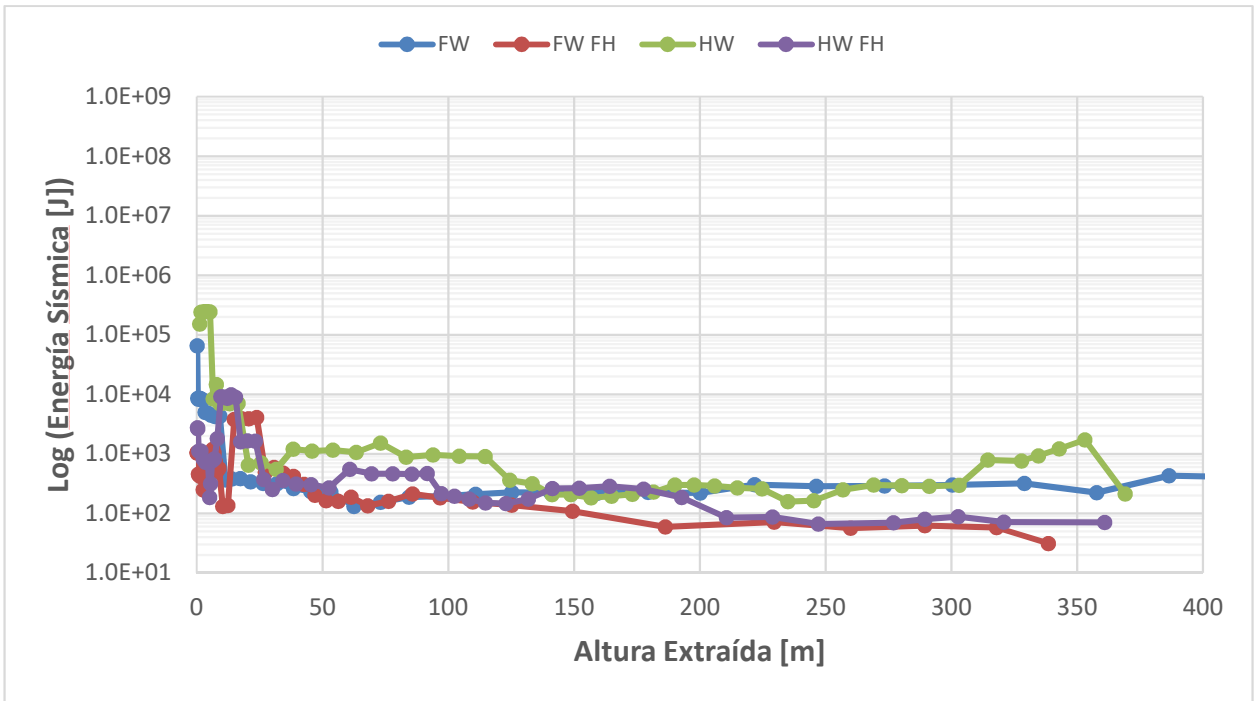


Figura 59: Energía sísmica promedio, El Teniente

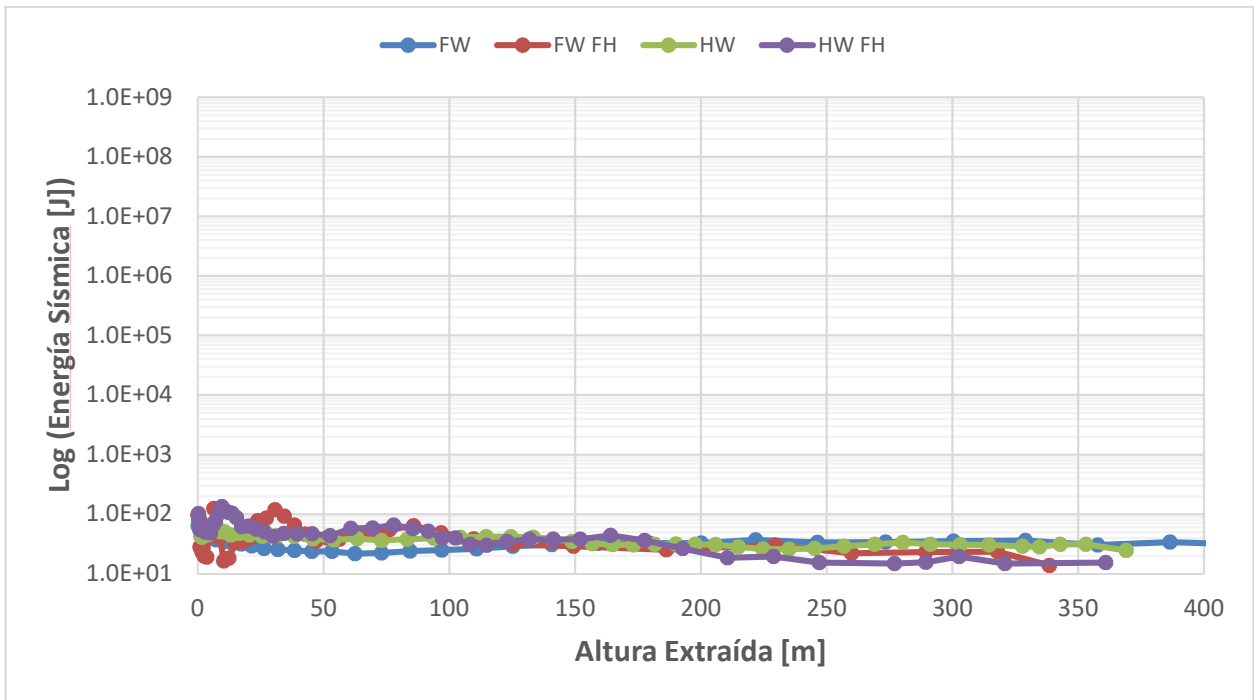


Figura 60: Energía sísmica promedio logaritmo, El Teniente

Es posible apreciar de los gráficos ciertos comportamientos para la energía sísmica que se asemejan a los observados en el momento sísmico, esto se debe a que ambos mediciones son proporcionales, como menciona Kanamori (1977). Así se observa que:

1. Los eventos sísmicos de mayor energía ocurren en los primeros metros de extracción (30 [m]), para luego mantenerse dentro de un rango relativamente constante, el cual es de menor magnitud para los sectores afectados por el FH.
2. También la suma de energía es menor para las litologías con FH, dado que ésta técnica permite que la roca libere energía a menores valores acumulados, en parte por las nuevas fracturas que permiten desplazamientos que originalmente no existirían.
3. Al considerar los promedios, los valores de energía sísmica son muy similares para las distintas litologías, pero a mayores alturas de extracción las curvas con FH se posición bajo las que no lo poseen.

En base a los puntos expuestos se recomienda realizar FH, si el objetivo es reducir la energía liberada en los eventos sísmicos, para evitar posibles estallidos de roca que ponen en peligro la seguridad de las personas y la continuidad de la producción, como ocurre al analizar el momento sísmico y su comportamiento al aplicar fracturamiento hidráulico.

5.3.3. Momento Sísmico vs Energía Sísmica

Las secciones 5.3.1 y 5.3.2 indican que el comportamiento del momento sísmico y la energía sísmica es muy similar. Para estudiar su correlación, se gráfica en la Figura 61, los valores máximos de uno en función del otro, junto con la relación de Kanamori (1977) que se puede aproximar como se muestra en la Ecuación 2. Además se indica el

ajuste de los datos a través de una recta con la misma estructura de la función de Kanamori en la Ecuación 8:

$$E[J] = \left(\frac{1}{2 \times 10^4}\right) \times M_o[Nm] \quad (2)$$

$$E[J] = \left(\frac{1}{9 \times 10^6}\right) \times M_o[Nm] \quad (8)$$

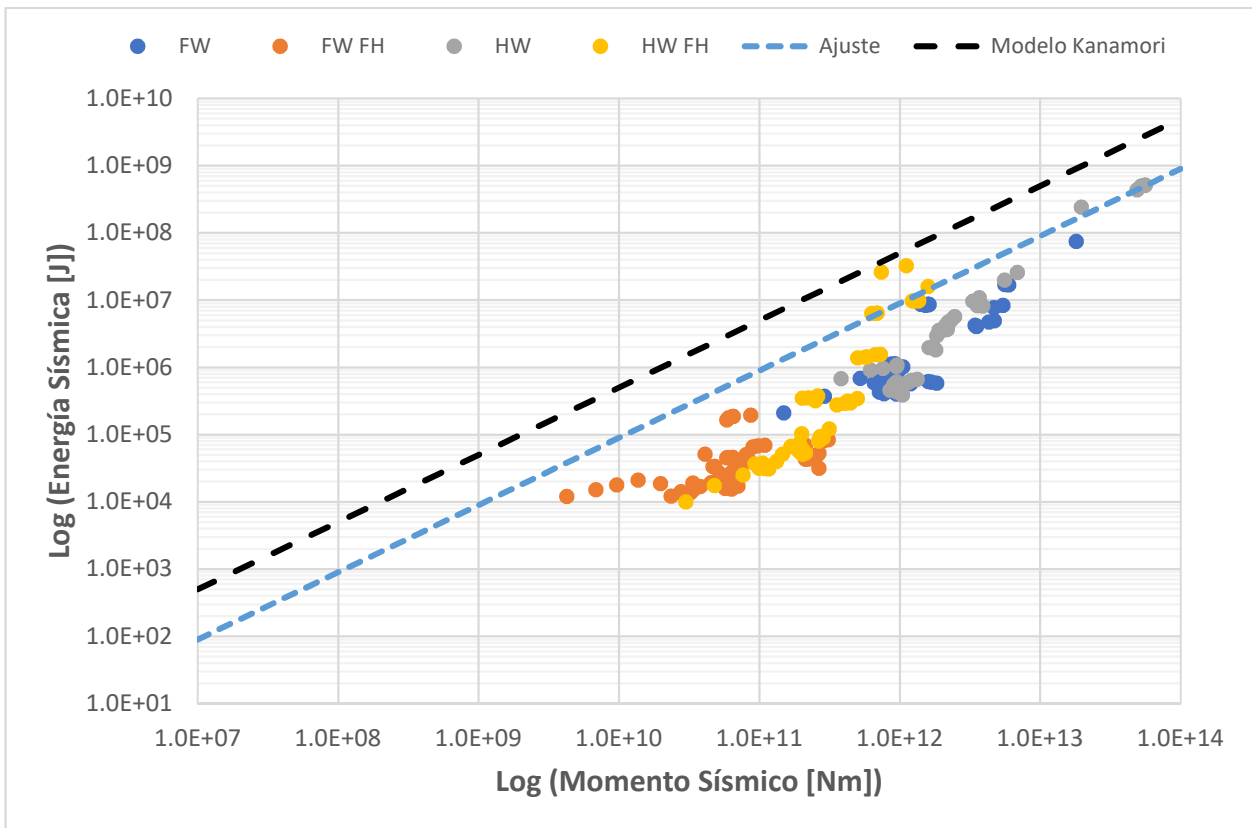


Figura 61: Momento sísmico vs energía sísmica (Máximos), El Teniente

Para analizar el comportamiento de los datos es necesario recordar que ambos ejes se encuentran en escala logarítmica, por lo que es útil apoyarse de las Ecuaciones 2 y 8, dado que, aunque las rectas se ven paralelas, poseen distintas pendientes con un coeficiente de posición igual a cero. Además, es posible visualizar que el ajuste se ve muy influenciado por los valores extremos, siendo estos los que mejor se correlacionan con la recta. Con lo anterior es posible concluir que la relación planteada por Kanamori para grandes terremotos no se cumple para eventos sísmicos generados por la acción de la minería, mientras que la relación entre el momento sísmico y la energía sísmica se ve poco afectada por la presencia de FH, pero si su magnitud, como se observó en las secciones previas.

5.4. SRM

5.4.1. Resultados sin FH

La Figura 62 presenta los resultados visuales de fragmentación de la muestra sin realización de FH sometida a las trayectorias de esfuerzos SP1 y SP2. Las curvas granulométricas generadas se pueden observar en la Figura 63.

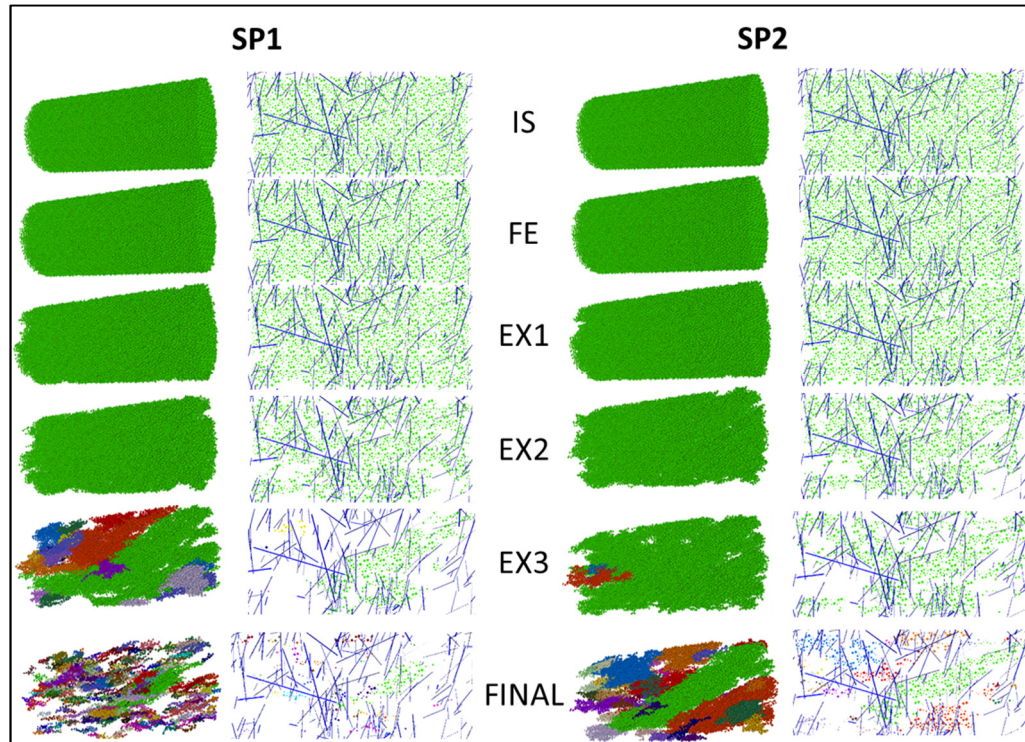


Figura 62: Comparación trayectorias de esfuerzos SRM (Vallejos & Suzuki, 2014)

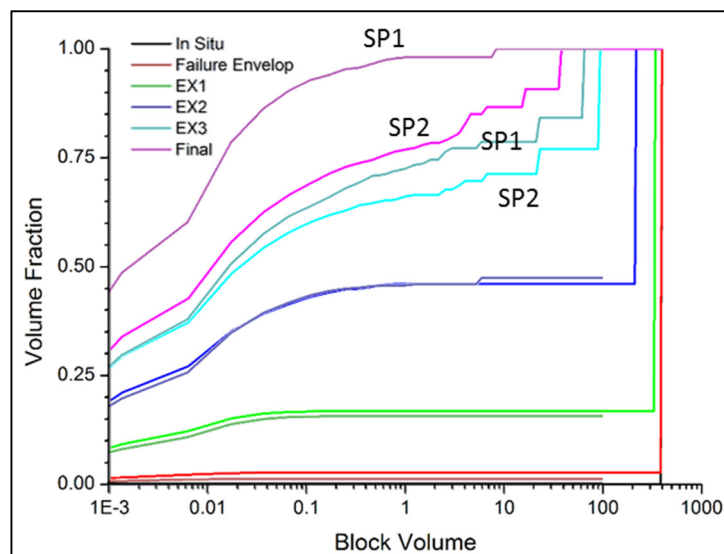


Figura 63: Curvas granulométricas trayectorias de esfuerzo SRM (Vallejos & Suzuki, 2014)

De las figuras anteriores, se observa que en la situación final la trayectoria de esfuerzos SP1 genera una granulometría más fina que la producida por la SP2 al considerar un

mismo arreglo estructural. Esto se debe a que la trayectoria SP2 se encuentra sometida a un confinamiento inicial mayor.

5.4.2. Resultados con FH

Para evaluar el impacto del FH en la fragmentación primaria se generan fracturas horizontales en la muestra sintética para luego someterla a las trayectorias de esfuerzos SP1 y SP2. La Figura 64 indica la evolución visual de la fragmentación en el modelo, además del estado final obtenido en el caso sin FH. Las curvas granulométricas para las trayectorias de esfuerzos SP1 y SP2 se presentan en las Figura 65 y Figura 66, respectivamente, junto con las curvas sin presencia de FH.

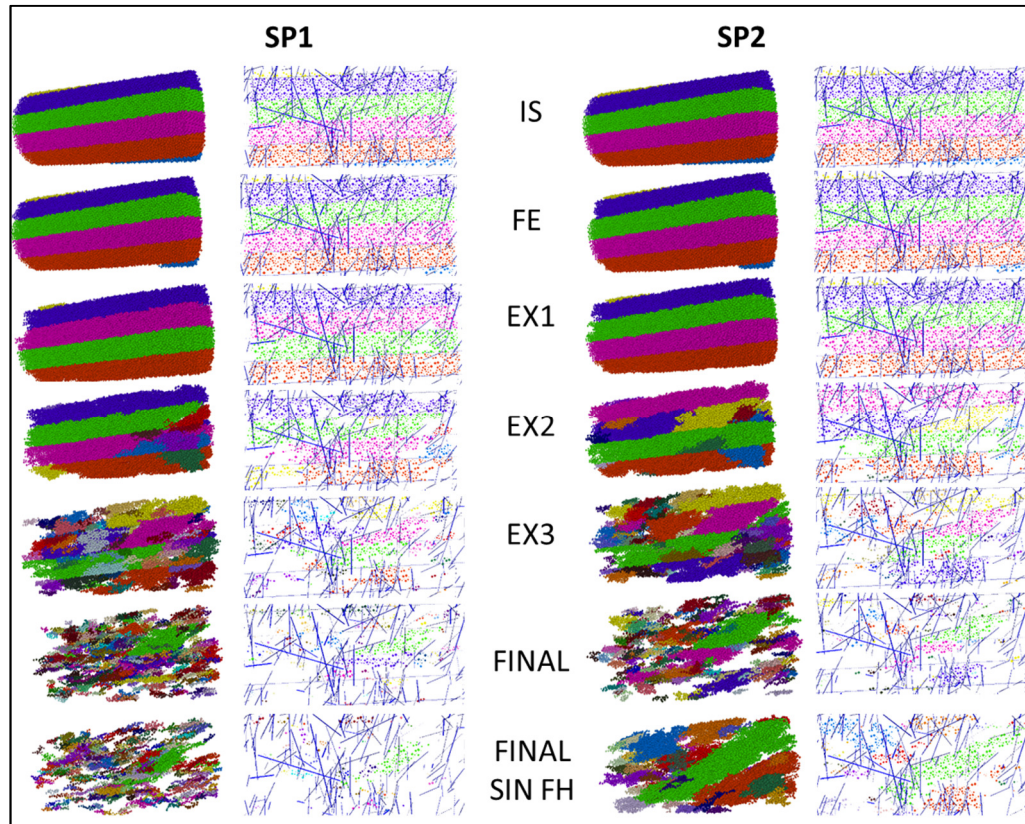


Figura 64: Comparación trayectorias de esfuerzo SRM con FH (Vallejos & Suzuki, 2014)

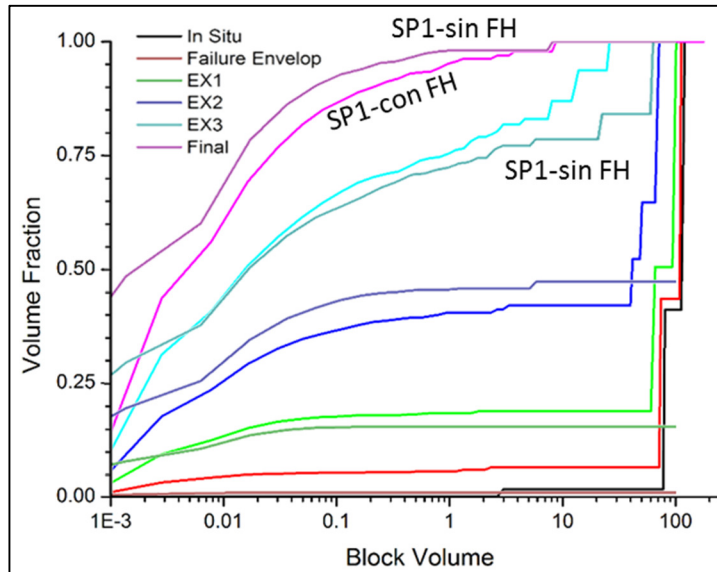


Figura 65: Curvas granulométricas SRM con FH trayectoria SP1 (Vallejos & Suzuki, 2014)

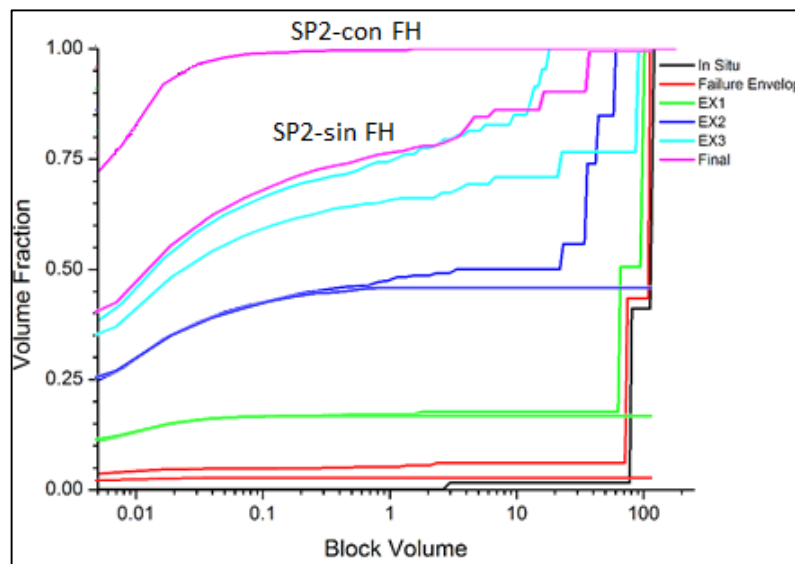


Figura 66: Curvas granulométricas SRM con FH trayectoria SP2 (Vallejos & Suzuki, 2014)

De las figuras anteriores se observa que el impacto del FH en la fragmentación primaria se ve afectada por la trayectoria y condición de esfuerzos inicial. Para el caso de la trayectoria de esfuerzos SP1, la fragmentación final es similar para los casos sin y con FH. Para el caso de la trayectoria de esfuerzos SP2, se observa que la fragmentación es significativamente más fina el caso con FH.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta tesis ha permitido obtener las siguientes conclusiones generales considerando los resultados de los análisis realizados para El Teniente y El Salvador, respecto a las distintas técnicas de preacondicionamiento:

- El fracturamiento hidráulico pareciera ser efectivo al momento de reducir los sobretamaños en base a las mediciones en terreno, sin embargo, la simulación indica que su efectividad se ve afectada por la trayectoria de esfuerzos a la que se somete la roca, por lo que mayores estudios lograrían concluir de manera más potente el impacto en este aspecto. Por otro lado, su efecto reduce la frecuencia de colgaduras y la magnitud de los eventos sísmicos, lo que reduce la probabilidad de situaciones adversas que pueden disminuir la producción del sector y generar costos extras.
- El debilitamiento dinámico con explosivos como acompañamiento del fracturamiento hidráulico asegura una considerable disminución de la granulometría a extraer en el nivel de producción junto con una reducción importante de la frecuencia de colgaduras. Se recomienda estudiar su impacto asociado a la sismicidad de ser factible para contrastarlo con los resultados obtenidos al utilizar únicamente FH.

En esta sección se presentan las distintas conclusiones obtenidas de los resultados y análisis asociados para las distintas secciones, junto con recomendaciones respecto a mejoras o trabajos a realizar a partir de estos.

6.1. BASE DE DATOS Y ANÁLISIS

Es posible concluir del análisis de las bases de datos que para un P_{32} constante, a mayor altura extraída, menores son los sobretamaños. Sin embargo, el efecto se ve reducido cuando la extracción va aumentando; siendo más notorio en el primer 30% de extracción. Además, se concluye que ha mayor P_{32} por la mayor presencia de fracturas, el sobretamaño disminuye.

En función del análisis de las bases de datos, se recomendaría recopilar más información para poseer una mayor cantidad de mediciones de colgaduras y sobretamaños, junto con distintas calidades de roca y mallas de producción, con el fin de poder diferenciar en base a una metodología similar a la utilizada el efecto de la malla utilizada sobre el tamaño de los bloques y la frecuencia de colgaduras, dado que para El Teniente coincide que la roca con menor P_{32} corresponde a la malla distinta, impidiendo aislar el efecto de cada uno de los elementos por separado.

6.2. MODELO SOBRETAMAÑO

Al observar los resultados de los modelos de sobretamaño, cuesta generalizar el efecto real del FH en el tamaño de los bloques. Aunque por un lado se ve una reducción en El Salvador, en el otro, debido a la reducida cantidad de mediciones existentes para El Teniente, no es posible concluir, pero pareciera que la técnica de fracturamiento hidráulico es efectiva al momento de reducir la granulometría recibida en el nivel de producción.

Sin embargo, al observar el efecto del FH en conjunto con DDE, la reducción de sobretamaños es considerable. Por lo que se recomienda la implementación de estas técnicas, si se desea disminuir las dimensiones de la roca en el punto de extracción.

6.3. MODELO COLGADURAS

El análisis de los modelos de colgaduras, indica que el efecto de preacondicionamiento permite disminuir la frecuencia de colgaduras, siendo el impacto notorio en El Teniente. Por otro lado, aunque se ve una baja reducción de la frecuencia en El Salvador, los valores hacen sospechar de un error en la base de datos o metodología implementada para correlacionar los sobretamaños a las colgaduras, por lo que se recomienda omitir el análisis para la conclusión y generar uno nuevo utilizando otra metodología o una verificación de la información para determinar la confiabilidad de esta.

En función de lo mencionado, se recomienda la realización de PA para disminuir el número de colgaduras, permitiendo un aumento en la producción y disminución de costos asociados a la reducción secundaria y remanaje de material correspondiente.

Dada la clasificación de los datos, los modelos generados para El Teniente, logran identificar el impacto de las mallas de extracción en la frecuencia de colgaduras, siendo menor para la de 15 x 20 [m x m] que la de 15 x 17.32 [m x m]. Un factor a considerar es que la de mejor desempeño es aquella que posee el menor P_{32} , lo que hace pensar en una mejor calidad de roca, pero dado que corresponde a una única litología y sector, se recomienda replicar el análisis con otras para corroborar la conclusión obtenida. Sin embargo, bajo el contexto de la información de esta tesis se recomienda la extracción del mineral utilizando una malla de 15 x 20 [m x m] por sobre una de 15 x 17.32 [m x m].

6.4. SISMICIDAD

El análisis de la sismicidad para el sector de la mina El Teniente estudiado indica que los eventos de mayor magnitud, considerando tanto momento sísmico como energía sísmica, ocurren al extraer los primeros metros de la columna de mineral (~30 [m]), decayendo rápidamente hasta mantenerse en un valor relativamente constante. Este comportamiento se observa para las dos litologías, sin importar si se aplica fracturamiento hidráulico o no. Sin embargo, la utilización de esta técnica de preacondicionamiento, aunque no afecta el comportamiento, sí disminuye la magnitud de los eventos registrados.

El estudio de la sismicidad permite visualizar la relación proporcional que existe entre el momento sísmico y la energía sísmica, no obstante, difiere de la presentada por Kanamori (1977) para grandes sismos, por lo que se puede concluir de manera preliminar que la relación se ve distorsionada por efecto de la minería. Además, se aprecia que el FH no afecta la relación, pero sí su magnitud, como se observa previamente en el análisis independiente de las variables.

En función de las conclusiones de esta sección, se recomienda la implementación del fracturamiento hidráulico cuando se desea reducir la magnitud de los eventos sísmicos, para disminuir la probabilidad de estallidos de roca por grandes concentraciones de esfuerzos, que ponen en riesgo la integridad de las personas, equipos, estructuras y producción de la faena.

6.5. SRM

El estudio realizado utilizando SRM indica que las simulaciones de los escenarios usados sólo permiten obtener conclusiones cualitativas, dado que el ensayo de fragmentación es simplificado y debe ser mejorado si se desea generar una herramienta que permita estimar la fragmentación de manera cuantitativa y confiable.

Otro aspecto a considerar es que la trayectoria de esfuerzos, la que depende de la geometría de propagación del *caving*, tiene un impacto significativo en la fragmentación final del macizo rocoso sintético, por lo tanto, se debe determinar previamente y con la mayor cantidad de fundamentos antes de aplicar la técnica, para producir resultados acordes con el contexto modelado.

Al momento de evaluar el efecto del FH en la fragmentación primaria, se observa que puede generar una disminución en la curva granulométrica de la unidad geotécnica en función de la trayectoria de esfuerzos implementada, resultado que se asemeja al generado por el modelo de fragmentación al estudiar los casos con PA que sólo poseen FH, en que el efecto no queda claramente definido.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aki, K. (1967). Scaling law of seismic spectrum. *Journal of Geophysical Research*, 72(4), 1217-1231.
- Aki, K. (1972). Earthquake mechanism. *Tectonophysics*, 13(1-4), 423-446.
- Alcott, J. M., Kaiser, P. K., & Simser, B. P. (1998). Use of microseismic source parameters for rockburst hazard assessment. In *Seismicity Caused by Mines, Fluid Injections, Reservoirs, and Oil Extraction* (pp. 41-65): Springer.
- Barbour, S. L., & Krahn, J. (2004). Numerical modelling—Prediction or process. *Geotechnical News*, 22(4), 44-52.
- Brady, B. H. (2004). *Rock mechanics: for underground mining*: Springer Science & Business Media.
- Brzovic, A., & Herrera, S. (2011). “Assessing Geological Vein Size and Intensity Using Discrete Fracture Network Modelling at the El Teniente Mine, Chile.” In 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association. In.
- Brzovic, A., Hurtado, J. P., & Marin, N. (2014). Intensity Rock Mass Preconditioning and Fragmentation Performance at the El Teniente Mine. Proceedings of the 3rd International Symposium on Block and Sublevel Caving, Santiago, Chile. In.
- Brzovic, A., & Schachter, P. (2013). Rock Mass Geotechnical Characterization based on the Weak Stockwork Veins at the El Teniente Mine. 3rd International Seminar on Geology for the Mining Industry. Ed. Inere Aracena, Antofagasta, Chile, Junio. In.
- Brzovic, A., & Villaescusa, E. (2007). “Rock Mass Characterization and Assessment of Block-Forming Geological Discontinuities during Caving of Primary Copper Ore at the El Teniente Mine, Chile.” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44 (4): 565–83. In.
- Bull, J. W. (2003). *Numerical analysis and modelling in geomechanics*: CRC Press.
- Cerrutti, C. (2008). Guía preliminar de criterios de diseño y parámetros de planificación con acondicionamiento. Informe IM2 P 45-07-IP-004-V0. Codelco Chile. In.
- Cerrutti, C., Contreras, S., Molina, R., Gálvez, F., Morales, R., & Espinoza, R. (2006). Validación de la tecnología de acondicionamiento en roca primaria con fracturamiento hidráulico en División El Teniente. Informe SIT 010-2006. Codelco Chile. In.
- Chacón, E., Apablaza, R., & Quiñones, L. (2003). Estudio de metodología de acondicionamiento de macizos rocosos para hundimiento. Informe Final IM2-18/99-73/01. Codelco Chile. In.

- Cundall, P. (1971). A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems. *Proc. Symp of the International Society for Rock Mech. Paper No. II-8., 1.*
- Cundall, P., & Hart, R. (1992). Numerical modelling of discontinua. *Engineering Computations, 9(2)*, 101 - 113.
- Cundall, P., & Strack, O. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *29(1)*, 47 –65.
- Dershowitz, W. (1985). "Rock Joint systems", PhD Thesis, Mass. Inst. of Technol., Cambridge. In.
- Elmo, D. (2006). *Evaluation of a hybrid FEM/DEM approach for determination of rock mass strength using a combination of discontinuity mapping and fracture mechanics modelling, with particular emphasis on modelling of jointed pillar.* (Ph.D.), PhD Thesis, University of Exeter,
- Gaete, M. (2015). *Impacto del campo de esfuerzos en el fracturamiento hidráulico.* Universidad de Chile,
- Hanks, T. C. (1977). Earthquake stress drops, ambient tectonic stresses and stresses that drive plate motions. In *Stress in the Earth* (pp. 441-458): Springer.
- Hurtado, J. P., & Brzovic, A. (2014). "Análisis de Fragmentación Histórica de Mina El Teniente 1993-2013." Codelco Chile Division El Teniente, Internal report GRMD-SGL-INF-069-2014. In.
- Israelsson, J. I. (1996). Short descriptions of UDEC and 3DEC. *Developments in geotechnical engineering, 79*, 523-528.
- ITASCA. (2008). *PFC3D (Particle Flow Code en 3 dimensiones). Versión 4.0.* Retrieved from Minneapolis.
- Jing, L. (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(3)*, 283-353. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00013-3
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of geophysical research, 82(20)*, 2981-2987.
- Kanamori, H. (1983). Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics, 93(3-4)*, 185-199.
- Kanamori, H., & Anderson, D. L. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America, 65(5)*, 1073-1095.
- Laubscher, D. (1994). Cave mining-the state of the art. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 94(10)*, 2279.

- Mas Ivars, D. (2010). *Bonded Particle Model for jointed rock mass*. PhD Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Estocolmo, Suecia.
- Mas Ivars, D. (2011). Synthetic Rock Mass testing with PFC3D. Handbook and Workshop.
- Mas Ivars, D., Potyondy, D., Pierce, M., & Cundall, P. (2008). The Smooth-Joint Contact Model (Abstract). *Proc. WCCM8 - ECCOMAS. Paper No. a2735*.
- Mendecki, A., Van Aswegen, G., Durrheim, R., & Ortlepp, W. (2001). Seismic monitoring in mines: selected terms and definitions. *Rockbursts and Seismicity in Mines-RaSiM5*, 5(563-570), 2.
- Millan, J., Brzovic, A., & Seguel, J. (2015). Geotechnical Model for the El Teniente Primary Rock Mass. 4rd International Seminar on Geology for the Mining Industry. Ed. Inere Aracena, Antofagasta, Chile, Julio. In.
- Nolte, K., & Economides, M. (1991). Fracture design and validation with uncertainty and model limitations. *Journal of Petroleum Technology*, 43(9), 1147-1155.
- Omori, F. (1894). On after-shocks.
- Omori, F. (1894). *On the after-shocks of earthquakes* (Vol. 7): The University.
- Orowan, E. (1960). Mechanism of seismic faulting. *Geological Society of America Memoirs*, 79, 323-346.
- Thatcher, W., & Hanks, T. C. (1973). Source parameters of southern California earthquakes. *Journal of geophysical research*, 78(35), 8547-8576.
- Toro, J. (2003). Geología ICO, El Salvador In.
- Trueman, R., Pierce, M., & Wattimena, R. (2002). Quantifying stresses and support requirements in the undercut and production level drifts of block and panel caving mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(5), 617-632.
- Utsu, T., & Ogata, Y. (1995). The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. *Journal of Physics of the Earth*, 43(1), 1-33.
- Valderrama, C., & Sáez, E. (2011). Modelación y análisis paramétrico de la propagación de fracturas hidráulicas.
- Vallejos, J. A., & Suzuki, K. (2014). Informe Final: Técnica de Modelamiento Numérico de Macizos Rocosos Sintéticos. Contrato N° 4501380227. In.
- Zamora, Á., Catro, C., & Contreras, S. (2006). Evaluación de Prueba de Preacondicionamiento en Roca Primaria de División Salvador, Proyecto IM2-IC14-04 Salvador. In.

