



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

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FLUJO GRAVITACIONAL EN MINERÍA DE PANEL
CAVING**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

PATRICIO ANDRÉS VERGARA ELGUETA

**PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
PABLO PAREDES MORALES
MANUEL MONTECINO MOLINA**

**SANTIAGO DE CHILE
2016**

RESUMEN

Para los métodos de explotación por Block/Panel Caving, el estudio del flujo gravitacional resulta fundamental dado que el éxito de la operación se basa en el efectivo flujo de mineral hacia los puntos de extracción. Es así como parámetros de diseño del nivel de producción, secuencia de extracción, plan minero y en consecuencia la recuperación del mineral, serán afectados por el flujo gravitacional. Considerando lo anterior, un mejor entendimiento del flujo gravitacional permitirá mejorar la eficiencia y en consecuencia la producción de una mina explotada por hundimiento.

La profundización de los yacimientos y la explotación llevada a cabo por niveles permiten que sobre las columnas extraíbles de nuevos sectores productivos, se ubique material quebrado remanente, si se suma el hecho de que la búsqueda de minimizar área utilizada por una faena puede llevar a depositar material estéril de granulometría fina sobre el cráter de subsidencia de la mina subterránea, se generan condiciones de borde para la operación que a la fecha no han sido estudiadas.

El objetivo de esta investigación es realizar un estudio de flujo gravitacional en minería de Panel Caving, considerando condiciones de borde que pueden ser encontradas en una operación real, para esto se realizan experimentos en un modelo físico a escala (1:200).

Con el fin de cumplir con el objetivo planteado se realizan 3 experimentos de flujo gravitacional para representar la configuración de panel Caving (PC). Se busca mediante los experimentos determinar la influencia sobre el flujo gravitacional de la secuencia de extracción y las condiciones de tiraje (ideal y no ideal) en una configuración que considera para la columna extraíble, tres zonas caracterizadas por sus distribuciones de tamaño; mineral in-situ, quebrado remanente y estéril. En todos los experimentos se busca cuantificar la interacción entre zonas de distinta granulometría, además la influencia sobre la recuperación y flujo de reservas ubicadas sobre una zanja acceso. Se utiliza en todos los experimentos material fragmentado, por lo que se asume a escala mina, que el hundimiento ya se ha propagado hasta superficie.

Para medir las variables de interés se utilizaron marcadores que fueron agregados al modelo físico a escala, líneas de flujo que permitieran identificar las zonas de movimiento y el comportamiento de la interfaz entre distintos materiales. Se utilizó en los experimentos material fragmentado, correspondiente a estéril de botadero, material quebrado remanente y mineral in-situ, proveniente de una mina explotada mediante PC, este material fue escalado (1:200) a partir de curvas de fragmentación características de un PC. La interacción entre los distintos materiales cargados en el modelo físico, fueron cuantificados en términos del punto de entrada de Dilución (PED) y punto entrada de Quebrado (PEQ).

En general los resultados de los experimentos indican que las condiciones de extracción y la secuencia empleada tienen influencia sobre la interacción de zonas de distinta granulometría, pudiendo disminuir el PED para un sector donde existen puntos que son sobre-extraídos o presentan una tasa de extracción mayor a la de sus vecinos. Junto con esto se evidencia la importancia de mantener un adecuado control de tiraje en un PC, dado que de no respetarse las diferencias de tonelaje entre columnas se pueden originar entradas de dilución temprana como consecuencia del aumento del ángulo de extracción. La principal hipótesis que se desprende de esta investigación es que no solo el *rilling* producto de la propagación del Caving contribuye a adelantar la entrada de dilución, en particular la dilución lateral, también puede tenerse dilución temprana producto de la percolación lateral favorecida por ángulos de extracción pronunciados.

ABSTRACT

In Block / Panel Caving methods, the study of gravity flow would be of paramount importance while the success of the operation is based on successful flow of mineral through drawpoints. Geometrical parameters and design aspects of production level, as well as extraction sequence, mine planning and mining recovery are affected by gravitational flow. Therefore, better understanding of gravity flow leads to improve all subsequence operations. For this reason, many studies have been carried out to improve understanding of gravity flow mechanisms.

Due to the importance of the gravitational flow in Block / Panel Caving mines, an experimental study was performed by applying scaled physical models to analyse the flow behaviour under different conditions, preferential flow and interaction height of movement zone.

The physical models, scaled 1:200, were filled in three various thickness levels with different fragmented materials representing three ore zones named as: Ore, Broken zone and Waste. Besides, one loading cross cut was assumed as an access crosscut with no extraction from its related drawpoint and the subsidence zone was evaluated during an ideal and operating mine planning. In order to measure the main variables related to gravity flow, painted markers were added inside the physical models to help to identify movement zones and behaviour of the interface between different ore zones.

Experiments showed (under the evaluated conditions) that there is no preferential flow of fine material due to the wide range of particle sizes and the great distance between the production level which acts as a barrier. Since it was made the extraction considering over-extraction column height removable respect to the distance between the sterile and the output level does not exceed 60 [m]. This showed that the percolation would influence dilution when different sizes of material exist in a draw column. In addition, it was observed that the sequence and flow angle given the progress of the Panel as well as over extraction reduced the entrance of broken material.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a mi familia, a las mujeres que me han dado la vida y han permitido que todo sea posible, Ana, Iris, María; mamá, tía y abuelita, siempre les agradeceré todo lo que han hecho por mí. Tío Juan y Tío Patricio, gracias por su cariño y apoyo. Hoy todo es posible gracias a ustedes.

Gracias a mis amigos, aquellos que han sido un pilar y que han estado en cada momento de este proceso. Carlos, Ginobilli, Javier, Monje, Marco y Perro, muchas gracias por ayudar a que las cosas sean más fáciles, no me alcanzará la vida para retribuirles. A mis amigos y compañeros de carrera, con quien tuve el agrado de compartir aula, trabajos, horas de estudio y carretes: Armijo, Chamo, Carol, Irribarra, Isaac, Jaime, Loco loco, Nacho, Pestañin y Villaseca. A todos ustedes, su amistad y cariño son sin duda uno de los mayores logros de la etapa universitaria.

A mis compañeros y amigos que forman parte de BCLab: Cami, Carito, Mena, Doli, David, Mati y René les agradezco cada momento compartido, cada alegría y cada anécdota. Por la ayuda brindada, muchas gracias.

A mi profesor guía, Raúl Castro, infinitas gracias por haber confiado en mí y permitirme ser parte de este proyecto, por su rigurosidad y paciencia para que este trabajo sea lo que es. De igual modo agradezco a Pablo Paredes, cuyos consejos y recomendaciones permitieron que llegara a buen puerto, gracias por la buena disposición y estar siempre disponible ante mis inquietudes. Al señor Manuel Montecino, por revisar este trabajo y ser un aporte para mejorarlo.

Agradezco a todos los profesores y a todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron a mi formación y han sido una inspiración, especialmente: Juan Alberto Montes, Benjamín Galdames, gracias por creer en mí y permitirme contribuir a la docencia. Al profesor Gonzalo Montes-Atenas, por estar siempre dispuesto a ayudarme. Profesores, gracias por motivarme e inspirarme a ser un buen profesional.

A la familia Lorca Contreras, Don Carlos y Tía Yenia, gracias por abrirme las puertas de su hogar y hacerme sentir como un hijo más.

Finalmente a mi compañera y mi cómplice, por su amor incondicional y constante apoyo. Yenia, tú y nuestro hijo forman el proyecto más importante del que puedo ser parte, Muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Introducción.....	9
1.2. Motivación del Trabajo.....	10
1.1.....	10
1.2.....	10
1.3. Objetivos.....	11
1.3.1. Objetivo General.....	11
1.3.2. Objetivos Específicos.....	11
1.4. Alcances.....	12
1.5. Metodología de la investigación.....	13
1.6. Estructura de la memoria.....	14
2. ANTECEDENTES	15
2.1. CASO DE ESTUDIO: Mina Esmeralda Sur, División El Teniente CODELCO.....	15
2.1.1. Mina Esmeralda.....	15
2.1.2. Botadero Rajo Sur.....	16
2.1.3. Curvas de Fragmentación para el Caso de Estudio.....	17
2.2. Conceptualización problemática.....	18
2.3. Teoría del Flujo Gravitacional y Modelos físicos.....	19
2.4. Teoría de Mezcla y Percolación entre partículas.....	20
2.4.1. Mezcla de Partículas.....	21
2.4.2. Percolación de partículas en minería de Caving.....	21
2.5. Minería de Caving y dilución.....	26
2.5.1. Control de Tiraje y Ángulo de Extracción en Panel Caving.....	27
2.6. Conclusiones.....	29
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	30
3.1. Similitud.....	30
3.2. Escala.....	31
3.3. Diseño Modelo Físico.....	31
3.3.1. Sector de Estudio (Prototipo).....	32
3.3.2. Diseño Maqueta a escala (1:200).....	32
3.4. Construcción Equipo experimental.....	34
3.5. Materiales.....	35
3.5.1. Caracterización: Uniformidad y Curvatura.....	35
3.6. Procedimiento Experimental.....	36
3.7. Resultados esperados.....	37
3.8. Variables y mediciones.....	38
3.9. Conclusiones y discusión.....	39
4. MODELAMIENTO FÍSICO: CALLE 35 - MINA ESMERALDA SUR	40
4.1. Materiales.....	40
4.1.1. Caracterización material.....	40
4.2. Condiciones de Borde.....	41
4.2.1. Número de puntos de extracción:.....	41
4.2.2. Plan de Extracción.....	42
4.2.3. Altura de Columna in-situ, extraíble y de Quebrado.....	42

4.2.4.	Criterio operacional	44
4.3.	Plan experimental	44
4.3.1.	Experimento I: Plan Programado	44
4.3.2.	Experimento II: Plan Realista.....	45
4.3.3.	Experimento III: Plan Realista, Modelo Extendido.....	45
4.4.	Conclusiones	47
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA ETAPA EXPERIMENTAL	48
5.1.	Experimento de Flujo I: Plan programado.....	48
5.2.	Experimento de Flujo II: Plan realista	50
5.3.	Experimento de Flujo III: Plan realista, modelo extendido	51
5.4.	Análisis de Resultados Experimentos de Flujo I y II.....	53
5.4.1.	Plan de extracción y Angulo de extracción	54
5.4.1.	Zanja no incorporada en la Extracción	56
5.5.	Análisis de Resultados Experimento III	57
5.5.1.	Plan de extracción y Angulo de extracción (Experimento III).....	58
5.5.2.	Punto de Entrada de Quebrado (PEQ) y Estéril (PED)	59
5.5.3.	Altura de interacción sobre la Zanja 44.....	60
5.5.4.	Efectos en la superficie (Subsidencia).....	60
5.6.	Conclusiones	61
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
6.1.	Principales conclusiones del trabajo	63
6.2.	Recomendaciones Trabajos Futuros	65
7.	BIBLIOGRAFÍA	66
8.	ANEXOS	68
8.1.	ANEXO A: Teoría de la percolación entre partículas	68
8.2.	ANEXO B: Análisis de Esfuerzos Inducidos en Experimento III.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- 1: Curva de fragmentación según Modelo Lognormal para el sector FW-Reservas Norte. (Backanalysis de fragmentación RENO- División El Teniente, CODELCO, 2009).	10
Figura 1- 2: Zonificación vertical de la columna y condiciones de borde a considerar.	12
Figura 1- 3: Esquema metodológica de investigación.....	13
Figura 2- 1: Macro bloques Esmeralda Sur	15
Figura 2- 2: (a) Fotografía satelital cráter de subsidencia El Teniente; la línea azul representa el límite del cráter. (b) Esquema en superficie de las áreas que forman la mina subterránea.	16
Figura 2- 3: A la izquierda, curva de fragmentación según Modelo Log normal para el sector FW-Reservas Norte (Backanalysis de fragmentación RENO, 2009). A la derecha, Curva de Fragmentación para el botadero Rajo Sur (Orica Mining Service).	17
Figura 2- 4: Caracterización estimada según altura para la columna sobre el nivel de producción de Esmeralda Sur.....	17
Figura 2- 5: Conceptualización del problema planteado	18
Figura 2- 6: Tasa de percolación: (a) Comparación entre la celda de corte simple (Bridgwater et al., 1978) y simulaciones en PFC3D, (b) Comparación entre partículas esféricas con corte horizontal, corte vertical y partículas agrupadas con corte vertical, (c) Partículas esféricas con distribución gaussiana, (d) Material con distribución Gaussiana en PFC3D en función de la tasa de deformación. (Pierce, 2009).....	23
Figura 2- 7 Perfil de velocidad de los discos del IMZ en REBOP, izquierda vista longitudinal, derecha vista en planta, Pierce (2009) (Iribarra, 2014).	23
Figura 2- 8 Comparación entre resultados obtenidos en la SCPG, modelo simplificado en PFC3D para una tasa de deformación de 0.4 s^{-1} y el modelo de Bridgwater (1978) (Hashim, 2011).....	24
Figura 2- 9: Comparación entre tiraje Aislado (Derecha) y Tiraje Parejo (Izquierda) al 60% de extracción. (Iribarra, 2014).....	27
Figura 2- 10: (a) Extracción Ideal. (b) Tasa de extracción excede tasa de propagación del hundimiento, se genera entrada de dilución por "Rilling" (De Wolfe, 1981).	28
Figura 2- 11: Control de Tiraje para una sección. (Julin, 1992).....	28
Figura 3- 1: Sector de estudio, planta del nivel de producción Mina Esmeralda	32
Figura 3- 2: Diseño Maquetas a escala, cotas en centímetros. Equipo I considera solo el área verde, Equipo II considera el área total (Gris y verde): (a) Vista frontal, (b) Vista en perspectiva de la base, (c) Vista en planta.....	33
Figura 3- 3: Equipo experimental, (a) Modulo de acrílico montado sobre estructura metálica, (b) Base de la maqueta, (c) Sistema de Extracción.	34
Figura 3- 4: Inserción de líneas de flujo y marcadores en el llenado del modelo físico.	36
Figura 3- 5: Diagrama procedimiento experimental.	37
Figura 4- 1: Granulometría para los distintos materiales, escala mina (derecha) y laboratorio (Izquierda). (Elaborado a partir de "Informe Backanalysis de fragmentación RENO- División El Teniente", CODELCO, 2009; "Granulometría Lastre, El Teniente Rajo Sur", ORICA Mining Service).....	40
Figura 4- 2: Esquema de las bases del Equipo I (Arriba) y Equipo II (abajo) utilizados en los experimentos de flujo.	41
Figura 4- 3(a) Altura de Columna extraíble. (b) Secuencia de extracción según año.....	42

Figura 4- 4: Modelos Físicos cargados inicialmente (0[%] extraído de la masa total programada); A la derecha Equipo experimental I con 600 [Kg], a la izquierda Equipo experimental II con 1000[kg].	43
Figura 4- 5: Sector de estudio y Condición según punto de extracción	45
Figura 4- 6: Comparación según periodo, entre puntos vecinos a piques de vaciado.	45
Figura 4- 7: (a) Sector de estudio Experimento y Condición según punto de extracción, (b) Condiciones a implementar en la maqueta.	46
Figura 5- 1: Desarrollo del Experimento I.....	48
Figura 5- 2: Desarrollo Experimento II	50
Figura 5- 3: Desarrollo Experimento III.....	51
Figura 5- 4: Envoltente de extracción, Experimento III.	52
Figura 5- 5: Experimento I, Comparación de las líneas de flujo según altura.	53
Figura 5- 6: Variación de la altura de columna según plan y ángulos entre columnas. (a) Experimento I, (b) Experimento II.	54
Figura 5- 7: Comparación entre Experimento I (a) y Experimento II (b)	55
Figura 5- 8: Comparación entre PEQ [%]: (a) Experimento I, (b) Experimento II.....	56
Figura 5- 9: Altura de interacción entre envoltente de extracción y movimiento. (a) Experimento II, (b) Experimento II.....	56
Figura 5- 10: Área no recuperada: (a) Experimento I, (b) Experimento II.	57
Figura 5- 11: Variación de Altura de columna en función de tiempo: (a) Según plan, (b) Observada en Experimento III.....	58
Figura 5- 12: Punto de Entrada de Quebrado Experimento III.....	59
Figura 5- 13: Periodo (mes) 45 y 46, en el cual se produce la conexión entre las zonas de movimiento de la zanja 43 y 45.....	60
Figura 5- 14: Topografía en Experimento III al final del año 6.	60
Figura 5- 15: Variación de distancia entre estéril-nivel de producción y profundidad de cuencas en modelo físico	61
Figura 8- 1: Representación movimiento de la celda de corte simple utilizada por Bridgwater et al., (1978).	68
Figura 8- 2: Ubicación celdas de Carga en Maqueta a escala	72
Figura 8- 3: Esfuerzo vertical relativo medido en la celda de carga	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2- 1 : Puntos de extracción por macrobloque en Esmeralda Sur.....	16
Tabla 2- 2: Resumen plan de producción Esmeralda Sur.....	16
Tabla 2- 3: Resumen estudio de flujo gravitacional en modelos físicos	20
Tabla 2- 4: Resumen de parámetros que controlan la percolación. Hashim (2011).....	25
Tabla 2- 5: Resumen Modelos percolación en Minería de Caving.	25
Tabla 2- 6: Resultados punto entrada de dilución de tiraje uniforme y aislado,(Iribarra, 2014). 26	
Tabla 2- 7: Matriz de Uniformidad, Adaptado de Susaeta, 2004 (Paredes, 2012).....	27
Tabla 3- 1: Factores de escala en función del factor de escala longitud (λ_L).	30
Tabla 3- 2: Factores de escala y sus respectivos valores	31
Tabla 3- 3: Resumen dimensiones escaladas nivel de producción.....	32
Tabla 3- 4: cota inferior y superior para los tamaños de partículas en modelo físico a escala.	35
Tabla 4- 1: Tamaños característicos para mineral, quebrado y estéril.	41
Tabla 4- 2: Caracterización materiales empleados en modelo físico.	41
Tabla 4- 3: Estadísticas básicas para el plan quinquenal Bloque 1 y 4 de Esmeralda Sur.	42
Tabla 4- 4: Resumen Masa de la Columna Extraíble por punto y Columna In-Situ.....	43
Tabla 4- 5: Resumen enfoque experimentos	44
Tabla 4 - 6: Resumen de las variables a medir en los experimentos.....	46
Tabla 5- 1: Resumen resultados Experimento I y II.....	53
Tabla 5- 2: Resumen Resultados Experimento III.....	57
Tabla 5- 3: Variación de ángulo entre columnas según periodo a partir del año 2.	59

1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene por objetivo introducir el tema de investigación, describiendo la motivación, los objetivos buscados, los alcances y la estructura de este trabajo.

1.1. Introducción

La minería por Block/Panel Caving es un método subterráneo no sustentado, ampliamente utilizado alrededor del mundo. Aun cuando tienen una alta inversión inicial, éste método presenta bajos costos operacionales por tonelada extraída y altas tasas de producción, características que le ha permitido posicionarse como el método subterráneo masivo más económico. Este método se basa en la socavación de la base del cuerpo mineralizado, que junto con la gravedad y debido a la acomodación de esfuerzos generan la fragmentación en la columna del cuerpo mineral, el material fragmentado será extraído a través de puntos de extracción lo que contribuirá a la fragmentación in-situ y a la sucesiva propagación del hundimiento (Castro 2006).

El éxito económico de la operación estará dado entonces por el efectivo diseño y desempeño de los niveles de producción, considerando también que la recuperación minera y el flujo de material (sea mineral o diluyente) están directamente relacionados al flujo gravitacional. El flujo gravitacional se define como el movimiento de las partículas debido a la gravedad, resulta relevante conocer y entender los principales mecanismos asociados al flujo gravitacional debido al gran impacto que genera sobre la operación minera.

A pesar de la gran cantidad de trabajos que se han realizado a la fecha, para entender y establecer la teoría del flujo gravitacional en minería por hundimiento. El conocimiento existente sigue siendo limitado, no permitiéndose la formulación de leyes físicas exactas que permitan modelar y representar los principales mecanismos asociados a dicho fenómeno. No son pocas las variables a tener en consideración a la hora de estudiar el flujo gravitacional en una operación minera por hundimiento, a esto se suman las limitaciones propias de la naturaleza de las investigaciones realizadas; los modelos numéricos requieren validación de un modelo físico, no existe consenso sobre la escala adecuada de los modelos físicos, y finalmente la experimentación a escala mina es escasa debido a los altos costos que representan. Todo lo anterior genera la necesidad de realizar más trabajos que contribuyan a aumentar y robustecer el conocimiento actual.

1.2. Motivación del Trabajo

Se tiene que muchos de las investigaciones realizadas sobre flujo gravitacional, han sido llevados a cabo obviando características propias de una mina; granulometría, tipo de material, secuencia y programa de tiraje, etc. Por ejemplo, para una explotación de Block/Panel Caving llevada a cabo en niveles, los niveles superiores ya explotados se ubicaran como material quebrado sobre la columna in-situ de niveles inferiores. La evidencia en terreno da cuenta de cambios en las granulometrías que se pueden encontrar dependiendo de la altura de extracción (ver Figura 1- 1). Sumado a esto, la generación y depositación de material fino sobre la superficie ya sea por procesos naturales (erosión, precipitaciones, subsidencia) o bien por la disposición de residuos provenientes de la misma actividad minera contribuyen a que sobre el nivel de producción sea posible encontrar zonas que pueden ser caracterizadas y diferenciadas por la distribución de tamaños de las partículas que las componen.

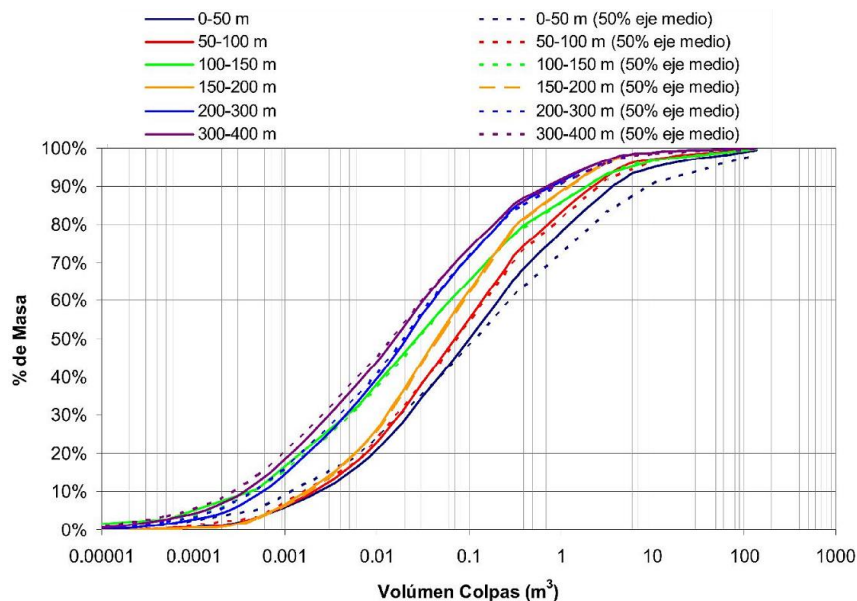


Figura 1- 1: Curva de fragmentación según Modelo Lognormal para el sector FW-Reservas Norte. (Backanalysis de fragmentación RENO- División El Teniente, CODELCO, 2009).

No solo cambios en el tamaño de partícula dan cuenta de condiciones propias de una operación minera. La secuencia y agendamiento de la extracción de reservas serán factores que afecten al flujo gravitacional del mineral hacia el nivel de producción. Dado que este tipo de interacciones y efectos son difíciles de observar a nivel mina es que se hace necesario el análisis experimental a escala laboratorio, tal como se propone en este trabajo.

1.3. **Objetivos**

1.3.1. *Objetivo General*

El objetivo general de este trabajo es realizar un análisis experimental de flujo gravitacional en minería de Panel Caving.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

Los objetivos específicos que se proponen para la realización del objetivo general son:

- Realizar una revisión crítica del estado del arte sobre los temas relacionados al flujo gravitacional y la minería por Panel Caving.
- Diseñar un modelo físico a escala de una mina de Caving, que permita realizar experimentos de flujo gravitacional de material granular y la medición de las principales variables asociadas al fenómeno.
- Identificar el efecto que la estrategia de extracción tipo Panel tiene sobre la interfaz mineral/estéril, para una configuración que considera un sector superior ya explotado.
- Determinar la influencia de no incluir una Zanja en el plan de extracción.
- Cuantificar posible flujo preferencial de material fino ubicado sobre material grueso.
- Analizar los efectos que el plan de extracción y en consecuencia el flujo de mineral, generan sobre la superficie (subsistencia).

1.4. Alcances

Esta memoria corresponde a un estudio experimental que utiliza un modelo físico a escala 1:200, el modelo se ha construido en base al diseño del nivel de producción de una mina explotada mediante Panel Caving.

Se utiliza material completamente fragmentado por lo que no se considera analizar cómo la propagación del hundimiento afecta el flujo de mineral. Las curvas granulométricas de los materiales a utilizar en los experimentos se obtienen de los informes de División El Teniente:

- “Backanalysis de fragmentación: Sector Reservas Nortes (RENO)”
- “Granulometría Lastre, El Teniente Rajo Sur”, ORICA Mining Service.

Sobre el nivel de producción se establecen tres zonas, caracterizadas por las distribuciones de tamaño de sus partículas:

- **Granulometría Fina (Estéril):** Material que corresponde a estéril de botadero o material fino proveniente de procesos naturales.
- **Granulometría Media (Quebrado):** Material remanente de explotación anterior en niveles superiores.
- **Granulometría Gruesa (Mineral In-Situ):** Material correspondiente a la columna de mineral sobre el nivel de producción.

El plan de extracción a evaluar corresponde al plan quinquenal para el Bloque 1 y Bloque 4 de Esmeralda Sur, División El Teniente-CODELCO.

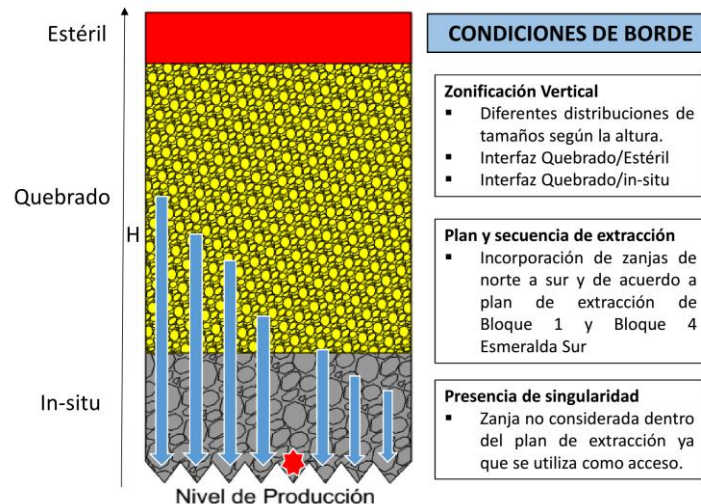


Figura 1- 2: Zonificación vertical de la columna y condiciones de borde a considerar.

Se pretende estudiar e identificar las interacciones que pudiesen existir dada la configuración del sistema planteado y las condiciones de borde impuestas como se muestra en la Figura 1- 2.

Los siguientes parámetros y procesos no serán estudiados en este trabajo:

- Efecto de la humedad (se utilizará mineral y estéril seco),
- Efecto de la composición (mineralogía) y forma de los materiales,
- Procesos de fragmentación que pueda ocurrir en la columna de mineral, y que deriven en la generación de finos.

1.5. Metodología de la investigación

La metodología planteada en el siguiente esquema tiene como propósito cumplir con los objetivos que se proponen.

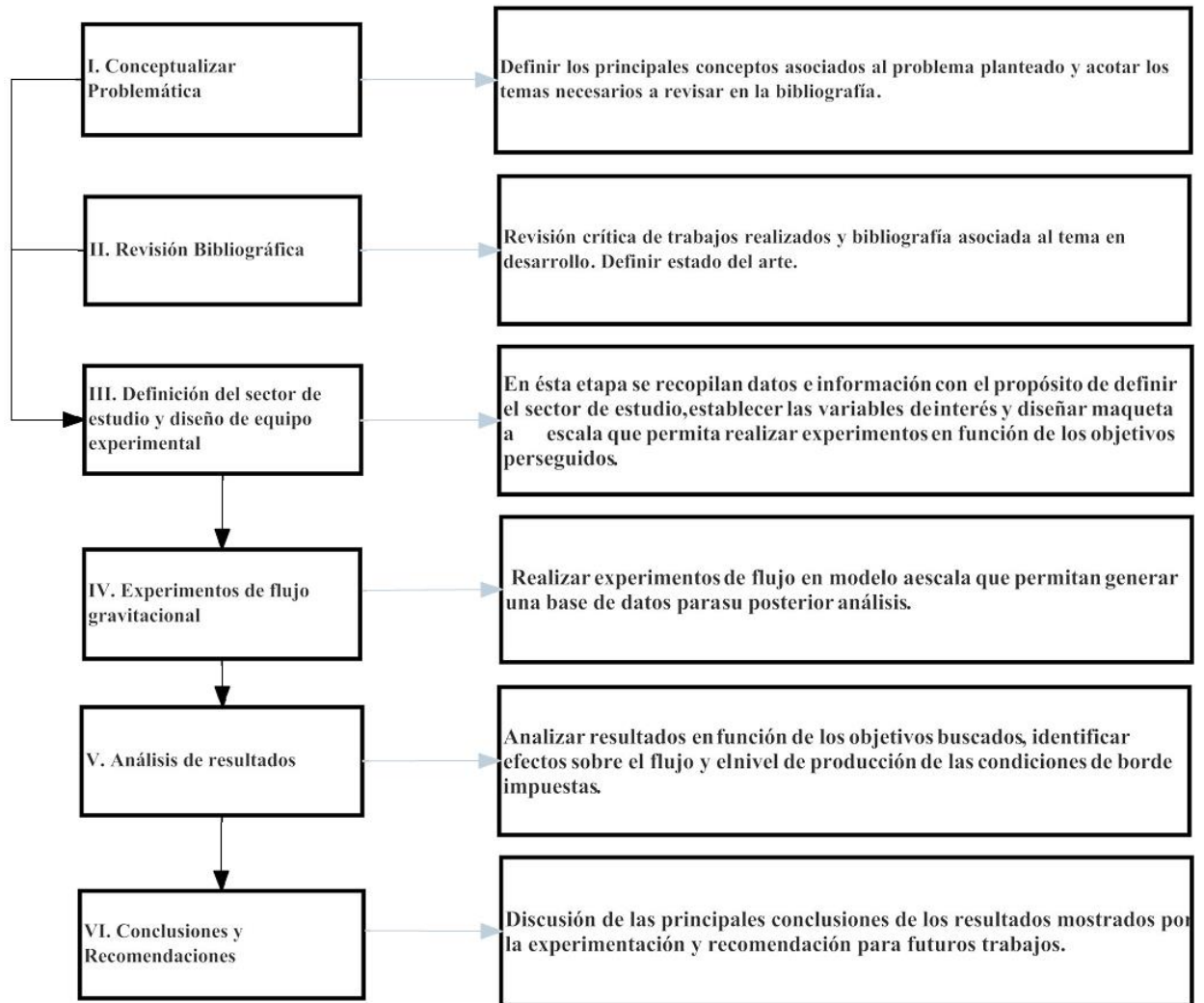


Figura 1- 3: Esquema metodología de investigación.

1.6. Estructura de la memoria

Se presenta a continuación la estructura de la memoria:

- **Capítulo 1: Introducción.** Se introduce el tema a desarrollar en el presente trabajo, dando a conocer los principales objetivos que se persiguen con la realización de la investigación. Este capítulo presenta la motivación y los alcances del trabajo a realizar.
- **Capítulo 2: Antecedentes.** Corresponde a la revisión de los antecedentes que justifican la realización del trabajo, además de presentar el análisis crítico sobre las teorías relacionadas a la problemática en estudio.
- **Capítulo 3: Metodología Experimental.** Tiene como finalidad mostrar los lineamientos y las bases de la experimentación a realizar. La idea es presentar brevemente los fundamentos teóricos detrás de los modelos físicos, mostrando los factores más importantes y las etapas necesarias para desarrollar los experimentos.
- **Capítulo 4: Modelamiento Físico.** Da cuenta de cómo se modela la problemática replicando las condiciones necesarias y aspectos claves para que los resultados sean representativos.
- **Capítulo 5: Resultados experimentales y análisis.** Se muestran los principales resultados obtenidos y el respectivo análisis que de ellos se desprenden.
- **Capítulo 6: Conclusiones.** Se muestran las conclusiones obtenidas de la investigación además de presentar comentarios y recomendaciones para trabajos futuros.

2. ANTECEDENTES

Este capítulo tiene como finalidad presentar una revisión crítica del estado del arte de los temas relacionados a la investigación; flujo gravitacional, interacción y percolación entre partículas de distinto tamaño, dilución en minería de Caving, entre otros.

Se busca fundamentar el enfoque planteado para el trabajo mediante la revisión y análisis de los estudios realizados a la fecha, junto con los antecedentes necesarios para justificar así el desarrollo de experimentos de flujo que permitan entender los efectos que la extracción (secuencia, agendamiento y zanjas a incorporar) tienen sobre el flujo gravitacional.

2.1. CASO DE ESTUDIO: Mina Esmeralda Sur, División El Teniente CODELCO

La División El Teniente, se ubica a ochenta kilómetros al sur de Santiago y a 2500 metros sobre el nivel del mar. Los sectores productivos de El Teniente están divididos en nueve áreas: Teniente 4 Sur, Diablo Regimiento, Pipa Norte, Reservas Norte (ReNo), Panel ReNo, Pilar Norte, Dacita, Esmeralda Sur, Esmeralda Panel 1 y las áreas nuevas de explotación: Pacifico Superior, Dacita y Nuevo Nivel Mina (NNM).

2.1.1. Mina Esmeralda

La mina Esmeralda está ubicada al este del yacimiento, bajo el área de producción agotada del sector Teniente 4, el Nivel de Hundimiento se ubica en la cota 2210. Este sector está compuesto por Esmeralda Convencional, Esmeralda Panel 1 y Esmeralda Sur.

La explotación del sector Esmeralda Sur se realiza mediante el método Panel Caving variante Hundimiento Convencional con pre-acondicionamiento completo de los bloques. Este método de explotación está asociado a una macro secuencia de bloques, donde la incorporación de área y tasas de extracción se definen en base a una estrategia de crecimiento que busca generar un área inicial (área crítica), para luego continuar con el proceso de explotación tradicional y así provocar un adecuado proceso de Caving.

La explotación de Esmeralda Sur considera la incorporación de los sectores al Oeste (Hw) desde el Este (Fw). El crecimiento considera dejar accesos en el Nivel de Producción (Z-40, Z-44, Z-49) que delimitan la separación entre Módulos del Bloque 1, 2, 3, 4,5,6, requiriéndose diseños especiales de socavación para dar continuidad al crecimiento. El área operativa y los bloques de la mina Esmeralda se muestran en la Figura 2- 1.

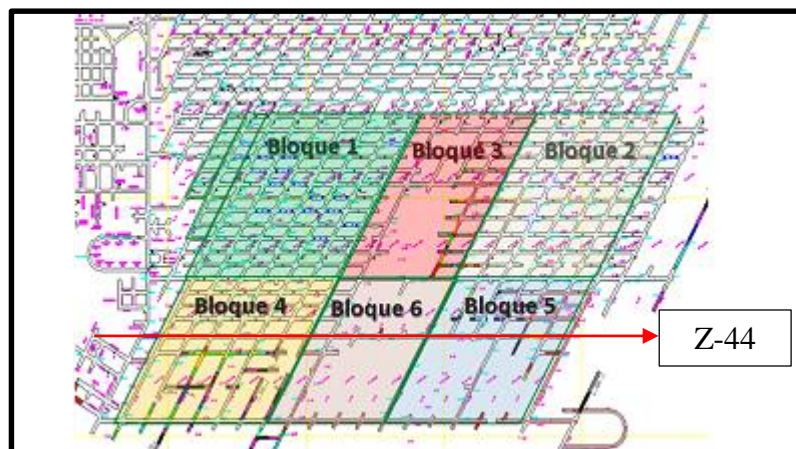


Figura 2- 1: Macro bloques Esmeralda Sur

Bloque	1	2	3	4	5	6
Nº Puntos de Extracción	196	200	104	174	224	128

Tabla 2- 1 : Puntos de extracción por macrobloque en Esmeralda Sur.

Dentro del diseño se tiene establecido un cambio en la malla de extracción, pasando desde dimensiones de 17[m] x 20[m] a una malla de 17[m] x 24.5 [m] debido a consideraciones geomecánicas del sector. Además, dentro de la planificación se ha considerado un acceso en toda la zanja 44, por lo cual no se generará extracción en dicha zona.

La planificación de la mina Esmeralda Sur considera la incorporación de área de hasta 3 bateas/mes para cada Bloque, se tiene así una tasa promedio de 2 bateas/mes lo que genera una producción estimada de 24 [ktpd] desde el año 2014 hasta las 41 [ktpd] durante el año 2017 (CODELCO, 2013). En la siguiente tabla se presenta un resumen del programa de producción hasta el año 2017.

Indicador	Año			
	2014	2015	2016	2017
Días Operativos	360	360	361	360
Tonelaje [Mton]	8.57	10.14	12.39	14.39
Producción [Kton/día]	23.80	28.18	34.32	39.98
Ley Media Cu [%]	1	1.07	1.03	0.93
Tasa de Extracción [ton/día m2]	0.38	0.38	0.4	0.44

Tabla 2- 2: Resumen plan de producción Esmeralda Sur

2.1.2. Botadero Rajo Sur

Junto con los sectores productivos subterráneos, en la División El Teniente se tiene una explotación a cielo abierto, correspondiente al proyecto Rajo Sur. El material estéril proveniente de esta operación es depositado sobre el cráter de subsidencia, tal cual muestra la Figura 2- 2.a.

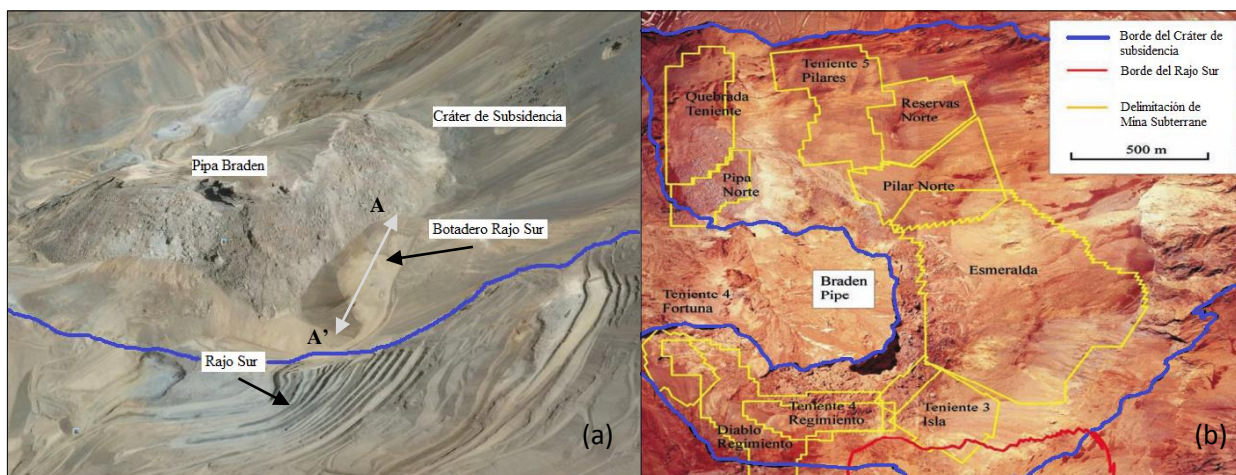


Figura 2- 2: (a) Fotografía satelital cráter de subsidencia El Teniente; la línea azul representa el límite del cráter. (b) Esquema en superficie de las áreas que forman la mina subterránea.

En la Figura 2- 2.a se puede observar que el botadero del rajo sur se ubica justo sobre el área de Esmeralda Sur en el cráter de subsidencia, esta condición es analizada con mayor profundidad en el siguiente apartado.

2.1.3. Curvas de Fragmentación para el Caso de Estudio

De los antecedentes disponibles, se sabe que sobre Esmeralda Sur se ubica el sector ya explotado de Teniente 4, de este modo se considera el material sobre la columna de mineral (In-Situ) del sector Esmeralda Sur como material completamente quebrado. Al mismo tiempo, sobre el material ya quebrado (Teniente 4) se ubica el botadero de estéril del Rajo Sur. Las curvas de fragmentación para los sectores mencionados (In-situ y el Quebrado) pueden ser obtenidas de la Figura 2- 3.a; curva roja y azul respectivamente. En tanto que la fragmentación del Estéril es caracterizada según la Figura 2- 3.b.

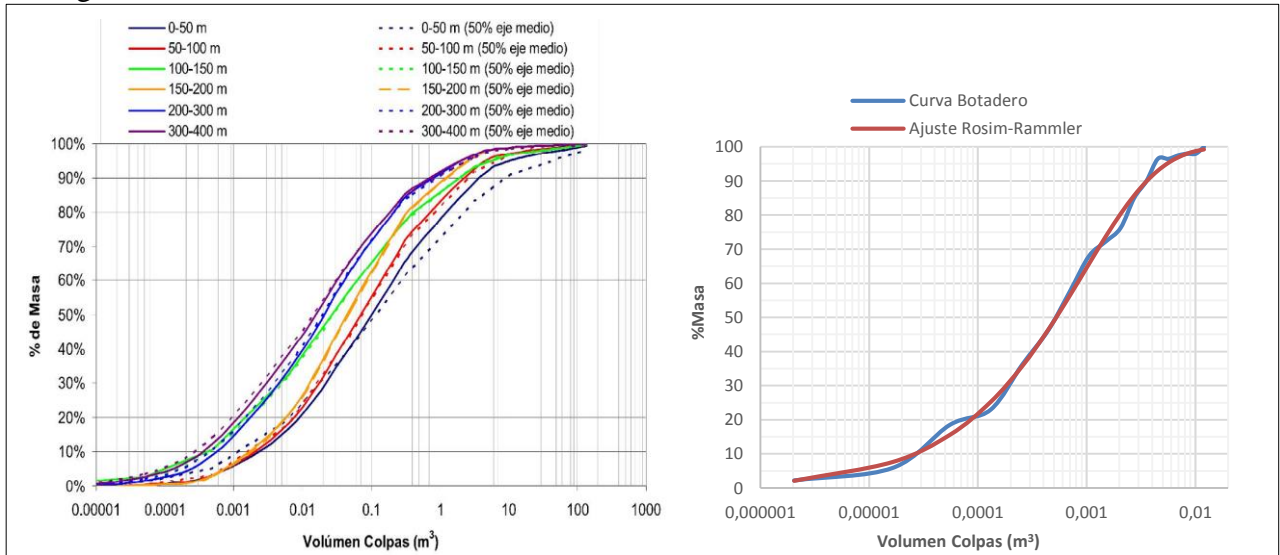


Figura 2- 3: A la izquierda, curva de fragmentación según Modelo Log normal para el sector FW-Reservas Norte (Backanalysis de fragmentación RENO, 2009). A la derecha, Curva de Fragmentación para el botadero Rajo Sur (Orica Mining Service).

Finalmente y en base a los antecedentes, la columna sobre el nivel de producción de Esmeralda Sur (Corte A-A', Figura 2- 2.a) puede ser caracterizada como muestra la siguiente figura:

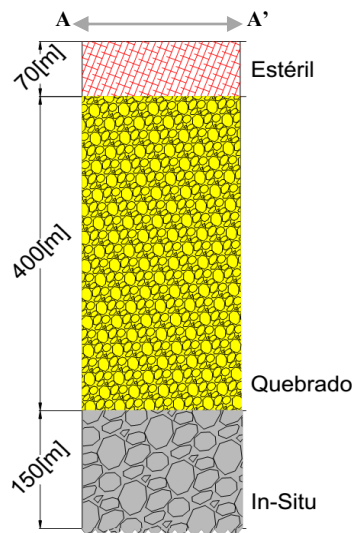


Figura 2- 4: Caracterización estimada según altura para la columna sobre el nivel de producción de Esmeralda Sur.

En la Figura 2- 4 se muestra una columna heterogénea, formada por materiales cuyas curvas de fragmentación varían de acuerdo a la altura, siendo la granulometría decreciente en el orden: Mineral In-situ, Quebrado, Estéril.

2.2. Conceptualización problemática

El autor propone el siguiente esquema para el entendimiento de la problemática planteada en la contextualización del apartado anterior.

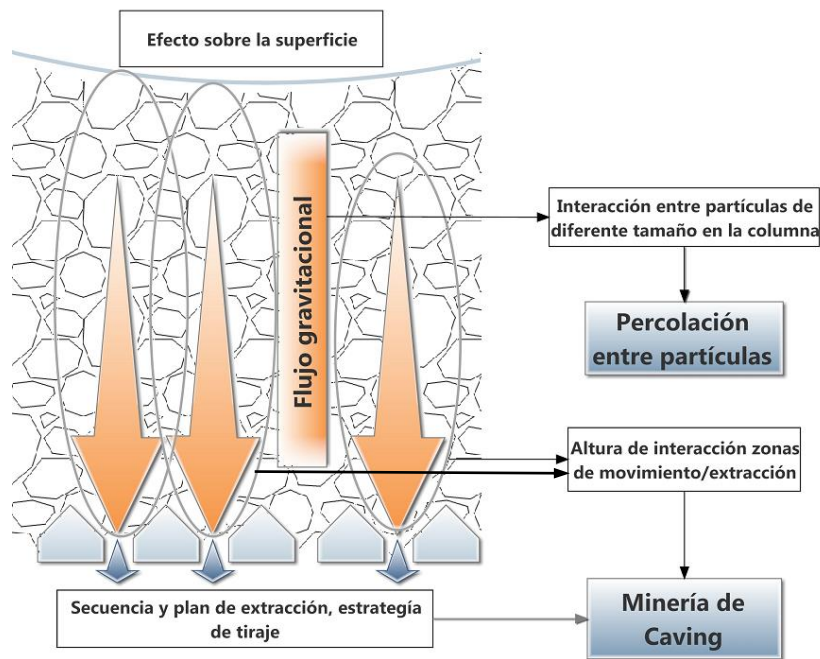


Figura 2- 5: Conceptualización del problema planteado

Esta conceptualización permite orientar y establecer los principales temas a revisar en la bibliografía.

Flujo Gravitacional: Se debe conocer y comprender el comportamiento del flujo gravitacional; principales variables y parámetros involucrados, forma y tamaño de la envolvente del flujo, esfuerzos y deformaciones presentes y como esto puede relacionarse con la percolación y consecuente migración de partículas, en particular de las de bajo tamaño.

Percolación y Mezcla de partículas: Aportan la base conceptual y teórica para comprender los principales mecanismos físicos involucrados en la percolación y mezcla entre partículas, considerando variables como distribución de tamaño, forma y densidad de las partículas.

Minería de Caving: Se hace necesario el conocimiento y comprensión de las distintas variantes de los métodos por hundimiento, a su vez, entender como las variables de diseño, parámetros de la operación y ejecución de la operación (tiraje aislado, tiraje parejo o proporcional), secuencia y plan de producción pueden afectar al fenómeno en estudio.

2.3. Teoría del Flujo Gravitacional y Modelos físicos

El flujo gravitacional de materiales granulares (no cohesivos) se entiende como el movimiento vertical de las partículas gobernado por la fuerza de gravedad y las interacciones entre ellas (Castro 2006). Este fenómeno es de gran importancia para la minería por hundimiento dado que el método se sustenta en el flujo gravitacional del mineral fragmentado hacia los puntos de extracción, junto con esto, el movimiento de las partículas tendrá gran impacto sobre la recuperación y la posible dilución que se pueda registrar (Paredes 2012). En consecuencia se ha hecho necesario el entendimiento y comprensión de los principales mecanismos asociados al flujo gravitacional y sus implicancias en la minería por Caving.

Diversos estudios se han realizados con la finalidad de aportar al conocimiento sobre flujo gravitacional, utilizándose para ello distintos enfoques; modelamiento físico a distintas escalas, modelamiento numérico, o bien experiencias a escala mina. Los resultados más significativos se presentan a continuación:

- Dado el flujo gravitacional, se generan dos zonas características; una zona de movimiento y una zona de extracción, no toda partícula que se mueve necesariamente será extraída (Kvapil 1965).
- Tanto la envolvente de movimiento como la de extracción están limitadas por un elipsoide (Castro, 2001).
- Es posible formular y relacionar matemáticamente las envolventes de extracción y movimiento.
- El ancho de la elipse no depende del tamaño del punto de extracción, sí, se ve influenciado por el tamaño de las partículas.
- El ancho de la elipse crecerá indefinidamente a medida que aumenta la extracción hasta alcanzar un ancho crítico, que se ha definido como el ancho de tiraje aislado (d_{ta}) (Castro, 2001).
- Se postulan 3 mecanismos de flujo:
 - *Flujo en masa*: En la parte superior del hundimiento, trayectoria vertical y tasa de flujo constante sin importar tamaño de partícula.
 - *Flujo Granular*: Movimientos laterales, interacción entre zonas activas y menos activas.
 - *Difusión de Vacíos*: Flujo irregular debido a la generación de espacios producto de la granulometría gruesa.
- El comportamiento del flujo se ve afectado por la estrategia de tiraje utilizada (cantidad de puntos de extracción activos, tonelaje extraído por punto), se distinguen (Laubscher, 2000):
 - Tiraje Aislado: un único punto activo,
 - Tiraje uniforme: tonelajes similares en una vecindad de puntos activos,
 - Tiraje proporcional: tonelajes proporcionales según altura de columna en un sector.

Se ha otorgado mayor relevancia a la revisión de los estudios realizados en modelos físicos dado el objetivo del presente trabajo, el resumen se presenta en la siguiente tabla.

Año	Autores	Materiales	Objetivos	Resultados
1916	G.Lheman	Mineral Chancado	Estudiar Recuperación Minera (Miami Copper mine)	Efectos del tamaño del punto de extracción sobre la recuperación
1946	McNicholas	Mineral Chancado	Estudiar Recuperación Minera (Climax Molybdenum mine)	Diferencias en el tamaño de los puntos de extracción dependiendo del tamaño de las partículas
1965	Kvapil	Arena	Proveer relaciones matemáticas respecto al flujo de materiales granulares en silos	Teoría de Elipsoides de Movimiento y extracción
1966	Janelid y Kvapil	Arena	Extender modelo de silos (Kvapil, 1966) a mina de hierro en Suecia explotada mediante el método de Sublevel Caving	Criterios de diseño para Sublevel Caving basados en la teoría de elipsoides
1972	Janelid	Mineral Chancado	Estudiar escalamiento desde modelo a escala mina	Resultados similares entre prototipo y modelo; diferencias asociadas a mayor movilidad y menor compactación en modelo
1984	Peters	Grava	Estudiar efecto; del tamaño de partícula en la forma de la zona de extracción	Ancho de la zona de extracción no depende del tamaño de partícula,
2001	Castro	Grava	Escalamiento de modelo físico para estudio de flujo gravitacional en minería por hundimiento	Las fuerzas preponderantes corresponden a la gravedad y la fricción. El movimiento de las partículas se limita a una elipsoide caracterizada por altura (H) y ancho (W)
2004	Power	Grava	Revisión de las escalas utilizadas en modelos físicos.	Resultados similares entre escala mina y modelo a la escala (1:30), destaca diferencia entre modelos 2Dy 3D (Rebate resultados de Peters)
2004	Susaeta	Arena	Estudio velocidad flujo gravitacional para tiraje aislado, tiraje interactivo.	Índice de Uniformidad (IU). A mayor uniformidad del tiraje, más tardía será la entrada de dilución
2006	Castro	Grava	Estudio flujo gravitacional en modelo 3D a gran escala	La masa extraída y la altura de extracción tienen gran influencia sobre la zona de extracción aislada.

Tabla 2- 3: Resumen estudio de flujo gravitacional en modelos físicos

2.4. Teoría de Mezcla y Percolación entre partículas

Aun cuando la mayoría de los estudios realizados sobre interacción entre partículas corresponden a trabajos que surgen en la industria farmacéutica con el fin de mejorar las mezclas de polvos, los resultados obtenidos no dejan de tener validez en el contexto de este trabajo, en tanto que aportan al entendimiento de los mecanismos físicos involucrados en las interacciones entre partículas de distinto tamaño que pueden generarse en la columna fragmentada sobre el nivel de producción.

Mayores detalles sobre la teoría de Percolación inter-particular y como se han derivado las expresiones matemáticas pueden ser revisados en la sección de anexos (Anexo A).

2.4.1. Mezcla de Partículas

Los principales mecanismos propuestos para la mezcla de partículas son (Lacey, 1956):

- I. *Mezcla convectiva*, transferencia de un grupo de partículas desde una ubicación inicial a otra, dentro de un volumen de partículas.
- II. *Mezcla difusiva*, distribución de partícula sobre una superficie recientemente creada dentro del volumen de partículas.
- III. *Mezcla por cizalle*, correspondiente a la generación de planos de deslizamiento al interior de un volumen.

Estos mecanismos varían en importancia de acuerdo al equipo de mezcla que se utilice, es decir, influye en el proceso de mezcla: la dirección, magnitud y tipo de esfuerzo que se aplica. De los experimentos llevados a cabo por Bridgwater (1976), tanto en celdas de corte simple como en celdas de corte anulares se desprende:

- Existe gran dificultad para desarrollar experimentos libres de incertidumbre muestral. Hay un sesgo asociado al tamaño y concentración de la muestra.
- El comportamiento depende del grado de cohesión, materiales no cohesivos tienden a expandirse y segregarse en las superficies libres.
- Una prueba del comportamiento difusivo es que para partículas inyectadas simultáneamente en un sistema, la varianza del desplazamiento es directamente proporcional al tiempo.
- Para partículas no cohesivas las únicas fuerzas presentes provienen de las impuestas por el sistema sobre el lecho de partículas.
- Debido a la presencia de esfuerzos de corte sobre el material granular (hoja de corte sobre las partículas) se generan zonas de falla, éstas dependen de la forma en que el material fluye sometido a deformaciones y de la composición del material. La zona de falla puede ser descrita mediante la altura y su espaciamiento.
- La altura de la zona de falla no varía significativamente con las variaciones de la velocidad de la hoja de corte. Mientras que el espaciamiento de dicha zona puede verse afectado por fuerzas internas dentro del flujo.
- Se observa dilatación de la zona de falla a altas tasas de deformación.
- El comportamiento de las zonas de falla adyacente a los bordes del sistema es diferente que en el seno del material.
- El movimiento de las partículas está ligado estrechamente a las zonas de falla.

2.4.2. Percolación de partículas en minería de Caving

La migración de finos, en la literatura se relaciona a procesos de percolación entre partículas que pueden ocurrir en una columna de mineral (Pierce 2009), donde una partícula de tamaño inferior al tamaño medio del lecho de mineral subyacente se desplaza a través de él. En una columna donde el tamaño de partículas es variable, la percolación entre partículas es el proceso que más contribuye a la segregación (Hashim 2011). Dependiendo del tamaño de partícula, la percolación puede ser espontánea o inducida producto de la deformación por corte en la matriz de partículas gruesas (Cardew 1981).

Los estudios realizados en torno a ésta temática han apuntado a identificar y demostrar la existencia de un flujo preferencial dada la diferencia de tamaños que existe entre partículas. Castro (2006) define el índice de percolación (p) según la siguiente expresión.

$$p[\%] = \frac{m_{50} - m_p}{m_{50}} \cdot 100$$

Ecuación 2- 1: Índice medio de percolación.

Donde m_{50} corresponde a la masa de los marcadores recuperados de 20 mm, y m_p la masa de partículas en estudio recuperadas y que fueron ubicadas en la misma posición inicial (x,y,z). Los principales resultados de las pruebas, respecto a flujo preferencial, sugieren que en un punto aislado, las partículas cuyo tamaño es menor al tamaño medio, tienden a fluir más rápido en una amplia distribución de tamaños. El índice de percolación medio se incrementa cuando el tamaño de partícula decrece.

No solamente se ha estudiado la migración de finos de forma experimental. Basado en los resultados de Bridgwater et al., (1978). Pierce (2009) estudia la migración de finos mediante modelamiento numérico (PFC3D), analizando el comportamiento de distintas condiciones; efecto de la distribución de tamaño en el lecho, efecto de las variaciones en la tasa de deformación, orientación de la deformación por corte, forma de las partículas.

Los resultados muestran:

- Existe concordancia entre los resultados obtenidos por Bridgwater (1978) y Pierce (2009). (Figura 2- 6.a).
- No existe un efecto pronunciado sobre la percolación debido a la orientación de los esfuerzos. Este resultado se considera relevante dado que muestra que la tasa de percolación adimensional (Ecuación 8- 7) puede ser aplicada para estimar percolación en flujo gravitacional, donde la dirección de los esfuerzos difiere de la dirección de los que se generan en una celda de corte. (Figura 2- 6.b).
- La tasa de percolación se ve disminuida por partículas del lecho que presentan una distribución de tamaño (Figura 2- 6.c). Es posible que se deba a la disminución de espacios disponibles entre partículas.
- En la Figura 2- 6.d se muestra al igual que lo propuesto por Bridgwater, que la tasa de percolación se ve afectada por las variaciones en las tasas de deformación.

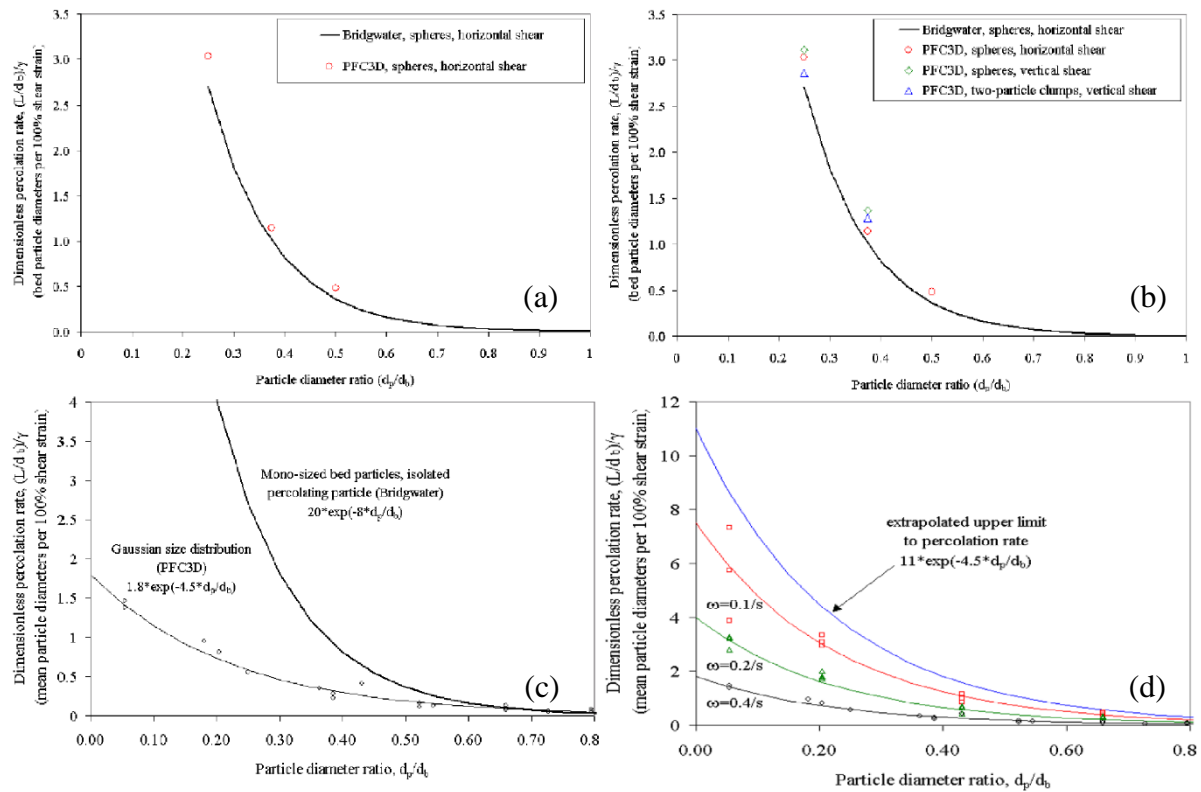


Figura 2- 6: Tasa de percolación: (a) Comparación entre la celda de corte simple (Bridgwater et al., 1978) y simulaciones en PFC3D, (b) Comparación entre partículas esféricas con corte horizontal, corte vertical y partículas agrupadas con corte vertical, (c) Partículas esféricas con distribución gaussiana , (d) Material con distribución Gaussiana en PFC3D en función de la tasa de deformación. (Pierce, 2009)

Finalmente Pierce, discretiza los elipsoides de movimiento para la formulación de REBOP, como discos superpuestos, ver Figura 2- 7.

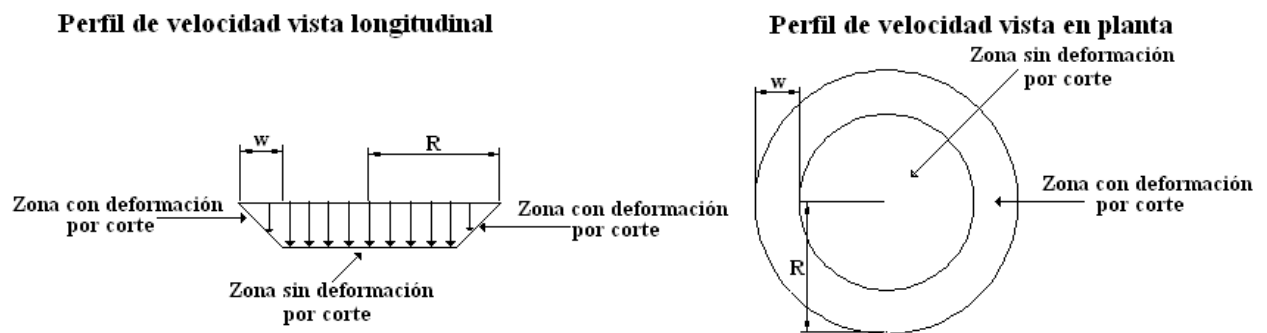


Figura 2- 7 Perfil de velocidad de los discos del IMZ en REBOP, izquierda vista longitudinal, derecha vista en planta, Pierce (2009) (Irribarra, 2014).

Pierce (2009) señala que para un marcador, dentro del anillo de corte, que está sujeto a un desplazamiento vertical incremental Δz_m la deformación por corte es controlado por el valor mínimo entre el radio R del disco y el ancho w del anillo de corte al cual reside, según la siguiente ecuación.

$$\Gamma = \frac{\Delta z_m}{\min(R, w)}$$

Ecuación 2- 2: Deformación por corte en REBOP, Pierce (2009).

Finalmente Pierce propone para la tasa de percolación en materiales con una distribución Gaussiana:

$$\bar{L} = \Gamma \bar{d} k_1 \exp\left(-4.5 \frac{d_p}{\bar{d}}\right)$$

Ecuación 2- 3: Distancia de percolación promedio teórica de una partícula en REBOP, Pierce (2009).

Sobre la Ecuación 2- 3, queda en discusión la representatividad y el rango de aplicabilidad del modelo propuesto, esto ya que las distribuciones de tamaño en una mina no necesariamente se ajustan a una distribución Gaussiana, siendo más complejas.

Con el fin de contribuir a la representatividad y mejorar el modelo propuesto por Bridgwater (1978) y ajustado por Pierce (2009), es que Hashim (2011) realiza un estudio de la percolación en minería por Caving a partir de la experimentación en modelo físico y el modelamiento numérico de celdas de corte. Para el caso del modelo físico se diseñó una celda especial para geo-materiales (SCPG, por su nombre en inglés- Shear Cell for Percolation of Geomaterials), en tanto que el modelo numérico se realizó en PFC3D. La Figura 2- 8, muestra los resultados y el ajuste propuesto por Hashim (2011).

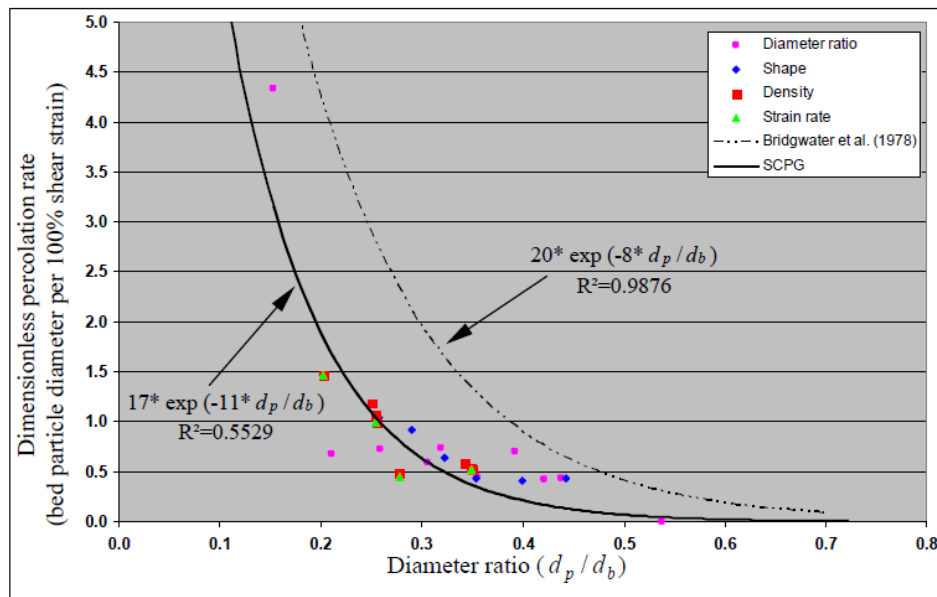


Figura 2- 8 Comparación entre resultados obtenidos en la SCPG, modelo simplificado en PFC3D para una tasa de deformación de 0.4 s⁻¹ y el modelo de Bridgwater (1978) (Hashim, 2011)

Se observa que los resultados obtenidos por Hashim (2011), muestran una menor percolación que los resultados obtenidos por Bridgwater, las diferencias observadas pueden explicarse debido a la naturaleza de los materiales empleados, Hashim a diferencia de Bridgwater no utiliza partículas esféricas mono-tamaños.

La siguiente tabla resume las principales conclusiones de los resultados obtenidos por Hashim.

Descripción	Comentario
Razón diámetro de partículas	Gran efecto en comparación a otros parámetros involucrados
Tasa de deformación	Tasa de Percolación aumenta hasta $\dot{\gamma} = 0.4 \text{ s}^{-1}$ y disminuye por sobre $\dot{\gamma} = 0.4 \text{ s}^{-1}$
Esfuerzo normal	Incrementos en el esfuerzo normal, disminuyen la velocidad de percolación
Densidad de partícula	A mayor densidad se tiene mayor percolación (para mismo tamaño y forma de partícula)
Propiedades del material	partículas de menor módulo elástico percolan más rápido
Propiedades superficiales	partículas de superficie suave percolan más rápido que partículas rugosas
Propiedades de forma	partículas redondeadas percolan más rápido que las angulosas
Efectos de la Pared	partículas pequeñas percolan más rápido en la pared de la celda que en la matriz de gruesos

Tabla 2- 4: Resumen de parámetros que controlan la percolación. Hashim (2011).

Finalmente los modelos obtenidos relacionados a percolación de partículas finas, en particular aquellos enfocados en el flujo preferencial en minería de Caving se resumen en la Tabla 2- 1 (los detalles de la formulación pueden revisarse en la sección de Anexos – Anexo A), donde se destacan los principales supuestos y aplicaciones para cada uno de ellos.

Autor (Año)	Expresión	Enfoque	Supuestos	Representa
Castro (2006)	$p(\%) = \frac{m_{50} - m_p}{m_{50}} \cdot 100$	Modelo Físico	Considera la masa recuperada de marcadores y la masa de partículas en estudio ubicadas en la misma posición inicial	Flujo gravitacional en un punto de extracción aislado (Minería de Caving)
Pierce (2009)	$\bar{L} = \Gamma \bar{d} k_1 \exp\left(-4.5 \frac{d_p}{\bar{d}}\right)$	Modelamiento Numérico	Partículas con distribución de tamaño Gaussiana, esfuerzos de corte solo en los bordes de la elipsoide, en el centro la deformación es nula	Flujo Gravitacional en un punto de extracción aislado (Minería de Caving)
Hashim y Sharrok (2012)	$\bar{L} = 17 \exp\left(-11 \frac{d_p}{\bar{d}}\right)$	Modelamiento Físico/Numérico	Basalto Chancado en celda de corte (una tasa de deformación de 0.4 s^{-1}) con un punto de extracción.	Percolación de partículas en Block Caving

Tabla 2- 5: Resumen Modelos percolación en Minería de Caving.

La importancia de estos resultados radica en que; se demuestra la existencia de flujo preferencial (Castro, 2006), los finos viajan más rápido hacia los puntos de extracción, y que este fenómeno puede ser cuantificado como la longitud vertical que es capaz de atravesar el material fino respecto al material grueso (Pierce, 2009; Hashim y Sharrok, 2012).

2.5. Minería de Caving y dilución

La dilución es parte inherente de la explotación minera, puede entenderse como todo aquel material que no ha sido planificado y es extraído junto a las reservas aun cuando éste no paga su costo de extracción. Sobre los mecanismos de entrada de dilución se han identificado tres (Paredes, 2012):

- Entrada vertical de dilución,
- Entrada de dilución generada por la propagación del Caving,
- Dilución lateral.

Estos mecanismos y su importancia en cuanto a determinar la entrada de dilución varían según la operación y la estrategia de explotación implementada. Es así como existe diferencia por ejemplo entre operar utilizando Block Caving que Panel Caving, esto ya que la forma en la que se incorporan puntos y avanza la secuencia de extracción, generan cambios en la ubicación y orientación de la interfaz diluyente-mineral.

Para los objetivos planteados, se considera relevante la posibilidad de identificar y si es posible lograr medir la dilución que ingresa a un punto. Laubscher (1994) define el porcentaje de entrada de dilución (PED) para un punto de extracción como el porcentaje de la columna que se ha extraído cuando ocurre la primera aparición de dilución en éste. Además, Laubscher, (2000), establece que el porcentaje de entrada de la dilución depende de:

- Altura de columna.
- Rangos de fragmentación.
- Espaciamiento entre puntos de extracción.
- Diferencia en tonelaje extraído de los distintos puntos de extracción activos.
- Altura de interacción.

En relación a lo anterior, se han realizado experimentos con el fin de cuantificar el impacto que genera material fino ubicado sobre la columna extraíble. Iribarra (2014) estudia la migración de partículas finas mediante el análisis experimental en un modelo físico a escala (1:200), se realizan dos experimentos; tiraje aislado y tiraje parejo con el fin de cuantificar la influencia de la estrategia de extracción sobre la migración de material fino ubicado sobre la columna de mineral.

Para cuantificar la migración se mide el punto de entrada de dilución (PED) cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla.

PED [%]	Tiraje Parejo	Tiraje Aislado
	95	60

Tabla 2- 6: Resultados punto entrada de dilución de tiraje uniforme y aislado,(Iribarra, 2014).

Los experimentos muestran que una estrategia de tiraje parejo aumenta el PED, esto se explicaría debido a la menor deformación en la columna de mineral impidiendo la generación de espacios para que el material fino se mueva más rápido, al contrario de lo que pasaría en tiraje aislado donde el PED es menor.

Julin (1992) propone que altas tasas de extracción concentradas en áreas pequeñas producirían un canal en la columna de mineral quebrado, favoreciendo a través de él, el flujo descendente de dilución contribuyendo a la mezcla temprana entre mineral-estéril y la consecuente pérdida de reservas.



Figura 2- 9: Comparación entre tiraje Aislado (Derecha) y Tiraje Parejo (Izquierda) al 60% de extracción. (Irribarra, 2014).

Del trabajo realizado por Irribarra (2014), se muestra que la diferencia de tamaño entre partículas no es motivo suficiente para explicar una temprana entrada de dilución, el flujo de estéril hacia los puntos de extracción dependerá también de la estrategia de extracción implementada y como esto afecta configuración espacial entre los distintos materiales presentes en la columna sobre el nivel de producción. El comportamiento del flujo para un punto y sus vecinos puede ser caracterizado mediante un vector llamado Índice de Uniformidad (I.U) (Susaeta, 2004), se tiene así una medida del tipo de tiraje y puede ser representado en la siguiente matriz.

		Índice de Uniformidad Específico				
		0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1
Número de puntos inactivos en vecindad	0	UNIF	UNIF	UNIF	SEMI	SEMI
	1	UNIF	UNIF	SEMI	SEMI	SEMI
	2	UNIF	SEMI	SEMI	SEMI	AISLADO
	3	SEMI	SEMI	SEMI	AISLADO	AISLADO
	4	SEMI	SEMI	AISLADO	AISLADO	AISLADO
	5	AISLADO	AISLADO	AISLADO	AISLADO	AISLADO
	6	AISLADO	AISLADO	AISLADO	AISLADO	AISLADO

Tabla 2- 7: Matriz de Uniformidad, Adaptado de Susaeta, 2004 (Paredes, 2012)

No se ha encontrado relación directa entre el índice de uniformidad y la entrada temprana de dilución (Paredes, 2012; Santibáñez, 2008), esto puede deberse a que aun cuando considera diferencias de tonelaje entre puntos para una determinada vecindad, el índice de uniformidad no es capaz de dar cuenta del área de contacto entre mineral - estéril, ángulo de extracción del mineral, etc. Es decir es un indicador para el tipo de tiraje, no así de los efectos que el tipo de tiraje puede generar. Sobre cuál sería el efecto de un tiraje proporcional, o bien, una estrategia de extracción tipo panel se discute en la siguiente sección.

2.5.1. Control de Tiraje y Ángulo de Extracción en Panel Caving

Como ya se ha mencionado, un aspecto crítico de una operación por Caving, corresponde a la dilución. El adecuado manejo y control de la dilución, es un factor clave a ser considerado dentro de la planificación, sea cual sea el horizonte temporal contemplado.

La estrategia empleada exitosamente para el control de la dilución se basa en el control del tiraje, el concepto básico en Panel Caving para el control de tiraje es mantener el ángulo formado entre la interfaz estéril/mineral y el nivel de hundimiento, tan suave como sea posible (De Wolfe, 1981),

esto es, manteniendo un cuidadoso control sobre los tonelajes extraídos por columna con el fin de asegurar la adecuada propagación del hundimiento (Figura 2- 10.a.) y evitando así, espacios por donde pueda entrar material diluyente , tal como se muestra en la Figura 2- 10.b.

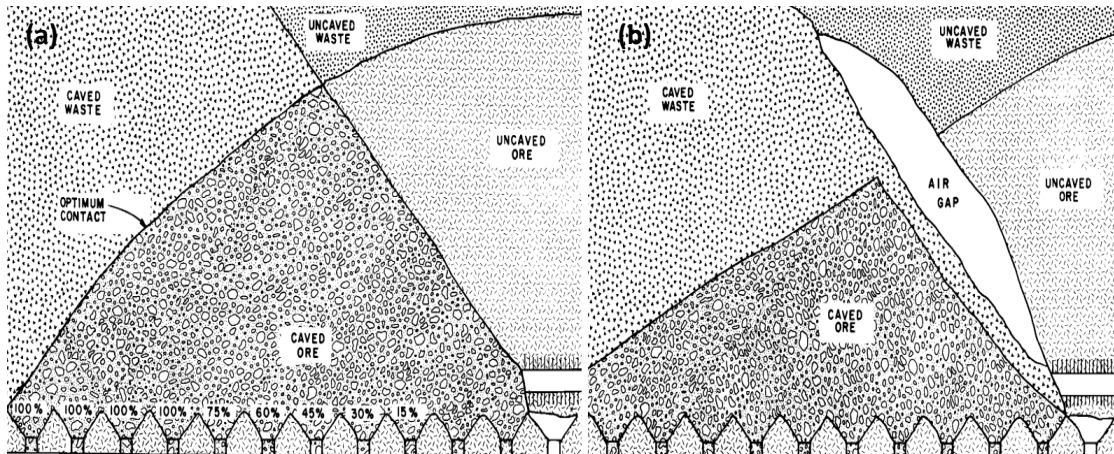


Figura 2- 10: (a) Extracción Ideal. (b) Tasa de extracción excede tasa de propagación del hundimiento, se genera entrada de dilución por "Rilling" (De Wolfe, 1981).

De las Observaciones en la Mina Henderson (De Wolfe, 1981) y el control de la extracción (diario a mensual) es que se postula que el ángulo de extracción ideal es aproximadamente de 45° a 50° (Julin, 1992).

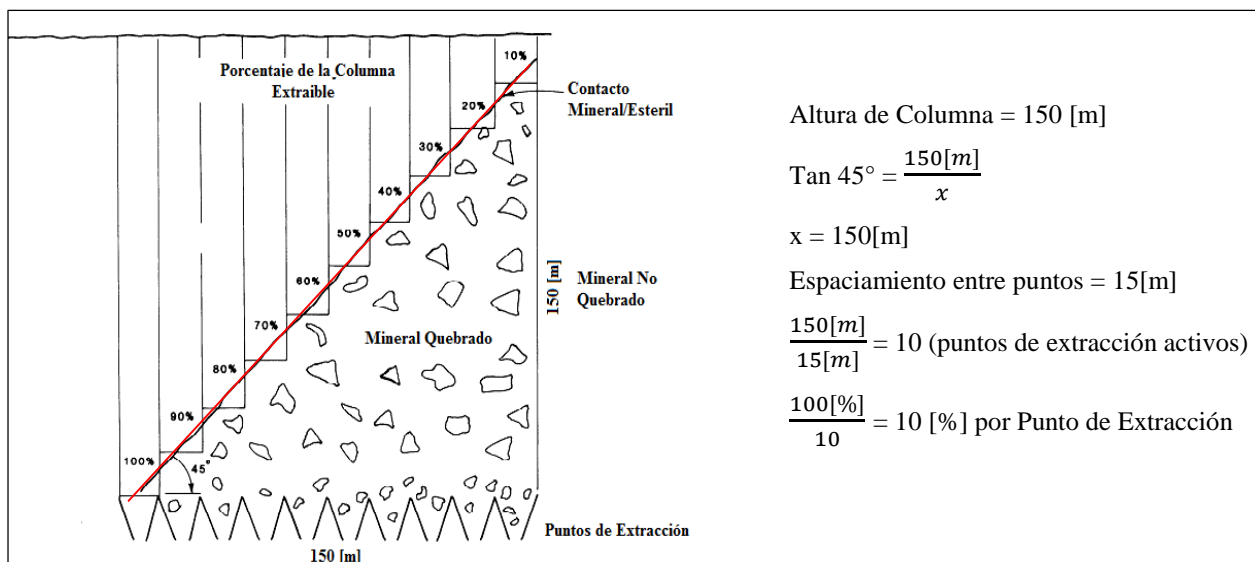


Figura 2- 11: Control de Tiraje para una sección. (Julin, 1992)

En la Figura 2- 11 se puede observar como la altura extraíble determina el área activa necesaria para un adecuado control del tiraje y en consecuencia del ángulo de extracción, el número de puntos está dado por el espaciamiento entre ellos y estos definirán las diferencias entre tonelajes extraídos para puntos vecinos (incrementos fijos entre columnas).

Para el ejemplo de la figura se observa que con una altura extraíble de 150[m] el área de influencia, considerando un ángulo de extracción de 45°, tiene un ancho de 150[m]. El espaciamiento entre puntos es de 15 [m] por lo que el número de puntos activos debe ser 10, de ésta forma la diferencia extraída entre columnas debe ser de un 10[%].

2.6. Conclusiones

- Para el caso de estudio propuesto y de la revisión bibliográfica se concluye que existe escasa información en la literatura relacionada al flujo gravitacional considerando una estrategia de extracción tipo Panel Caving. Los principales estudios y resultados se han enfocado en minería por Block Caving, o bien en estudiar puntos de extracción aislados, no mostrando así la interacción que puede existir en un sector dada una secuencia de extracción y la interacción de varios puntos de extracción activos, sobre esta base se justifica la realización de este trabajo con el fin de aportar al entendimiento del flujo gravitacional en Panel Caving.
- Para la problemática a analizar y considerando la evidente diferencia de tamaño entre los fragmentos presentes en la columna de mineral, la teoría de la percolación y mezcla de partículas no aportan suficiente información que pudiese ser aplicada en forma cuantitativa y directa para estimar la mezcla entre mineral y diluyente, dicho de otro modo, no es posible estimar que tanto puede descender el material fino sobre la columna de gruesos. Se hace necesaria la realización de experiencias que permitan evaluar y entender el comportamiento del flujo gravitacional en una columna heterogénea (zonas con granulometría distintas), más aún, la necesidad de cuantificar el impacto de esta condición sobre la operación minera dado un plan de producción.
- Finalmente se entiende que para la planificación y operación de una explotación por Panel Caving el control de la extracción resulta ser un factor clave en el control de la dilución, de los trabajos realizados por Paredes (2012) y Santibáñez (2008) se concluye que el índice de uniformidad no es una buena métrica para evaluar el impacto del tiraje sobre la entrada de dilución, por ésta razón no se ha considerado en este trabajo como un parámetro de estudio. De las observaciones realizadas por De Wolfe (1981) y de Julin (1992), se plantea el ángulo de extracción como la variable a considerar para el control del tiraje en Panel Caving, en consecuencia para el control de la dilución.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se presenta a continuación el detalle de la metodología empleada para llevar a cabo la etapa experimental.

El modelamiento a escala tiene por objetivo poder observar y realizar experiencias de fenómenos de flujo (que a escala mina o numérica no sería posible) donde la fuerza preponderante sobre las partículas es la gravedad. Para lograr lo anterior debe considerarse aspectos tales como la similitud, escala y diseño de la maqueta entre otros.

3.1. Similitud

Un factor importante a considerar en la experimentación con modelos físicos corresponde a la similitud entre prototipo y modelo, donde es posible identificar tres tipos de similitud (Pineda 2012):

- *Similitud geométrica*: dos sistemas son geoméricamente similares cuando la distancia entre puntos homólogos es dada por un factor de escala de longitud constante λ_L .
- *Similitud cinética*: dos sistemas son similares en su cinemática cuando dos eventos homólogos ocurren a un factor de escala de tiempo constante λ_T .
- *Similitud dinámica*: dos sistemas son dinámicamente similares en puntos homólogos cuando la relación entre la inercia y cualquier fuerza externa es constante entre el modelo y el prototipo.

De las tres, la Similitud geométrica corresponde a aquella más fácil de alcanzar siendo la Similitud dinámica aquella que resulta imposible de ser replicada en los modelos físicos a baja escala de laboratorio (Halim, 2004). Dado el enfoque del presente trabajo se establece que la similitud geométrica basta para alcanzar los objetivos buscados, considerando los alcances establecidos.

A partir de un análisis de similitud es posible determinar los factores de escala en función del factor de escala de longitud (λ_L).

Variable	Factor	Factor de escala
Longitud	λ_L	λ_L
Área	λ_A	λ_L^2
Volumen	λ_{Vol}	λ_L^3
Velocidad	λ_V	$\lambda_L^{1/2}$
Tiempo	λ_T	$\lambda_L^{1/2}$
Masa	λ_W	λ_L^3
Ángulo de fricción	$\lambda_{tan(\theta)}$	1

Tabla 3- 1: Factores de escala en función del factor de escala longitud (λ_L).

3.2. Escala

Uno de los aspectos claves a ser determinados previo a la experimentación, es la escala geométrica a utilizar en la construcción de la maqueta. Esta debe ser tal que permita la representatividad del fenómeno a estudiar. A su vez, debe garantizar la factibilidad de construcción global y de cada uno de sus componentes (pilares, calles, bateas), permitiendo así la adecuada manipulación y control de la experimentación (Orellana 2012). En este sentido, la escala a utilizar corresponde a 1:200, escala a la cual las partículas de los materiales siguen siendo afectadas sólo por la gravedad (material no cohesivo), no existiendo otras fuerzas preponderantes que darán cohesión al sistema, tales como: capilaridad, fuerzas de Van der Waals y fuerzas electrostáticas. Junto con lo anterior, la escala seleccionada permite observar un mayor número de puntos de extracción, mayores alturas de columna y abarcar mayor área de estudio.

A continuación se presentan los factores de similitud escalados según la escala 1:200.

Variable	Factor	Factor de escala	Valor
<i>Longitud</i>	λ_L	λ_L	1:200
<i>Área</i>	λ_A	λ_L^2	1:40000
<i>Volumen</i>	λ_{Vol}	λ_L^3	1:8,000,000
<i>Velocidad</i>	λ_V	$\lambda_L^{1/2}$	1:14.1
<i>Tiempo</i>	λ_T	$\lambda_L^{1/2}$	1:14.1
<i>Masa</i>	λ_W	λ_L^3	1:8,000,000
<i>Ángulo de fricción</i>	$\lambda_{tan(\phi)}$	1	1:1
<i>Densidad</i>	λ_ρ	1	1:1

Tabla 3- 2: Factores de escala y sus respectivos valores

3.3. Diseño Modelo Físico

En esta sección se detalla la metodología empleada para el diseño del modelo físico. La metodología empleada se detalla a continuación.

- **Determinar sector de estudio:** A partir de los objetivos planteados se selecciona, en base a la información disponible, el sector que presenta las condiciones adecuadas para el análisis y desarrollo de este trabajo.
- **Escalar Dimensiones:** De los planos disponibles del sector de estudio se seleccionan los principales parámetros a ser considerados en el diseño y construcción de la maqueta a escala.
- **Diseñar Maqueta:** Se realiza el diseño considerando los objetivos planteados, lo anterior implica velar por la representatividad, y al mismo tiempo, la factibilidad operacional del modelo.

3.3.1. Sector de Estudio (Prototipo)

Para la definición del sector de estudio se considera la zona que subyace bajo el botadero de estéril (ver Figura 2- 2), dicha zona corresponde a parte del Bloque 1 y parte del Bloque 4 del sector Esmeralda Sur. En la Figura 3- 1, se observa que el botadero comprende una extensa área entre las calles de producción 33 y la 37, es por ello que se selecciona la calle 35 y los puntos de extracción que van desde la zanja 38 a la zanja 50. Esta zona (área achurada roja en la Figura 3- 1) al encontrarse justo bajo el botadero sería la más afectada en el caso de existir algún tipo de interacción entre el botadero y el nivel de producción debido al flujo.

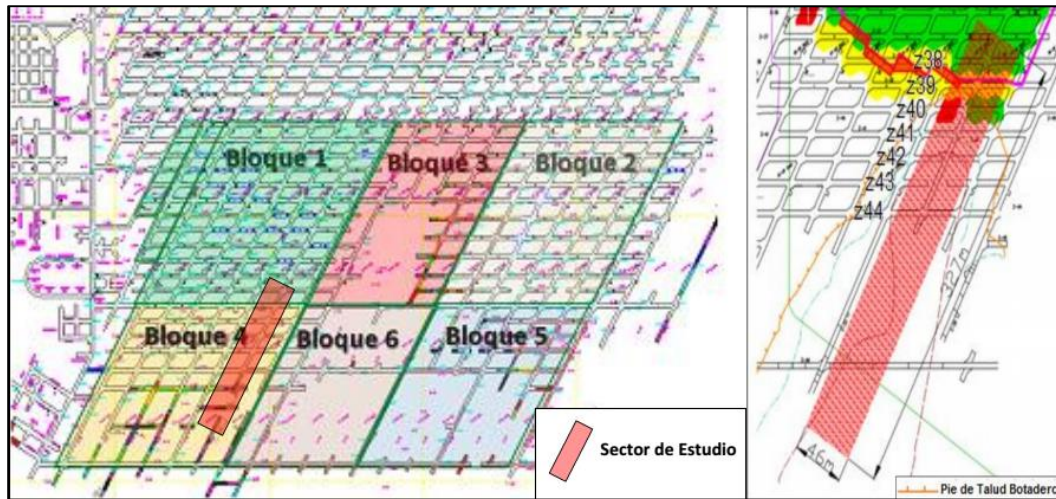


Figura 3- 1: Sector de estudio, planta del nivel de producción Mina Esmeralda

El sector de estudio tiene como dimensiones: 327 [m] de largo y 46 [m] de ancho, que representan 15042 [m²] del nivel de producción. El diseño de la malla de extracción del sector seleccionado corresponde a una malla tipo Teniente de 20 [m] x 34 [m] hasta la zanja 43, cambiando hacia el Sur debido a consideraciones geomecánicas por una malla de 24.5 [m] x 34[m].

3.3.2. Diseño Maqueta a escala (1:200)

Definida la escala y el sector de estudio se diseñan dos maquetas que se utilizarán en la experimentación, siendo los principales componentes a construir los pilares zanjas y el pilar corona que formaran el nivel de producción. Los dos equipos modulares tienen altura de 2.5 [m], se diferencian por sus bases de distinto tamaño; *Equipo I* con una base de 0.7 [m] x 0.223 [m] y *Equipo II* con base de 1.633 [m] x 0.223 [m].

Las dimensiones para los pilares zanja y para el pilar corona son:

Parámetro	Crown Pillar		Pilar Zanja			
	Sector[m]	Modelo[cm]	Z39-Z43		Z44-Z49	
			Sector[m]	Modelo[cm]	Sector[m]	Modelo[cm]
Ancho	19.6	9.8	16	8	20.5	10.25
Altura	18	9	13	6.5	18	9
Ápex	3.74	1.87	0	0.5	1.2	0.6
Altura Calle	3.7	1.85	-	-	-	-
Ancho Calle	4	2	-	-	-	-
Altura galería	-	-	3.7	1.85	3.7	1.85
Ancho galería	-	-	4	2	4	2
Angulo Pared entre bateas	-	-	49°	49°	56°	56°

Tabla 3- 3: Resumen dimensiones escaladas nivel de producción.

El diseño de la maqueta a escala se realiza en función de los objetivos planteados, la principal restricción que se impone es respetar geometría y dimensiones del prototipo. Junto con esto se busca minimizar singularidades que pudiesen afectar el flujo; por ejemplo, la generación de zonas estancadas producto de singularidades en la maqueta.

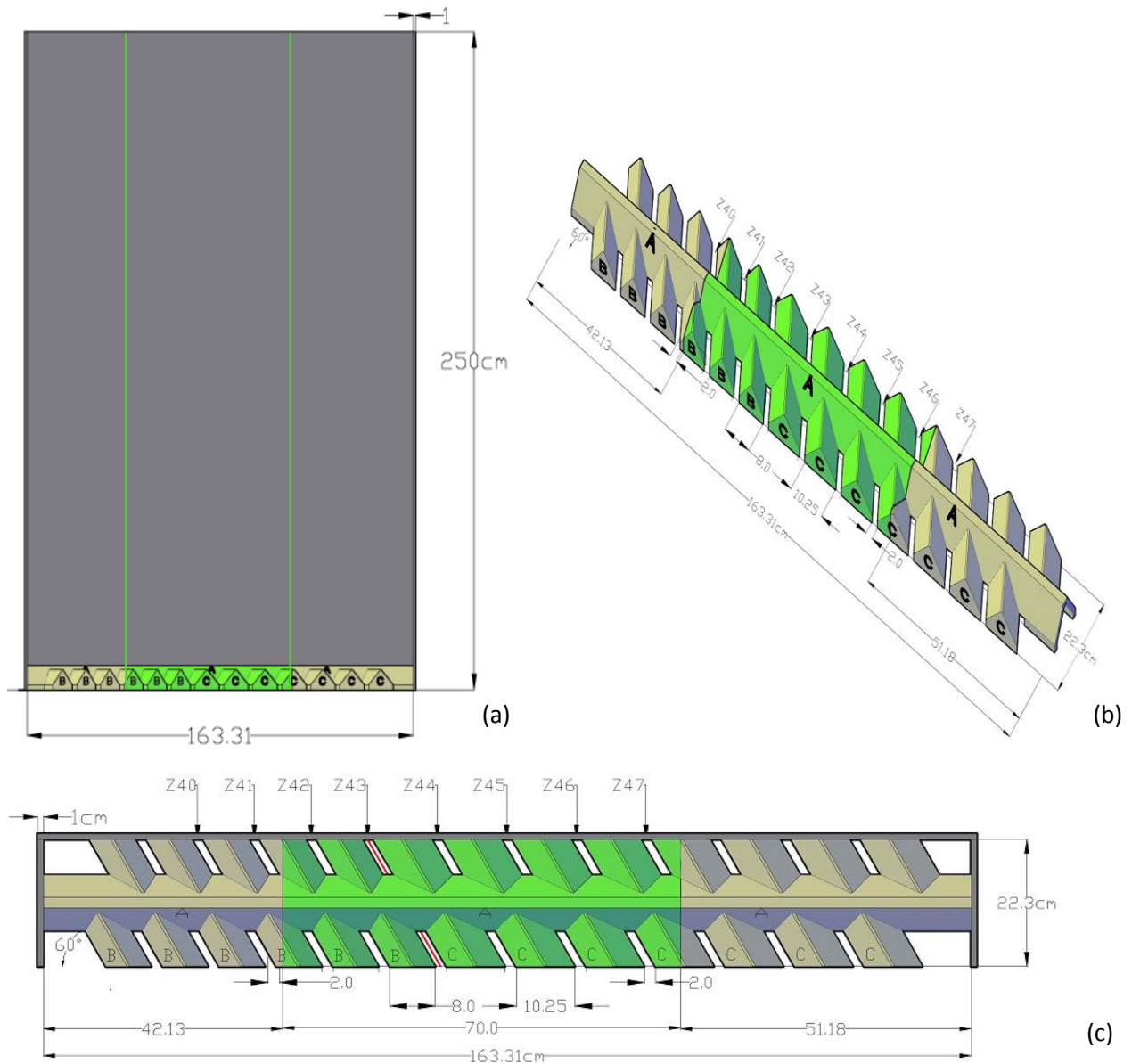


Figura 3- 2: Diseño Maquetas a escala, cotas en centímetros. Equipo I considera solo el área verde, Equipo II considera el área total (Gris y verde): (a) Vista frontal, (b) Vista en perspectiva de la base, (c) Vista en planta.

Se observa en la Figura 3- 2 distintas vistas para el diseño de las maquetas a escala, se ha diferenciado las distintas componentes mediante letras; A corresponde al pilar corona, B y C corresponden a pilares de las zanjas. La línea roja en la Figura 3- 2 indica la zanja de referencia para el cambio en las dimensiones de la malla, de 20[m] x 34[m] a 24.5 [m] a 34 [m].

3.4. Construcción Equipo experimental

La configuración de las maquetas a escala se detalla a continuación:

- **Base:** Estructura de acrílico que representa el nivel de producción, está formada por los pilares zanjas y el pilar corona.
- **Módulos de Acrílico:** Paneles de acrílico de 2.5 [m] de altura, que acoplados constituyen las paredes del modelo a escala.
- **Estructura Metálica:** Unidad formada por barras metálicas las cuales proveen de soporte y contención al módulo de acrílico, evitando deformaciones de la base y de las paredes dado el peso del material cargado en la maqueta.
- **Sistema de extracción:** Corresponde a un sistema accionado por servomotores ubicados en cada punto de extracción; estos pueden ser controlados mediante una interfaz web donde se seleccionan los puntos de extracción en el modelo que estarán activos y además permite controlar el ángulo de giro y el tiempo que le toma al servomotor realizar dicho giro, con esto es posible controlar la tasa de extracción de cada punto.



Figura 3- 3: Equipo experimental, (a) Módulo de acrílico montado sobre estructura metálica, (b) Base de la maqueta, (c) Sistema de Extracción.

3.5. Materiales

Los materiales a utilizar en el modelo deben ser materiales equivalentes, esto es (Mandel, 1963):

- Las partículas del medio granular contenidas en el modelo deben ser homotéticas con respecto de la distribución del medio granular del prototipo.
- Los granos deben contener la misma masa específica, igual coeficiente de Poisson, y Modulo de Elasticidad.
- El material utilizado en el modelo debe respetar la ley de Coulomb, por lo tanto deben poseer el mismo ángulo de fricción.

De lo anterior se concluye que lo más adecuado es utilizar en el modelo físico el mismo material que del prototipo (mina) (Orellana, 2012).

Como se ha mencionado y con el fin de que las fuerzas actuando sobre las partículas sean solo la gravedad y la fricción entre ellas (Pineda, 2012), existirá una cota inferior para el tamaño mínimo, lo mismo ocurrirá con el tamaño máximo. Se acota el tamaño máximo de las partículas en el modelo por el tamaño de la apertura del punto de extracción, esto con el fin de evitar problemas técnicos, colgaduras imposibles de retirar y asegurar la capacidad de fluir del material hacia el punto de extracción.

Tamaño Mínimo	Tamaño Máximo
$d_{cr} < (\lambda_L \cdot d_{min})$	$(\lambda_L \cdot d_{máx}) < a_{pe}$

Tabla 3- 4: cota inferior y superior para los tamaños de partículas en modelo físico a escala.

Donde d_{min} corresponde al tamaño mínimo de partícula a considerar en el prototipo, mientras que $d_{máx}$ corresponde al tamaño máximo de partícula a considerar del prototipo. En tanto, d_{cr} representa el tamaño crítico al cual otras fuerzas preponderan por sobre la gravedad, y a_{pe} representa el ancho del punto de extracción en el modelo.

3.5.1. Caracterización: Uniformidad y Curvatura

Para la caracterización del material a emplear, se utiliza las distribuciones de tamaños de cada zona a representar en la maqueta a escala. La pendiente y forma general de la distribución granulométrica puede ser descrita por medio del coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de curvatura (Cz) (Craig, 2004), definidos respectivamente en la Ecuación 3- 1 y la Ecuación 3- 2.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ecuación 3- 1: Coeficiente de Uniformidad (Craig, 2004)

$$Cz = \frac{D_{30}^2}{D_{60}D_{10}}$$

Ecuación 3- 2: Coeficiente de Curvatura (Craig, 2004)

Donde D_{10} , D_{30} y D_{60} representan el tamaño bajo el cual se encuentra el 10%, 30% y 60% de las partículas respectivamente. Un mayor índice de uniformidad muestra que mayor es el rango de tamaños de las partículas. Mientras que un coeficiente de curvatura entre 1 y 3 da cuenta de una buena gradación de las partículas.

3.6. Procedimiento Experimental

Los experimentos de flujo gravitacional se llevan a cabo en el Laboratorio de Block Caving de la Universidad de Chile. Los pasos a seguir para el desarrollo de los experimentos se detallan a continuación.

- I. *Preparación del material:* Se realiza en el laboratorio de procesamiento de minerales de la Universidad de Chile. El material es chancado y clasificado para poder construir las curvas granulométricas requeridas. En caso de ser necesario el material es sometido a secado para retirar la humedad presente.
- II. *Calibración sistema de extracción:* Antes de cargar el modelo por completo, se realizan pruebas con el sistema de extracción. El propósito es determinar la tasa de extracción para cada punto dada una determinada configuración; ángulo de giro y periodo del servomotor. De esta forma es posible estimar el tiempo que debe estar activo el servomotor hasta cumplir con la masa programada para el periodo en curso.
- III. *Llenado del modelo físico:* El equipo experimental se llena utilizando poruña para depositar sucesivas capas (una sobre otra) de material. Cada 20 [cm] se incorporan líneas de flujo para poder distinguir de mejor manera las zonas de flujo, además, se incorporan marcadores- partículas debidamente identificadas y correspondientes al d_{100} de las partículas empleadas en los experimentos.



Figura 3- 4: Inserción de líneas de flujo y marcadores en el llenado del modelo físico.

- IV. *Extracción:* Es dependiente de la carta de tiraje a evaluar. La extracción se realiza en ciclos caracterizados por el número de puntos activos y la masa a extraer por punto en el periodo. En esta etapa el mineral retirado en los diferentes puntos de extracción es depositado en recipientes para su pesaje, alcanzada la masa requerida para el periodo se detiene la extracción.
- V. *Toma y Registro de datos:* Para cada ciclo de extracción se revisa punto por punto si se ha recuperado algún marcador. En caso de existir recuperación de marcador se registra la masa a la cual fue recuperado, la idea es poder determinar las zonas de extracción que genera la estrategia de extracción implementada. De igual forma se verifica mediante inspección visual la presencia de material diluyente con el fin de reportar la masa a la que se registra la entrada de dilución al punto de extracción.

El procedimiento experimental se resume en el siguiente esquema:

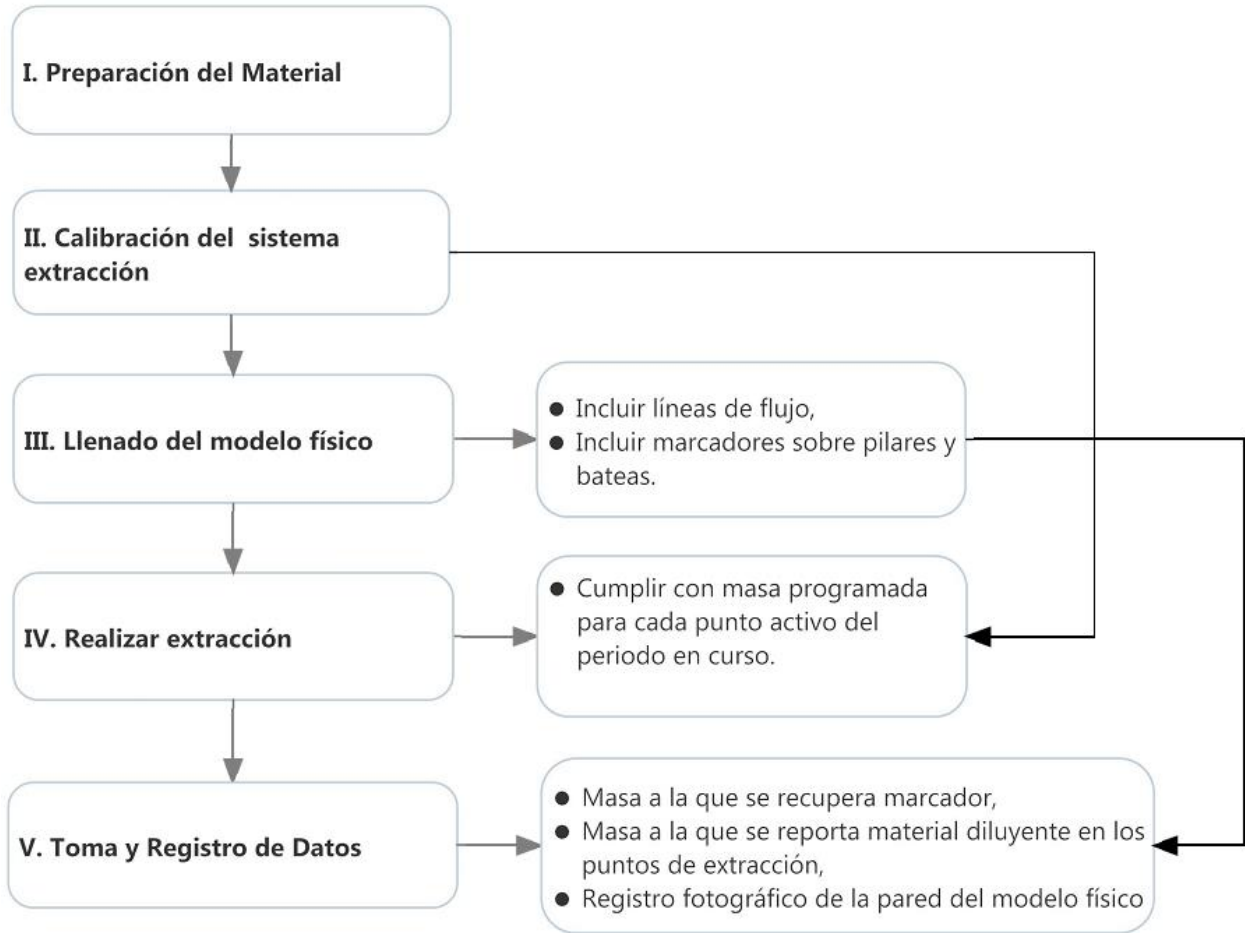


Figura 3- 5: Diagrama procedimiento experimental.

3.7. Resultados esperados

Los resultados que se pueden obtener con experimentos de este tipo y en el equipo experimental, son:

- Zonas de Movimiento y Zonas de extracción.
- Recuperación minera (Incorporando trazadores que permiten estimar reservas remanentes sobre los pilares).
- Altura de interacción.
- Efectos en la superficie producto de la extracción.
- Migración de finos: En el caso de usar materiales con diferencias de tamaño pronunciadas.
- Cuantificación de esfuerzos inducidos sobre pilares: Incluyendo celdas de carga en la base del modelo.

3.8. Variables y mediciones

Del análisis bibliográfico y con el fin de cumplir con los objetivos propuestos se establece que las variables a medir durante la etapa experimental corresponden a:

- *Punto de Entrada de Dilución (PED)*: Da cuenta de la interacción, debido a flujo preferencial, entre el fino depositado en el cráter se subsidencia y el Nivel de Producción. Se calcula según la expresión:

$$PED[\%] = \frac{M_D}{M_p} \cdot 100$$

- **Ecuación 3- 3: Calculo de PED en experimentos.**

Donde, M_D corresponde a la masa a la cual se reporta dilución en el punto y M_P corresponde a la masa programada según altura de columna para dicho punto.

- *Punto de Entrada de Quebrado (PEQ)*: Permite identificar la interacción entre la zona de Quebrado y el Nivel de Producción.

$$PEQ[\%] = \frac{M_Q}{M_p} \cdot 100$$

- **Ecuación 3- 4: Calculo de PEQ en experimentos.**

Donde, M_Q corresponde a la masa a la cual se reporta material quebrado en el punto de extracción y M_P corresponde a la masa programada según altura de columna de Mineral In-Situ para dicho punto.

- *Altura Interacción Zanja acceso*: Se cuantifica de esta forma el efecto de la no extracción de una zanja sobre el flujo del mineral. Para esto, se incluye dentro del modelo físico marcadores correspondientes al d_{80} del mineral, debidamente identificados y diferenciados del resto de las partículas.
- *Altura equivalente extraída*: Cuantificar el efecto de la extracción sobre el flujo del material hacia el nivel de producción, caracterizando la estrategia de extracción tipo panel mediante el ángulo de extracción, dicho ángulo se calcula a partir de la diferencia de alturas extraídas entre puntos contiguos.
- *Distancia entre interfaz quebrado/botadero y nivel de producción*: Permite cuantificar los efectos del flujo sobre la superficie, además de determinar el potencial ingreso (percolación) de material fino a los puntos de extracción.

3.9. Conclusiones y discusión

- Sobre la similitud, se concluye que solo la similitud geométrica y la similitud cinemática pueden ser alcanzadas de forma sencilla, en tanto que la similitud dinámica resulta casi imposible. Se entiende entonces que la validez y representatividad de la experimentación en modelos físicos estará limitada. No obstante, dependiendo de los objetivos a cumplir estos podrán ser alcanzados siempre que se cumplan las condiciones adecuadas.
En el caso de este trabajo se busca estudiar las interacciones debido al flujo gravitacional debiendo prevalecer la fuerza de gravedad. Es así como se descarta el uso de material saturado, o bien agregar humedad al sistema dado que no contribuirá a mejorar la simulación física, por el contrario generarán un efecto negativo en la capacidad de fluir de las partículas.
- Se concluye también que debe existir un compromiso entre representatividad y objetivos buscados; una escala mayor permitiría el uso de granulometrías mayores, pudiendo incorporar también el efecto de la humedad y dados los tamaños mayores se evitaría los efectos de capilaridad sobre las partículas finas, pero, también una escala mayor limitará el tamaño del modelo a construir, no pudiendo construirse modelos extensos que incluyan un gran número de puntos de extracción.
- La discusión se plantea entonces en torno a la metodología y al conocimiento que existe actualmente sobre la experimentación a escala, si bien Power (2004) plantea que la escala más adecuada para obtener resultados similares a escala mina corresponde a 1:30, otros experimentos muestran que es posible obtener resultados factibles a escalas menores (Pineda, 2012; Orellana, 2012), entonces, es de esperarse la existencia de una escala factible según sea el fenómeno a estudiar.

4. MODELAMIENTO FÍSICO: CALLE 35 - MINA ESMERALDA SUR

Para la modelación física, las condiciones iniciales del sistema y los parámetros de entrada que se imponen tienen gran influencia sobre los resultados que se obtienen. En consecuencia es necesario replicar de la mejor forma las condiciones que se tienen a escala natural.

En este capítulo se muestra cómo se configuran los experimentos de flujo a realizar con el fin de modelar las condiciones del sector de estudio, definido para la calle 35 entre la zanja 38 y la zanja 50 de los Bloques 1 y 4 de la mina Esmeralda Sur.

4.1. Materiales

Para el desarrollo de los experimentos se utiliza material proveniente de mina El Teniente, este material es obtenido mediante muestreo, tanto en la mina subterránea como en el botadero de estéril del Rajo Sur. Este material es sometido a chancado y clasificación en el laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Universidad de Chile, con el fin de construir las curvas granulométricas que se muestran en la siguiente figura.

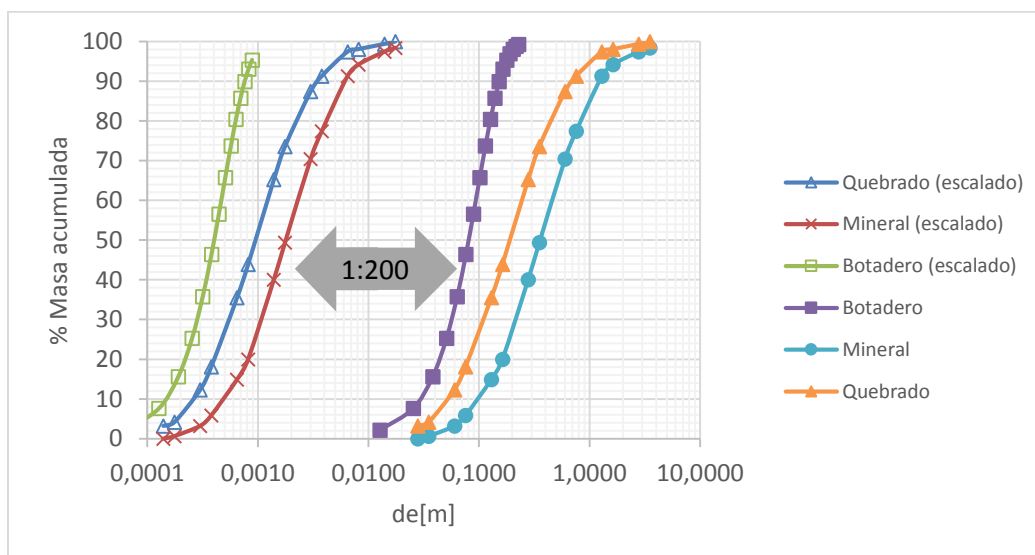


Figura 4- 1: Granulometría para los distintos materiales, escala mina (derecha) y laboratorio (Izquierda). (Elaborado a partir de “Informe Backanalysis de fragmentación RENO- División El Teniente”, CODELCO, 2009; “Granulometría Lastre, El Teniente Rajo Sur”, ORICA Mining Service)

En la Figura 4- 1, las curvas sin marcador representan la escala mina en tanto las curvas tachadas muestran la escala laboratorio. Las curvas a escala mina se han obtenido de la Figura 1- 1, donde la condición ha sido la altura a representar según el sector de estudio elegido; se tiene que la curva para Mineral ha de ser representativa para la altura de columna extraíble (50-100[m]) en tanto la curva para el Quebrado corresponde a una altura de entre 200 a 300 [m], finalmente, la curva para el material estéril corresponde a la curva medida del botadero de estéril del Rajo Sur en División El Teniente de CODELCO.

4.1.1. Caracterización material

El material para las distintas zonas a representar se caracteriza por sus granulometrías, los tamaños característicos empleados en el modelo son los que se muestran en la Tabla 4- 1.

Material		d ₈₀ [mm]	d ₅₀ [mm]	d ₂₀ [mm]
Estéril	Modelo	0.65	0.40	0.20
	Prototipo	130	80	40
Quebrado	Modelo	2.30	1.00	0.40
	Prototipo	460	200	80
Mineral	Modelo	3.30	1.50	0.80
	Prototipo	660	300	160

Tabla 4- 1: Tamaños característicos para mineral, quebrado y estéril.

Se ha calculado la densidad aparente para cada material cargado en el modelo, se muestran los resultados (junto a los coeficientes de uniformidad y curvatura) en la siguiente tabla.

Material	Densidad aparente [gr/cm ³]	Cu	Cz
Estéril	1.60	2.1	1.1
Quebrado	1.40	2.7	1.5
Mineral	1.50	4.8	1.2

Tabla 4- 2: Caracterización materiales empleados en modelo físico.

La densidad estimada corresponde a la que se consigue de depositar el material dentro del modelo sin compactarlo. Estos resultados son densidades menores a las que se pueden encontrar en una mina (1.8 a 2.7 [gr/cm³])

4.2. Condiciones de Borde

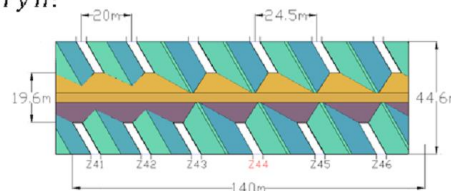
Las condiciones de borde a imponer tienen relación con las condiciones propias del prototipo (sector de estudio), esto es, representar a escala laboratorio las condiciones necesarias para realizar experimentos representativos.

4.2.1. Número de puntos de extracción:

Los puntos de extracción están dispuestos en bases de acrílico con un diseño de malla tipo Teniente de 20[m] x 34[m] y 24.5 x 34 [m].

Dado que se utilizan dos equipos experimentales de distintos tamaños, se tiene para el Equipo I un total de 20 puntos operativos mientras que para el Equipo II se tiene 44 puntos operativos. Para ambos equipos, la zanja en el centro del modelo (Z44) no es considerada en la extracción por ser una Zanja acceso.

Base Experimento I y II:



Base Experimento III:

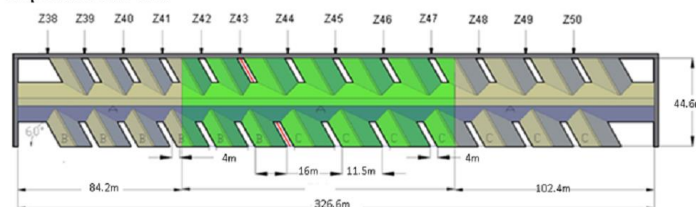


Figura 4- 2: Esquema de las bases del Equipo I (Arriba) y Equipo II (abajo) utilizados en los experimentos de flujo.

4.2.2. Plan de Extracción

El plan de extracción a utilizar corresponde al Plan Quinquenal (División El Teniente, CODELCO, 2014) para al bloque 1 y bloque 4 de Esmeralda Sur. Este plan se escala a gramos y se ajusta al modelo físico de tal forma que sea equivalente y representativo del plan programado para los puntos de extracción considerados para el sector de estudio, es decir, se mantiene la altura de columna extraíble y masa por periodo para cada uno de ellos.

Bloque	Altura Escala Mina				Tonelaje Base Escala Mina			
	In-Situ [m]		Extraíble [m]		In-Situ [Kton]		Extraíble [Kton]	
	Promedio	Desv Est	Promedio	Desv Est	Promedio	Desv Est	Promedio	Desv Est
1	150.94	27.07	240.17	32.33	124.05	23.74	182.37	24.86
4	191.76	81.81	291.39	64.73	193.29	77.38	272.06	54.17

Tabla 4- 3: Estadísticas básicas para el plan quinquenal Bloque 1 y 4 de Esmeralda Sur.

La secuencia de extracción es replicada de la carta de tiraje del plan quinquenal para el bloque 1 y bloque 4 de Esmeralda Sur, planificación que considera la incorporación de puntos de norte a sur y desde Oeste (Fw) a Este (Hw) como muestra la Figura 4- 3.b, el sector de estudio corresponde al rectángulo rojo.

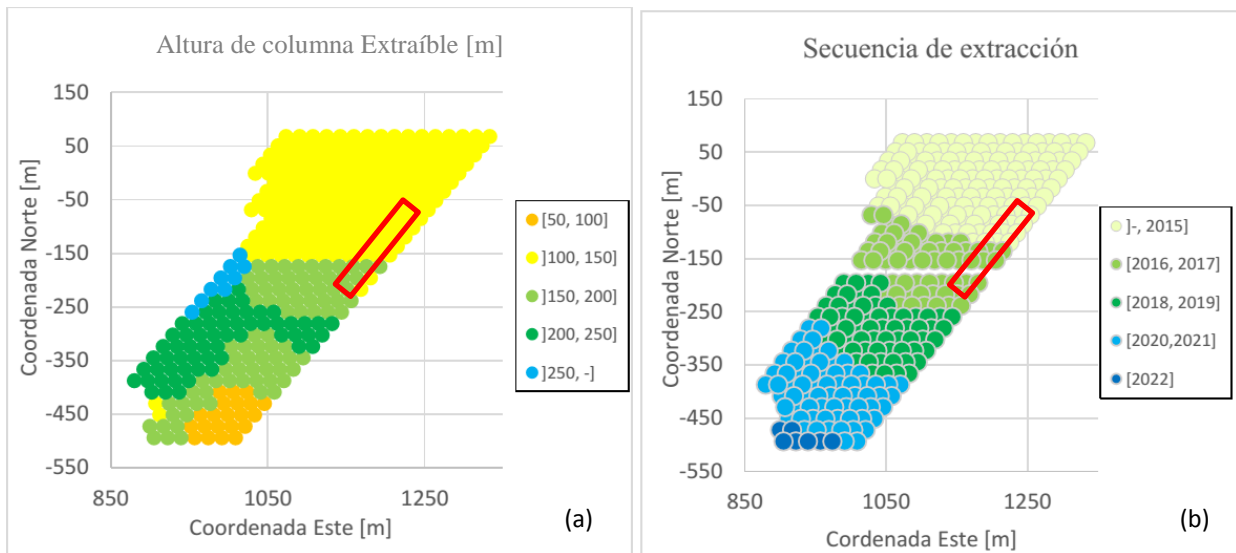


Figura 4- 3(a) Altura de Columna extraíble. (b) Secuencia de extracción según año

4.2.3. Altura de Columna in-situ, extraíble y de Quebrado

Se considera la altura in-situ y de extracción del Bloque 1 y Bloque 4 en Esmeralda sur, donde la altura de columna promedio para el sector de estudio (borde rojo en Figura 4- 3) corresponde a 150 [m] mientras que la columna del material quebrado se estima en 400 [m], en tanto la altura del botadero se ha establecido en 70 [m].

Para modelar esta condición física es que la maqueta se divide verticalmente manteniendo la razón que existe entre alturas de las distintas zonas (in-situ, quebrado, estéril); para todos los experimentos a realizar se llena el modelo físico primero con partículas de mineral (granulometría gruesa) hasta alcanzar 65 [cm] de altura, esto define la zona de mineral in-situ.

Sobre la columna de Mineral in-situ fragmentado se incorpora una zona de Quebrado remanente (granulometría media) completando los 240 [cm]. Por último se agrega material fino que representa la zona de estéril llegando a los 250[cm].

En el proceso de llenado y tal como se observa en la Figura 4- 4, cada 20 [cm] se ubican líneas de colores (material pintado) con la finalidad de observar el flujo del material. Además y para estudiar las recuperación sobre la zanja acceso, se incluyen marcadores debidamente identificados sobre los pilares y sobre las bateas.

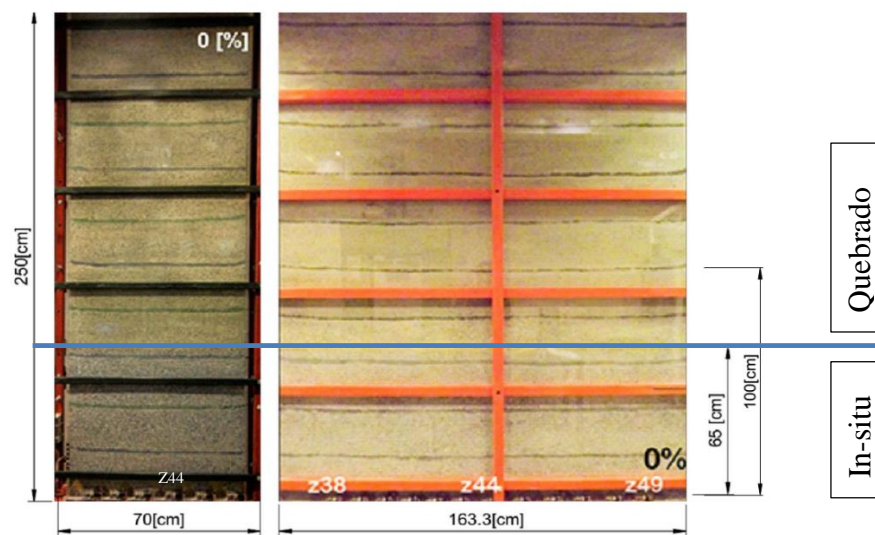


Figura 4- 4: Modelos Físicos cargados inicialmente (0[%] extraído de la masa total programada); A la derecha Equipo experimental I con 600 [Kg], a la izquierda Equipo experimental II con 1000[kg].

Finalmente la altura del mineral in-situ se mantiene fija para cada uno de los puntos dentro del modelo (línea azul en la Figura 4- 4), esto según la información disponible para el sector de estudio. La siguiente tabla muestra un resumen de la altura extraíble, la altura in-situ y la masa promedio que será extraída por punto según sector.

Sector	Escala Laboratorio		
	Altura Mineral In-situ [m]	Altura Promedio Columna Extraíble [m]	Masa Promedio columna extraíble [kg]
Hasta Zanja 42	0.65	1	12
Zanja 43	0.65	1.14	13
Desde Zanja 44	0.65	0.96	12

Tabla 4- 4: Resumen Masa de la Columna Extraíble por punto y Columna In-Situ.

4.2.4. Criterio operacional

Con el fin de mantener condiciones de tiraje similares a las presentes en una mina de Caving, se imponen como criterio de operación para la extracción de mineral en el modelo físico:

- I. *Un equipo de carguío (LHD) por calle:* Se considera que existe un LHD por calle, tal cual ocurre en una calle de producción. Es así como en el desarrollo de los experimentos, por ciclo de extracción no deben existir dos o más puntos extrayendo simultáneamente para una misma calle.
- II. *Extracción diferenciada para puntos vecinos a piques de vaciado:* Una práctica común conocida en minas explotadas por block/panel Caving es que para alcanzar las metas de producción propuestas en un período de tiempo se realiza una “sobre extracción” de mineral desde puntos de extracción cercanos a piques de vaciado. De esta forma, el operador del equipo LHD acarrea más mineral por unidad de tiempo, dada la reducción en la distancia de acarreo.

4.3. Plan experimental

Para la etapa experimental se considera la realización de 3 experimentos, 2 de los cuales se llevan a cabo en el Equipo experimental I (equipo modular de dimensiones menores) y 1 en el Equipo experimental II (modelo de dimensiones mayores). El enfoque de los experimentos se detalla a continuación.

Experimento	Equipo Experimental	Descripción	Objetivos
I	Equipo I	Experimento donde se extrae el plan quinquenal de Esmeralda comprende extracción de la Calle 35, desde la Zanja 41 a Zanja 47	Cuantificar la migración de finos desde el botadero de estéril, determinar el punto de entrada de quebrado y observar el efecto de la no extracción de la zanja 44 sobre el flujo.
II	Equipo I	Se considera sobre-extracción de un 20% y velocidad 50% mayor en los puntos de extracción cercanos a pique de vaciado. Condiciones similares experimento 1	Establecer efecto de sobre-extracción en la entrada de dilución
III	Equipo II	Considera la simulación de extracción del Panel Esmeralda desde la Zanja 38 hasta la Zanja 50 en la Calle 35	Determinar condiciones topográficas debido al plan minero y cuantificar posible entrada de quebrado y estéril desde el botadero. Mostrar condiciones de interacción sobre la Zanja 44

Tabla 4- 5: Resumen enfoque experimentos

El detalle de cada plan experimental se muestra en los siguientes apartados.

4.3.1. Experimento I: Plan Programado

El Experimento I tiene como objetivo cuantificar la migración de finos, determinar el punto de entrada de quebrado y cuantificar el efecto de no extraer una Zanja (Z44) sobre el flujo.

En este experimento se realiza una extracción, tipo Panel Caving, y de acuerdo a la planificación original de cada uno de los 24 puntos de extracción considerados en el sector de estudio.

4.3.2. Experimento II: Plan Realista

El Experimento II tiene como objetivo analizar el efecto de sobre-extracción de puntos sobre la migración de finos y el comportamiento de la interfaz Quebrado-Mineral (punto de entrada de quebrado). En este experimento, y a partir del análisis de bases de datos históricas de Esmeralda Convencional (Armijo, 2015), se considera una sobre-extracción de hasta un 20 [%] y una velocidad de extracción hasta 50[%] mayor para los puntos vecinos a piques de vaciado (OP, por sus iniciales en inglés – Ore Pass), por cada OP se tienen 4 puntos de extracción vecinos. Para el sector de estudio considerado en este experimento, se tienen 2 OP por calle de producción. El sector de estudio considera: la mitad oeste de la calle 33, la mitad este de la calle 37 y por completo la calle 35, así, se consideran 10 puntos de extracción con la condición mencionada anteriormente (Sobre-extracción y mayor velocidad de tiraje). Lo anterior se muestra en el esquema de la Figura 4- 5.

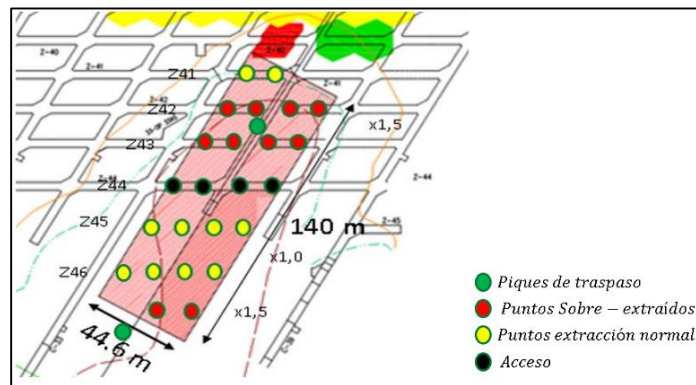


Figura 4- 5: Sector de estudio y Condición según punto de extracción

Finalmente se modifica la carta de tiraje, incorporando así la condición de sobre extracción y mayor velocidad de tiraje. Esto se refleja en el aumento de masa a extraer de los puntos en cuestión y una reducción en los periodos activos de dichos puntos debido a la mayor tasa de extracción (alcanzan antes su altura extraíble).

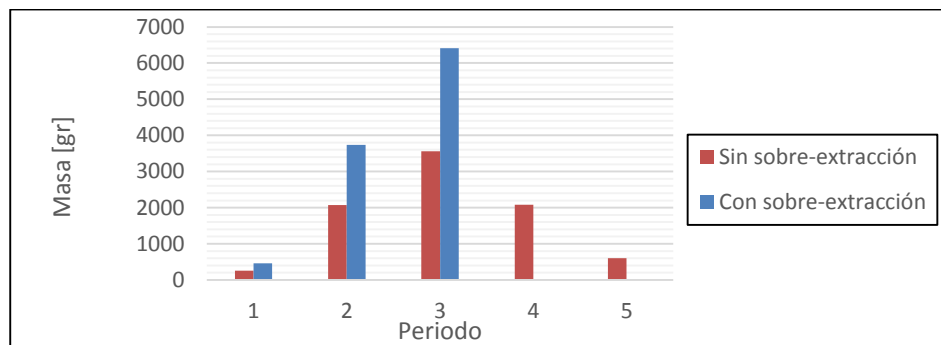


Figura 4- 6: Comparación según periodo, entre puntos vecinos a piques de vaciado.

4.3.3. Experimento III: Plan Realista, Modelo Extendido

El Experimento III tiene como objetivo determinar las condiciones topográficas debido a la extracción, cuantificar la migración de finos, punto de entrada de quebrado y las condiciones de interacción sobre la zanja 44. Este modelo físico se implementa con el objetivo de analizar de forma más representativa el comportamiento del flujo en los puntos cercanos a la Zanja 44 (acceso), esto considerando el efecto que genera la extracción de puntos vecinos y disminuyendo los efectos de borde que pudiesen generar las paredes de la maqueta sobre el sector de estudio.

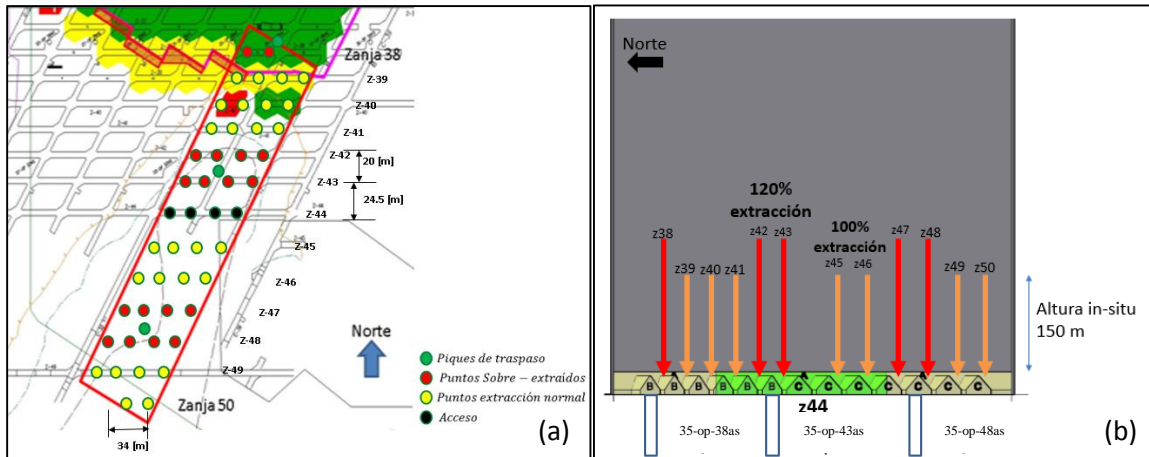


Figura 4- 7: (a) Sector de estudio Experimento y Condición según punto de extracción, (b) Condiciones a implementar en la maqueta.

Como muestra la Figura 4- 7.a, se consideran 48 puntos de extracción para la Calle 35 entre la Zanja 38 y la Zanja 50, de los cuales 18 contemplan la condición de vecinos a pique de vaciado (OP).

Finalmente en la Tabla 4 - 6, se muestra un resumen de las mediciones que se realizan en los experimentos de flujo desarrollados en este trabajo.

Variable a medir	Experimento	Método de medición	Objetivo
Punto de entrada de quebrado	I,II y III	Disposición de marcadores en Interfaz quebrado/in-situ.	Reportar el porcentaje de extracción al cual se aprecia material quebrado en los puntos de extracción.
Punto de entrada de estéril fino	I,II y III	Coloración material estéril en altura de 500 m (color rojo)	Identificar posible migración (flujo preferencial) de material fino.
Altura de interacción y recuperación minera zanja 44	I,II y III	Disposición y recuperación de marcadores en todo el modelo y análisis de imágenes.	Determinar la altura de interacción (zonas de movimiento) sobre la zanja 44 y la altura de material remanente estancado debido a la no extracción de la zanja 44.
Cambio topográfico	III	Análisis de imágenes	Determinar el potencial de generación de cuencas en el cráter debido a la extracción

Tabla 4 - 6: Resumen de las variables a medir en los experimentos.

4.4. Conclusiones

No todas las condiciones a escala mina pueden ser replicadas en un experimento de flujo a baja escala, es por ello que se deben considerar solo las condiciones más importantes y aquellas que se entiendan como las de mayor influencia sobre el fenómeno en estudio. Para el caso de modelar la Calle 35 del Bloque 1 y Bloque 4 de Esmeralda Sur, se consideran necesarias y suficientes las condiciones de borde impuestas y detalladas en este capítulo.

Sobre el plan de producción a replicar en los experimentos, se considera más representativo evaluar dicho plan bajo condiciones “operacionales” similares a las que se pueden encontrar a escala mina, por ello la incorporación de criterios; como considerar un LHD por calle o bien escalar el plan a gramos considerando las condiciones de los puntos vecinos a piques de vaciado permiten otorgar mayor realismo a la simulación propuesta y al mismo tiempo darle validez a los resultados que se puedan obtener.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA ETAPA EXPERIMENTAL

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos una vez realizados los experimentos de flujo en los modelos a escala, para ninguno de los experimentos se reporta entrada de material fino en los puntos de extracción. El capítulo se ha dividido en subsecciones con el fin de presentar detalladamente los resultados para cada una de las tres experiencias realizadas.

5.1. Experimento de Flujo I: Plan programado

El desarrollo del Experimento I se muestra en la siguiente secuencia de imágenes en función del porcentaje de avance de la extracción, esto se ha calculado según la masa extraída respecto a la columna in-situ que para el sector de estudio corresponde a 150 [m] promedio a escala mina.

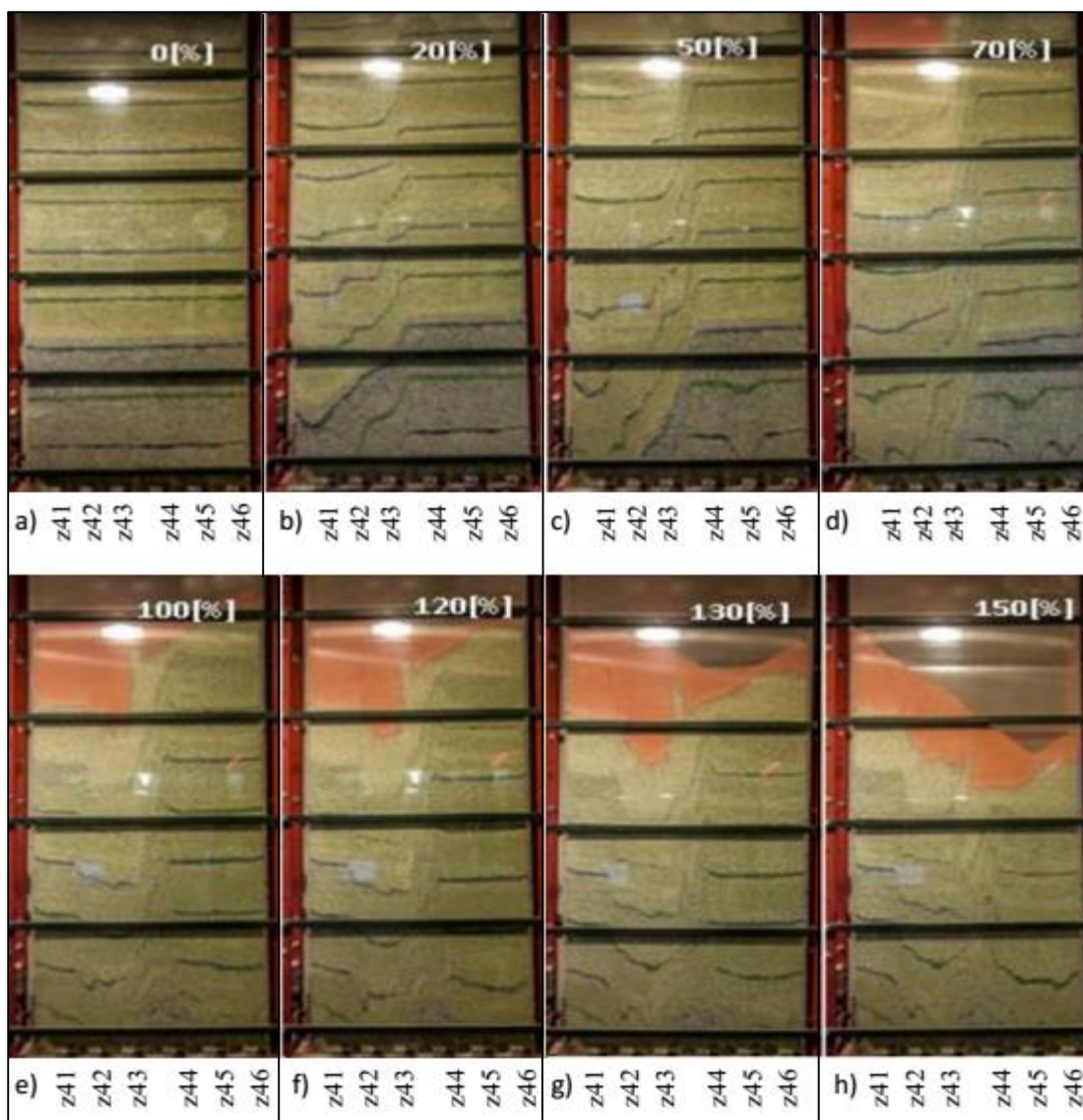


Figura 5- 1: Desarrollo del Experimento I

En la Figura 5- 1 la secuencia de avance de la extracción va de izquierda a derecha, se observan ocho estados del experimento de flujo realizado.

La primera imagen (Figura 5- 1.a.) da cuenta del modelo en su estado inicial, la segunda imagen (Figura 5- 1.b.) muestra el experimento cuando se ha alcanzado un 20% del plan programado para el sector, y se tienen en producción las zanjas: 41, 42 y 43. Es fácil observar en la Figura 5- 1.b. mediante las líneas de flujo incorporadas en el modelo, que la diferencia de alturas entre las columnas extraídas genera una flexión en la interfaz Quebrado-Mineral, formando un ángulo “característico” respecto al nivel de hundimiento, tal cual lo describiera Julin (1992).

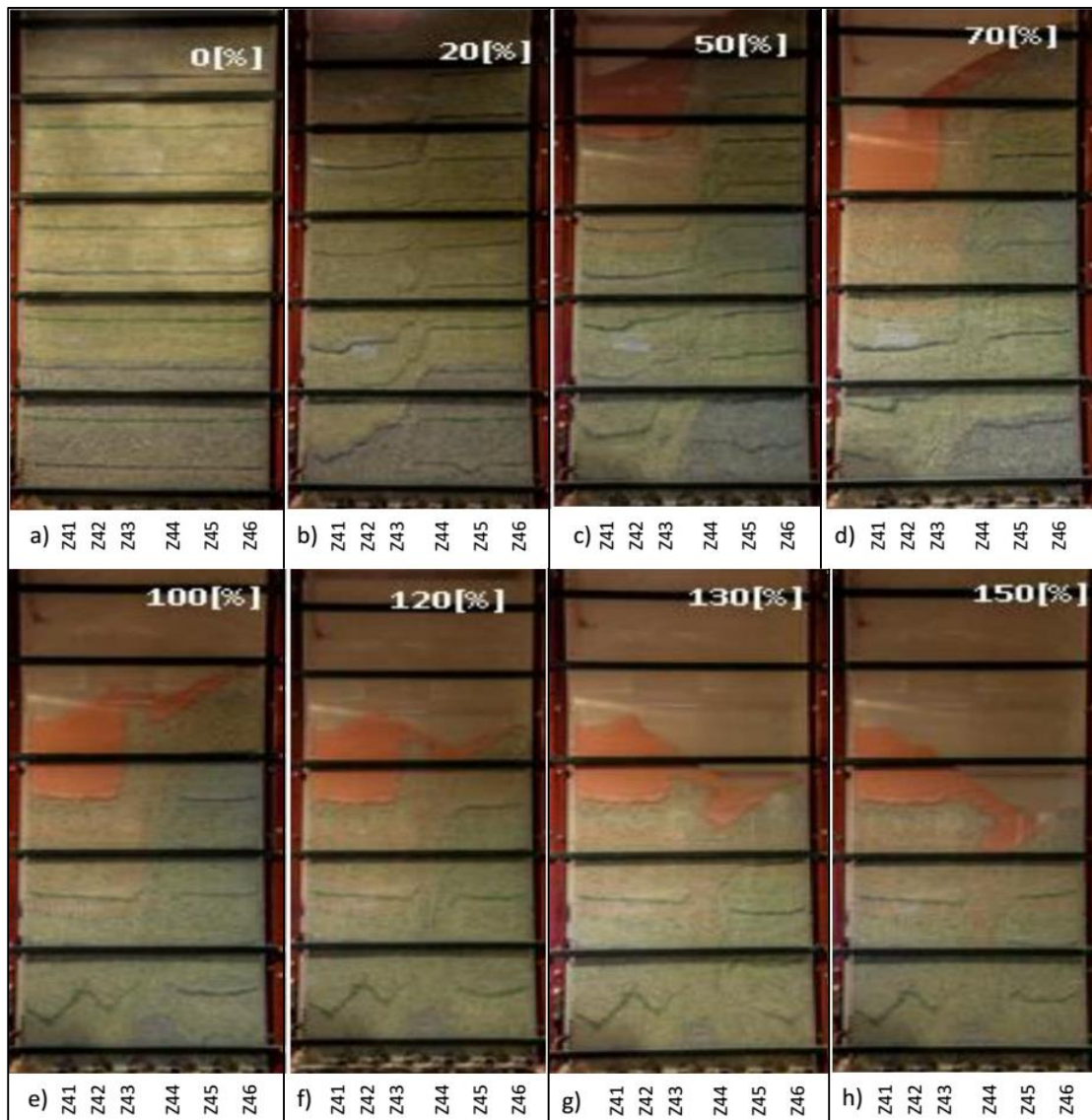
En la Figura 5- 1.c. se ha alcanzado un 50% de avance del plan, para la zanja 41(z41) se tiene casi un 80% extraído de su columna extraíble, en tanto que la zanja 44 (z44) no ha sido incorporada razón por la cual el ángulo de la interfaz se ve más pronunciado respecto a la imagen anterior, sobre este mismo punto, el no incorporar una zanja es equivalente a tener un espaciamiento mayor al necesario para la interacción entre puntos vecinos, es fácil notar en las imágenes que existe una zona de no movimiento sobre la z44

Respecto a la topografía, aun cuando se observa un mayor descenso del material estéril sobre las zanjas: 41, 42, 43 (Figura 5- 1.d.)Figura 5- 1, la apertura e incorporación de puntos desde la zanja 44 hacia la derecha contribuyen a que la superficie descienda de forma uniforme, tal como se observa al completar 100% y 120% el avance de la extracción respecto la columna in-situ. El comportamiento descrito anteriormente, dependerá de las zanjas activas y su ubicación, una vez que se han cerrado puntos (z41, z42, z43), continuar con la extracción de los puntos a la derecha de la z44 genera una diferencia pronunciada entre la altura de la topografía.

Finalmente, bajo las condiciones evaluadas no se observa interacción entre el material fino (estéril) y el nivel de producción, no se observó en ninguno de los puntos material fino el cual se marcó de color rojo para facilitar su identificación. Aun cuando se observa que la interfaz Estéril-Mineral desciende de forma irregular, en todo momento logra distinguirse, lo cual da cuenta de la escasa mezcla (o bien la baja percolación del estéril respecto al quebrado).

5.2. Experimento de Flujo II: Plan realista

De igual forma que para el Experimento I, se muestra el desarrollo del Experimento II en la siguiente secuencia de imágenes, también en función de la masa extraída respecto a la columna in-situ.



El desarrollo del experimento es similar al anterior, es posible observar que realizar sobre-extracción de puntos (z42, z43) y un aumento en la velocidad de tiraje provoca un descenso más rápido del estéril respecto al nivel de producción, así mismo es posible notar que la superficie descende de forma irregular. De igual forma que en el Experimento I, no extraer la zanja 44 (z44) genera que las zonas a la derecha y a la izquierda de esta singularidad se comporten inicialmente de forma aislada, debiendo haber pasado varios periodos para que logren conectar. Tal como muestran las líneas de flujo en la Figura 5- 2.c. donde se ha extraído el 50 % de la masa programada, la zona de la mitad izquierda del modelo no logra conectar con la mitad derecha.

5.3. Experimento de Flujo III: Plan realista, modelo extendido

Finalmente y al igual que en las otras dos experiencias (EI y EII), se muestra a continuación el desarrollo del Experimento III en la siguiente secuencia de imágenes, se muestran en función del tonelaje extraído correspondiente a la columna In-situ y en cada imagen se señala el año equivalente del plan de producción. La secuencia avanza de izquierda a derecha.

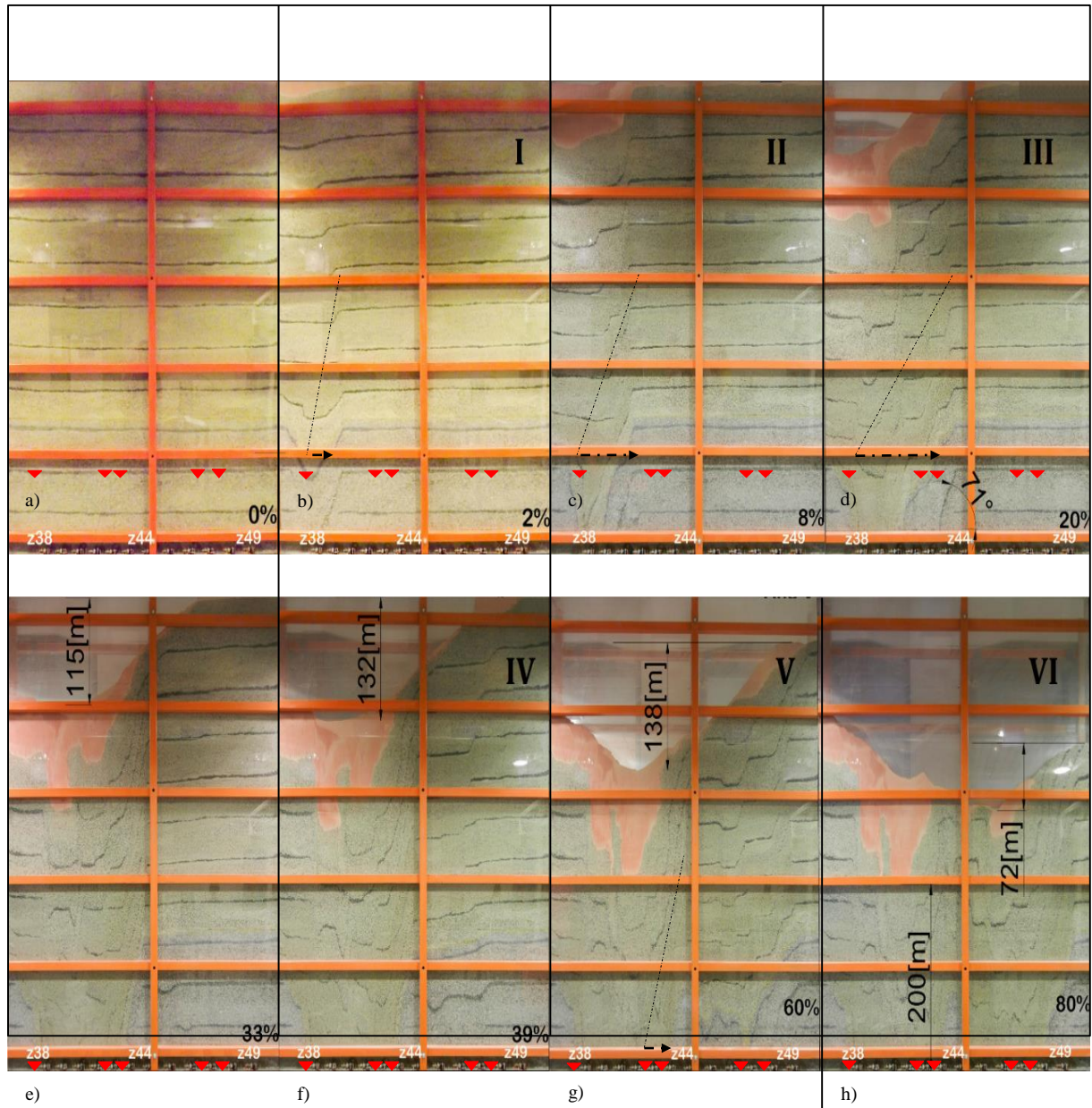


Figura 5- 3: Desarrollo Experimento III.

En la figura anterior se muestran ocho estados del Experimento de Flujo III (EIII), se han resaltado en las imágenes las zanjas que son vecinas a piques de traspaso (triángulos rojos). Se inicia la secuencia de extracción con la zanja 38 (z38), en la Figura 5- 3.b. se muestra el primer año del plan donde se han abierto las zanjas 38 y 39, la mayor tasa de tiraje en la z38 genera inicialmente un ángulo de flujo pronunciado, que descenderá a medida que se incorporan zanjas a la producción (secuencia b, c y d en la Figura 5- 3). No obstante, el agotamiento de la primera zanjas abierta y la

no extracción de la zanja 44 tenderán a aumentar el ángulo de flujo del Panel (Figura 5- 3.g), tal como se observó en los Experimentos I y II.

Por otra parte, al igual que en los experimentos anteriores, se observa que en todo momento la zanja 44 al no ser incorporada en producción se transforma en una singularidad para el flujo, generándose una zona de material sin fluir. Al final del cuarto año (Figura 5- 3.f) y una vez que se han incorporado tres corridas de zanjas (z45, z46, z47) a la derecha de la zanja 44, se observa movimiento del material estático sobre la z44 por encima de los 40 [cm]-escala laboratorio.

Es interesante notar como varía la topografía en función del plan, despreciando el efecto de borde, que puede ofrecer la pared de acrílico, se observa que durante los primeros cuatro años (hasta Figura 5- 3.f) la sobre extracción de las zanjas 42 y 43 contribuyen a un mayor descenso de la superficie, sumado al hecho de que no existe descenso alguno desde la z44 hacia la derecha, se genera una depresión considerable en el cráter de subsidencia. A partir del cuarto año la apertura de nuevos puntos e incorporación de nuevas zanjas (z45, z46, z47) permite que la superficie del lado izquierdo del modelo descienda.

En la siguiente figura se observa como progresa la extracción de izquierda a derecha, es posible notar que la extracción va avanzando de forma secuencial, variación gradual de colores de azul a rojo solo hasta alcanzar la zanja que no se extrae (línea punteada en la Figura 5- 4) momento en el cual la extracción del lado derecho muestra un patrón de flujo distinto al sector anterior a la zanja acceso, también se aprecia que no extraer la zanja 44 genera una zona de material remanente que no logra ser extraído.

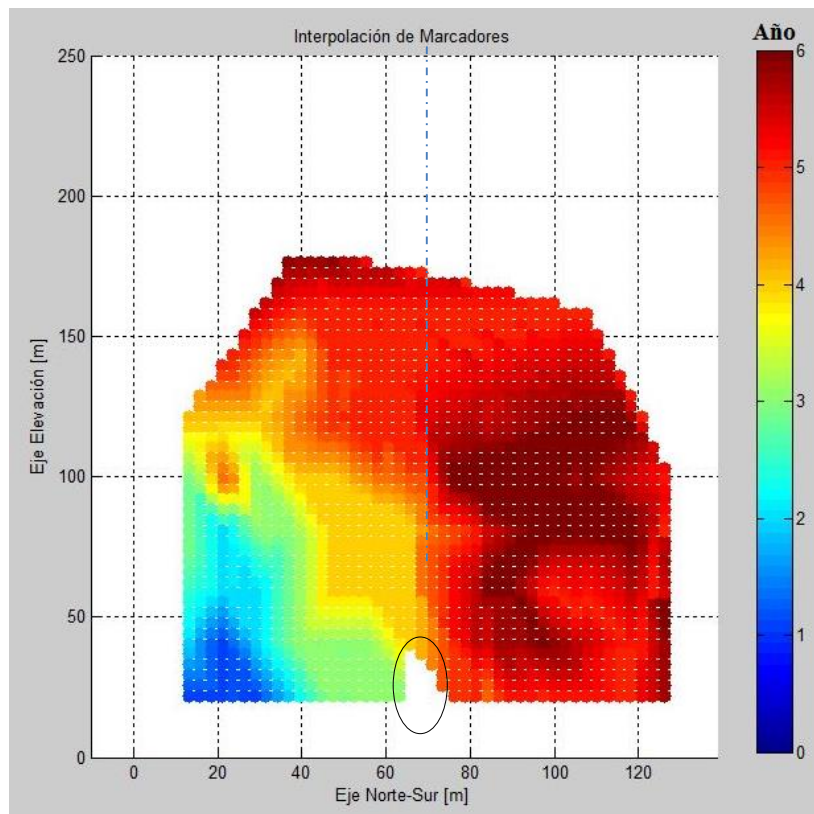


Figura 5- 4: Envoltente de extracción, Experimento III.

5.4. Análisis de Resultados Experimentos de Flujo I y II

Los resultados de los experimentos I y II son comparables puesto que se realizan en el mismo equipo experimental, por lo tanto, están sujetos a las mismas perturbaciones que pudiesen existir. Los principales resultados se resumen en la siguiente tabla:

Variable medida	Experimento	
	I	II
Velocidad de extracción Promedio [g/periodo]	263	352
Masa Extraída [kg]	307	335
PEQ promedio[%] (Respecto columna In-situ)	70±5	65±5
PED [%]	-	-
Distancia Estéril-Nivel de Producción [m]	220	200
Diferencia entre cota máxima y mínima- topografía[m]	100	80

Tabla 5- 1: Resumen resultados Experimento I y II

Como se muestra en la Tabla 5- 1, en ninguno de los dos experimentos se reporta entrada del material fino, por esta razón no existe información para el PED. En ambos experimentos la zona de Quebrado actúa como barrera para el flujo de estéril hacia los puntos de extracción, esto puede deberse a:

- la distribución de tamaño de las partículas y buena gradación ($C_u=2.7$, $C_z=1.5$),
- la gran distancia entre el material fino (Estéril) y el nivel de producción,
- la densidad del lecho a la altura de la interfaz Estéril-Quebrado.
- Flujo en masa que no favorecería la mezcla entre partículas como sucedería en un flujo interactivo.

Estos factores en conjunto podrían explicar por qué el material fino no logra alcanzar el nivel de producción durante el desarrollo de los experimentos, la densidad de la columna fragmentada varía debido al esponjamiento y según la altura de columna dado el tiraje, de igual forma la compactación del material granular, esperándose mayor compactación en los sectores de mayor densidad (Dorador, 2014) lo que evitaría el descenso de partículas más finas. Es posible observar este hecho en la Figura 5- 5, donde las líneas de flujo cercanas al nivel de producción ($H < 65$ [cm]) se deforman con mayor facilidad y aun cuando se ha extraído masa de la misma columnas las líneas de flujo sobre los 100 [cm] se mantienen a una distancia constante durante los primeros ciclos de extracción.

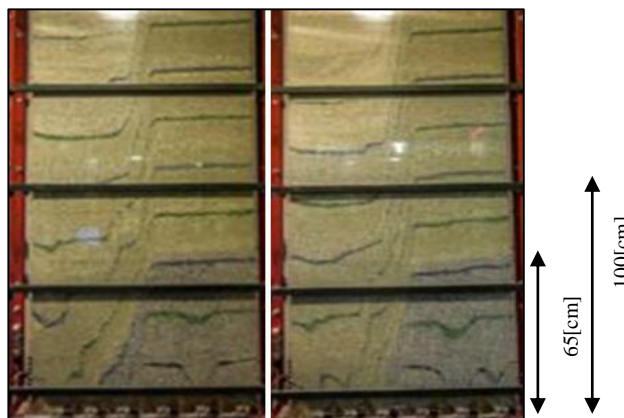


Figura 5- 5: Experimento I, Comparación de las líneas de flujo según altura.

5.4.1. Plan de extracción y Angulo de extracción

Para el análisis del flujo gravitacional en la estrategia tipo Panel Caving se considera necesario comprender el comportamiento del ángulo de extracción. Tal como se menciona en el capítulo de antecedentes el ángulo de extracción dependerá de la altura de columna extraíble y la cantidad de puntos activos, con el fin de mostrar de mejor manera el comportamiento de esta variable es que en la Figura 5- 6 se muestra el ángulo formado entre columnas y como varía en función de las alturas de columnas.

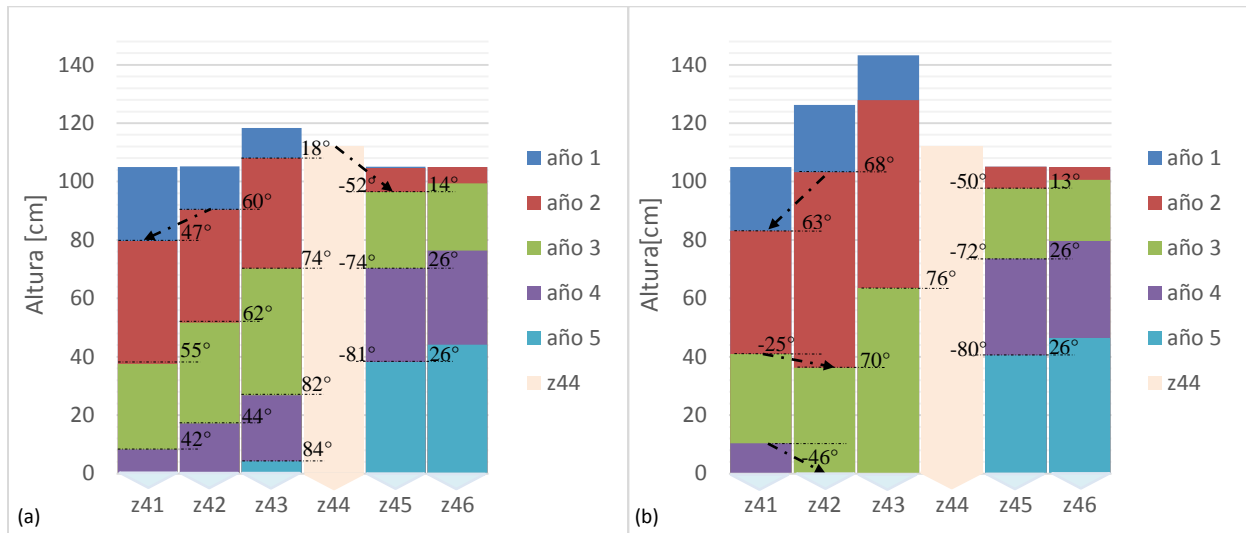


Figura 5- 6: Variación de la altura de columna según plan y ángulos entre columnas. (a) Experimento I, (b) Experimento II.

En la figura anterior cada porción coloreada muestra como varía la columna en un año. Es posible observar que el ángulo con que avanza el Panel no es constante, varía entre columnas continuas y varía según el periodo, en particular se observa que el no extraer la Zanja 44 (z44) produce un aumento del ángulo de extracción. Por otra parte, se puede comparar el efecto entre el plan programado y el que considera sobre extracción, Figura 5- 6.a. y Figura 5- 6.b. respectivamente, donde la sobre extracción de la zanja 42 y 43 sumado a la mayor velocidad de tiraje de estos puntos produce un cambio de sentido del ángulo de extracción respecto al avance del panel (de izquierda a derecha en la imagen).

El desarrollo de los experimentos corrobora lo expuesto anteriormente. En la Figura 5- 7 se muestra el comportamiento del flujo de material para el Experimento I (a) y el Experimento II (b).

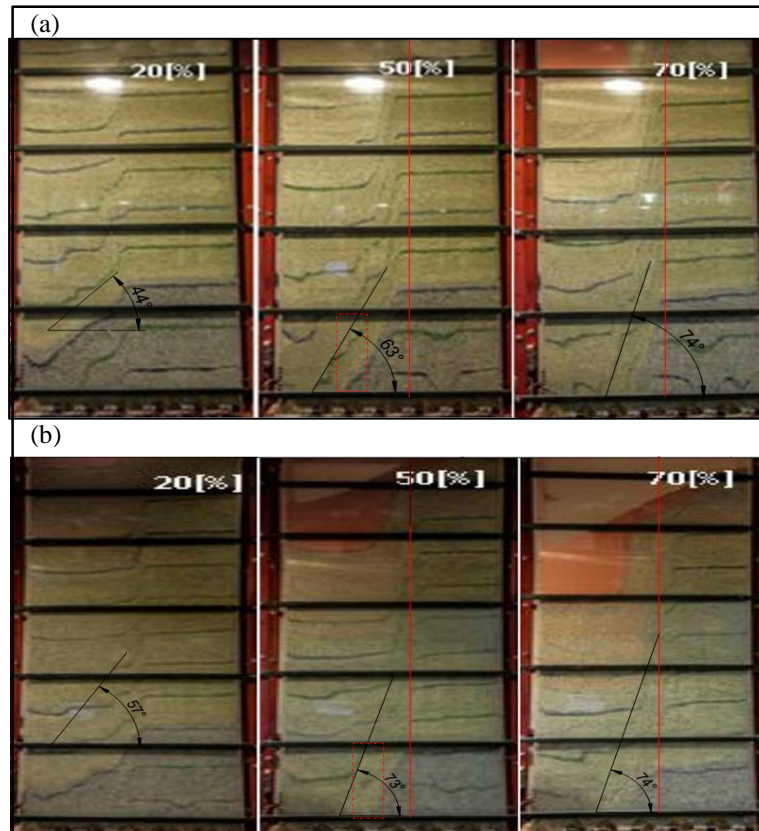


Figura 5- 7: Comparación entre Experimento I (a) y Experimento II (b)

En la figura anterior es posible apreciar los efectos que genera la sobre extracción sobre el flujo gravitacional del material fragmentado, comparando estados similares de avance del plan. Para el caso del plan ideal (Figura 5- 7.a) se observa que los ángulos de flujo son menores que para el plan realista (Figura 5- 7.b). Asociado a lo anterior, se puede apreciar que la interfaz entre Quebrado y Mineral desciende de forma más lenta para el Experimento I (EI) que para el Experimento II (EII), esto se asocia al ángulo de avance del Panel, que al presentar mayor inclinación (debido a la mayor velocidad de extracción) permite que el Quebrado descienda más rápido sobre el nivel de producción. Si se compara los rectángulos rojos de la Figura 5- 7, se observa que para el caso ideal (EI) la interfaz Quebrado-Mineral es distinguible fácilmente, además de presentar mayor porcentaje de mineral respecto al caso más realista (EII).

Finalmente se compara el Punto de Entrada de Quebrado (PEQ), indicador definido en este trabajo para analizar la interacción entre Quebrado y Mineral, es por esto que se mide respecto de la columna In-Situ. Para el cálculo del PEQ se considera la primera entrada de quebrado observada en los puntos de extracción, es decir, no se ha diferenciado entre pulso o entrada continua de Quebrado.

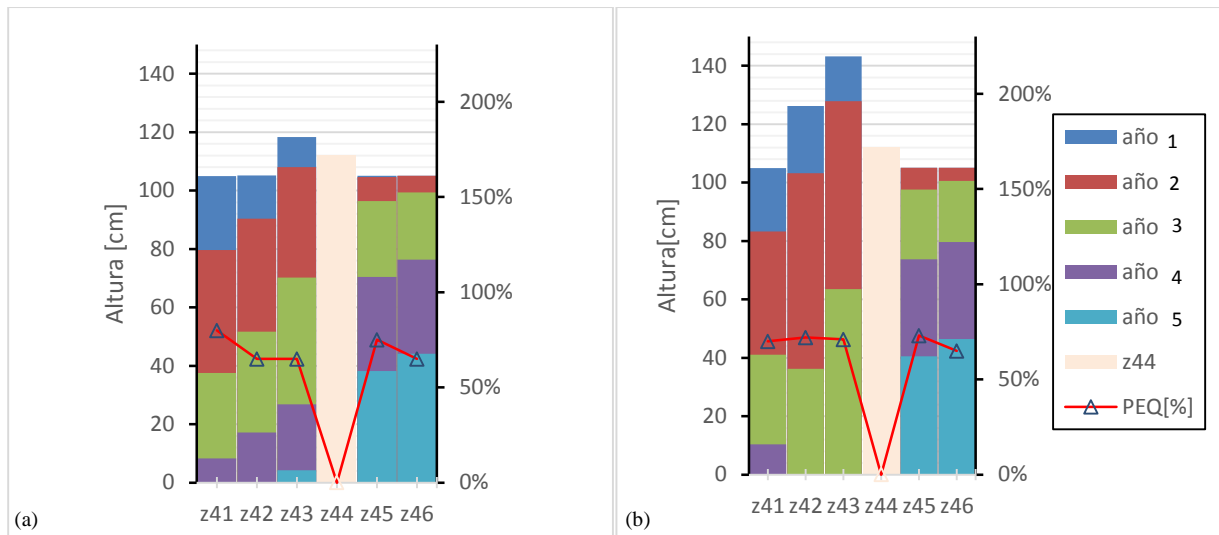


Figura 5- 8: Comparación entre PEQ [%]: (a) Experimento I, (b) Experimento II.

En la figura anterior se muestra la variación de altura de columna en el tiempo para la calle 33, la línea roja representa el Punto de Entrada de Quebrado (PEQ) respecto de la columna In-Situ, cuya altura se fijó en 65 [cm], es posible observar que la sobre extracción de los puntos en la zanja 42 y 43 (Experimento II) produce un descenso más rápido de su respectivas columnas, lo que genera una inversión en el ángulo de extracción respecto al caso ideal (Figura 5- 8.b), esto explicaría el descenso en el PEQ para dicho punto ya que el área de contacto entre Quebrado-Mineral sería mayor.

5.4.1. Zanja no incorporada en la Extracción

De los experimentos realizados es posible notar en la Figura 5- 1 y en la Figura 5- 2 que el no extraer una zanja (Z44), genera una singularidad que perturba el flujo del material y la conexión entre las zonas de movimiento de la zanja 43 y la zanja 45.

Del análisis de los marcadores puestos sobre la zanja 44 y aquellos recuperados se estima la zona de interacción entre la envolvente de extracción formada por la zanja 41, 42, 43 y la zona de extracción formada por la zanja 45 y 46. De igual forma mediante el análisis de imágenes se estiman las zonas que no alcanzaron a tener movimiento (flujo) de material, zona que se caracteriza como un pilar no recuperado sobre la zanja 44.

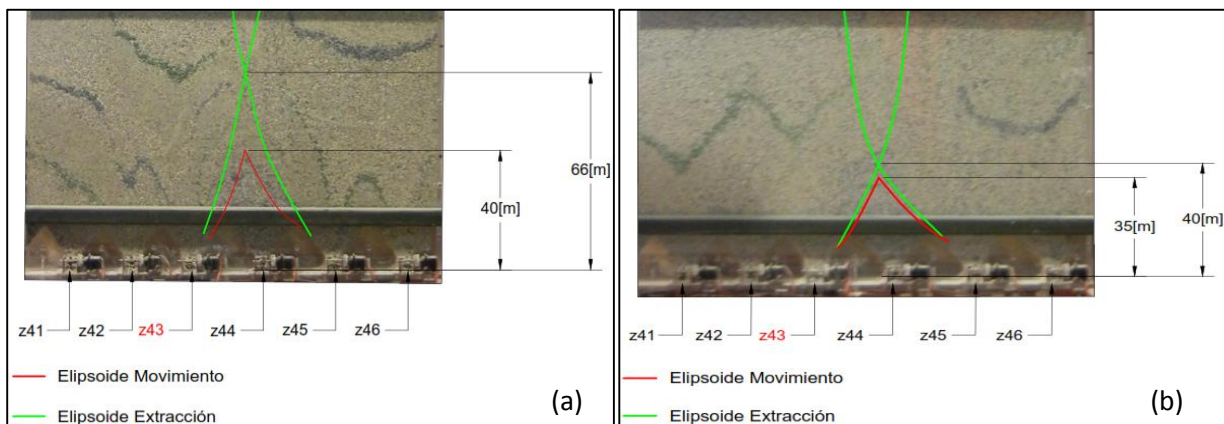


Figura 5- 9: Altura de interacción entre envolvente de extracción y movimiento. (a) Experimento II, (b) Experimento II.

Se observa en la Figura 5- 9 la consecuencia de no extraer una zanja, esto puede entenderse como la pérdida de reservas debido al pilar no extraído. Las dimensiones del pilar no recuperado dependerán de las condiciones de extracción llevadas a cabo, tal como muestra las imágenes de la figura anterior, una extracción más agresiva (sobre extracción, imagen derecha) generará un pilar de dimensiones menores a las de una extracción llevada a cabo de forma conservadora (plan ideal, imagen izquierda). Esto tiene sentido pensando en que a mayor masa extraída, mayor será la dimensión tanto del elipsoide de movimiento como del elipsoide de extracción.

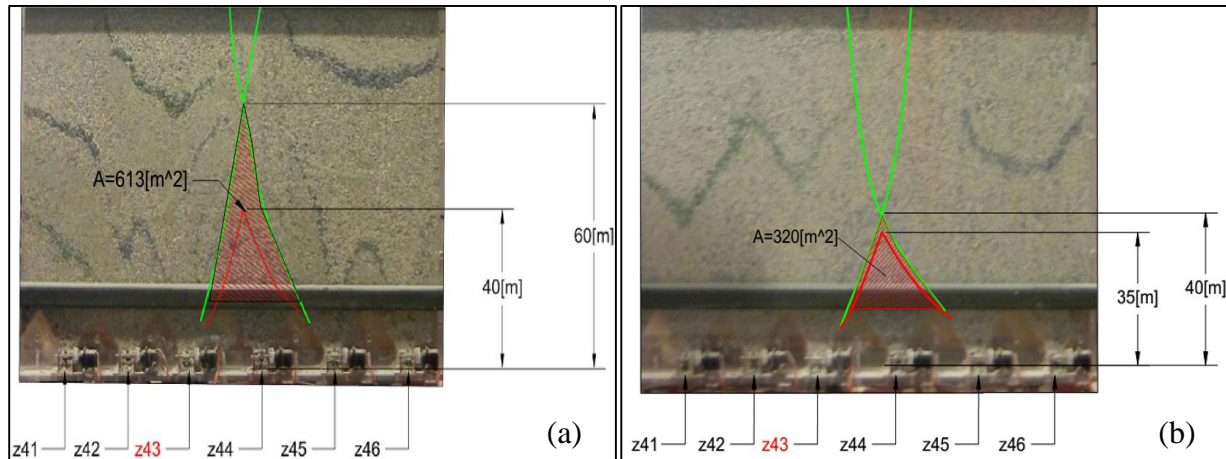


Figura 5- 10: Área no recuperada: (a) Experimento I, (b) Experimento II.

Finalmente y en base a lo mostrado por los experimentos se estima el área del pilar no recuperado sobre la zanja 44, siendo casi el doble el área del pilar del Experimento I en comparación al del Experimento II.

5.5. Análisis de Resultados Experimento III

En ésta sección se detalla el análisis de los resultados obtenidos a partir del experimento III, se ha dividido el análisis de acuerdo al tema involucrado.

Masa total extraída [kg]	550
Extraído Según Plan [%]	80
Última Zanja Incorporada	z49
PEQ (respecto mineral in-situ) [%]	63±16
PED [%]	-
Distancia Estéril-Nivel de Producción [m]	200
Diferencia entre cota máxima y mínima-topografía[m]	72

Tabla 5- 2: Resumen Resultados Experimento III.

De igual forma que para el experimento I y II, no se reporta material fino correspondiente a estéril en el nivel de producción.

5.5.1. Plan de extracción y Angulo de extracción (Experimento III)

De igual forma que para el Experimento I y el Experimento II, se han graficado las alturas de columna según plan, en función del tiempo y como varían las alturas de columna según los resultados del experimento.

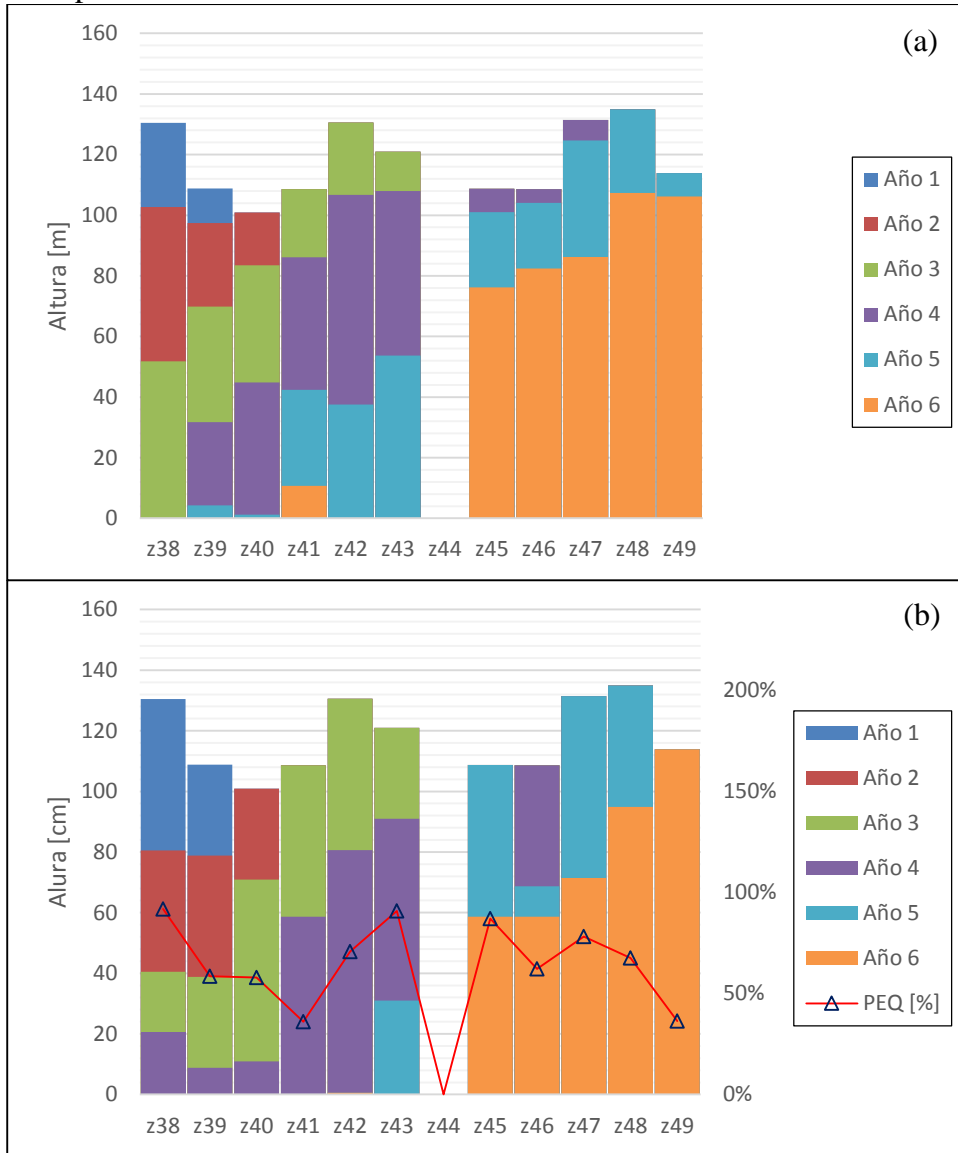


Figura 5- 11: Variación de Altura de columna en función de tiempo: (a) Según plan, (b) Observada en Experimento III.

Comparando la Figura 5- 6.a y Figura 5- 6.b, se observa que la variación de altura por año es mayor en la realidad, en particular las zanjas (z38, z42, z43, z47, z48) que presentan la condición de sobre-extracción y mayor velocidad de tiraje tienen una variación mayor de altura. De estos resultados, y considerando que se extrajo exactamente la masa programada por punto, se entiende que la densidad aparente del material una vez que hay extracción es menor a la estimada con el modelo cargado, esto se condice con los resultados obtenidos por Hancock (2013).

Al igual que para el Experimento II, el análisis del plan y los resultados para el Experimento III muestra que las zonas con sobre-extracción incrementan el ángulo entre columnas contiguas, o visto de otra forma, varía la inclinación (ángulos negativos) respecto al avance de la secuencia.

zanjas/año	Programado				Observado			
	II	III	IV	V	II	III	IV	V
z38-z39	-28	61	73	23	-10	-10	-50	0
z39-z40	19	54	53	-17	66	73	12	0
z40-z41	38	67	76	76	38	75	78	0
z41-z42	66	67	64	-26	66	66	66	3
z42-z43	-44	-44	7	58	-44	-44	46	72
z43-z44	-84	-84	-84	-77	-32	-32	67	83
z44-z45	84	84	84	83	-27	-27	-27	-27
z45-z46	0	0	0	14	0	0	0	-73
z46-z47	62	62	62	59	62	62	62	79
z47-z48	16	16	16	40	16	16	16	16
z48-z49	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60

Tabla 5- 3: Variación de ángulo entre columnas según periodo a partir del año 2.

5.5.2. Punto de Entrada de Quebrado (PEQ) y Estéril (PED)

En el desarrollo del experimento no se reporta material estéril, en los puntos de extracción del sector de estudio, tal cual en el Experimento I y II. Mientras es realizada la extracción, el estéril descende manteniendo la interfaz con el material quebrado. Cabe destacar que al final del experimento el estéril ha descendido a una altura de 200 m sobre el nivel de producción, es decir, descendió 300 m, desde su posición inicial a 500 m (Ver Figura 5- 3.h).

Respecto del punto de entrada de quebrado, se muestra en la el PEQ [%] al cual se reporta material quebrado en cada punto de extracción. El punto de entrada de quebrado promedio para el sector corresponde a $63 \pm 16\%$. De igual forma que para el Experimento II, se observa que los puntos de extracción vecinos a zanjas sobre-extraídas (puntos en rojo y amarillo pertenecientes a las zanjas 40, 41, 42, 46 y 48), presentan puntos de entrada de quebrado menor en comparación a puntos en otra ubicación, reportan una entrada de quebrado en torno al $33 \pm 4\%$

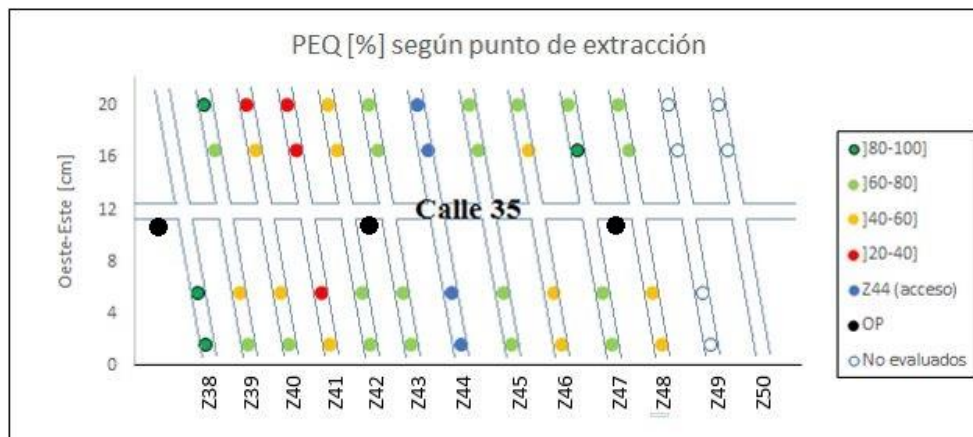


Figura 5- 12: Punto de Entrada de Quebrado Experimento III

5.5.3. Altura de interacción sobre la Zanja 44

La altura de interacción o de conexión sobre la Zanja 44 (Z44) se define como la altura a la cual se interceptan las zonas de movimiento (IMZ) de la Zanja 43 y 45. Mediante el análisis de imágenes es posible determinar la altura de interacción y el periodo a la cual se produce.

La Figura 5- 13 muestra el periodo 45-46 y porcentaje de extracción del plan de producción a 33% y 36% de la extracción programada, periodos entre los que se produce interacción sobre la Z44. Cabe destacar que no existe interacción sobre la zanja 44 hasta el periodo 45. La altura de interacción en el periodo 46 es 80 m desde el nivel de producción y desciende hasta 50 m hacia periodo 72 del plan de producción (fin año 6).

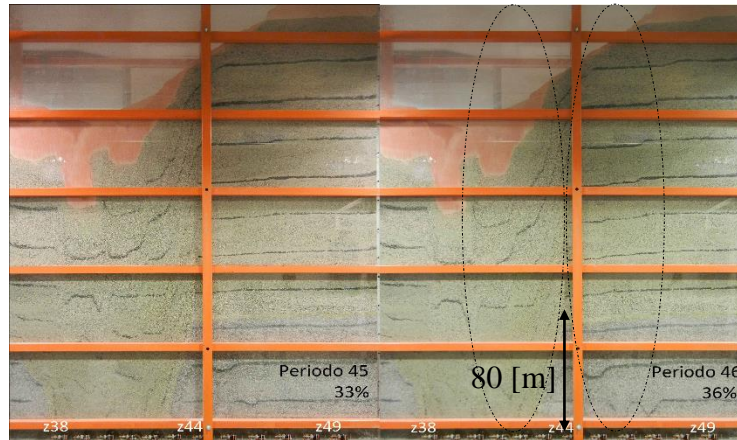


Figura 5- 13: Periodo (mes) 45 y 46, en el cual se produce la conexión entre las zonas de movimiento de la zanja 43 y 45

5.5.4. Efectos en la superficie (Subsidencia)

Al finalizar el experimento se pueden observar dos cuencas en topografía luego de extraído un 80% del plan de producción del sector (correspondiente al periodo 72 (fin año 6)). Se observa una cuenca al norte de la zanja 44 de 56 m de profundidad y una al sur de 72 m de profundidad respecto de la cota máxima observada.

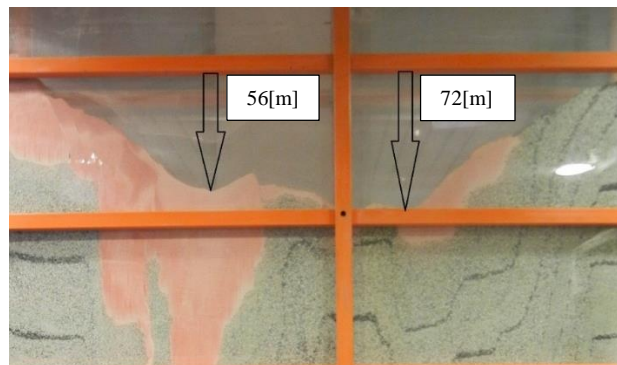


Figura 5- 14: Topografía en Experimento III al final del año 6.

Dado el plan y la secuencia de extracción, se observa que a medida que pasan los periodos (aumento en masa acumulada extraída) existe un descenso de la distancia entre la interfaz quebrado-estéril. Lo anterior se observa en la secuencia de la Figura 5- 3.

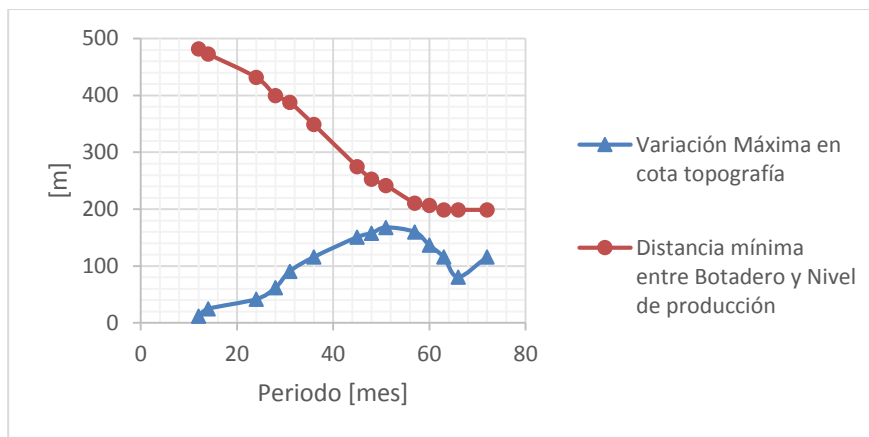


Figura 5- 15: Variación de distancia entre estéril-nivel de producción y profundidad de cuencas en modelo físico

El mínimo de la distancia entre estéril y nivel de producción es alcanzado en las zonas donde ha habido mayor extracción (z42-z43), esto se observa en las Figura 5- 3, donde las zonas con mayor extracción presentan mayor penetración del estéril en el material quebrado, al mismo tiempo está sobre extracción y mayor velocidad de tiraje en dichos puntos genera los cambios abruptos de cota que se observan, llegando a alcanzar la máxima diferencia cerca del quinto año.

5.6. Conclusiones

De los resultados obtenidos solo los resultados del Experimento I y II son comparables cuantitativamente dado que se realizan en el mismo equipo experimental y por tanto están sometido a las mismas perturbaciones que pudiesen generar las condiciones de borde.

Sí, es posible concluir cualitativamente sobre lo que ocurre con el flujo y los efectos que las condiciones de borde impuestas tienen sobre él.

- La no extracción de una zanja genera una perturbación en el flujo en cuanto al movimiento y la extracción del mineral. Sobre este punto todos los experimentos mostraron una zona de material estancada sobre la Z44, mientras que para el Experimento III se observa un claro efecto sobre la superficie dada la tardía conexión entre las zonas de movimiento al norte y al sur de la zanja que no se extrae. La importancia de este análisis radica en que las cuencas en superficies permiten la acumulación de precipitaciones, que pueden generar entradas de agua/barro al nivel de producción (Navia, 2015).
- Las condiciones de extracción, en particular condiciones extremas (donde se lleva a cabo una sobre extracción de puntos), impacta negativamente en el indicador definido como PEQ. La disminución del PEQ observada en los experimentos con sobre-extracción puede explicarse dado el avance del Panel Caving y el ángulo de flujo del material que se forma entre columnas contiguas, lo cual genera cambios en la posición (flexión) de la interfaz Quebrado/Mineral, sumado a lo anterior, una mayor variación en la altura de columna producto de una sobre-extracción y mayor tasa de extracción puede explicarse por una disminución en la densidad aparente del material, lo que favorecería el aumento de la porosidad permitiendo así la percolación (flujo preferencial) de material de granulometría más fina, en este caso del Quebrado .

- No es posible observar interacción entre el material fino y el nivel de producción esto se explicaría dado que la zona de material quebrado funcionaría como barrera ya sea por: la altura de la zona de quebrado, la compactación del material debido a la gradación de sus partículas y a que la interfaz Estéril-Quebrado se encuentra a una distancia considerable del nivel de producción, donde si es posible observar aumentos de porosidad considerables (Hancock, 2013).

Si es posible observar mezcla entre estéril y quebrado, aun así el material fino no logra alcanzar distancias considerables sobre el quebrado. De esto se deduce que la percolación entre partículas no es relevante para el caso en estudio y las condiciones evaluadas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo y los resultados de los experimentos de flujo muestran:

- No existe interacción entre el material fino del estéril y el nivel de producción toda vez que estando activos la mayoría de los puntos de extracción y alcanzándose la altura de columna extraíble para cada punto, no se reporta material estéril en ningún de ellos. Luego para las condiciones evaluadas no se observa flujo preferencial del material fino (estéril) hacia el nivel de producción.
- En todos los experimentos realizados se observa que la no extracción de la zanja acceso (Z44) genera una perturbación en el flujo, comportándose de forma aislada la zona de movimiento anterior a la zanja no extraída y del mismo modo la zona de movimiento posterior. Esto genera una zona con reservas remanentes, el tamaño de esta zona puede variar dependiendo de la estrategia de extracción empleada.
- Existe un efecto sobre la topografía derivado de no extraer una zanja. La tardía conexión de las zonas de movimiento anterior y posterior a la zanja acceso permite la generación de cuencas en superficies las cuales pueden tener un impacto negativo sobre el nivel de producción, dado que permiten la acumulación de precipitaciones.

6.1. Principales conclusiones del trabajo

A partir del análisis experimental y los principales resultados obtenidos, se concluye que para el caso de una extracción tipo Panel Caving. Las principales variables a considerar para el correcto control de la dilución, corresponde al ángulo de extracción formado entre columnas vecinas (esto se condice con lo expuesto por De Wolfe (1981) y Julin (1992)) y la velocidad a la que se extrae el material. Se debe tener en consideración también que los experimentos se realizaron sobre materiales completamente fragmentados, razón por la cual la propagación del Caving no es una condición que contribuya a adelantar la entrada de dilución, luego, la dilución lateral por rilling no puede ser considerada como una posible explicación a la dilución temprana observada en puntos ubicados al lado de zanjas sobre-extraídas.

La evidencia experimental muestra que la principal diferencia entre el plan programado y la realización de los experimentos, tiene relación a como varía la altura de columna por periodo. Aun cuando se extrae la masa programada, los marcadores incorporados en el modelo mostraron que la altura equivalente extraída no fue similar a la calculada mediante el plan programado, fue mayor. Esto puede atribuirse a los cambios en la densidad y en consecuencia a la porosidad en las zonas cercanas a la batea (Hancock, 2013). Se debe considerar también la extracción secuencial, observada también por Kvapil (1965), reportándose variaciones de la porosidad dependiendo del sentido de avance de la secuencia de extracción. Aumentando a favor del sentido de la extracción y disminuyendo en el sentido contrario.

Todo lo anterior permite plantear la principal hipótesis de este trabajo, y es que la sobre extracción de puntos en una secuencia de Panel Caving contribuye a la entrada de dilución temprana de los puntos vecinos a las zanjas sobre extraída, no solamente a los que se incorporan de forma posterior como lo plantea De Wolfe (1981), sino a aquellos puntos ya activos también pueden ser afectados por dilución temprana. Esto guarda relación con: el ángulo de flujo que se genera producto de la

considerable diferencia de altura entre columnas y al aumento de la porosidad en la zona cercana a los puntos de extracción lo que permitiría la percolación del material más fino.

El ángulo que se generé entre columnas será un indicador de la dirección en la que se esperaría pueda moverse el material hacia los puntos de extracción, teniendo esto directa relación con la dirección de avance de la secuencia de extracción, tal como se observó en los experimentos.

De lo anterior se recomienda para una operación minera mediante Panel Caving, mantener un adecuado control de los tonelajes extraídos, en particular mayor atención con los puntos vecinos a puntos de vaciados. Manteniendo así un adecuado tiraje, que permita mantener constante la diferencia entre columnas vecinas y así evitar ángulos de Panel pronunciados, lo que contribuye a un aumento del área de contacto entre dilución-mineral sobre la columna debido a la flexión del IMZ (Kvapil, 1965), situación observadas también en este trabajo.

Escenario Observable	Recomendación
Material quebrado remanente y granulometría fina sobre columna extraíble	<ul style="list-style-type: none"> • Control estricto del tonelaje extraído para el sector • Respetar secuencia y apertura de punto programada • Monitoreo de puntos vecinos a piques de vaciado
Sobre-extracción de puntos cercanos a piques de vaciado	<ul style="list-style-type: none"> • Si se reporta dilución como pulso en puntos vecinos: aumentar velocidad de extracción de estos y llevar adecuado registro del tonelaje extraído para poder igualar alturas de columna en el sector y así mantener uniforme el contacto entre dilución y mineral. • Se reporta dilución continua en puntos vecinos : aumentar tiraje para favorecer el movimiento de la dilución hacia estos puntos ya contaminados, mantener tiraje constante y controlado el resto de los puntos • No se reporta dilución: disminuir la tasa de extracción en piques de vaciado y tratar de aumentar el tiraje en los puntos vecinos hasta alcanzar diferencias de altura de columna dentro de lo programado.
Zanja Acceso	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar velocidad de extracción en zanjas vecinas con el fin de adelantar la conexión sobre la zanja acceso, mantener un tiraje constante y en lo posible sobre-extracción con el fin de reducir las reservas remanentes que pudiesen quedar sobre la zanja acceso

Tabla 6- 1: Recomendaciones basadas en la investigación

6.2. **Recomendaciones Trabajos Futuros**

Se recomienda realizar más repeticiones de los experimentos mostrados en este trabajo con el fin de dar un mayor sustento y aportar evidencia concluyente de la hipótesis aquí expuesta. Aumentar el número de marcadores, con el fin de tener una grilla más densa que permita identificar de forma indirecta los cambios de densidad, mediante las variaciones de altura equivalente extraída.

De igual forma, se recomienda observar la entrada de dilución caracterizándola como pulsos o entrada continua, de esta forma poder determinar el real aporte de la percolación como proceso de segregación al interior del IEZ permitiendo el flujo preferencial de material fino, y al mismo tiempo como una medida indirecta de la porosidad, es de esperarse que a mayor porosidad, mayor sea la proporción entre material diluyente fino y mineral que se observe en los puntos de extracción.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Armijo, F. Castro, R. Irribarra, S. 2014. Experimental study of fines migration for caving mines. Caving 2014, Santiago.
2. Armijo, F., 2015. Comunicación personal. Laboratorio de Block Caving, Universidad de Chile, Chile.
3. Castro, R. 2001. Escalamiento para modelo físico de flujo gravitacional, Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
4. Castro, R. 2006. Study of the Mechanisms Of Gravity Flow for Block Caving. Tesis de doctorado. Australia, University of Queensland.
5. Craig, R. F. 2004. Soil Mechanics, 7th, Spon Press: New York.
6. Dorador, L. 2014. Assessment of broken ore density variations in a block cave draw column as a function of fragment size distributions and fines migration. Caving 2014, Santiago.
7. Halim, A. (2004). 3D large scale physical modelling for studying interactive drawing and drawpoint spacing in Block Caving Mines. Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland.
8. Hashim, M. 2011. Particle Percolation in block caving mines. Tesis de doctorado. Australia, University of New South Wales.
9. Lacey, P.M.C. 1954. Developments in the theory of particle mixing. *Power Technology*.
10. Laubscher, D. 2000. A practical manual on block caving. *International Caving Study (1997-2000)* Capítulo Design Topic – Dilution.
11. Mandel, J. 196). Tests on reduced scale models in soil and rock mechanics, a study of the conditions of similitude. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 31-42.
12. Navia, I., 2015. Comunicación personal. Laboratorio de Block Caving, Universidad de Chile, Chile.
13. Orellana, L. 2012. Estudio de variables de diseño del sistema de minería continua a partir de experimentación en laboratorio, tesis de magíster en minería, Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
14. Pierce, M. 2009, A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines, Tesis de doctorado. Australia. University of Queensland, pp 234-263.

15. Pineda, M. 2012. Study of the gravity flow mechanisms at goldex by means of a physical model. Tesis de magíster en minería. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
16. Paredes, P. (2012, Agosto). Mecanismos de entrada de dilución en minas de Block/Panel Caving. Tesis para optar al grado de magister en minería, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.

8. ANEXOS

En esta sección se ha incluido material que puede ser revisado para el mejor entendimiento y profundización de algunos temas presentes en el cuerpo de la memoria.

8.1. ANEXO A: Teoría de la percolación entre partículas

Mediante el uso de celdas de corte simple y celdas de corte anulares se han estudiado los mecanismos presentes y las principales variables asociadas a la mezcla de dos tamaños de partículas, las partículas de diámetro pequeño d_p que percolan y partículas de diámetro superior D_b que corresponde a una matriz de gruesos.

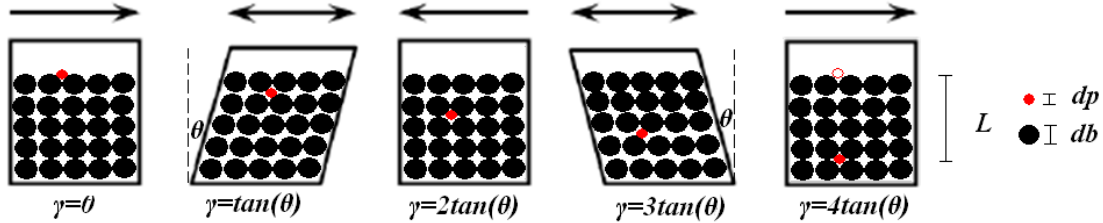


Figura 8- 1: Representación movimiento de la celda de corte simple utilizada por Bridgwater et al., (1978).

Los resultados experimentales de Bridgwater (1976) muestran que los factores más importantes en la percolación son los siguientes: la tasa de deformación, la deformación total aplicada al material granular, y a la razón entre tamaños (d_p/D_b). Para razones d_p/D_b semejantes a 1, la percolación solo puede ocurrir si el sistema está sujeto a deformación.

En tanto que el movimiento vertical de una esfera en un material granular siendo deformado, se puede caracterizar por el número de Peclet:

$$Pe_v = \frac{ud_p}{D'} = 2d_b \left(\frac{1}{D_b} - \frac{1}{d_p} \right)$$

Ecuación 8- 1: Número de Pécelet, Willimemse (1961).

Donde,

- Pe_v : Número de Pécelet
- u : Velocidad de la esfera que percola
- d_p : Diámetro esfera que percola
- d_b : Diámetro esfera en la superficie del sistema
- D_b : Diámetro esfera del lecho (Matriz porosa)
- D : Coeficiente de difusión

Los experimentos en celdas de corte simple muestran también que existen movimientos laterales de las partículas más finas, pudiendo coexistir percolación vertical como lateral de partículas debido a procesos convectivos (Bridgwater et al., 1978). De la medición del tiempo que tarda una partícula en atravesar un lecho granular se evalúa la velocidad de una partícula fina percolando en un lecho de gruesas, se plantea la tasa de percolación como una función dependiente de varias variables (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

$$\frac{u}{\dot{\gamma}d_b} = f \left\{ \frac{d_p}{d_b}, \frac{\sigma_y}{E_b}, \frac{E_p}{E_b}, \frac{d_b\rho_b g}{E_b}, \frac{d_b\dot{\gamma}^2}{g}, \frac{\rho_p}{\rho_b} \right\}$$

Ecuación 8- 2: Tasa de Percolación, Bridgwater et al., (1978).

Donde $\dot{\gamma}$ denota la tasa de deformación por corte, d_p y D_b son los diámetros de la partícula percolante y la del lecho respectivamente, E_p y E_b corresponde a los módulos de Young de la partícula percolante y la del lecho respectivamente, σ_y es el esfuerzo normal a la superficie superior de la celda, g la aceleración de gravedad, y ρ_p junto con ρ_b las densidades de las partículas percolantes y del lecho respectivamente.

Se establece así, que los principales factores son (Bridgwater et al., 1978):

- Razón entre diámetros de partículas ($\frac{d_p}{D_b}$), a menor razón, mayor será la velocidad de percolación.
- Esfuerzo normal (σ_y), a mayor esfuerzo disminuye la velocidad de percolación.
- Tasa de deformaciones por corte ($\dot{\gamma}$), a bajas tasas de deformación aumenta la velocidad de percolación.

La percolación se define entonces como el descenso de pequeñas partículas a través de un lecho de partículas de mayor tamaño por influencia de la gravedad, este proceso contribuye a aumentar la segregación (Cardew, 1981), luego es posible modelar el lecho de partículas sometidas a esfuerzos de corte como una serie de capas, por la cuales se mueve de una capa a otra la partícula que percola. La velocidad de percolación u es obtenida a partir del tiempo medio de residencia (t_m) y la altura del lecho (L):

$$u = L/t_m$$

Ecuación 8- 3: Velocidad de percolación

Combinando la varianza de la distribución del tiempo de residencia con el tiempo medio de residencia, da como resultado el número de Péclet práctico (Pe'_a):

$$Pe'_a = 2 \cdot \frac{d_b}{L} \cdot \left(\frac{t_m}{\sigma}\right)^2$$

Ecuación 8- 4: Número de Péclet, Cardew (1981).

Altos números de Péclet representan flujos de partículas con baja dispersión, mientras que números de Péclet pequeños representan flujo de partículas con una alta dispersión, es decir, alta percolación. Cuando el tamaño de la partícula percolando es mucho menor al tamaño de la partícula del lecho, pero no lo suficientemente pequeña para que ocurra percolación espontanea (es decir, $0.155 \cdot d_b < d_p \ll d_b$), se tiene que no existen movimiento ascendente de las partículas, solo existirán movimientos descendentes. Esto permite expresar el tiempo medio de residencia como sigue:

$$t_m = n \cdot \tau_D$$

Ecuación 8- 5: Tiempo medio de residencia para percolación de partículas pequeñas ($0.155 \cdot d_b < d_p \ll d_b$).

y

$$\sigma^2 = n\tau_D^2$$

Ecuación 8- 6: Desviación estándar de la distribución de tiempo de residencia.

Donde, τ_D corresponde al tiempo de residencia medio para la percolación de una partícula a través de una capa, se tiene entonces que el tiempo medio de residencia para la percolación en el lecho corresponde a la suma del tiempo de residencia de la partícula en cada capa, y el cociente σ/τ_D depende solamente del número de capas en el lecho.

Sustituyendo estos resultados en la Ecuación 8- 3 y Ecuación 8- 4, considerando que $u = L/t_m$ se tiene que el número de Péclet será igual a 2. Este resultado es concordante con valores experimentales, en el rango $0.2 \cdot d_b < d_p < 0.7d_b$.

Números de Péclet y velocidades de percolación han sido medidos para razones entre diámetros de partículas finas que percolan y partículas gruesas en el lecho para el rango 0.25-0.7 (Bridgwater et al., 1978), estos datos han sido ajustados y se ha obtenido la siguiente expresión:

$$\frac{\dot{L}}{\gamma d_b} = \frac{u}{\dot{\gamma} d_b} = k_d \exp\left(\frac{-d_p}{k_b d_b}\right)$$

Ecuación 8- 7: Tasa de percolación adimensional (DPR: Dimensionless Percolation Rate).

Donde \dot{L} representa la distancia de percolación media, γ corresponde a la deformación por corte. Por último k_d y k_b son constantes arbitrarias cuyos valores se han encontrado, siendo 20 y 1/8 respectivamente.

El término de la izquierda en la Ecuación 8- 7, se denomina tasa de percolación adimensional y corresponde a la distancia promedio que puede recorrer una partícula fina, a través de una matriz de partículas gruesas.

Año	Modelo	Representa	Autor	Supuestos / Parámetros de entrada	Aplicación	Enfoque Estudio
1978	$\frac{\bar{L}}{\gamma d_b} = \frac{u}{\dot{\gamma} d_b} = k_d \exp\left(-\frac{d_p}{k_b d_b}\right)$ $k_d = 20, \quad k_b = 1/8$	Tasa de percolación: distancia promedio que puede alcanzar una partícula que percola.	Bridgwater et al.	Partícula percolante y de lecho mono-tamaño, forma esférica, razones (d_p/d_b) entre 0.25-0.7	Percolación de partículas en celdas de corte.	Modelo Físico
1981	$Pe'_a = 2 \cdot \frac{d_b}{L} \cdot \left(\frac{t_m}{\sigma}\right)^2$	Grado de dispersión de las partículas que se mueven a través de una capa.	Cardew	Modela una masa de partículas como capas superpuestas. Percolación de partículas pequeñas cuyo tamaño está acotado en el rango $0.2 \cdot d_b < d_p < 0.7 d_b$, $Pe = 2$. Solo tienen movimiento descendente.	Flujo de partículas y dispersión.	Modelo estadístico
2006	$p(\%) = \frac{m_{50} - m_p}{m_{50}} \cdot 100$	Índice de percolación, medida de flujo preferencial.	Castro	Considera la masa recuperada de marcadores y la masa de partículas en estudio ubicadas en la misma posición inicial	Flujo gravitacional en un punto de extracción aislado (Minería de Caving)	Modelo Físico
2009	$\bar{L} = \Gamma \bar{d} k_1 \exp\left(-4.5 \frac{d_p}{\bar{d}}\right)$	Distancia de percolación en REBOP	Pierce	Partículas con distribución de tamaño Gaussiana, esfuerzos de corte solo en los bordes de la elipsoide, en el centro la deformación es nula	Flujo Gravitacional en un punto de extracción aislado (Minería de Caving)	Modelamiento Numérico
2012	$\bar{L} = 17 \exp\left(-11 \frac{d_p}{\bar{d}}\right)$	Distancia de percolación en SPCG	Hashim y Sharrok	Basalto Chancado en celda de corte (una tasa de deformación de 0.4 s^{-1}) con un punto de extracción.	Percolación de partículas en Block Caving	Modelamiento Físico/Numérico

Tabla 8- 1: Resumen modelos e índices de percolación.

8.2. ANEXO B: Análisis de Esfuerzos Inducidos en Experimento III

A partir de los resultados obtenidos en el Experimento I y II y con el fin de estudiar la influencia que el flujo de material tiene sobre el nivel de producción, es que se instalan tres celdas de carga sobre el Crown pillar con el fin de medir los esfuerzos inducidos.

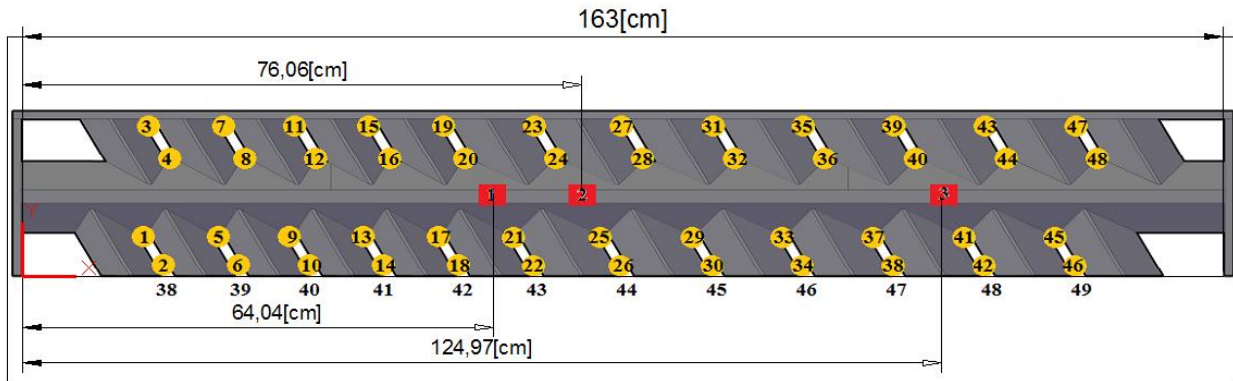


Figura 8- 2: Ubicación celdas de Carga en Maqueta a escala

La Figura 8- 1 muestra la disposición de las celdas de carga en la base del modelo a escala, la celda 1 (C1) se ubica sobre la zanja 43, la celda 2 (C2) se ubica sobre la zanja 44, la celda 3 (C3) se ubica sobre la zanja 48. Los resultados de las mediciones se muestran en el gráfico de la siguiente figura.

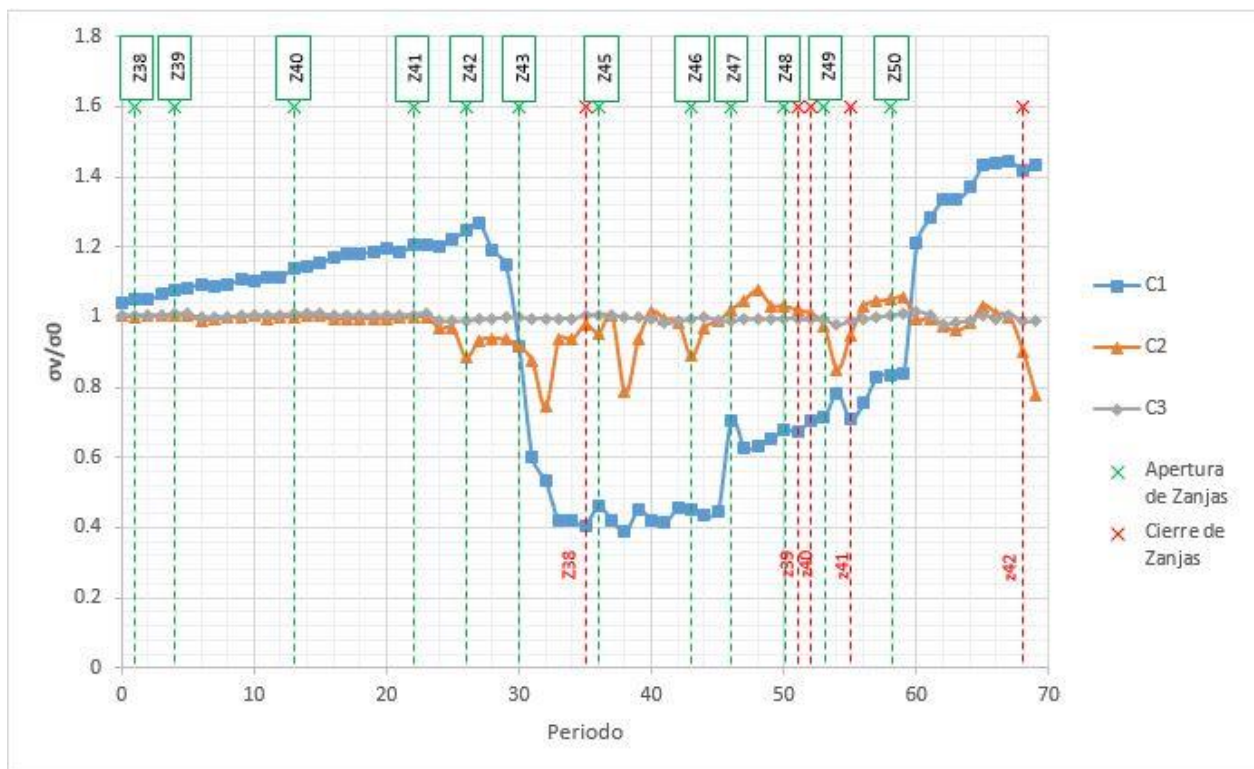


Figura 8- 3: Esfuerzo vertical relativo medido en la celda de carga

Se observa en la Figura 8- 3 que a medida que la secuencia de extracción avanza y se van incorporando zanjas a la producción el esfuerzo vertical relativo comienza a aumentar, a medida que se acerca el frente de extracción a la posición de la celda 1(z43) el esfuerzo relativo sobre el

Crown pillar alcanza su máximo. Incorporada la zanja correspondiente a la ubicación de la celda se observa una disminución del esfuerzo vertical, tal cual se observa en la línea azul de la Figura 8- 3. El avance de la secuencia y el cierre de puntos contribuyen a que detrás del avance de la zona de movimiento se genere una zona de no flujo, esto se observa una vez cerradas las zanjas 38, 39, 40 y 41, esto justificaría el comportamiento ascendente de la curva azul a partir del periodo 40 hacia adelante.

Respecto a las mediciones de la celda 2, ubicada sobre la zanja acceso, esta presenta oscilaciones en sus mediciones no mostrando una tendencia del esfuerzo vertical relativo respecto al avance de la secuencia, de la masa extraída, o bien, respecto a la distancia relativa entre la ubicación de la celda y el frente de extracción.

Finalmente la celda 3 no mostró variaciones en los esfuerzos medidos, es posible que haya ocurrido un error con los instrumentos de medición, razón por la cual el esfuerzo vertical en este punto no varía significativamente como si lo muestran las otras dos celdas.

Si bien es posible observar en la celda 1 una tendencia en cuanto al esfuerzo vertical relativo respecto al avance de la extracción, pudiendo el esfuerzo relativo variar entre un 0.6 y 1.26. El resto de las celdas no logra mostrar un comportamiento que pueda ser explicado a partir de los experimentos. Se estima necesario realizar un mayor número de experimentos con el fin de estudiar de forma exhaustiva el comportamiento de los esfuerzos inducidos respecto a la estrategia de extracción.