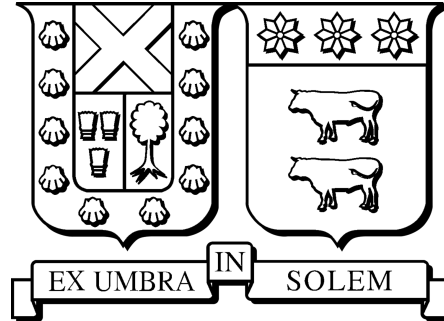


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y MATERIALES
SANTIAGO-CHILE



CUANTIFICACIÓN DE LA MIGRACIÓN DE FINOS EN MINERÍA DE BLOCK CAVING MEDIANTE EXPERIMENTOS DE LABORATORIO

Autor:
Michael Alexis Aravena Tavali

Trabajo de tesis presentado como requisito parcial para optar al grado de:

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Metalúrgica

Profesor Guía:
Dr. Sergio Palma Moya

Defendida públicamente el 25 de octubre de 2023 ante la comisión conformada por:

Dr. Gonzalo Nelis
Dr. Sergio Palma
Dr. Francisco Vivanco

Universidad Técnica Federico Santa María
Universidad Técnica Federico Santa María
Universidad de Santiago de Chile

Agradecimientos

Comienzo agradeciendo a Sergio Palma, por creer en mí y darme la oportunidad de participar en este proyecto. Personalmente, considero que esta experiencia ha sido de gran aprendizaje y crecimiento personal.

Estoy eternamente agradecido por la familia que tengo: mi mamá, mi papá y mis dos hermanos menores. Son el pilar más grande que puedo tener en la vida. Siempre tuvieron confianza en mí y nunca dudaron de que obtendría mi título profesional. A Jack, por acompañarme cada noche de amanecida.

A mi abuelo materno y al tata, que están en el cielo. Sé que estarían muy orgullosos de lo que estoy logrando. A mi lela, que a pesar de enfrentar problemas de salud, ha estado a mi lado en todo momento. A mi abuela Ercilia, tíos y primos, que siempre me motivaron a seguir creciendo.

Quiero agradecer a todos mis amigos, en especial a aquellos que conocí durante mi tiempo en la universidad, 'Los Finteros'. Tenemos anécdotas dentro y fuera de la universidad, las cuales, no terminaría de enumerar en este escrito. Es increíble lo diferentes que podemos ser y lo bien que nos llevamos. Siempre los llevaré en mi corazón.

Por último, agradezco a todas las personas que han aparecido en mi vida. Creo que, cada acción y cada momento construyen una línea temporal que da por resultado lo que estamos viviendo.

Abstract

Fines migration in block caving mining corresponds to the movement of low-sized granular material. This material is directed towards the extraction points, causing dilution of valuable ore and safety problems due to cohesive hang-ups. Although there are previous studies on fines migration through experiments with granular material and 3D simulations, empirical evidence is scarce. Therefore, a solid understanding of the relationship between variables affecting fines migration is lacking. By means of twenty-four experiments on a laboratory-scale physical model, the influence of different variables on fines migration is analyzed. The variables considered are the average diameter of the fine mineral, the fine mineral content, the mineral orientation and the type of extraction (isolated/interactive). The results show that fines migration increases with fine ore content and decreases with inclination, these two variables being the most determinant. An interactive extraction reduces and delays the migration of fines to the extraction points. The average diameter of the fine ore appears to have a minor influence, although conditions are observed where increasing diameter leads to increased fines migration. The plots obtained provide valuable information for understanding fines migration in block caving operations under various conditions. With these, the change in fines migration can be estimated by involving different variables simultaneously. This is a complementary tool to the models currently used in mining to evaluate this phenomenon.

Resumen

La migración de finos en minería block caving corresponde al movimiento de material granular de bajo tamaño. Este material se dirige hacia los puntos de extracción, causando la dilución del mineral valioso y problemas de seguridad debido a las colgaduras cohesivas. A pesar de que existen estudios previos sobre la migración de finos mediante experimentos con material granular y simulaciones 3D, la evidencia empírica es escasa. Por lo tanto, se carece de una comprensión sólida de la relación entre las variables que afectan la migración de finos. Por medio de veinticuatro experimentos en un modelo físico a escala de laboratorio, se analiza la influencia de distintas variables en la migración de finos. Las variables consideradas son el diámetro medio del mineral fino, el contenido de mineral fino, la orientación del mineral y el tipo de extracción (aislado/interactivo). Los resultados muestran que la migración de finos aumenta con el contenido de mineral fino y disminuye con la inclinación, siendo estas dos variables las más determinantes. Una extracción interactiva reduce y retrasa la migración de finos a los puntos de extracción. El diámetro medio del mineral fino parece tener una influencia menor, aunque se observan circunstancias en las que el incremento del diámetro conduce a un aumento de la migración de finos. Las gráficas obtenidas brindan información valiosa para comprender la migración de finos en operaciones block caving bajo diversas condiciones. Con estas, se puede estimar el cambio de la migración de finos al tener implicada distintas variables en simultáneo. Esto supone una herramienta complementaria a los modelos que se usan actualmente en minería para evaluar este fenómeno.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Introducción General	1
1.2. Descripción del Problema	1
1.3. Objetivos	2
1.4. Alcances y Limitaciones	2
2. Antecedentes	3
2.1. Metodología de Block Caving	3
2.2. Flujo Gravitacional	4
2.3. Migración de Finos y Dilución	5
3. Metodología experimental	8
3.1. Diseño Experimental	8
3.2. Caracterización del Mineral	9
3.3. Disposición Espacial del Mineral	10
3.4. Modalidad de Extracción	11
3.5. Cuantificación de la Migración de Finos	13
4. Resultados y Discusión	14
4.1. Interpretación Cualitativa	14
4.2. Interpretación Cuantitativa	14
4.2.1. Influencia del diámetro medio del mineral fino	14
4.2.2. Influencia del contenido de mineral fino	18
4.2.3. Influencia del tipo de extracción	19
4.2.4. Influencia de la inclinación del mineral	19
5. Conclusiones y Perspectiva	20
5.1. Conclusiones	20
5.2. Recomendaciones	21
A.	24
B.	35

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción General

Chile es el principal productor y exportador de cobre del mundo, gracias a la constante extracción de mineral de los distintos yacimientos que se ubican en su territorio. Sin embargo, esta actividad ha provocado el agotamiento y profundización de las reservas de mineral a lo largo de los años, lo que plantea un desafío para la industria minera de innovar y aplicar métodos de explotación más eficientes. Uno de estos métodos es el block caving, una técnica de explotación subterránea que se utiliza en yacimientos masivos de gran escala por su bajo costo y alta capacidad de producción ([Gertsch and Bullock, 1998](#)). No obstante, la física del método no ha sido estudiada en profundidad, y los modelos disponibles se basan principalmente en observaciones empíricas limitadas que no permiten comprender completamente fenómenos físicos como la migración de finos, fenómenos que influye directamente en los costos de producción y al beneficio económico de un proyecto minero.

1.2. Descripción del Problema

La migración de finos implica pérdidas económicas por dilución cuando el material incorporado es estéril ([Laubscher, 2003](#); [Nicola Pérez, 2015](#)). Según [Rivas Oviedo et al. \(2018\)](#), la dilución es un fenómeno inevitable que provoca incertidumbre en la planificación de proyectos mineros, por lo que resulta esencial estimar la proporción de residuos que se combinan con el mineral para no comprometer el beneficio económico esperado. Asimismo, la migración de finos puede generar colgaduras cohesivas ([Sánchez et al., 2019](#)) a causa de la fuerza capilar, lo que supone un riesgo tanto para el personal como para la maquinaria que opera en los puntos de extracción.

1.3. Objetivos

Objetivo general

- Comprender mediante experimentos de laboratorio la influencia que tienen distintas variables en la migración de finos en minería block caving.

Objetivos específico

- Determinar la incidencia que tiene en simultaneo la granulometría, la distribución espacial de la roca fracturada y el tipo de extracción en la migración de finos.
- Elaborar un ábaco que funcione como sistema referencial para predecir la fluctuación de la migración de finos entre yacimientos que comparten una o más semejanzas.

1.4. Alcances y Limitaciones

En este trabajo se estudia la migración de finos mediante el uso de mineral de cuarzo seco en un modelo físico cuasi-bidimensional. Debido a que no se efectúan simulaciones computacionales que permitan comparar los resultados experimentales, las conclusiones no se validan desde otra perspectiva, lo cual restringe la aplicabilidad de los hallazgos en escenarios del mundo real. No obstante, este enfoque podría generar hallazgos innovadores sobre el fenómeno estudiado bajo condiciones específicas, aportando una visión valiosa en un campo de estudio altamente especializado.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Metodología de Block Caving

Block Caving es un método de explotación subterránea en el cual, el cuerpo mineralizado se hunde de forma natural tras iniciar el quiebre del macizo rocoso. El método aprovecha el efecto de la gravedad en conjunto con los esfuerzos internos de la roca para generar y extender las fracturas, permitiendo así hundir progresivamente el mineral tras retirar el mineral por medio de LHD desde los puntos de extracción (Véase [Figura 2.1](#)).

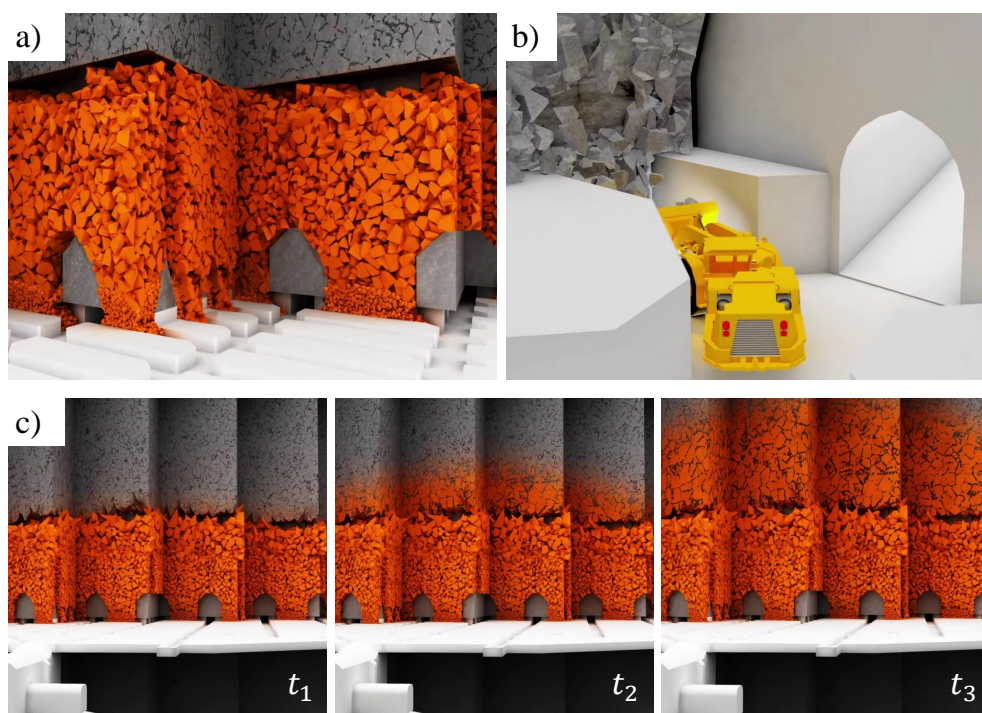


Figura 2.1. a) Vista bateas y puntos de extracción. b) LHD cargando material desde un punto de extracción. c) Secuencia de fracturamiento en Block Caving. Fuente: CODELCO Chile, 2023.

El método se constituye por distintos niveles de trabajo, donde cada uno de estos niveles tiene una finalidad específica. Típicamente se tiene el nivel de hundimiento, producción, ventilación y transporte (Véase [Figura 2.2](#)). El nivel de hundimiento es un nivel temporal en el que se perfora y trona de forma ascendente, fragmentando así la base del bloque del mineral. Por debajo y conectado mediante bateas de extracción se tiene el nivel de producción, el cual tiene un conjunto de túneles paralelos denominados calles, los cuales son utilizados por los LHD para transitar y transportar el mineral fragmentado. A su vez se tiene un segundo arreglo de túneles que conectan las calles y los puntos de extracción, siendo estas las galerías zanjadas ([Véase Figura 2.1](#)), permitiendo así que los LHD carguen el material y lo transporten a los distintos túneles subverticales (piques) que conectan hacia el nivel de transporte.

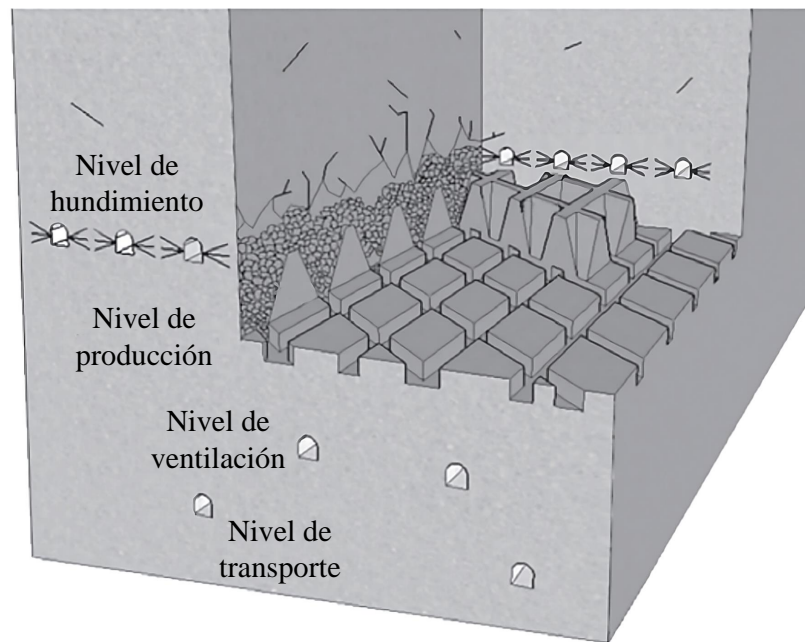


Figura 2.2. Esquema de niveles que constituyen al método Block Caving. Adaptado de ([Gómez and Labbé, 2019](#)).

2.2. Flujo Gravitacional

El flujo gravitacional se define como el desplazamiento de material en sentido descendente, debido a la acción de la gravedad. Este es el principio básico de los métodos de hundimiento, donde el mineral se traslada desde su posición inicial hasta los puntos de extracción conforme se va extrayendo el mineral. Rudolf Kvapil fue un precursor en el estudio del flujo gravitacional, realizando experimentos físicos de flujo gravitacional en los años 60. Dichos experimentos originaron los conceptos de zona aislada de extracción (IEZ) y zona de movimiento aislada (IMZ). La IEZ se refiere al volumen de material que se extrae por los puntos de extracción, mientras que la IMZ se refiere al volumen de material que se moviliza producto de la extracción de material ([Kvapil, 2008](#)). Cada una de estas zonas tiene forma elipsoidal.

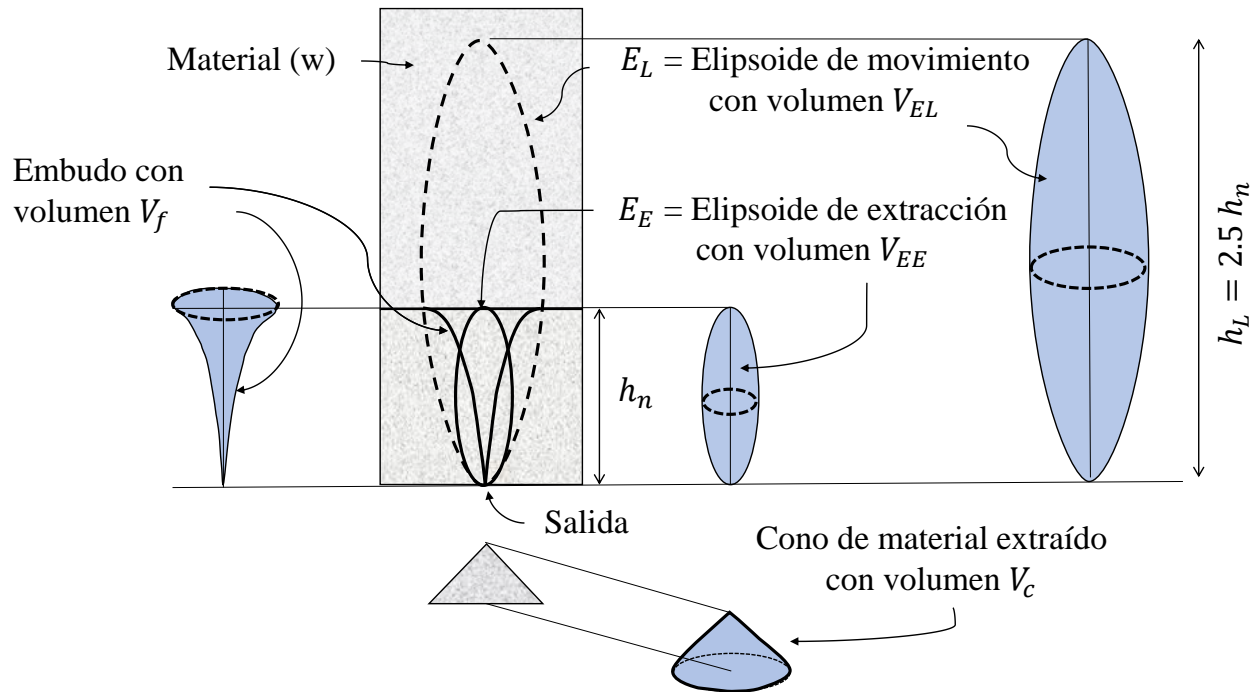


Figura 2.3. Relación volumétrica entre el elipsoide de movimiento y el elipsoide de extracción. Adaptado de (Kvapil, 2008).

Como se aprecia en la Figura 2.3, existe una relación geométrica entre las alturas de los elipsoides de movimiento y extracción. Kvapil concluyó que los elipsoides IEZ e IMZ se hacen más anchos al aumentar el tamaño de partícula, es decir, se vuelven menos excéntricos.

2.3. Migración de Finos y Dilución

Se le denomina fino al material granular sólido de tamaño reducido que se encuentra en los medios porosos naturales y que pueden ser movilizados por medio de fuerzas coloidales, hidrodinámicas, entre otras (Khilar and Fogler, 1998). La migración de finos implica pérdidas económicas por dilución cuando el material que se incorpora al mineral es material estéril (Laubscher, 2003; Nicola Pérez, 2015). Genéricamente la dilución corresponde a la reducción en concentración de una sustancia “A” al añadir una sustancia “B”. Análogamente en minería la dilución hace referencia a la mezcla de mineral de baja ley y/o estéril con mineral de ley económicamente explotable.

Según Laubscher (2000), la dilución en procesos mineros es un fenómeno que se ve influenciado por una serie de parámetros. Uno de los factores fundamentales que determina la dilución es el tamaño de la fragmentación del estéril. Cuando el estéril se fragmenta en partículas muy finas, la dilución tiende a ocurrir de manera más rápida y en una mayor cantidad en comparación con el estéril que presenta una granulometría gruesa. Esto se debe a que las partículas más pequeñas tienen una mayor superficie de contacto con la masa circundante, lo que facilita la infiltración de material estéril en la zona de extracción del mineral.

Otro aspecto relevante que influye en la dilución es el grado de interacción entre los puntos de extracción. Cuando existe interacción entre puntos de extracción, la dilución tiende a ser menor.

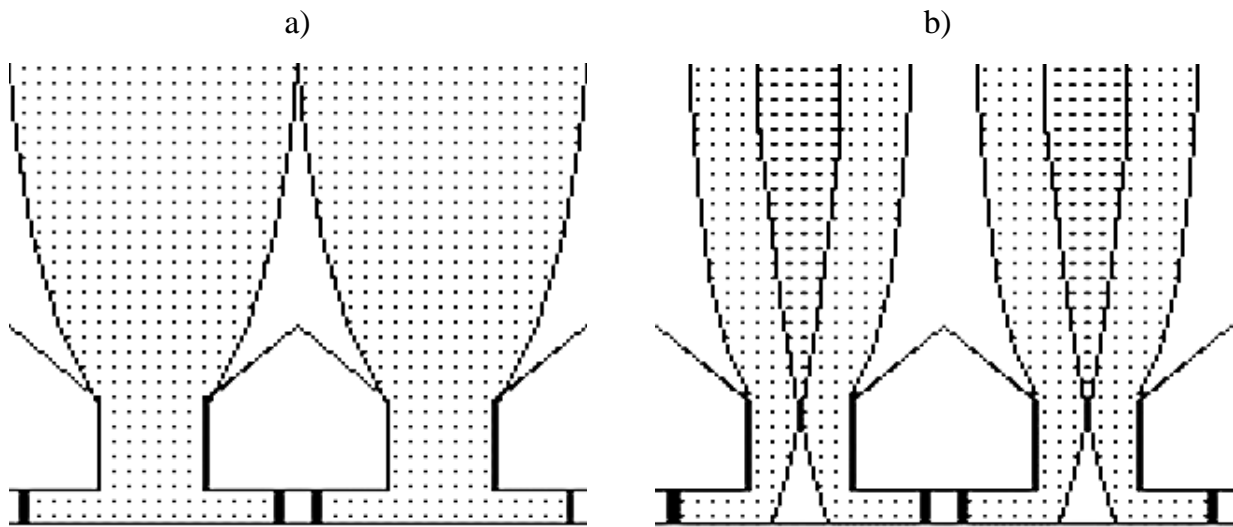


Figura 2.4. Formación e interacción de elipsoides. a) Elipsoides tangentes. b) Elipsoides superpuestas. Fuente: (Laubscher, 2000).

Mediante experimentos realizados con arena, como se documenta en el estudio de Susaeta (2004), se ha logrado obtener evidencia significativa sobre el fenómeno de la dilución en contextos de extracción de minerales. Este autor notó que la dilución tiende a disminuir de manera notable cuando se establece un flujo interactivo entre diversos puntos de extracción en el yacimiento. Este hallazgo es de gran relevancia, ya que respalda y amplía el concepto previamente propuesto por Laubscher, en el cual se sugiere que la interacción entre puntos de extracción puede influir en la dilución del mineral extraído.

Pierce llevó a cabo simulaciones tridimensionales con el propósito de estudiar la migración de finos tras realizar extracciones aisladas (Pierce, 2010). El modelo empleado consistió en partículas esféricas clasificadas en dos categorías según su tamaño: partículas finas y partículas gruesas (Véase Figura 2.5). El punto de extracción se ubicó en el centro del modelo. A partir de dichas simulaciones, el autor observó lo siguiente: en la fase inicial, algunas partículas finas experimentaron desplazamientos en presencia de pequeñas perturbaciones. Conforme avanzó el proceso de extracción, las partículas finas demostraron una mayor tendencia a moverse verticalmente en comparación con las partículas gruesas. Las partículas que se encontraban en la región central, directamente sobre el punto de extracción, exhibieron los desplazamientos verticales más pronunciados.

En el año 2022, se llevó a cabo un estudio experimental tridimensional (3D), como se documenta en el trabajo de investigación Castro et al. (2022). Este estudio implicó la disposición de mineral fino en la parte superior y mineral grueso en la parte inferior, con la inclusión de marcadores que facilitaron el análisis de la formación y deformación del elipsoide de extracción. El autor notó que existe una correlación positiva entre la migración de finos y

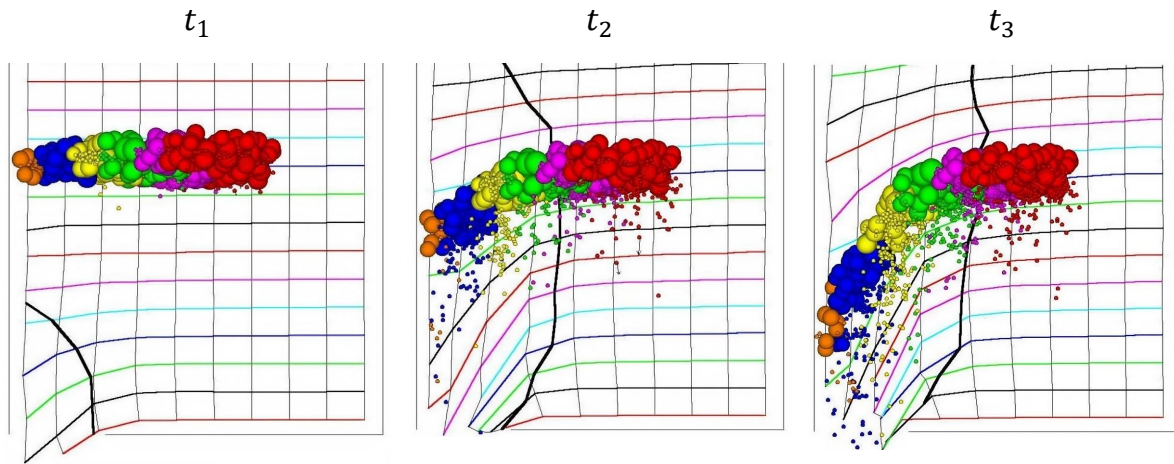


Figura 2.5. Secuencia que ilustra el movimiento del material grueso y fino. Fuente: (Pierce, 2010)

el aumento del ratio diámetro mineral grueso respecto al mineral fino. Esto sugiere que la migración de finos se incrementa al reducir el tamaño de las partículas de mineral fino. Además, los resultados obtenidos en el estudio experimental indican que una extracción simultánea e interactiva tiene el efecto de reducir y retardar la migración del mineral fino.

Capítulo 3

Metodología experimental

3.1. Diseño Experimental

Se construyó un modelo físico que simula un block caving de 200 m de altura a una escala de 1:267, el cual consta de un contenedor de $62 \times 75 \times 2$ cm (ancho \times alto \times espesor) apoyado sobre dos pilares, tal como se aprecia en [Figura 3.1](#). El modelo físico posee paredes de vidrio que facilitan la visualización del movimiento del mineral al ser extraído por las bateas. Estas bateas, ubicadas en la parte inferior del modelo físico, presentan un ángulo de inclinación de 45° y una distancia de 6 cm entre sus centros. La geometría de las bateas se muestra en [Figura 3.1](#).

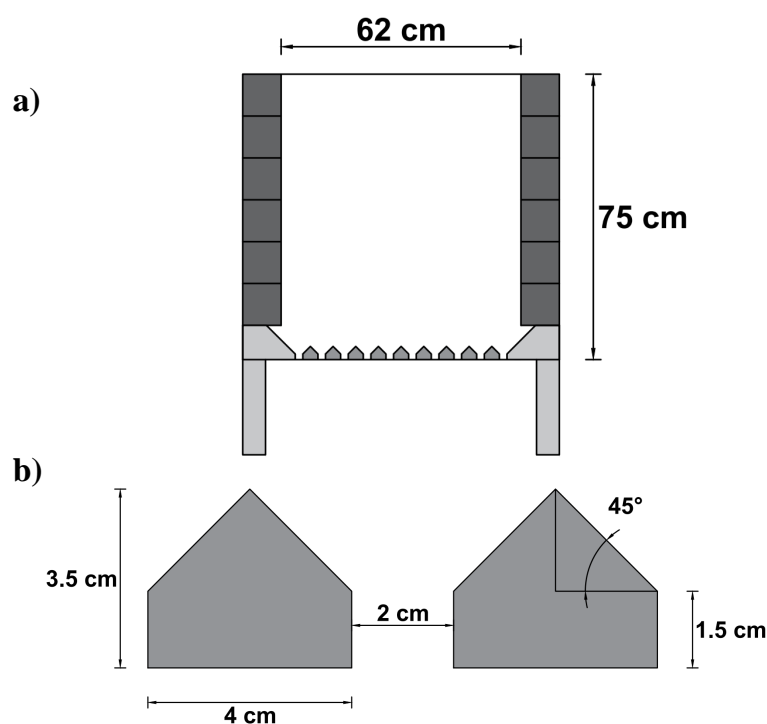


Figura 3.1. a) Esquema del modelo experimental que simula el método de explotación block caving. b) Pilares zanjados que dan forma a las bateas utilizadas en los experimentos.

3.2. Caracterización del Mineral

La caracterización del mineral se puede abordar desde distintas perspectivas, tales como la geométrica, la química y la coloidal (Khilar and Fogler, 1998). En este estudio, se efectuó una caracterización geométrica, centrada especialmente en la determinación del diámetro de las partículas. Esta variable es de gran relevancia, puesto que condiciona directamente el comportamiento del flujo granular, tanto en su desplazamiento como en su detención.

El mineral grueso y fino es de tipo cuarzo, cuyas propiedades se establecen a partir de muestras representativas obtenidas por medio de roleo y cuarteo (Sironvalle, 2002). Mediante el tamizaje, se realiza una operación de separación del mineral de acuerdo al tamaño de sus partículas. Cada tamiz retiene los granos cuyo tamaño está entre la malla actual y la superior (Salager, 2007). Los resultados del tamizaje se muestran en curvas granulométricas, gráficas que tienen como ejes el diámetro del mineral (d_i) y el pasante acumulado (P_i). El pasante acumulado señala el porcentaje de material que atraviesa una malla de tamaño d_i . A los datos experimentales se les ajusta el modelo teórico de Rosin-Rammler (Rosin, 1933) y se obtienen los distintos valores de d_i de los distintos minerales. De las curvas teóricas se deduce y estima el diámetro medio (d_{50}), el coeficiente de uniformidad (C_U) y el coeficientes de curvatura (C_Z). El coeficiente de uniformidad evalúa el grado de homogeneidad en el tamaño de las partículas, siendo próximo a 1 cuando son muy semejantes. El coeficiente de curvatura describe la forma de una distribución granulométrica, siendo entre 1 y 3 para los materiales bien graduados. Los coeficientes de uniformidad y curvatura se expresan según Craig (2004) de la siguiente forma:

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.1)$$

donde d_{10} y d_{60} corresponden al diámetro en el que se tiene un 10 y 60 % del pasante acumulado.

$$C_Z = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (3.2)$$

donde d_{10} , d_{30} y d_{60} corresponden al diámetro en el que se tiene un 10, 30 y 60 % del pasante acumulado.

En la Figura 3.2 se presenta la curva granulométrica, y en la Tabla 3.1 se resume la caracterización de cada mineral, incluyendo el ángulo de reposo (ϕ).

Mineral	d_{10} (μm)	d_{30} (μm)	d_{50} (μm)	d_{60} (μm)	C_U	C_Z	ϕ ($^\circ$)
Fine 1	116	158	186	200	1.72	1.07	27 \pm 1
Fine 2	315	423	496	531	1.68	1.07	25 \pm 1
Coarse	1800	1944	2025	2060	1.14	1.02	19 \pm 1

Tabla 3.1: Caracterización del mineral grueso y fino empleado en los experimentos.

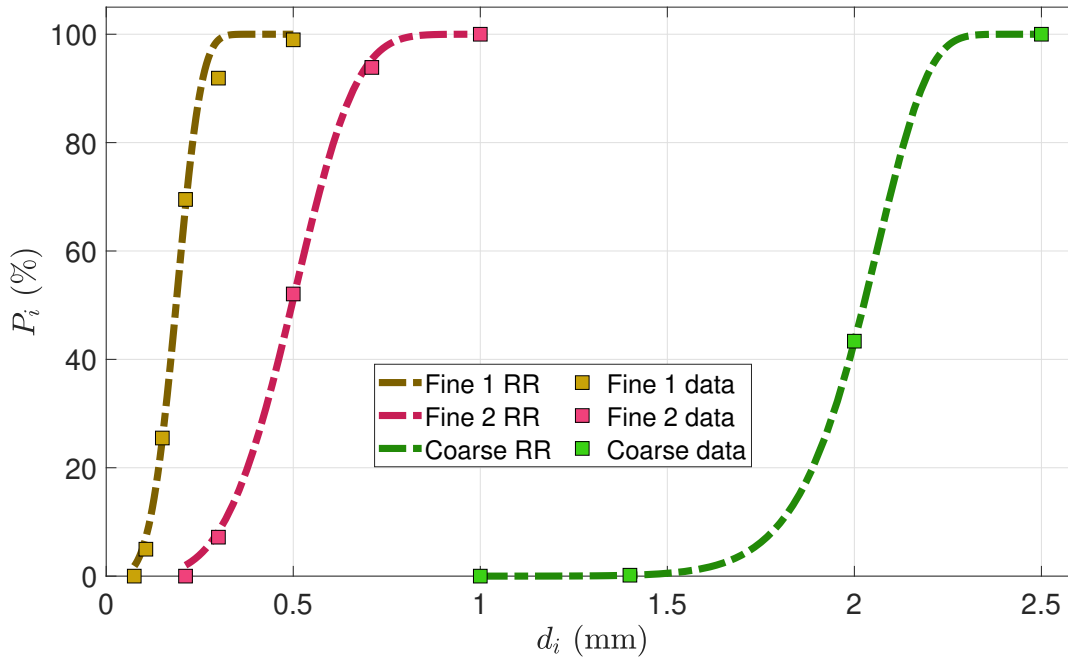


Figura 3.2. Curvas granulométricas de los minerales empleados en los experimentos. P_i corresponde al pasante acumulado para un tamaño d_i . 'data' corresponde a los datos provenientes del tamizaje, y 'RR' corresponde a la curva teórica del modelo Rosin-Rammler.

3.3. Disposición Espacial del Mineral

Se establecen tres orientaciones del mineral (θ): horizontal (0°), inclinada (45°) y vertical (90°). Estas orientaciones se ilustran en la [Figura 3.3](#). La razón de esta elección es que la mineralización en los yacimientos puede presentar distintas configuraciones. De esta manera, se intenta simular situaciones más cercanas a la realidad.

En cada una de estas orientaciones, el mineral fino ocupa un porcentaje del volumen total de la maqueta. Este porcentaje corresponde al contenido de mineral fino (V) y toma los valores de 20 y 40%. En los experimentos con mineral orientado horizontalmente, el fino y grueso se ubican en la parte superior e inferior respectivamente. Aquí el mineral fino adopta forma rectangular de ancho 62 y alto h cm. Respetando el contenido de mineral fino, h toma valores de 15 y 30 cm.

En los experimentos con mineral orientado en 45° , el fino adopta forma de triángulo rectángulo isósceles de catetos x cm. Respetando el contenido de mineral fino, x toma valores de 43 y 61 cm.

En los experimentos con mineral orientado verticalmente, el fino adopta forma rectangular de alto 75 y ancho b cm. Respetando el contenido de mineral fino, b toma valores de 12 y 25 cm.

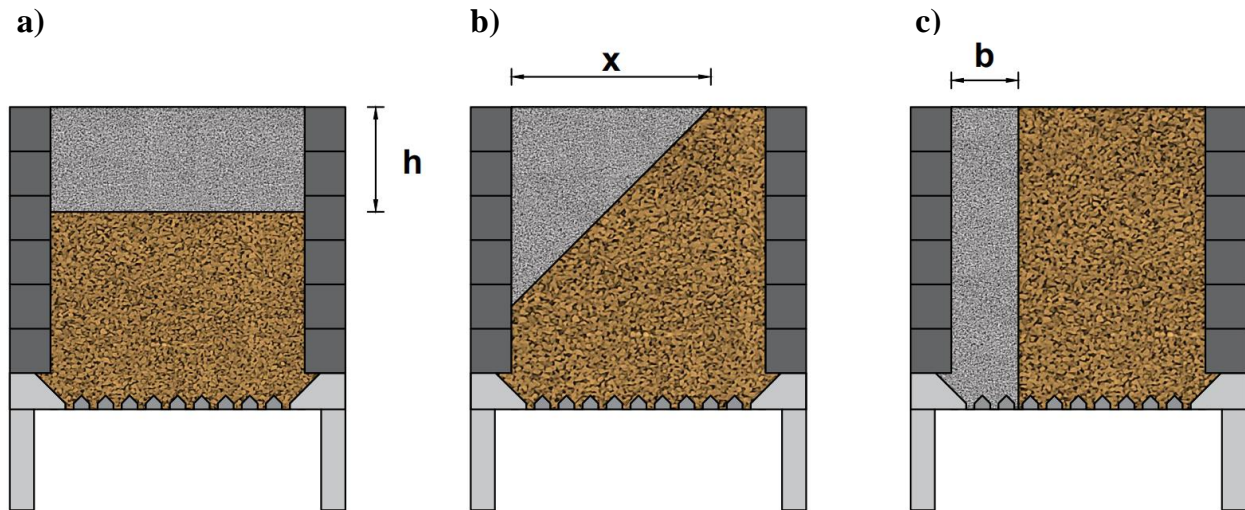


Figura 3.3. (a) Contenedor con mineral orientado horizontalmente. En la parte superior se ubica el mineral fino. (b) Contenedor con mineral orientado en 45° . El mineral fino se ubica en el triángulo equilátero de catetos x . (c) Contenedor con mineral orientado verticalmente. El mineral fino se ubica al costado izquierdo.

3.4. Modalidad de Extracción

En los experimentos, se pretende estudiar el comportamiento de la migración de finos en dos escenarios: extracción aislada y extracción interactiva. En una extracción aislada, se extrae mineral exclusivamente desde un punto ($P = 1$), mientras que en una extracción interactiva, se extrae mineral desde dos puntos adyacentes de forma simultánea ($P = 2$). Se desarrolló un código en la plataforma Arduino para regular el movimiento de un motor, realizando de esta forma extracciones discretas y controladas, simulando el proceso extractivo de los LHD (Load-Haul-Dump) utilizados en minería block caving.

La [Tabla 3.2](#) resume las variables experimentales y sus respectivos valores (matriz experimental). La combinatoria de estas variables da lugar a la ejecución de un total de veinticuatro experimentos.

P	θ ($^\circ$)	d_g (μm)	d_f (μm)	V (%)
1	0	2025	186	20
2	45		496	40
	90			

Tabla 3.2: Matriz experimental compuesta por el tipo de extracción (P), orientación del mineral (θ), diámetro medio del mineral grueso (d_g), diámetro medio de mineral fino (d_f) y el contenido de mineral fino (V).

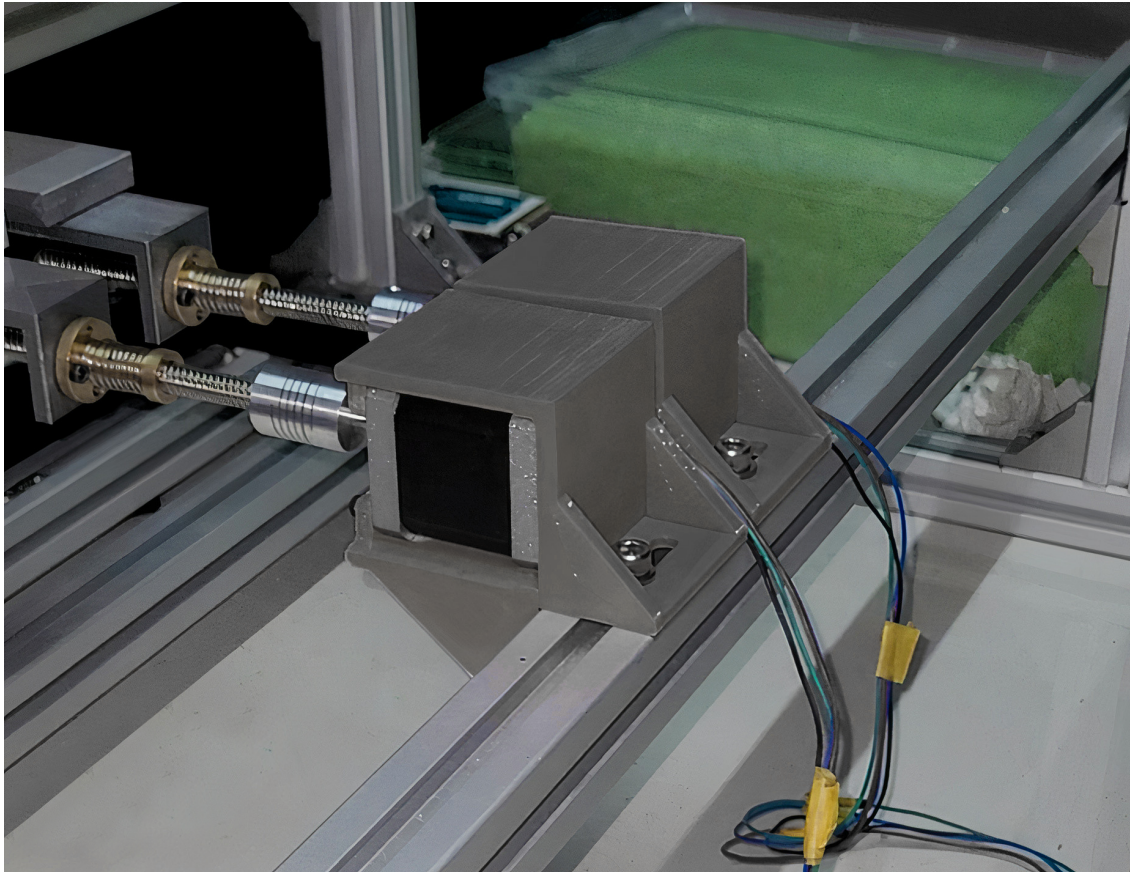


Figura 3.4. Sistema de extracción empleado en los experimentos. Cada sistema de extracción se compone por un motor que es controlado por medio de Arduino.

3.5. Cuantificación de la Migración de Finos

Es esencial destacar que, en el análisis de los resultados no se emplea la fórmula PED (Porcentaje de Entrada de Dilución) propuesta por [Laubscher \(1994\)](#). Esto se debe a que, esta fórmula depende de la altura de interacción, un parámetro que no ha sido considerado en el marco de este estudio.

En los experimentos, la migración de finos se cuantifica por medio de la dilución, la cual se define según [Yi et al. \(2022\)](#), de la siguiente forma :

$$Dilution = \frac{Waste}{Ore + Waste} \quad (3.3)$$

En el presente trabajo se asume el mineral fino (M_F) como estéril y el mineral grueso (M_G) como mineral valioso. Se presentan los resultados mediante gráficos, los cuales se elaboran a partir de la relación entre la dilución acumulada (D) y la masa total acumulada (M_T) hasta la n -ésima extracción. Esta relación se expresa matemáticamente como:

$$D_i = \frac{\sum_{i=1}^n M_{Fi}}{\sum_{i=1}^n (M_{Gi} + M_{Fi})} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{Fi}}{\sum_{i=1}^n M_{Ti}} \quad (3.4)$$

Para establecer el nivel de influencia que tiene una variable experimental en la dilución, se compara la masa necesaria (entre dos experimentos) para alcanzar una dilución predefinida. En otras palabras, se tiene como criterio el desfase másico entre experimentos al modificar una variable. La influencia se definen como: nula, si el desfase másico se encuentra en el intervalo $[0, 250]$ g; baja, si el desfase másico se encuentra en el intervalo $[500, 1000]$ g; media, si el desfase másico se encuentra en el intervalo $(1000, 1500]$ g; y alta, si el desfase másico es mayor que 1700 g. Esto se expresa en la [Tabla 3.3](#). Es importante destacar que los intervalos se definen en función de los resultados obtenidos. Por lo tanto, este proceso se caracteriza por ser subjetivo y propenso a variaciones, dependiendo de la interpretación individual de cada lector. De este modo, la modificación de los intervalos resulta en una alteración de la influencia (ya sea de nula a baja, de baja a media, de media a alta, o viceversa).

Desfase másico (g)	Influencia
$[0 - 250]$	Nula
$[500 - 1000]$	Baja
$(1000 - 1500]$	Media
$[1700 - \infty]$	Alta

Tabla 3.3: Sistema referencial para determinar el nivel de influencia que tiene una variable experimental sobre la dilución.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1. Interpretación Cualitativa

La [Figura 4.1](#) ilustra el movimiento del material granular luego de efectuar extracciones aisladas. Cada secuencia tiene un diámetro medio de mineral fino específico y distintivo por su color. A su vez, cada secuencia tiene una disposición espacial del mineral determinada.

Se puede observar que el mineral fino de diámetro medio $186 \mu\text{m}$ tiende a generar una huella de forma elipsoidal prácticamente perfecta tras realizar extracciones, como lo postuló [Kvapil \(2008\)](#). Parece ser que la formación de estas elipsoides no se ve influenciada por la inclinación del mineral. No obstante, para validar de manera concluyente esta afirmación, se hace necesario emplear técnicas computacionales que sean capaces de determinar movimientos infinitesimales tras realizar las extracciones.

Por otro lado, se observa que en las orientaciones, ya sea horizontal o inclinada a 45° , el fino de diámetro medio $186 \mu\text{m}$ presenta una mayor velocidad de migración en comparación con el fino de diámetro medio $496 \mu\text{m}$. Esto se atribuye al hecho de que se requirieron menos extracciones para que el fino de diámetro medio $186 \mu\text{m}$ alcance el punto de extracción. Este fenómeno se constata para un contenido de mineral fino del 20 y 40 %. Estos hallazgos coinciden con las observaciones de [Laubscher \(2000\)](#), quien notó que a medida que disminuye el tamaño de las partículas minerales, la dilución en los puntos de extracción se manifiesta de manera más temprana.

En la [Figura 4.2](#) y [Figura 4.3](#) se presenta la dilución acumulada de los distintos experimentos, tras emplear la [Ecuación 3.4](#).

4.2. Interpretación Cuantitativa

4.2.1. Influencia del diámetro medio del mineral fino

En la orientación horizontal del mineral se observa que, al aumentar el diámetro medio del mineral fino, la dilución presenta un incremento marginal y nulo (influencia baja y nula), a excepción del caso particular donde se tiene una extracción interactiva con un contenido de mineral fino del 20 %. En este caso, el aumento del diámetro medio conlleva a un aumento significativo de la dilución (influencia media).

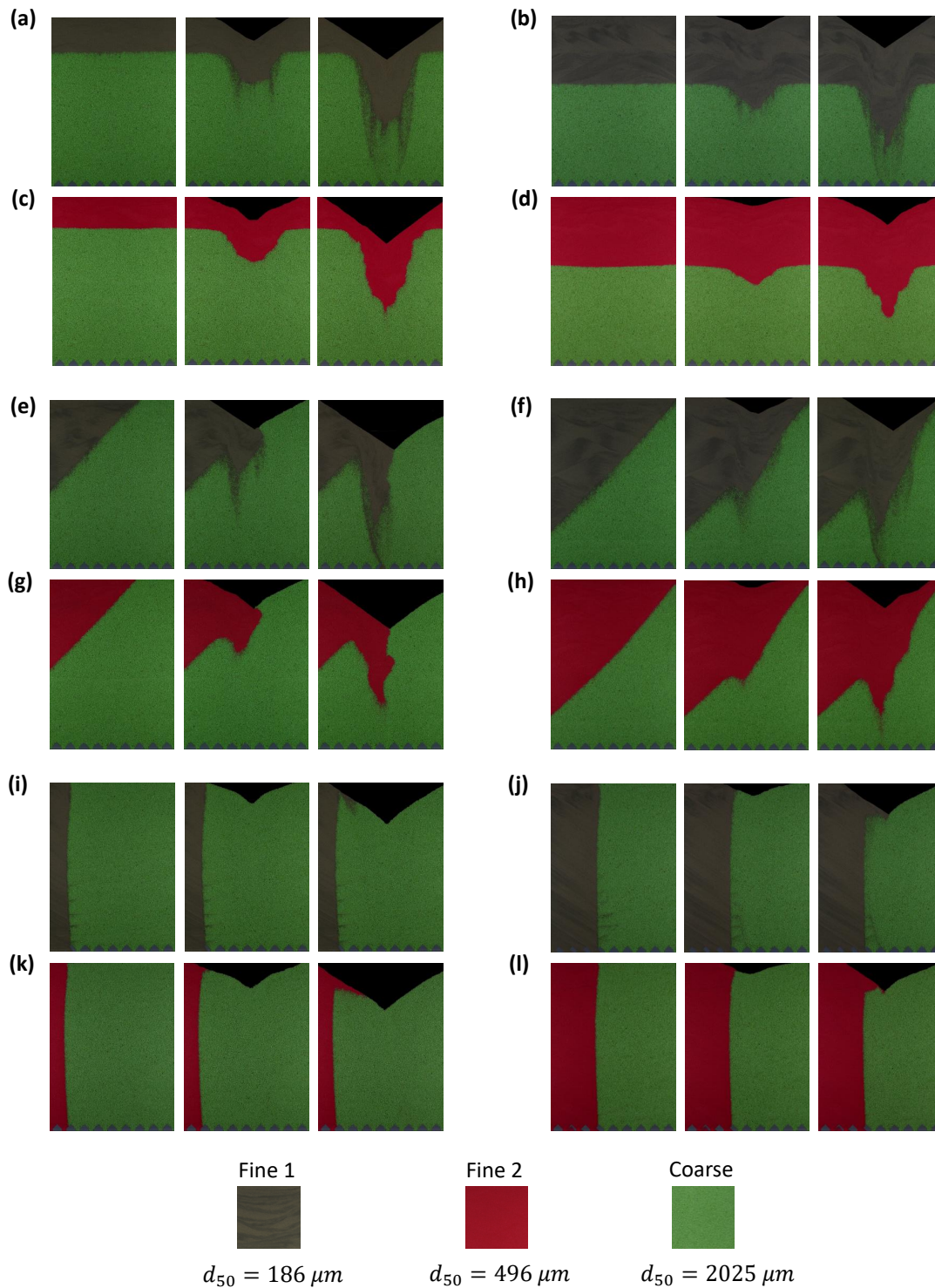


Figura 4.1. Migración de finos tras realizar extracciones aisladas. (a), (b), (c) y (d) experimentos con mineral horizontal, en los que se modificó el contenido y diámetro medio del mineral fino. (e), (f), (g) y (h) experimentos con mineral inclinado en 45° en los que se modificó el contenido y diámetro medio del mineral fino. (i), (j), (k) y (l) experimentos con mineral vertical en los que se modificó el contenido y diámetro medio del mineral fino.

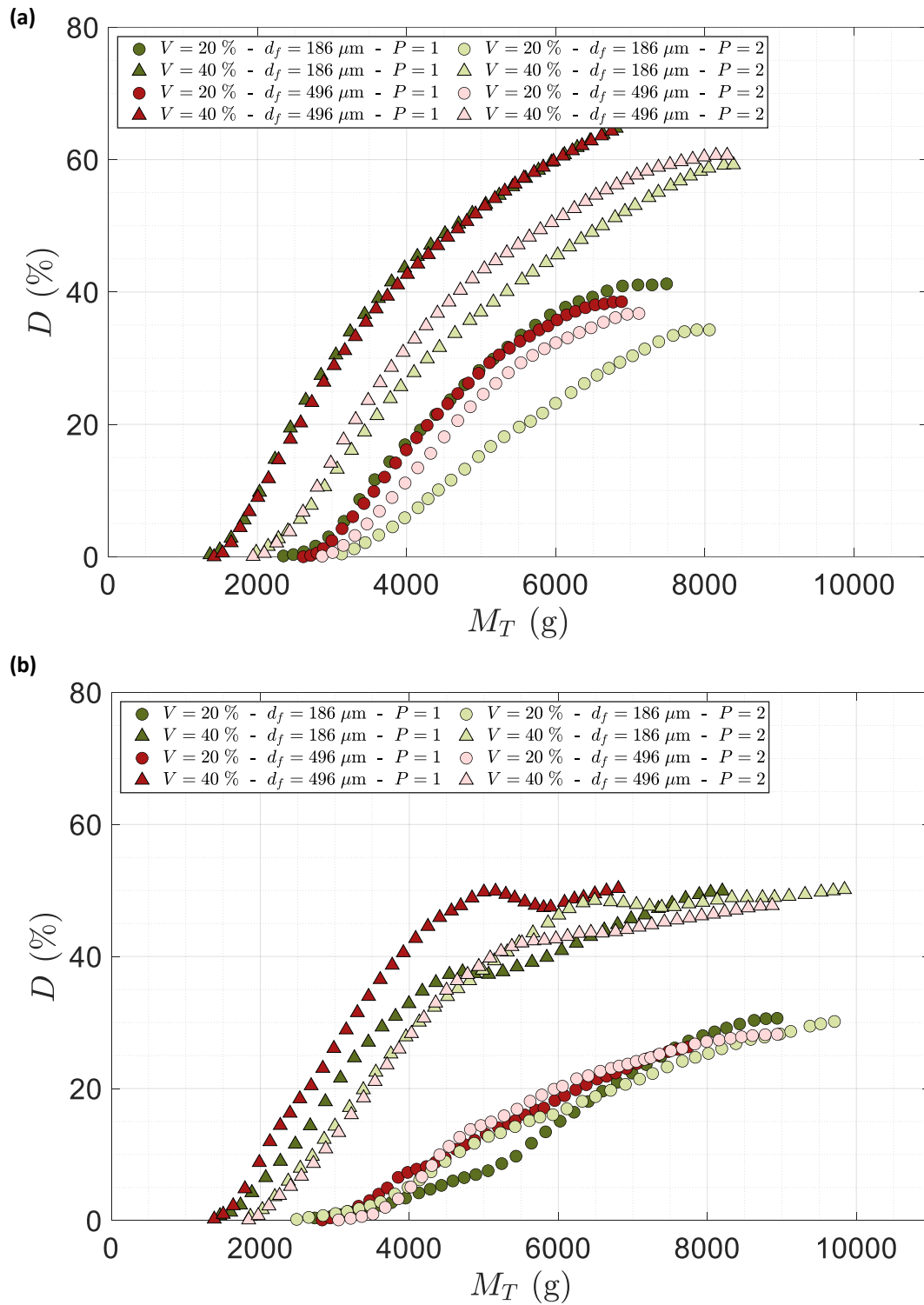


Figura 4.2. Dilución acumulada (D) en función de la masa total acumulada (M_T), para distinto contenido de mineral fino (V), diámetro medio del mineral fino (d_f) y tipo de extracción (P). (a) Experimentos con mineral orientado horizontalmente. (b) Experimentos con mineral orientado en 45° .

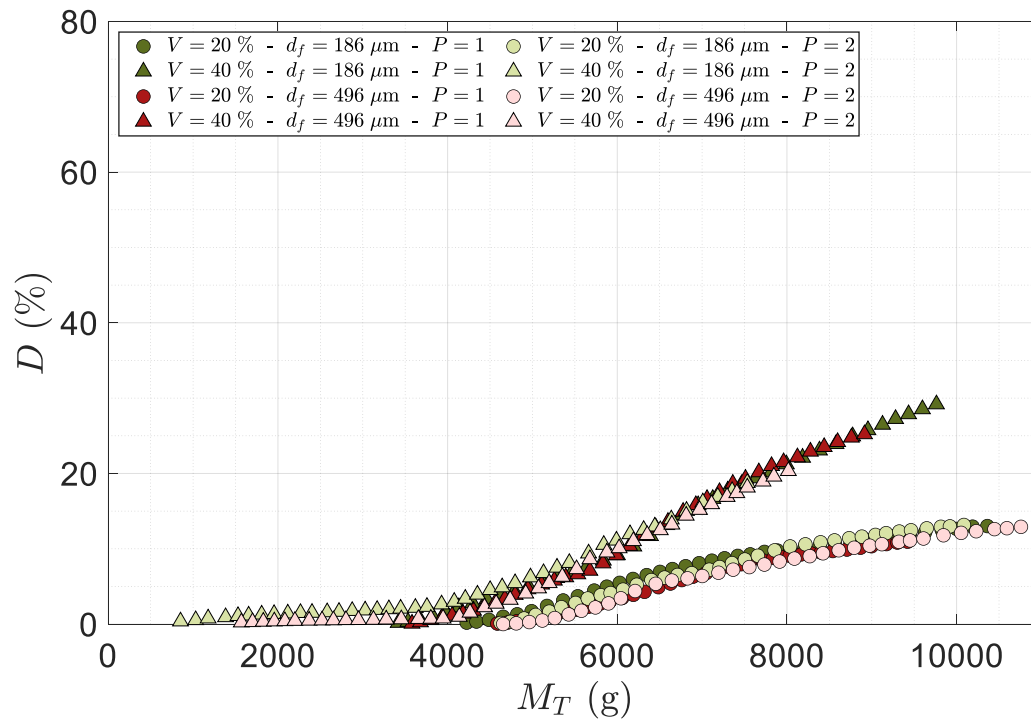


Figura 4.3. Dilución acumulada (D) en función de la masa total acumulada (M_T), para distinto contenido de mineral fino (V), diámetro medio del mineral fino (d_f) y tipo de extracción (P). Todos los datos provienen de los experimentos con mineral orientado verticalmente.

En la orientación inclinada a 45° del mineral, se constata nuevamente que el aumento del tamaño del mineral fino, conlleva a un aumento de la dilución, sin embargo, el aumento no es notable (influencia baja). Se tiene un caso particular en el que el aumento del tamaño del mineral fino conduce a un aumento sustancial de la dilución (influencia media), y este ocurre cuando se tiene una extracción aislada con un contenido de mineral fino del 40 %. Cabe destacar que este aumento de la dilución se manifiesta cuando se ha extraído una gran cantidad de mineral.

En la orientación vertical del mineral, se evidencia que el diámetro del mineral fino tiene escasa o nula incidencia en la dilución (influencia nula), independientemente del contenido de mineral fino y del tipo de extracción. Es decir, la dilución es prácticamente idéntica. Por otra parte, generalmente se aprecia que aumentar el diámetro medio del mineral fino retrasa su entrada en los puntos de extracción. Sin embargo, este retraso no es relevante (influencia nula o baja).

De acuerdo con los resultados obtenidos, la dilución depende del diámetro medio del mineral fino bajo ciertas condiciones. Esto denota que, el diámetro medio no tiene una influencia clara en todos los casos estudiados.

En el año 2022, Castro llevó a cabo experimentos con mineral dispuesto horizontalmente, en la cual 35 % del contenido era mineral fino. Las extracciones fueron del tipo aislada (Castro et al., 2022). Bajo estas condiciones, el autor halló una correlación directa entre la migración de finos y el cociente entre el diámetro medio del mineral grueso y el mineral fino. De ello se infiere que la migración de finos se reduce al incrementarse el diámetro medio del mineral fino. En el presente estudio, bajo condiciones semejantes, no se observa una alteración significativa de la dilución al modificar el diámetro medio del mineral fino. En consecuencia, se plantea la posibilidad de que intervengan otros factores además del diámetro promedio del mineral. Estos factores podrían incluir el coeficiente de uniformidad, la proporción entre el tamaño del mineral grueso y el mineral fino, así como el ángulo de reposo de los minerales, entre otros.

Por otra parte, se ratifica que la migración de finos tiende a ocurrir más tempranamente cuando el diámetro medio del mineral fino se reduce, tal como lo plantean Castro et al. (2022); Laubscher (2000); Pierce (2010).

4.2.2. Influencia del contenido de mineral fino

Se observa que, al incrementar el contenido de mineral fino, se produce un aumento de la dilución (influencia alta). Esto se aplica en las tres orientaciones del mineral: horizontal, inclinada a 45° y vertical. A su vez, este incremento de la dilución aplica para todo diámetro medio del mineral fino y todo tipo de extracción. Este fenómeno se explica principalmente por la proximidad que existe entre el mineral grueso y los puntos de extracción, lo cual implica una mayor probabilidad de arrastre de partículas finas hacia el punto de extracción. Los resultados de este estudio coinciden con los de Castro et al. (2022), sobre la influencia del contenido de mineral fino en la dilución.

4.2.3. Influencia del tipo de extracción

En la orientación horizontal del mineral, se aprecia una disminución significativa de la dilución al pasar de una extracción aislada a una interactiva (influencia media). No obstante, particularmente para un contenido de mineral fino del 20 % y diámetro medio 496 μm , tener una extracción interactiva no conducen una reducción considerable de la dilución (influencia baja).

En la orientación inclinada a 45° del mineral, se verifica que, en general, tener una extracción interactiva reduce la dilución, pero dicha reducción no es notable (influencia baja). Sin embargo, se destaca que, para un contenido de mineral fino del 40 % y diámetro medio 496 μm , la extracción interactiva conduce a una disminución sustancial de la dilución (influencia media).

En la orientación vertical del mineral, se constata que, en general, el tipo de extracción no afecta a la dilución. Es decir, se presenta una dilución prácticamente idéntica (influencia nula).

Los resultados obtenidos coinciden con lo observado por [Castro et al. \(2022\)](#) y con lo planteado por [Laubscher \(2000\)](#); [Susaeta \(2004\)](#). Es decir, a mayor interacción entre puntos de extracción (dos puntos en simultaneo), menor migración de finos. Por otra parte, se constata que pasar de una extracción aislada a una extracción interactiva conlleva a un retraso de la entrada de mineral fino, siendo consistente con lo obtenido por [Castro et al. \(2022\)](#) y lo planteado por [Laubscher \(2000\)](#).

4.2.4. Influencia de la inclinación del mineral

Generalmente se observa que para todo experimento base (V , d_f y P fijos, con $\theta = 0^\circ$), el incremento de la inclinación implica una disminución notoria de la dilución (influencia alta). Esto se infiere del comportamiento del conjunto de datos de cada experimento. Ejemplo de esto, es la condición en que se tiene un contenido de mineral fino del 20 %, diámetro medio 186 μm y un punto de extracción activo. Al tener una orientación de 0, 45 y 90°, la dilución máxima toma valores de 41, 30 y 13 %. Esto supone una situación más favorable en términos económicos, puesto que, se extrae principalmente mineral grueso (mineral de valor) y no mineral fino (material estéril). Asimismo, se observa que el aumento de la inclinación del mineral produce una homogeneización de la dilución (para un mismo valor de V). Es decir, a medida que se aumenta la inclinación, la dilución tiende a tomar valores similares para todo diámetro de mineral fino y todo tipo de extracción.

Capítulo 5

Conclusiones y Perspectiva

5.1. Conclusiones

El análisis de la dilución permitió cuantificar la migración de finos, que es un fenómeno influenciado por varias variables. La influencia de cada variable se determinó de manera subjetiva, basándose en la diferencia de masa necesaria entre experimentos, para alcanzar una dilución previamente establecida. Por lo tanto, la influencia puede cambiar según el juicio de cada lector y la dilución que se escoja de manera arbitraria. De este modo, cada variable estudiada puede pasar de una influencia nula a baja, de baja a media, de media a alta, y viceversa.

Las variables más relevantes son el contenido de mineral fino (V) y el ángulo de inclinación del mineral (θ). Según los resultados experimentales, se observa que la migración de finos se incrementa con valores altos de V y bajos de θ . Esto se debe principalmente a que el mineral fino cercano al punto de extracción tiene una mayor probabilidad de ser arrastrado.

El cambio del diámetro medio del mineral fino (d_f) presenta una influencia menor, a diferencia de las otras dos variables. En algunos experimentos, el efecto es reducido y en otros, inexistente. No obstante, se evidencia una tendencia creciente de la dilución al incrementar el diámetro medio del mineral fino. Esto implica una relación directa, lo que contrasta ligeramente con los resultados del estudio de Castro en 2022. Por lo tanto, se plantea la posibilidad de que existan otros factores que puedan afectar la migración de finos.

La extracción interactiva con dos puntos simultáneos, reduce la migración de finos en comparación con la extracción aislada. Sin embargo, esta reducción no es significativa en todos los experimentos realizados.

Destacar que, el contenido de mineral fino y la orientación corresponden a variables que se controlaron minuciosamente en cada experimento con la finalidad de entender la influencia que estas tienen en la migración de finos. Sin embargo, estas son propiedades geológicas del yacimiento que no se pueden modificar.

Las gráficas obtenidas pueden representar un sistema referencial para predecir la fluctuación de la migración de finos entre distintos yacimientos que comparten una o más semejanzas. Esto implica que, a partir de las propiedades de un yacimiento, se puede proyectar la migración en otro yacimiento con condiciones equivalentes. A su vez, de estas gráficas se puede analizar la influencia que tienen distintas variables en simultáneo.

5.2. Recomendaciones

Cada caso particular que se presente en la industria minera debe ser evaluado mediante las gráficas proporcionadas en este estudio, en conjunto de los distintos modelos que se utilizan en la actualidad. De esta forma, se podrá determinar si la migración de finos será temprana, tardía, de bajo o alto contenido másico.

Se recomienda analizar el impacto de las variables estudiadas en la migración de finos a nivel industrial. Asimismo, se sugiere considerar la utilización de simulaciones tridimensionales (3D) para comparar y validar los resultados obtenidos en este estudio.

Bibliografía

- Castro, R., Arancibia, L., and Gómez, R. (2022). Quantifying fines migration in block caving through 3d experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 151:105033.
- Craig, R. F. (2004). *Craig's soil mechanics*. CRC press.
- Gertsch, R. E. and Bullock, R. L. (1998). *Techniques in underground mining: Selections from Underground mining methods handbook*. SME.
- Gómez, R. and Labbé, E. (2019). Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: la actual metodología aplicada en Chile del "block caving". *Boletín Geológico y Minero*, 130(1).
- Khilar, K. C. and Fogler, H. S. (1998). *Migrations of fines in porous media*, volume 12. Springer Science & Business Media.
- Kvapil, R. (2008). *Gravity flow in sublevel and panel caving: a common sense approach: Luleå University of Technology*.
- Laubscher, D. (1994). Cave mining-the state of the art. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 94(10):279–293.
- Laubscher, D. (2000). Block caving manual. prepared for international caving study. *Brisbane: JKMRC and Itasca Consulting Group*.
- Laubscher, D. H. (2003). Cave mining handbook. *De Beers, Johannesburg*, page 138.
- Nicola Pérez, C. F. d. (2015). *Dilución operacional en mina El Soldado*. Universidad de Chile.
- Pierce, M. E. (2010). *A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines*. University of Queensland Brisbane, Australia.
- Rivas Oviedo, J. M. et al. (2018). *Control Geológico en la Dilución Mineral*. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas.
- Rosin, P. (1933). The laws governing the fineness of powdered coal. *J. Inst. Fuel*, 7(31):29–36.
- Salager, J. L. (2007). *Granulometría teoría*. Universidad de los Andes. Merida Venezuela.

- Sánchez, V., Castro, R. L., and Palma, S. (2019). Gravity flow characterization of fine granular material for block caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 114:24–32.
- Sironvalle, M. A. A. (2002). Introducción al muestreo minero. *Santiago de Chile*.
- Susaeta, A. (2004). Theory of gravity flow (part 1). *Proceedings of MassMin*, pages 167–72.
- Yi, C., Johansson, D., Wimmer, M., Nordqvist, A., and San Miguel, C. (2022). *Numerical modelling of fragmentation by blasting and gravity flow in sublevel caving mines*.

Apéndice A

A continuación, se adjunta el paper asociado a este trabajo, actualmente aceptado en el Primer Congreso de Mecánica de Rocas en Chile, organizado por la Sociedad Chilena de Mecánica de Rocas (SCMR) y el Departamento de Ingeniería de Minas de USACH.

Influencia de la granulometría y distribución espacial de la roca fracturada en la migración de finos aplicado a Block Caving

M. Aravena ^a, S. Palma ^a

^a *Research and Innovation in Mining Group (RIMG), Complex Fluids Laboratory, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile.*

RESUMEN

El *block caving* es un método de explotación subterránea que se aplica en grandes yacimientos de baja ley por su bajo costo y alta capacidad de producción, lo que lo hace rentable y atractivo. A pesar de que el método ha sido ampliamente estudiado, se ha descuidado el análisis de la migración de finos, un fenómeno que afecta la dilución del mineral y genera pérdidas económicas. El objetivo de este trabajo es ampliar el conocimiento sobre la migración de finos desde una perspectiva experimental, evaluando la influencia de distintas variables en este proceso. Se realizaron cuatro experimentos en los que se varió el contenido de mineral fino, así como su diámetro medio, en un modelo físico de *block caving* a escala 1:267. En cada experimento se efectuaron extracciones discretas y controladas mediante un código en Arduino UNO. Los resultados mostraron que, al aumentar la altura de mineral fino, la migración de finos se intensificaba y el mineral fino aparecía más tempranamente en los puntos de extracción. Asimismo, el incremento del diámetro medio del mineral fino provocaba un aumento de la migración de finos en condiciones específicas, siendo una circunstancia negativa en el desarrollo de un proyecto minero, debido al aumento de la dilución por la inclusión de material fino de baja ley y/o estéril.

PALABRAS CLAVE

Block caving; Migración de finos; Dilución; Minería subterránea.

1. INTRODUCCIÓN

Block caving es un método de explotación subterránea que permite extraer grandes cantidades de mineral con un bajo costo de operación mediante el aprovechamiento de la fuerza de gravedad y la fracturación natural de la roca (Gertsch y Bullock, 1998). El método consiste en socavar el cuerpo mineralizado y dejar que se colapse bajo su propio peso, formando una caverna artificial que se llena posteriormente con mineral fracturado. El método es rentable y reduce el impacto ambiental en la superficie, pero requiere una alta inversión inicial y un buen conocimiento de las propiedades geomecánicas del yacimiento. Uno de los fenómenos que afecta al método es la migración de finos, que consiste en el movimiento de partículas pequeñas de estéril hacia los puntos de extracción, lo que puede aumentar la dilución y alterar el beneficio económico del proyecto. Por lo tanto, es importante comprender los mecanismos y las consecuencias de la migración de finos para optimizar el diseño y la operación del método *block caving*.

Con el paso de los años distintos autores han tratado de entender el flujo gravitacional y la dilución que se produce al extraer mineral. Entre estos tenemos a Laubscher que a partir de observaciones empíricas planteó

que la dilución dependía de lo siguiente (Laubscher, 2000): la regularidad e irregularidad del contacto mineral/estéril, el tamaño de partículas que se extraen, y la mayor o menor interacción entre puntos de extracción. Según Laubscher, cuanto más pequeñas sean las partículas, más se mezclarán el mineral y el estéril, y, además, la dilución se producirá más rápido. Por otro lado, a mayor interacción entre puntos de extracción, menor es la dilución, y a su vez, la aparición de dicha dilución se retrasa.

Susaeta por medio de experimentos con arena concluyó en 2004 que, la interacción entre diferentes puntos de extracción disminuye la dilución (Susaeta, 2004). Este resultado es similar al propuesto por Laubscher.

Pierce usó PFC3D para simular la extracción de material granular en el año 2010. El modelo consistió en partículas esféricas (finas y gruesas) distribuidas en forma circular, con un punto de extracción en el centro. De estas simulaciones, Pierce dedujo que al inicio de la simulación algunas partículas finas se filtraban una distancia corta por pequeñas perturbaciones, que las partículas finas se desplazaban más verticalmente que las gruesas durante la simulación, y que las partículas sobre el punto de extracción eran las que más se movían (Pierce, 2010).

De los últimos estudios que se han hecho, se tienen los experimentos en 3D para estudiar la migración de finos realizado por Castro en el año 2022. El experimento consistió en llenar un recipiente con mineral fino en la parte superior y mineral grueso en la parte inferior. Adicional a este mineral, dispuso marcadores al interior del modelo físico que permitió visualizar la formación y deformación de elipsoides. De los resultados el concluyó que, al tener mayor contenido de mineral fino, la percolación ocurría antes, planteando que se debía a la migración de finos. Asimismo, propone una relación directamente proporcional entre el cociente del diámetro del mineral grueso y el diámetro del mineral fino, con la migración de finos (Castro et al., 2022).

La literatura disponible sobre la migración de finos y la dilución en *block caving* es escasa y se basa en una reducida cantidad de observaciones empíricas (o simulaciones). Se requieren experimentos controlados que determinen las relaciones entre las distintas variables que puedan estar involucradas. El estudio completo de este proyecto consta de 36 experimentos en los cuales se analiza el efecto que tiene la distancia entre puntos de extracción, la granulometría y la distribución espacial de la roca fracturada en la migración de finos. Por medio de tamizaje y pesaje se cuantifica la dilución que se tiene en cada experimento.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. Diseño experimental

Se tiene un modelo físico que consta de un contenedor de 62 x 75 x 2 cm (ancho x alto x espesor) soportado por dos pilares (Véase Figura 1). El contenedor fue construido con paredes de vidrio que permiten visualizar el flujo de mineral a medida que se retira desde los puntos de extracción. La maqueta es una representación de un *block caving* típico a escala de laboratorio (1:267). En la parte inferior del contenedor se tienen bateas, las cuales tienen dimensiones fijas para cada uno de los experimentos. El modelo físico se encuentra en un cuarto oscuro, iluminado por dos focos de alta intensidad. De esta forma se evita cualquier tipo de contaminación lumínica que pueda afectar el material visual. La obtención de imágenes y video se logra mediante el uso de una cámara Nikon D7500 que graba en resolución 4K UHD a 30 cuadros por segundo, obteniendo así material visual de alta calidad.

La extracción de mineral se hace con un sistema automatizado que es controlado por medio de Arduino UNO (Véase Figura 2). La extracción es del tipo discreta y siempre se extrae la misma cantidad de mineral en cada ciclo (apertura y cierre del punto de extracción), de esta forma, la tasa de extracción no es un factor que pueda alterar los resultados y posteriormente el análisis.

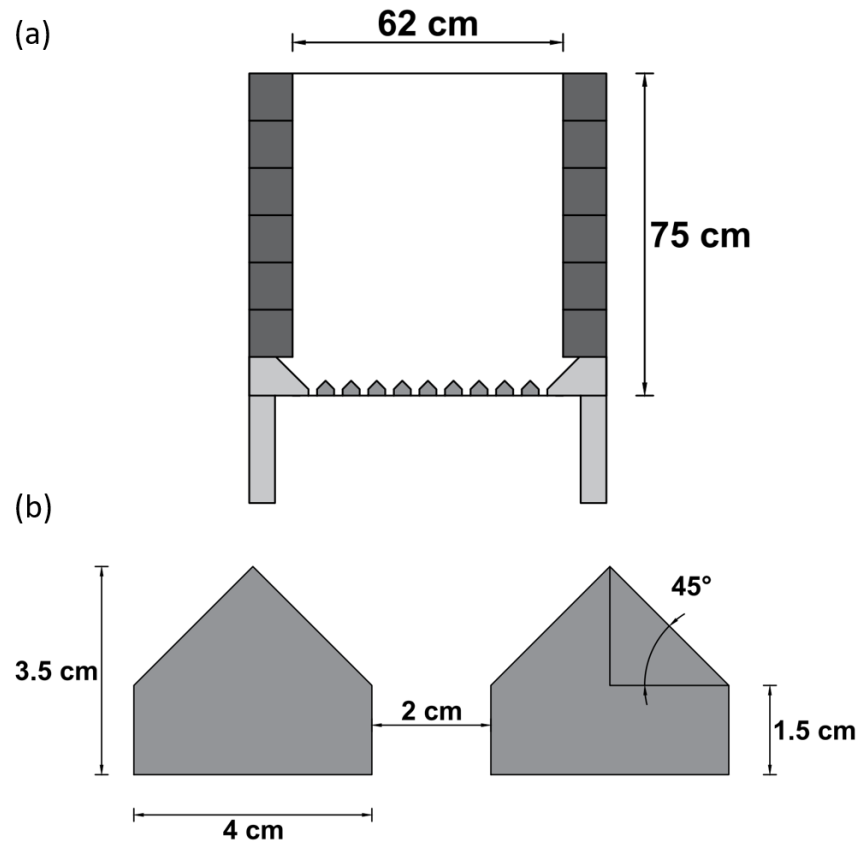


Figura 1. (a) Modelo físico *block caving* escala 1:267. (b) Dimensiones de pilares zanja que dan forma a las bateas.

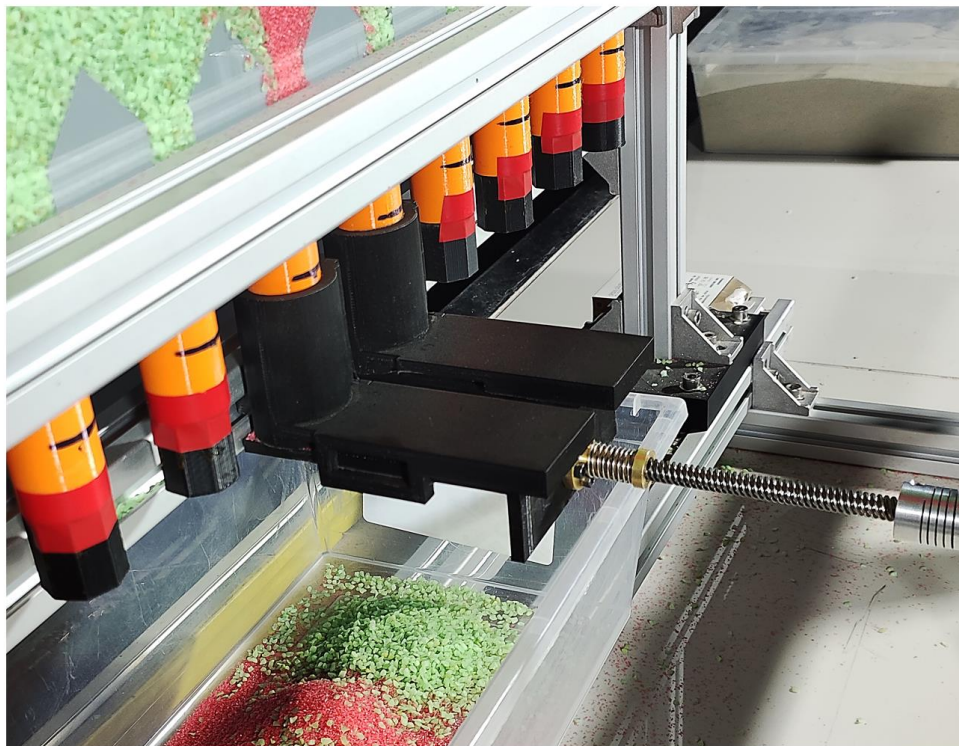


Figura 2. Sistema de extracción automatizado y controlado por Arduino UNO.

2.2. Caracterización del mineral

La caracterización del mineral grueso y fino se realiza desde un punto de vista geométrico, ya que, el diámetro de las partículas tiene un rol fundamental en el comportamiento del flujo granular, tanto en el movimiento como en estancamiento. Para determinar las distintas características del mineral se procede primeramente con la obtención de una muestra representativa, la cual, se obtiene por medio de roleo y cuarteo (Sironvalle, 2002).

Después de obtener una muestra representativa se realiza el tamizaje, una clasificación de material granular utilizando una serie de tamices apilados en orden descendente de tamaño. Cada tamiz retiene los granos cuyo tamaño es mayor que la abertura de la malla del tamiz, pero menor que el de los tamices superiores. La curva granulométrica obtenida corresponde a la que se presenta en la Figura 3, y a cada set de datos se le ajusta el modelo teórico de Rosin-Rammler (RR), de esta forma, se interpolan los distintos diámetros en función del pasante acumulado.

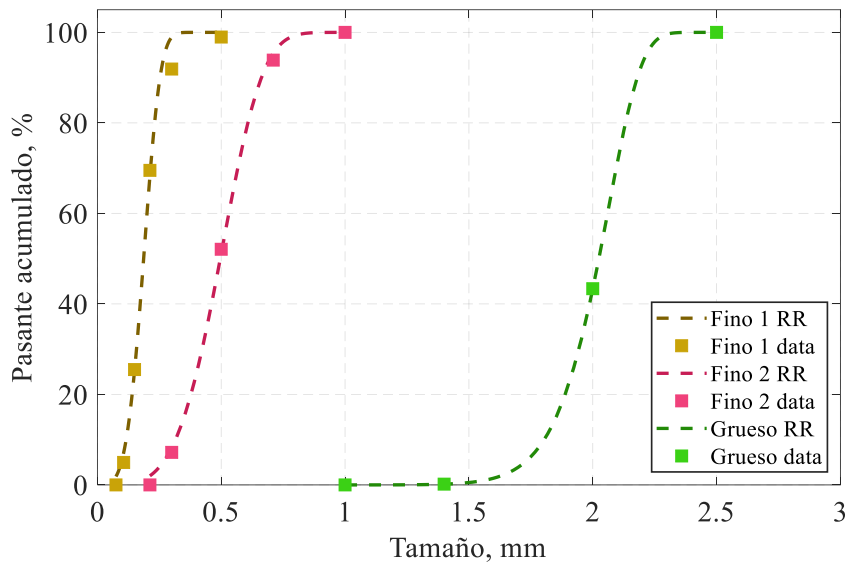


Figura 3. Curva granulométrica de los minerales utilizados en los experimentos. “RR” corresponde al modelo teórico de Rosin-Rammler y “data” corresponde a los datos provenientes del tamizaje.

Con las curvas de la Figura 3 se obtiene y calcula el diámetro medio del mineral (d_{50}), coeficiente de uniformidad (C_U) y el coeficiente de curvatura (C_Z). El diámetro medio corresponde al tamaño de mineral en la que, el pasante acumulado es 50%. Es decir, 50% del mineral está por debajo del tamaño d_{50} . El coeficiente de uniformidad se utiliza para evaluar la uniformidad en tamaño de las partículas. Mientras más cercano a 1, más uniforme y semejante son las partículas. Por otro lado, el coeficiente de curvatura indica la curvatura que tiene una distribución granulométrica. Los materiales bien graduados tienen valores entre 1 y 3. El coeficiente de uniformidad y de curvatura se expresan como (Craig, 2004):

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

donde d_{10} y d_{60} son el diámetro de partícula en el que se tiene un 10% y 60% de pasante acumulado respectivamente.

$$C_Z = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} d_{60}} \quad (2)$$

donde d_{10} , d_{30} y d_{60} son el diámetro de partícula en el que se tiene un 10%, 30% y 60% de pasante acumulado respectivamente. La caracterización de los minerales empleados se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del mineral utilizado en los experimentos.

Mineral	$d_{10}, \mu\text{m}$	$d_{30}, \mu\text{m}$	$d_{50}, \mu\text{m}$	$d_{60}, \mu\text{m}$	C_U	C_Z
Grueso	1800	1944	2025	2060	1.14	1.02
Fino 1	116	158	186	200	1.72	1.07
Fino 2	315	423	496	531	1.68	1.07

El mineral grueso y el mineral fino son cuarzo de diferente color. El cuarzo es el mineral más abundante de la corteza terrestre, con un 12% de su composición. Sus propiedades mecánicas incluyen: dureza 7 en la escala de Mohs, tenacidad quebradiza, módulo de elasticidad de 75 GPa, resistencia a la flexión de 68 MPa y resistencia a la tracción entre 45-50 MPa.

2.3. Configuración espacial de la roca fracturada

En este estudio se consideran dos configuraciones con mineral fracturado: (a) horizontal con 15 cm de altura de mineral fino y (b) horizontal con 30 cm de altura de mineral fino. El mineral grueso y el mineral fino se ubican en la parte inferior y superior de la configuración, respectivamente. Estas configuraciones permiten realizar experimentos que representan diferentes situaciones que podrían ocurrir en la realidad. La altura de mineral fino se denota con h . La Figura 4 muestra las configuraciones utilizadas.

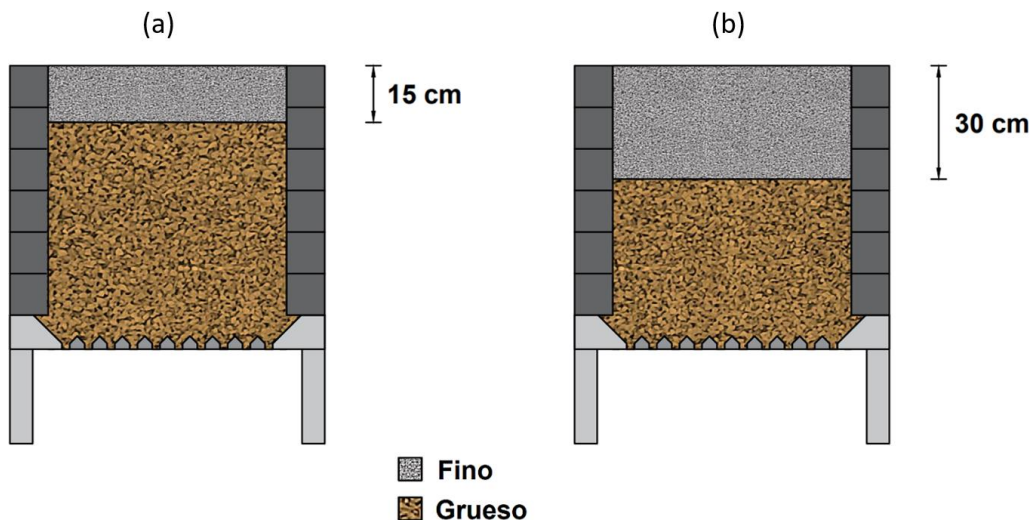


Figura 4. Configuración espacial de la roca fracturada. (a) Columna con 15 cm de mineral fino. (b) Columna con 30 cm de mineral fino.

Con las variables mencionadas se construye la matriz experimental de la Tabla 2. A partir de esta tabla se puede observar que el número total de experimentos es cuatro.

Tabla 2. Matriz experimental compuesta por el diámetro medio del mineral grueso (d_g), el diámetro medio del mineral fino (d_f) y el contenido de mineral fino (h).

$d_g, \mu\text{m}$	$d_f, \mu\text{m}$	h, cm
2025	186	15
-	496	30

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Figura 5 y Figura 6 se ilustra la evolución de la migración de finos a medida que se realiza su extracción. Cabe destacar que, en cada secuencia se extrajo una cantidad uniforme de mineral, y, a su vez, dicha secuencia precede al momento en el que el mineral fino alcanza los puntos de extracción.

En cada ciclo de extracción (que comprende la apertura y cierre del punto de extracción), el mineral se somete a un proceso de tamizado, lo que resulta en una separación entre el mineral grueso y el mineral fino. De esta manera, se generan las gráficas que se presentan en la Figura 7, las cuales ilustran la cantidad de mineral fino que se va infiltrando a medida que se extrae mineral grueso y fino.

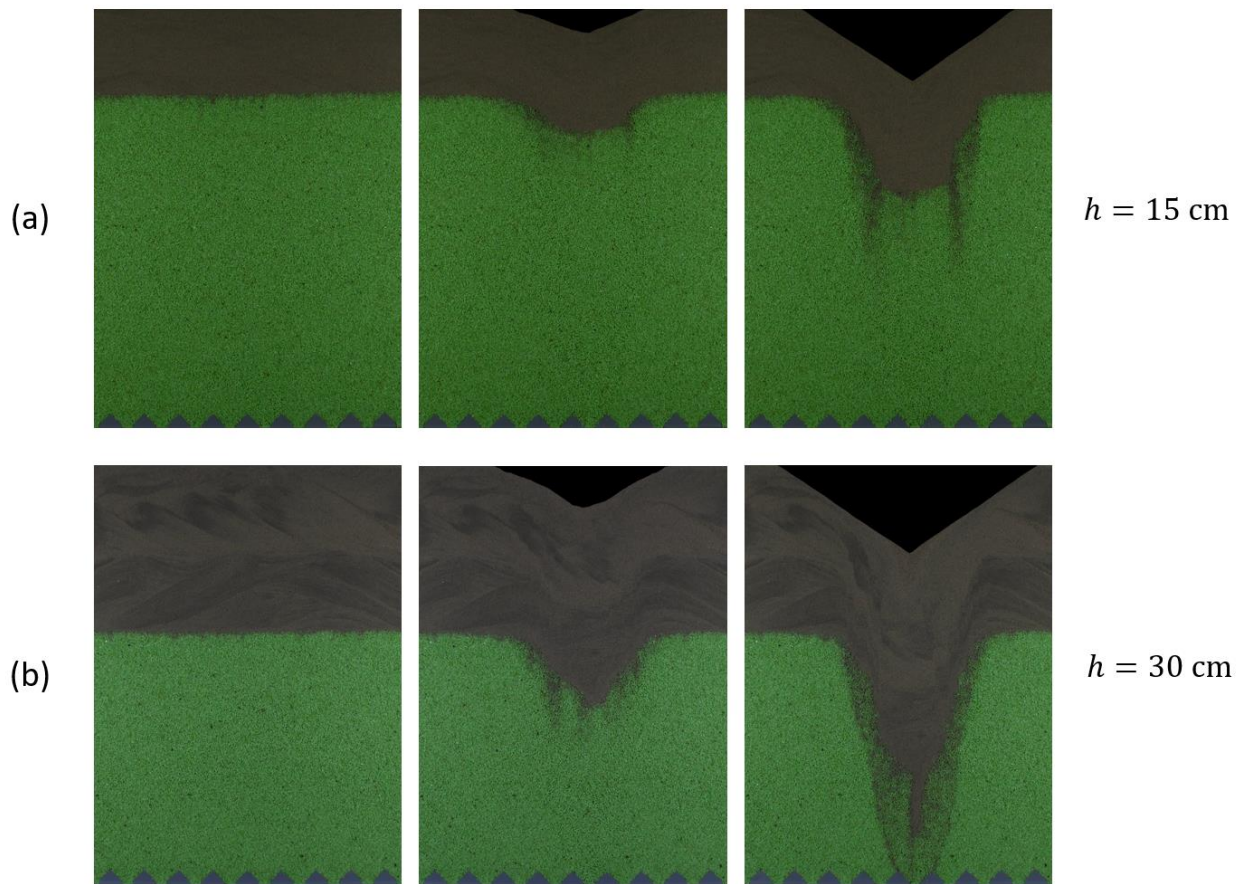


Figura 5. Comparación de la migración de finos para un mismo número de extracciones, en la que el diámetro medio del mineral fino es de $186 \mu\text{m}$. (a) secuencia de extracción para una altura de fino $h = 15 \text{ cm}$. (b) secuencia de extracción para una altura de fino $h = 30 \text{ cm}$.

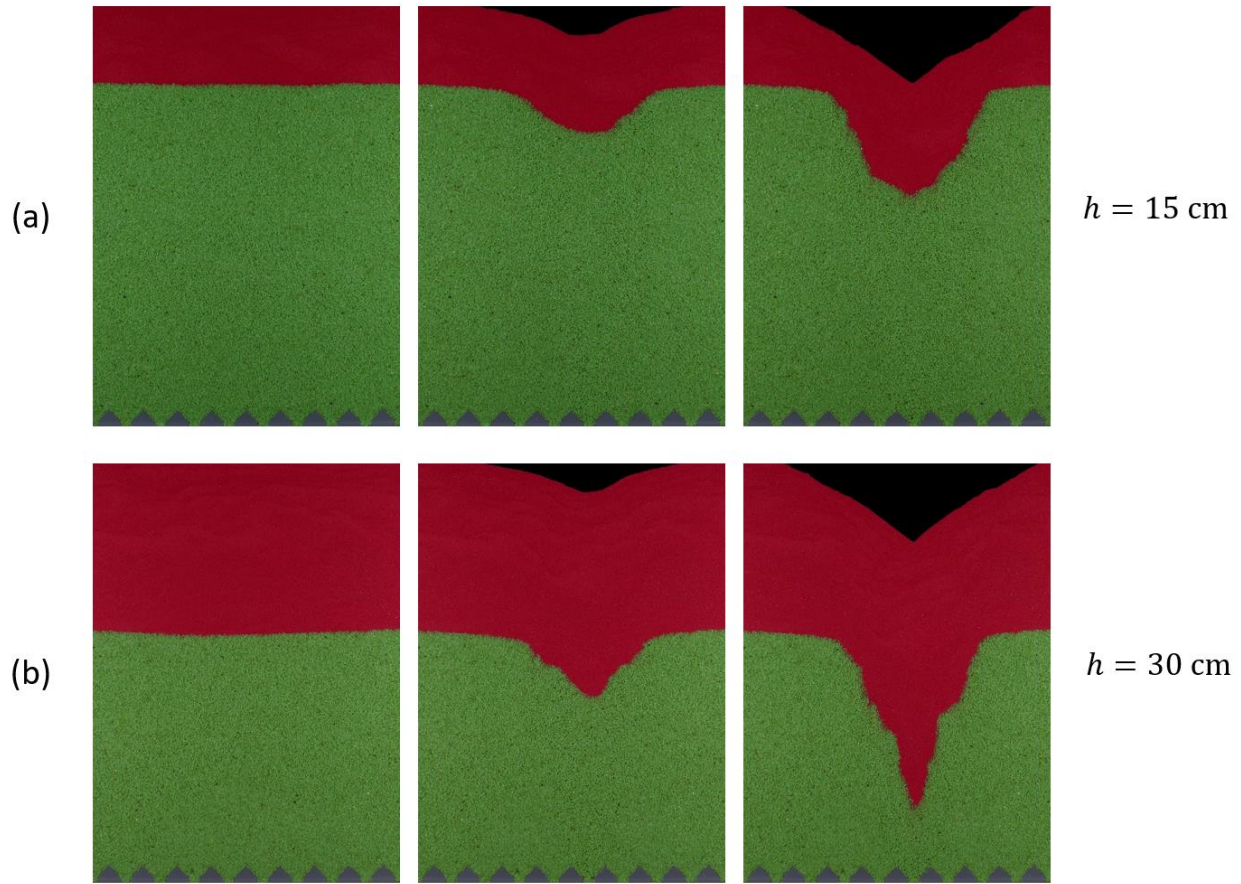


Figura 6. Comparación de la migración de finos para un mismo número de extracciones, en la que el diámetro medio del mineral fino es de $496 \mu\text{m}$. (a) secuencia de extracción para una altura de fino $h = 15 \text{ cm}$. (b) secuencia de extracción para una altura de fino $h = 30 \text{ cm}$.

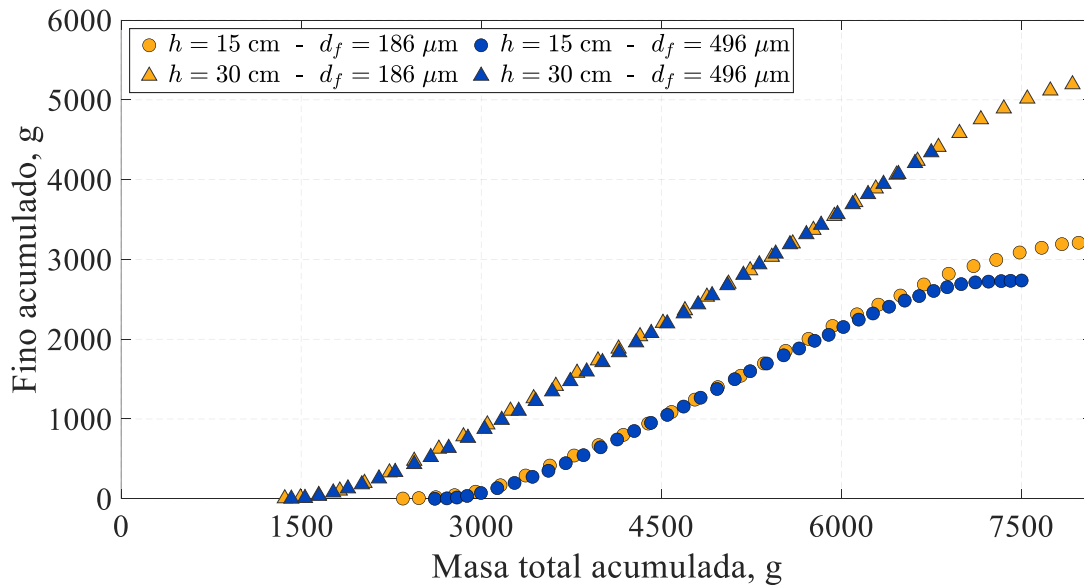


Figura 7. Masa total acumulada versus fino acumulado de los cuatro experimentos realizados.

Por definición tenemos que la dilución se expresa como (Yi, et al., 2022):

$$D = \frac{\textit{estéril}}{\textit{mineral+estéril}} \quad (4)$$

En los experimentos realizados, el material fino corresponde a estéril y el material grueso corresponde a mineral. Con esta expresión, el fino acumulado se transforma a dilución acumulada (Véase Figura 8). Esta grafica considera datos desde el momento en que aparece la dilución. Es decir, ambas curvas omiten la masa de mineral grueso que se extrae previo a la aparición del fino.

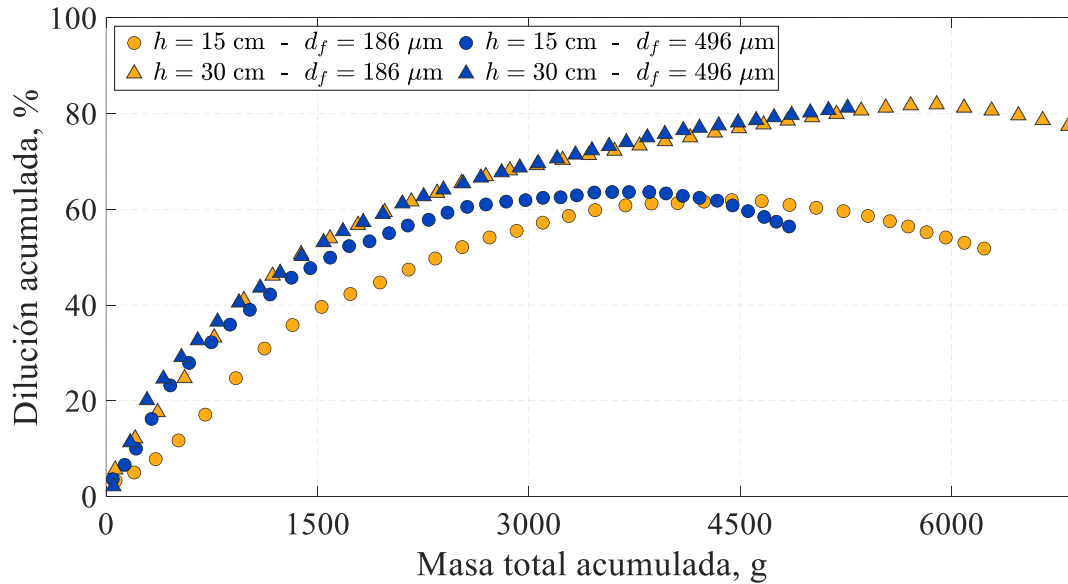


Figura 8. Masa total acumulada versus dilución acumulada de los cuatro experimentos realizados.

4. ANÁLISIS

4.1. Influencia de la altura de mineral fino

De las fotografías presentadas en la Figura 5 y Figura 6, se puede realizar una transformación lineal de píxel a centímetro, pudiendo así determinar el desplazamiento vertical del mineral fino tras realizar cierta cantidad de extracciones. Los valores de estos desplazamientos se indican en la Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 3. Migración de mineral fino de diámetro medio 186 μm .

h , cm	Desplazamiento vertical, cm
15	18.0
30	37.4

Tabla 4. Migración de mineral fino de diámetro medio 496 μm .

h , cm	Desplazamiento vertical, cm
15	19.7
30	31.5

Se desprende que, el mineral fino tiene un mayor desplazamiento vertical al tener una altura de mineral fino de 30 cm.

Se infiere que el incremento en el desplazamiento vertical podría estar relacionado con la presión litostática que el mineral fino ejerce sobre sí mismo. En las situaciones con $h = 15$ cm, la zona central de la columna presenta una menor cantidad de mineral en la parte superior, que en las situaciones con $h = 30$ cm, donde se aprecia una sobrecarga S (Véase Figura 9).

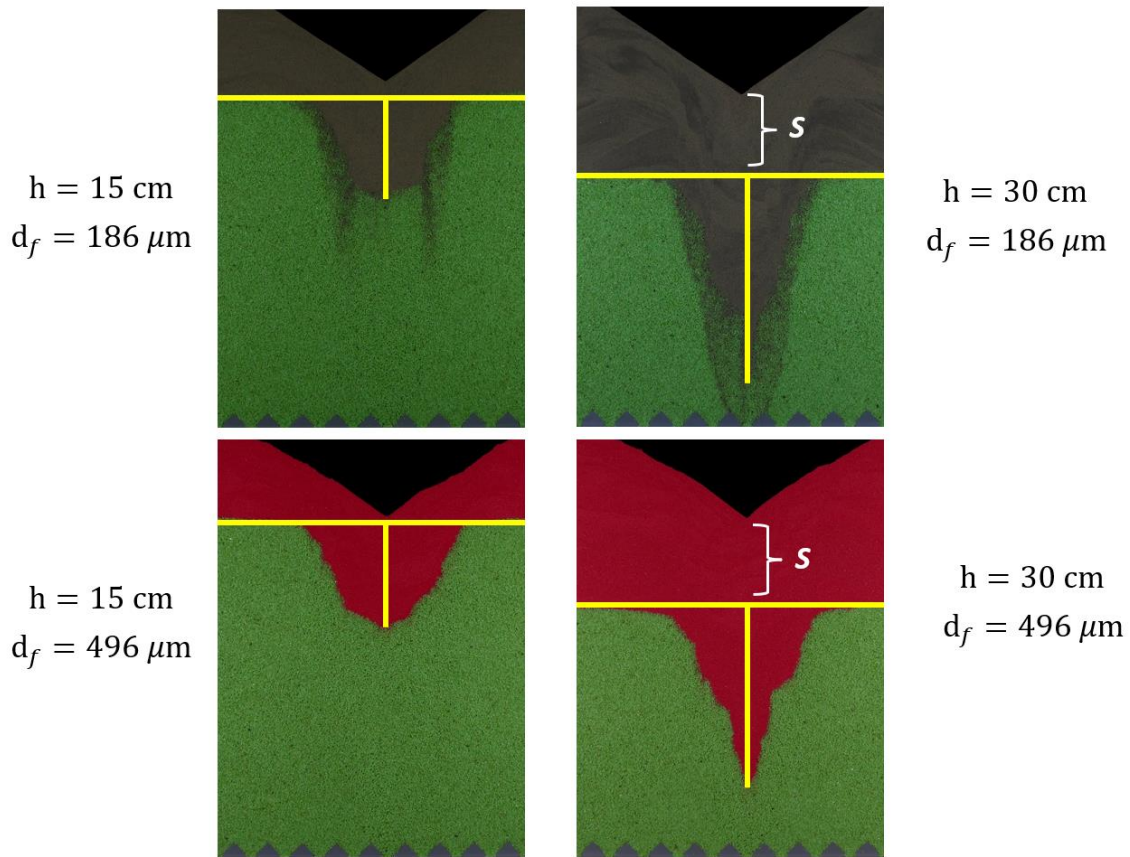


Figura 9. Contraste del desplazamiento vertical de finos en experimentos con diferente altura y diámetro medio de mineral fino.

Según se observa en la Figura 8, para un diámetro medio de $186 \mu\text{m}$, la dilución aumenta más rápidamente al contar con 30 cm de mineral fino. Esto se deduce por el desfase en el eje y de las curvas, donde, al parecer, la presión litostática provoca una migración de finos más veloz. Para un diámetro medio de $496 \mu\text{m}$ se presenta el mismo comportamiento, no obstante, las diluciones son más parecidas.

4.2. Influencia del diámetro medio del mineral fino

Según se observa en la Figura 8, para la situación en que se cuenta con 15 cm de mineral fino, la variación en el diámetro medio del mineral fino implica una modificación de la dilución, donde, el incremento del diámetro ocasiona un aumento de la dilución, resultado que contrasta ligeramente con los hallazgos de Castro (Castro, 2022). En la misma figura se aprecia que, para la situación en que se dispone de 30 cm de mineral fino, la variación en el diámetro medio del mineral fino no tiene incidencia sobre la dilución, es decir, no hay diferencia en el eje x ni el eje y.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con lo expuesto en este trabajo, se observa que la migración de finos aumenta al incrementarse el contenido de mineral fino. Esto significa que la condición de $h=30$ cm favorece la migración de finos en relación con la condición $h=15$ cm. Esta situación se presenta al emplear mineral fino de diámetro medio $186 \mu\text{m}$ y $496 \mu\text{m}$. Se supone que esto se debe a la presión litostática que ejerce el mineral fino sobre sí mismo. En la condición de 15 cm de mineral fino, el aumento del diámetro medio implica un incremento de la migración de finos, es decir, se establece una relación directamente proporcional. Este resultado contrasta con lo obtenido en 2022 por el investigador Castro. Por ello, se sugiere realizar estudios más profundos que permitan comprender la divergencia de los resultados. Es posible que existan otros parámetros que puedan influir en esta diferencia experimental.

Desde una perspectiva industrial, poseer un mayor contenido de mineral fino supone un efecto adverso en un proyecto minero, ya que propicia la aparición de finos en los puntos de extracción, ocasionando un aumento de la dilución. Si la ley del mineral se reduce excesivamente, el proyecto minero podría no ser viable. Se recomienda efectuar los experimentos mencionados, utilizando una gran variedad de tamaños, además de considerar la variación del tipo de mineral, con el propósito de verificar la consistencia y extrapolabilidad de estos resultados en distintas configuraciones mineralógicas.

En trabajos futuros se abordará la influencia de la inclinación del mineral, así como el tipo de extracción (aislado/interactivo) de manera simultánea en la migración de finos. De esta manera, se pretende elaborar un ábaco que funcione como sistema referencial para predecir la variación de la migración de finos entre yacimientos que comparten una o más similitudes (similitud entre variables estudiadas). Asimismo, se realizará un análisis cualitativo infinitesimal de la migración de finos mediante un mapa de desplazamientos. De esta forma, se obtendrá mayor conocimiento de la evolución de los elipsoides de movimiento y extracción al tener implicadas diferentes condiciones.

REFERENCIAS

- Castro, R., Arancibia, L., & Gómez, R. (2022). *Quantifying fines migration in block caving through 3D experiments*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 151, 105033.
- Craig, R. F. (2004). *Craig's soil mechanics*. CRC press.
- Gertsch, R. E., & Bullock, R. L. (1998). *Techniques in underground mining: Selections from Underground mining methods handbook*.
- Laubscher, D. H. (2000). *Block Caving Manual, prepared for International Caving Study*. Brisbane: JKMRRC and Itasca Consulting Group.
- Pierce, M. E. (2010). *A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines*. Brisbane, Australia: University of Queensland.
- Sironvalle, M. A. A. (2002). *Introducción al muestreo minero*. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, Santiago, Chile.
- Susaeta, A. (2004). *Theory of gravity flow (Part 1)*. Proceedings of MassMin, 167-72.
- Yi, C., Johansson, D., Wimmer, M., Nordqvist, A., & San Miguel, C. R. (2022). *Numerical modelling of fragmentation by blasting and gravity flow in sublevel caving mines*.

Apéndice B

A continuación, se adjunta el paper asociado a este trabajo, el cual será remitido a una revista especializada en el campo de la minería.

Cuantificación de la migración de finos en minería de block caving mediante experimentos de laboratorio

Michael Aravena^{a,b}, Sergio Palma^{a,b,*} and Francisco J. Vivanco-Avaría^c

^aResearch and Innovation in Mining Group (RIMG), Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile.

^bComplex Fluids Laboratory, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile.

^cUniversidad de Santiago de Chile (USACH), Departamento de Física and Center for Soft Matter Research (SMAT-C), Chile.

ARTICLE INFO

Keywords:

Block Caving
Migración de finos
Dilución
Flujo gravitacional
Minería subterránea

ABSTRACT

La migración de finos en minería block caving corresponde al movimiento de material granular de bajo tamaño. Este material se dirige hacia los puntos de extracción, causando la dilución del mineral valioso y problemas de seguridad debido a las colgaduras cohesivas. A pesar de que existen estudios previos sobre la migración de finos mediante experimentos con material granular y simulaciones 3D, la evidencia empírica es escasa. Por lo tanto, se carece de una comprensión sólida de la relación entre las variables que afectan la migración de finos. Por medio de veinticuatro experimentos en un modelo físico a escala de laboratorio, se analiza la influencia de distintas variables en la migración de finos. Las variables consideradas son el diámetro medio del mineral fino, el contenido de mineral fino, la orientación del mineral y el tipo de extracción (aislado/interactivo). Los resultados muestran que la migración de finos aumenta con el contenido de mineral fino y disminuye con la inclinación, siendo estas dos variables las más determinantes. Una extracción interactiva reduce y retrasa la migración de finos a los puntos de extracción. El diámetro medio del mineral fino parece tener una influencia menor, aunque se observan circunstancias en las que el incremento del diámetro conduce a un aumento de la migración de finos. Las gráficas obtenidas brindan información valiosa para comprender la migración de finos en operaciones block caving bajo diversas condiciones. Con estas, se puede estimar el cambio de la migración de finos al tener implicada distintas variables en simultáneo. Esto supone una herramienta complementaria a los modelos que se usan actualmente en minería para evaluar este fenómeno.

1. Introducción

El block caving es un método de explotación subterránea en el que se induce el colapso natural del macizo rocoso mediante la fracturación y extracción del mineral. Este método aprovecha la gravedad y los esfuerzos internos de la roca para generar y propagar fracturas, lo que facilita el hundimiento del mineral. Se aplica en yacimientos masivos de gran tamaño por su bajo costo y alta capacidad de producción [3]. El método se posiciona como una solución al agotamiento de reservas superficiales y la disminución de leyes de mineral. Sin embargo, la física del método no está bien estudiada, mas bien se basa en modelos antiguos elaborados a partir de una reducida cantidad de observaciones empíricas. Esto impide comprender fenómenos como la migración de finos, lo que corresponde a material granular sólido de tamaño reducido que se encuentra en los medios porosos naturales y que pueden ser movilizados por diversas fuerzas [4]. La migración de finos conduce a pérdidas económicas por dilución en caso de que el material que se incorpora es material estéril [8, 9]. De acuerdo con [11], la dilución es un fenómeno inevitable que genera incertidumbre en la planificación de proyectos mineros. Es por esto que, es crucial estimar la cantidad de residuos que se mezclan con el mineral para no afectar el beneficio económico previsto. Además, la migración de finos puede originar colgaduras cohesivas debido a la fuerza capilar [14], lo que se traduce

en un riesgo al personal como a la maquinaria que opera en los puntos de extracción.

El fundamento principal del método block caving es el flujo gravitacional, que consiste en el movimiento descendente de material bajo la acción de la gravedad. Este fenómeno lo estudió Rudolf Kvapil mediante ensayos físicos en los años 60 y estableció dos conceptos: la zona de extracción aislada (IEZ, por sus siglas en inglés) y la zona de movimiento aislado (IMZ, por sus siglas en inglés). El IEZ corresponde al volumen de material que se extrae, y el IMZ al volumen de material que se desplaza debido a la extracción [5]. Ambos volúmenes tienen forma elipsoidal. Kvapil observó que la forma y el tamaño de los elipsoides dependen del tamaño de partícula del material. A mayor tamaño de partícula, menor excentricidad de los elipsoides. Esto implica que el flujo gravitacional es diferente según el tamaño de partícula.

De acuerdo con [7], la dilución depende de varios parámetros. Entre estos está el tamaño de la fragmentación del estéril: si es muy fino, la dilución se produce más rápido y en mayor cantidad que si es grueso. Otro factor es el nivel de interacción entre los puntos de extracción. A medida que estos se entrelazan de manera más significativa, se observa una reducción en la dilución y un aumento en el tiempo requerido para que se manifieste.

A través de experimentos con arena, Susaeta notó que la dilución disminuye cuando se tiene un flujo interactivo entre diversos puntos de extracción [16], concepto semejante al propuesto por Laubscher.

✉ sergio.palma@usm.cl (S. Palma)
ORCID(s):

Pierce realizó simulaciones 3D para estudiar cómo se mueven las partículas finas al extraer material desde un punto aislado [10]. El modelo que usó consistía en partículas esféricas de dos tamaños: finas y gruesas. El punto de extracción estaba en el centro del modelo. De estas simulaciones, el autor observó lo siguiente: al comienzo, algunas partículas finas se desplazaban debido a pequeñas perturbaciones. A medida que avanzaba la extracción, las partículas finas se movían más verticalmente, que las gruesas. Las partículas que estaban en la zona central, sobre el punto de extracción, eran las que más se desplazaban verticalmente. Además, las partículas finas migraban más rápido que las gruesas.

El año 2022 se realizó un estudio experimental 3D, en el que, se tenía mineral fino en la parte superior, mineral grueso en la parte inferior y marcadores que permitieron analizar la formación y deformación del elipsoide de extracción [1]. El autor percibió que a mayor proporción entre diámetro de mineral grueso y el del fino, mayor migración de finos. Esto quiere decir que, la migración de finos se incrementa al reducir el tamaño del mineral fino. A su vez, los resultados experimentales indican que una extracción interactiva reduce y retrasa la migración de finos.

Se observa que la migración de finos es un fenómeno poco estudiado, basado en evidencia empírica limitada que no permite establecer relaciones sólidas entre las distintas variables que pueden influir en simultáneo. El propósito de este estudio radica en la cuantificación y comprensión de la influencia conjunta de diversas variables en la migración de finos en el contexto de la minería block caving. A su vez, se pretende crear un ábaco que sirva como sistema de referencia para estimar la variación de la migración de finos entre yacimientos que tienen una o más similitudes (similitud de variables estudiadas). De esta forma, se puede predecir la migración de finos usando datos históricos de yacimientos parecidos.

Para lograr esto, se realizan veinticuatro experimentos utilizando un modelo físico a escala de laboratorio. En estos experimentos, se efectúa la manipulación de las siguientes variables experimentales: el diámetro medio de mineral fino, el contenido de mineral fino, la orientación del mineral y el tipo de extracción (aislado con un punto de extracción e interactivo con dos puntos de extracción). El diámetro medio del mineral grueso permanece constante en todos los experimentos. La cuantificación de la migración de finos se realiza tamizando y pesando el mineral de cada extracción.

2. Metodología experimental

2.1. Diseño experimental

El modelo físico consiste en un contenedor de $62 \times 75 \times 2$ cm (ancho \times alto \times espesor) sostenido por dos pilares, como se muestra en [Figure 1](#). Este representa un block caving de 200 m de alto a escala de laboratorio (1:267), y se fabricó con paredes de vidrio que permiten observar el flujo de mineral durante su extracción desde las bateas. En la parte inferior del modelo físico se ubican bateas que tienen un ángulo de inclinación constante de 45° y una separación fija de 6 cm

entre cada una (de centro a centro). La geometría de las bateas se ilustra en [Figure 1](#).

2.2. Caracterización del mineral

El mineral se puede caracterizar mediante diferentes enfoques, entre los que se destacan los geométricos, químicos y coloidales [4]. En el presente estudio, se ha realizado una caracterización geométrica, enfocándose específicamente en la medición del diámetro de las partículas. Esta variable tiene una importancia fundamental, ya que influye directamente en el comportamiento del flujo granular, tanto en su movimiento como en su estancamiento.

El mineral grueso y fino corresponden a cuarzo, cuyas características se determinan a partir de muestras representativas obtenidas mediante roleo y cuarteo [15]. Dichas muestras se someten a un proceso de tamizaje, que consiste en la separación del mineral según el tamaño de sus partículas [13], obteniendo así datos experimentales a los que se les ajusta el modelo teórico de Rosin-Rammler [12].

De los modelos teóricos se obtiene y calcula el diámetro medio (d_{50}), el coeficiente de uniformidad (C_U) y el coeficientes de curvatura (C_Z). El coeficiente de uniformidad mide el grado de homogeneidad en el tamaño de las partículas, siendo cercano a 1 cuando son muy similares. El coeficiente de curvatura caracteriza la forma de una distribución granulométrica, siendo entre 1 y 3 para los materiales bien graduados. Los coeficientes de uniformidad y curvatura se definen según [2] de la siguiente forma:

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

$$C_Z = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (2)$$

En la [Figure 2](#) se presenta la curva granulométrica, y en la [Table 1](#) se resume la caracterización de cada mineral, incluyendo el ángulo de reposo (ϕ).

2.3. Disposición espacial del mineral

Se consideran tres orientaciones del mineral (θ): horizontal (0°), inclinada (45°) y vertical (90°). Estas se establecen porque la mineralización en los yacimientos pueden adoptar diversas formas (Véase [Figure 1](#)). De este modo, se pretende simular casos más acordes con la realidad.

En cada una de estas orientaciones, el mineral fino ocupa un porcentaje del volumen total de la maqueta. Este porcentaje corresponde al contenido de mineral fino (V) y toma los valores de 20 y 40%. En los experimentos con mineral orientado horizontalmente, el fino y grueso se ubican en la parte superior e inferior respectivamente. Aquí el mineral fino adopta forma rectangular de ancho 62 y alto h cm. Respetando el contenido de mineral fino de 20 y 40%, h toma valores de 15 y 30 cm respectivamente.

En los experimentos con mineral orientado en 45° , el fino adopta forma de triángulo rectángulo isósceles de catetos x cm. Respetando el contenido de mineral fino de 20 y 40%, x toma valores de 43 y 61 cm respectivamente.

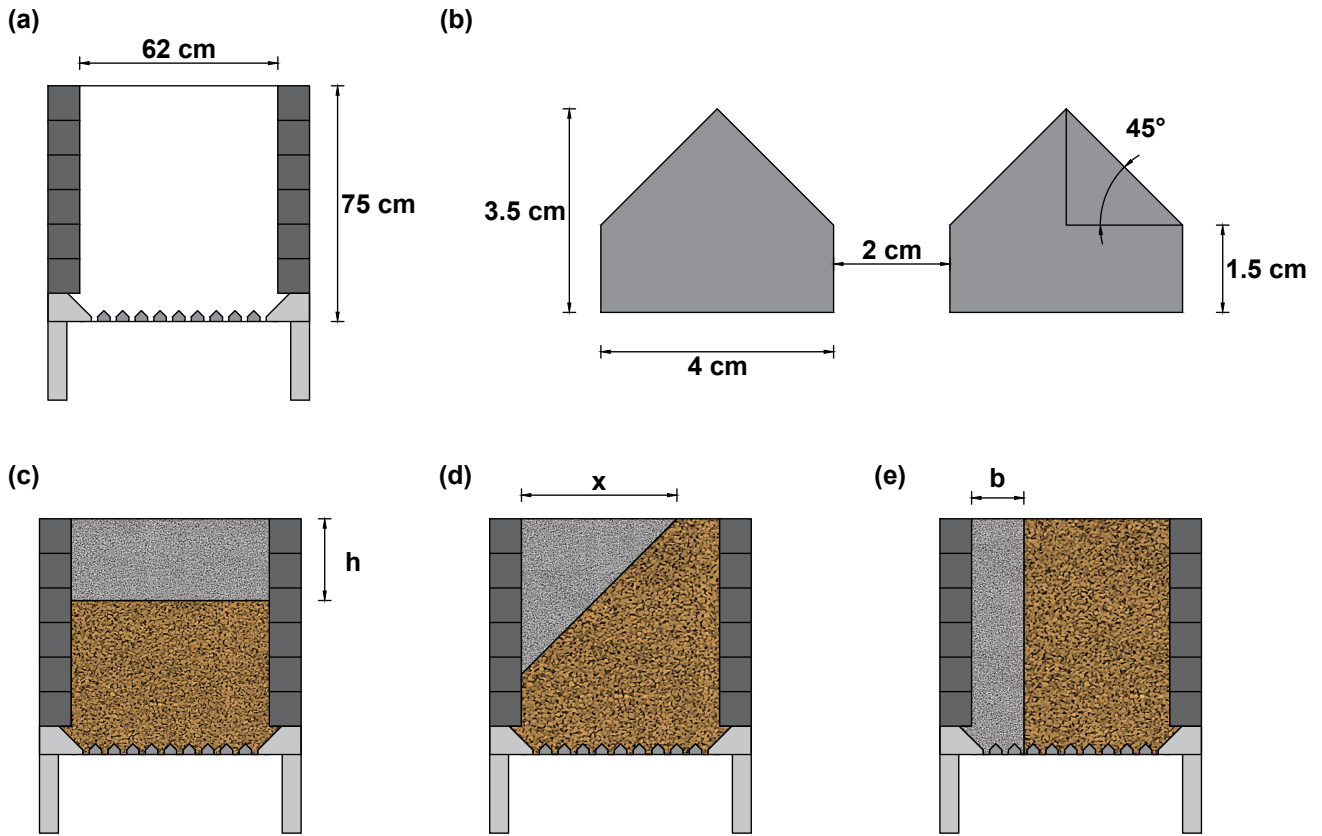


Figure 1: Esquema representativo de las distintas unidades que componen al modelo experimental. (a) Contenedor vacío. (b) Pilares zanjas que dan forma a las bateas. (c) Contenedor con mineral orientado horizontalmente. En la parte superior se ubica el mineral fino. (d) Contenedor con mineral orientado en 45° . El mineral fino se ubica en el triángulo equilátero de catetos x . (e) Contenedor con mineral orientado verticalmente. El mineral fino se ubica al costado izquierdo.

Mineral	d_{10} (μm)	d_{30} (μm)	d_{50} (μm)	d_{60} (μm)	C_U	C_Z	ϕ ($^\circ$)
Fine 1	116	158	186	200	1.72	1.07	27 ± 1
Fine 2	315	423	496	531	1.68	1.07	25 ± 1
Coarse	1800	1944	2025	2060	1.14	1.02	19 ± 1

Table 1
Caracterización del mineral grueso y fino empleado en los experimentos.

En los experimentos con mineral orientado verticalmente, el fino adopta forma rectangular de alto 75 y ancho b cm. Respetando el contenido de mineral fino de 20 y 40%, b toma valores de 12 y 25 cm respectivamente.

2.4. Modalidad de extracción

En los experimentos, se pretende estudiar el comportamiento de la migración de finos en dos escenarios: extracción aislada y extracción interactiva. En una extracción aislada, se extrae mineral exclusivamente desde un punto ($P = 1$), mientras que en una extracción interactiva, se extrae mineral desde dos puntos adyacentes de forma simultánea ($P = 2$). Se desarrolló un código en la plataforma Arduino para regular el movimiento de un motor, realizando de esta forma extracciones discretas y controladas, simulando el proceso extractivo de los LHD (Load-Haul-Dump) utilizados en minería block caving.

P	θ ($^\circ$)	d_g (μm)	d_f (μm)	V (%)
1	0	2025	186	20
2	45		496	40
	90			

Table 2
Matriz experimental compuesta por el tipo de extracción (P), orientación del mineral (θ), diámetro medio del mineral grueso (d_g), diámetro medio de mineral fino (d_f) y el contenido de mineral fino (V).

La **Table 2** resume las variables experimentales y sus respectivos valores (matriz experimental). La combinatoria de estas variables da lugar a la ejecución de un total de veinticuatro experimentos.

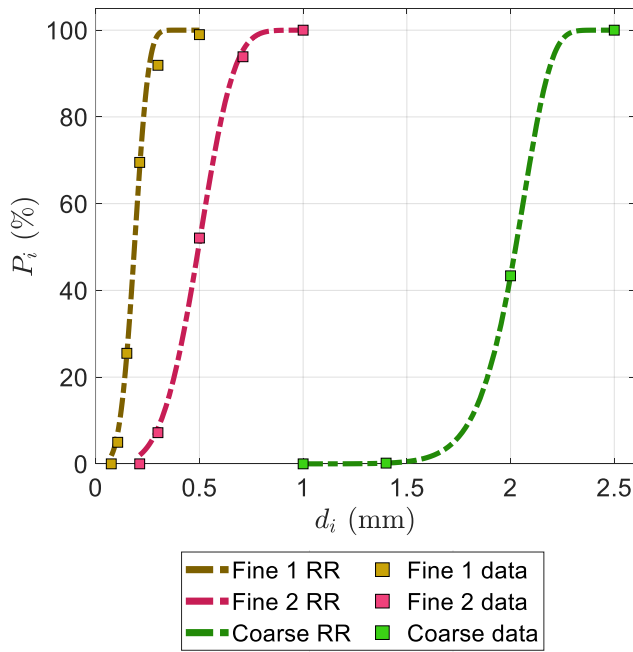


Figure 2: Curvas granulométricas de los minerales empleados en los experimentos. P_i corresponde al pasante acumulado para un tamaño d_i . "data" corresponde a los datos provenientes del tamizaje, y "RR" corresponde a la curva teórica del modelo Rosin-Rammler.

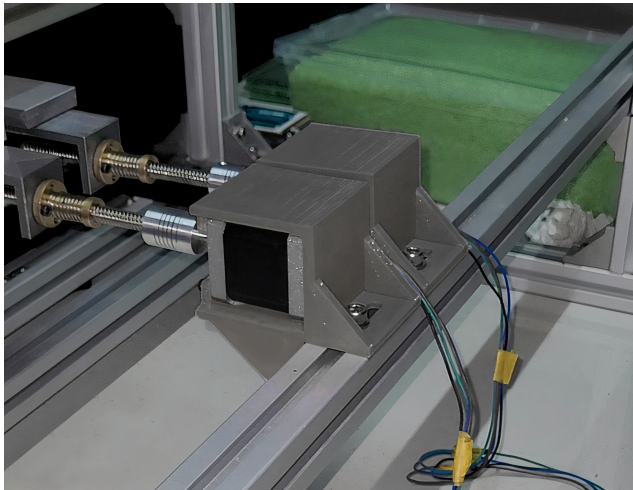


Figure 3: Sistema de extracción empleado en los experimentos. Este se compone por motores controlados por medio de Arduino.

2.5. Cuantificación de la migración de finos

Es esencial destacar que, en la discusión no se emplea la fórmula PED (Porcentaje de Entrada de Dilución) propuesta por Laubscher [6]. Esto se debe a que, esta fórmula depende de la altura de interacción, un parámetro que no ha sido considerado en el marco de este estudio.

En los experimentos, la migración de finos se cuantifica por medio de la dilución, la cual se define [17]:

$$Dilution = \frac{Waste}{Ore + Waste} \quad (3)$$

Desfase másico (g)	Influencia
[0 – 250]	Nula
[500 – 1000]	Baja
(1000 – 1500]	Media
[1700 – ∞]	Alta

Table 3

Sistema referencial para determinar el nivel de influencia que tiene una variable experimental sobre la dilución.

En el presente trabajo se asume el mineral fino (M_F) como estéril y el mineral grueso (M_G) como mineral valioso. Se presentan los resultados mediante gráficos, los cuales se elaboran a partir de la dilución acumulada (D) y la masa total acumulada (M_T) hasta la n -ésima extracción. Esta relación se expresa matemáticamente como:

$$D_i = \frac{\sum_{i=1}^n M_{Fi}}{\sum_{i=1}^n (M_{Gi} + M_{Fi})} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{Fi}}{\sum_{i=1}^n M_{Ti}} \quad (4)$$

Para establecer el nivel de influencia que tiene una variable experimental en la dilución, se compara la masa necesaria (entre dos experimentos) para alcanzar una dilución predefinida. En otras palabras, se tiene como criterio el desfase másico entre experimentos al modificar una variable.

La influencia se definen como: nula, si el desfase másico se encuentra en el intervalo [0, 250] g; baja, si el desfase másico se encuentra en el intervalo [500, 1000] g; media, si el desfase másico se encuentra en el intervalo (1000, 1500] g; y alta, si el desfase másico es mayor que 1700 g. Esto se expresa en la Table 3. Es importante destacar que los intervalos se definen en función de los resultados obtenidos. Por lo tanto, este proceso se caracteriza por ser subjetivo y propenso a variaciones, dependiendo de la interpretación individual de cada lector. De este modo, la modificación de los intervalos resulta en una alteración de la influencia (ya sea de nula a baja, de baja a media, de media a alta, o viceversa).

3. Resultados y discusión

La Figure 4 ilustra el movimiento del material granular luego de efectuar extracciones aisladas. Cada secuencia tiene un diámetro medio de mineral fino específico y distintivo por su color. A su vez, cada secuencia tiene un disposición espacial del mineral determinada.

Se puede observar que el mineral fino de diámetro medio $186 \mu\text{m}$ tiende a generar una huella de forma elipsoidal prácticamente perfecta tras realizar extracciones, como lo postuló Kvapil en estudios previos [5]. Parece ser que la formación de estas elipsoides no se ve influenciada por la inclinación del mineral. No obstante, para validar de manera concluyente esta afirmación, se hace necesario emplear técnicas computacionales que sean capaces de determinar movimientos infinitesimales tras realizar las extracciones.

Por otro lado, se observa que en las orientaciones, ya sea horizontal o inclinada a 45° , el fino de diámetro medio $186 \mu\text{m}$ presenta una mayor velocidad de migración en

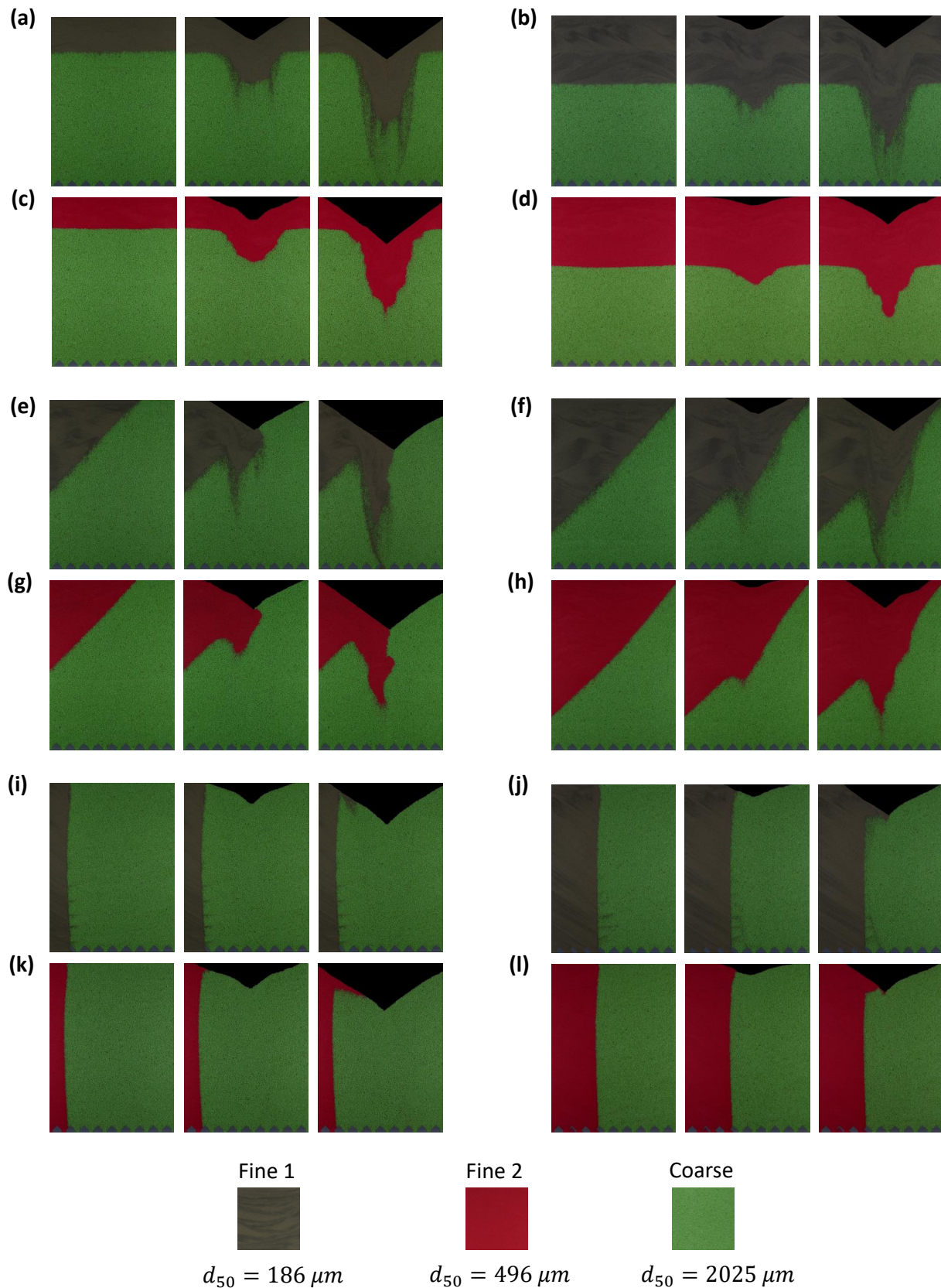


Figure 4: Migración de finos tras realizar extracciones aisladas. (a), (b), (c) y (d) experimentos con mineral horizontal, en los que se modificó el contenido y diámetro medio del mineral fino. (e), (f), (g) y (h) experimentos con mineral inclinado en 45° en los que se modificó el contenido y diámetro medio del mineral fino. (i), (j), (k) y (l) experimentos con mineral vertical en los que se modificó el contenido y diámetro medio del mineral fino.

comparación con el fino de diámetro medio $496 \mu\text{m}$. Esto se atribuye al hecho de que se requirieron menos extracciones para que el fino de diámetro medio $186 \mu\text{m}$ alcance el punto de extracción. Este fenómeno se constata para un contenido de mineral fino del 20 y 40%. Estos hallazgos coinciden con las observaciones de Laubscher [7], quien notó que a medida que disminuye el tamaño de las partículas minerales, la dilución en los puntos de extracción se manifiesta de manera más temprana.

En la [Figure 5](#) y [Figure 6](#) se presenta la dilución acumulada de los distintos experimentos, tras emplear la [Equation 4](#).

3.1. Influencia del diámetro medio del mineral fino

En la orientación horizontal del mineral se observa que, al aumentar el diámetro medio del mineral fino, la dilución presenta un incremento marginal y nulo (influencia baja y nula), a excepción del caso particular donde se tiene una extracción interactiva con un contenido de mineral fino del 20%. En este caso, el aumento del diámetro medio conlleva a un aumento significativo de la dilución (influencia media).

En la orientación inclinada a 45° del mineral, se constata nuevamente que el aumento del tamaño del mineral fino, conlleva a un aumento de la dilución, sin embargo, el aumento no es notable (influencia baja). Se tiene un caso particular en el que el aumento del tamaño del mineral fino conduce a un aumento sustancial de la dilución (influencia media), y este ocurre cuando se tiene una extracción aislada con un contenido de mineral fino del 40%. Cabe destacar que este aumento de la dilución se manifiesta cuando se ha extraído una gran cantidad de mineral.

En la orientación vertical del mineral, se evidencia que el diámetro del mineral fino tiene escasa o nula incidencia en la dilución (influencia nula), independientemente del contenido de mineral fino y del tipo de extracción. Es decir, la dilución es prácticamente idéntica. Por otra parte, generalmente se aprecia que aumentar el diámetro medio del mineral fino retrasa su entrada en los puntos de extracción. Sin embargo, este retraso no es relevante (influencia nula o baja).

De acuerdo con los resultados obtenidos, la dilución depende del diámetro medio del mineral fino bajo ciertas condiciones. Esto denota que, el diámetro medio no tiene una influencia clara en todos los casos estudiados.

En el año 2022, Castro llevó a cabo experimentos con mineral dispuesto horizontalmente, en la cual 35% del contenido era mineral fino. Las extracciones fueron del tipo aislada. Bajo estas condiciones, el autor halló una correlación directa entre la migración de finos y el cociente entre el diámetro medio del mineral grueso y el mineral fino [1]. De ello se infiere que la migración de finos se reduce al incrementarse el diámetro medio del mineral fino. En el presente estudio, bajo condiciones semejantes, no se observa una alteración significativa de la dilución al modificar el diámetro medio del mineral fino. En consecuencia, se plantea la posibilidad de que intervengan otros factores además del diámetro promedio del mineral. Estos factores

podrían incluir el coeficiente de uniformidad, la proporción entre el tamaño del mineral grueso y el mineral fino, así como el ángulo de reposo de los minerales, entre otros.

Por otra parte, se ratifica que la migración de finos tiende a ocurrir más tempranamente cuando el diámetro medio del mineral fino se reduce, tal como lo plantean Castro, Laubscher y Pierce [1, 7, 10].

3.2. Influencia del contenido de mineral fino

Se observa que, al incrementar el contenido de mineral fino, se produce un aumento de la dilución (influencia alta). Esto se aplica en las tres orientaciones del mineral: horizontal, inclinada a 45° y vertical. A su vez, este incremento de la dilución aplica para todo diámetro medio del mineral fino y todo tipo de extracción. Este fenómeno se explica principalmente por la proximidad que existe entre el mineral grueso y los puntos de extracción, lo cual implica una mayor probabilidad de arrastre de partículas finas hacia el punto de extracción. Los resultados de este estudio coinciden con los de Castro [1] sobre la influencia del contenido de mineral fino en la dilución.

3.3. Influencia del tipo de extracción

En la orientación horizontal del mineral, se aprecia una disminución significativa de la dilución al pasar de una extracción aislada a una interactiva (influencia media). No obstante, particularmente para un contenido de mineral fino del 20% y diámetro medio $496 \mu\text{m}$, tener una extracción interactiva no conducen una reducción considerable de la dilución (influencia baja).

En la orientación inclinada a 45° del mineral, se verifica que, en general, tener una extracción interactiva reduce la dilución, pero dicha reducción no es notable (influencia baja). Sin embargo, se destaca que, para un contenido de mineral fino del 40% y diámetro medio $496 \mu\text{m}$, la extracción interactiva conduce a una disminución sustancial de la dilución (influencia media).

En la orientación vertical del mineral, se constata que, en general, el tipo de extracción no afecta a la dilución. Es decir, se presenta una dilución prácticamente idéntica (influencia nula).

Los resultados obtenidos coinciden con lo observado por Castro [1] y con lo planteado por Laubscher y Susaeta [7, 16]. Es decir, a mayor interacción entre puntos de extracción (dos puntos en simultaneo), menor migración de finos. Por otra parte, se constata que pasar de una extracción aislada a una extracción interactiva conlleva a un retraso de la entrada de mineral fino, siendo consistente con lo obtenido por Castro [1] y lo planteado por Laubscher [7].

3.4. Influencia de la inclinación del mineral

Generalmente se observa que para todo experimento base (V , d_f y P fijos, con $\theta = 0^\circ$), el incremento de la inclinación implica una disminución notoria de la dilución (influencia alta). Esto se infiere del comportamiento del conjunto de datos de cada experimento. Ejemplo de esto, es la condición en que se tiene un contenido de mineral fino del 20%, diámetro medio $186 \mu\text{m}$ y un punto de extracción

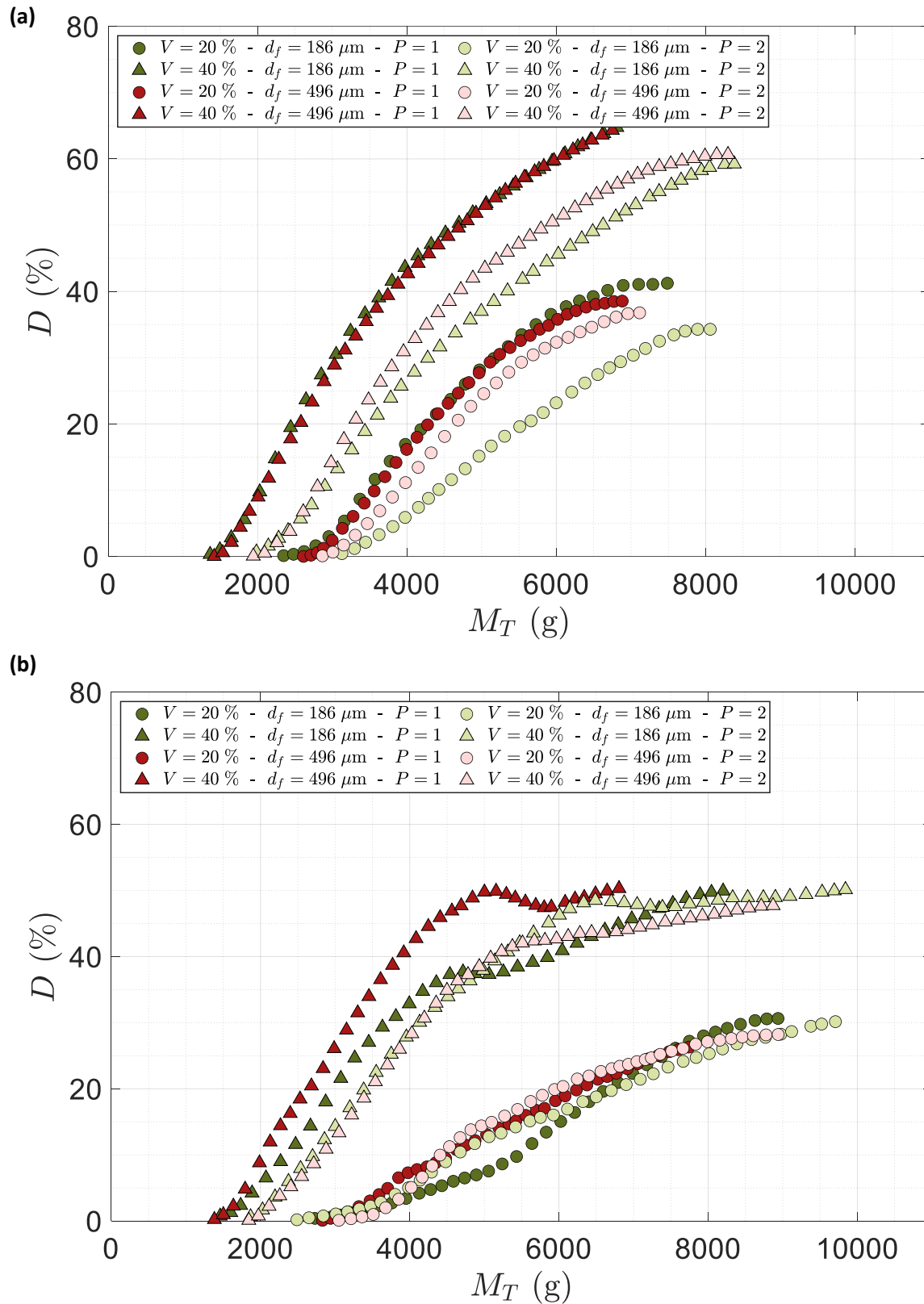


Figure 5: Dilución acumulada (D) en función de la masa total acumulada (M_T), para distinto contenido de mineral fino (V), diámetro medio del mineral fino (d_f) y tipo de extracción (P). (a) Experimentos con mineral orientado horizontalmente. (b) Experimentos con mineral orientado en 45° .

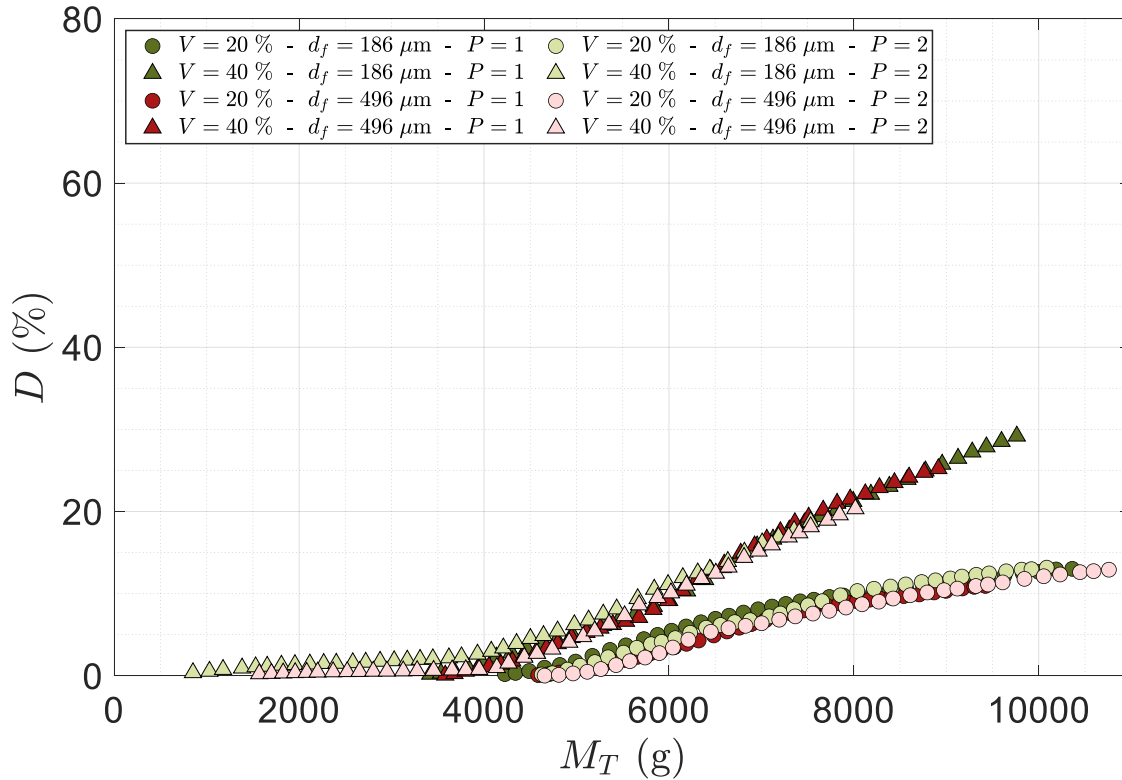


Figure 6: Dilución acumulada (D) en función de la masa total acumulada (M_T), para distinto contenido de mineral fino (V), diámetro medio del mineral fino (d_f) y tipo de extracción (P). Todos los datos provienen de los experimentos con mineral orientado verticalmente.

activo. Al tener una orientación de 0, 45 y 90°, la dilución máxima toma valores de 41, 30 y 13%. Esto supone una situación más favorable en términos económicos, puesto que, se extrae principalmente mineral grueso (mineral de valor) y no mineral fino (material estéril). Asimismo, se observa que el aumento de la inclinación del mineral produce una homogeneización de la dilución (para un mismo valor de V). Es decir, a medida que se aumenta la inclinación, la dilución tiende a tomar valores similares para todo diámetro de mineral fino y todo tipo de extracción.

4. Conclusiones

El análisis de la dilución permitió cuantificar la migración de finos, que es un fenómeno influenciado por varias variables. La influencia de cada variable se determinó de manera subjetiva, basándose en la diferencia de masa necesaria entre experimentos, para alcanzar una dilución previamente establecida. Por lo tanto, la influencia puede cambiar según el juicio de cada lector y la dilución que se escoja de manera arbitraria. De este modo, cada variable estudiada puede pasar de una influencia nula a baja, de baja a media, de media a alta, y viceversa.

Las variables más relevantes son el contenido de mineral fino (V) y el ángulo de inclinación del mineral (θ). Según los resultados experimentales, se observa que la migración

de finos se incrementa con valores altos de V y bajos de θ . Esto se debe principalmente a que el mineral fino cercano al punto de extracción tiene una mayor probabilidad de ser arrastrado.

El cambio del diámetro medio del mineral fino (d_f) presenta una influencia menor, a diferencia de las otras dos variables. En algunos experimentos, el efecto es reducido y en otros, inexistente. No obstante, se evidencia una tendencia creciente de la dilución al incrementar el diámetro medio del mineral fino. Esto implica una relación directa, lo que contrasta ligeramente con los resultados del estudio de Castro en 2022. Por lo tanto, se plantea la posibilidad de que existan otros factores que puedan afectar la migración de finos.

La extracción interactiva con dos puntos simultáneos, reduce la migración de finos en comparación con la extracción aislada. Sin embargo, esta reducción no es significativa en todos los experimentos realizados.

Destacar que, el contenido de mineral fino y la orientación corresponden a variables que se controlaron minuciosamente en cada experimento con la finalidad de entender la influencia que estas tienen en la migración de finos. Sin embargo, estas son propiedades geológicas del yacimiento que no se pueden modificar.

Las gráficas obtenidas pueden representar un sistema referencial para predecir la fluctuación de la migración de finos entre distintos yacimientos que compartan una o más

semejanzas (semejanza en variables estudiadas). Esto implica que, a partir de las propiedades de un yacimiento, se puede proyectar la migración en otro yacimiento con condiciones equivalentes. A su vez, de estas gráficas se puede analizar la influencia que tienen distintas variables en simultáneo. No obstante, cada caso particular que se presente en la industria minera debe ser evaluado mediante las gráficas proporcionadas en este estudio, en conjunto de los distintos modelos que se utilizan en la actualidad. De esta forma, se podrá determinar si la migración de finos será temprana, tardía, de bajo o alto contenido másico.

Se recomienda analizar el impacto de las variables estudiadas en la migración de finos a nivel industrial. Asimismo, se sugiere considerar la utilización de simulaciones tridimensionales (3D) para comparar y validar los resultados obtenidos en este estudio.

Declaration of competing interest

There is no Conflict of Interest.

Acknowledgments

The authors thank the support of the National Scientific Research Agency of Chile (ANID) and Fondecyt Regular Grant No 1211469.

References

- [1] Castro, R., Arancibia, L., Gómez, R., 2022. Quantifying fines migration in block caving through 3d experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 151, 105033.
- [2] Craig, R.F., 2004. *Craig's soil mechanics*. CRC press.
- [3] Gertsch, R.E., Bullock, R.L., 1998. *Techniques in underground mining: Selections from Underground mining methods handbook*. SME.
- [4] Khilar, K.C., Fogler, H.S., 1998. *Migrations of fines in porous media*. volume 12. Springer Science & Business Media.
- [5] Kvapil, R., 2008. *Gravity flow in sublevel and panel caving: a common sense approach*. Luleå University of Technology.
- [6] Laubscher, D., 1994. Cave mining-the state of the art. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 94, 279–293.
- [7] Laubscher, D., 2000. *Block caving manual*. prepared for international caving study. Brisbane: JKMRRC and Itasca Consulting Group .
- [8] Laubscher, D.H., 2003. *Cave mining handbook*. De Beers, Johannesburg , 138.
- [9] Nicola Pérez, C.F.d., 2015. *Dilución operacional en mina El Soldado*. Universidad de Chile.
- [10] Pierce, M.E., 2010. *A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines*. University of Queensland Brisbane, Australia.
- [11] Rivas Oviedo, J.M., et al., 2018. *Control Geológico en la Dilución Mineral*. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas.
- [12] Rosin, P., 1933. The laws governing the fineness of powdered coal. *J. Inst. Fuel* 7, 29–36.
- [13] Salager, J.L., 2007. *Granulometría teoría*. Universidad de los Andes. Merida Venezuela .
- [14] Sánchez, V., Castro, R.L., Palma, S., 2019. Gravity flow characterization of fine granular material for block caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 114, 24–32.
- [15] Sironvalle, M.A.A., 2002. *Introducción al muestreo minero*. Santiago de Chile .
- [16] Susaeta, A., 2004. Theory of gravity flow (part 1). *Proceedings of MassMin* , 167–72.
- [17] Yi, C., Johansson, D., Wimmer, M., Nordqvist, A., San Miguel, C., 2022. Numerical modelling of fragmentation by blasting and gravity flow in sublevel caving mines.