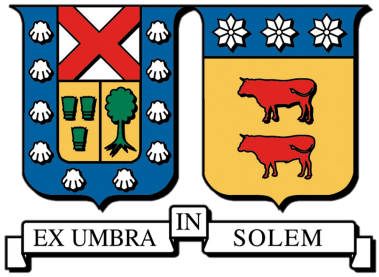
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS, METALURGIA Y MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



EVALUACIÓN DEL FENÓMENO DE BOMBEO DE AGUA-BARRO EN MINERÍA DE CAVING: UN ENFOQUE EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO

Autora: Antonia Segovia Alba

Trabajo de titulación presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniera Civil de Minas

Profesor Guía:	Dr.	Sergio Palma Moya
Profesor Co-Guía:	Dr.(c)	Álvaro Vergara Barría
Profesor Comisión	Dra.	Gisella Palma Lira

2025

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación del fenómeno de bombeo de agua-barro en minería de caving: un enfoque experimental y numérico.

Nombre del candidato(a): Antonia Paz Segovia Alba

Carrera / Grado: Ingeniería civil de minas

Campus: San Joaquín **Departamento:** Ingeniería de minas, metalurgia y materiales

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Sergio Andres Palma Moya, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

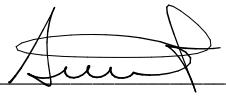
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 03/11/2025 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29/10/2025 **Firma:** 

Agradecimientos

Hubo un momento en mi vida en que pensé que nunca llegaría a escribir esta página. Creí que no lograría terminar la carrera, y que la oscuridad que sentía entonces no tendría fin. Sin embargo, hoy estoy aquí, más fuerte y agradecida que nunca, cerrando un ciclo que alguna vez imaginé imposible.

Mis primeras palabras de agradecimiento son, sin duda, para mis padres, **Solange y Gabriel**. Ambos han sido mi pilar fundamental, la base sobre la cual he construido cada paso de mi vida. Gracias por su amor incondicional, por su paciencia infinita y por enseñarme, con su ejemplo, el valor del esfuerzo y la perseverancia. Todo lo que soy y todo lo que he logrado se los debo a ustedes.

También quiero recordar con mucho cariño a **Amanda**, mi compañera fiel, mi perrita y hermana que ya no está conmigo, pero que me acompañó en cada noche difícil. Fue quien lamió mis lágrimas cuando me frustraba con la universidad, quien me recibió cuando llegaba llorando por haber reprobado un ramo, y quien me dio consuelo sin decir una palabra. La extraño profundamente, pero su amor y compañía siguen conmigo.

A mis compañeros de universidad, **Kote, Romi, Seba, Negro, Carlos y Mito**, gracias por compartir este largo camino. Por cada trabajo que parecía imposible, por cada risa en los almuerzos, por aguantar mis nervios y hacerme reír cuando más lo necesitaba. A veces me sacaron canas verdes, pero también fueron parte esencial de los momentos más felices de esta etapa. Gracias por hacer que el recorrido fuera más liviano y lleno de amistad.

A mis mejores amigos, **Amara y Sebastián**, gracias por estar siempre. Por escuchar mis quejas, por aconsejarme, por nunca juzgarme, por acompañarme incluso en los detalles más pequeños. No hay palabras suficientes para expresar cuánto valoro su presencia en mi vida. Gracias por quedarse, por crecer conmigo y por recordarme siempre que no estoy sola. Espero seguir viendo cómo avanzamos juntos en cada etapa que venga.

A mis profesores **Sergio y Álvaro**, les agradezco profundamente por su apoyo constante y por haberme brindado oportunidades que nunca imaginé, como el poder viajar a Europa y aprender en un entorno completamente nuevo. Gracias por su comprensión en los momentos difíciles, por motivarme cuando quise rendirme, y por enseñarme no solo sobre cosas técnicas, sino también sobre resiliencia y compromiso. Agradezco tambien a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) y del proyecto FONDECYT Regular N° 1211469.

Finalmente, quiero agradecer a **Felipe**. Aunque hoy nuestros caminos sigan direcciones distintas, fuiste una parte muy importante de este proceso. Gracias por tu compañía, por ayudarme a entender cuando me costaba, por revisar mis trabajos, por tu apoyo constante, y por las noches eternas de estudio que terminaban entre risas y cansancio. Tu apoyo fue esencial para llegar hasta aquí, y siempre te recordaré con cariño y gratitud.

A todos ustedes, gracias por ser parte de mi historia. Este logro no es solo mío; es de cada persona que me acompañó, me sostuvo y me impulsó a seguir cuando creía que no podía más.

"You know you're good when you can even do it with a broken heart"

- Taylor Swift

Resumen

Cuantificar los mud rushes es clave para proteger a las personas, sostener la continuidad operacional y contener los costos en minería por hundimiento. Su activación depende de interacciones no lineales entre flujo granular y agua que, en condiciones geomecánicas reales, siguen siendo difíciles de anticipar. La mayor profundidad de explotación, la variabilidad climática y la heterogeneidad hidrogeológica intensifican estos riesgos, por lo que se requiere un marco que permita medir, comparar y predecir el fenómeno con criterios operacionales verificables.

Con ese propósito se integra experimentación física a escala con modelación acoplada DEM–CFD para evaluar cómo la secuencia de apertura, la granulometría, la fracción de finos, la saturación y la localización del ingreso de agua condicionan la movilización de partículas y la dilución. Se emplea un protocolo de ensayos repetibles con medición de masa y curvas de dilución, más un procesamiento de imágenes que cuantifica la evolución de áreas de finos y frentes de movilización. El modelo numérico reproduce la interacción fluido–partícula y se calibra con datos de laboratorio para explorar escenarios que exceden la escala experimental manteniendo la física dominante. En el análisis estadístico de repetición (condición seca, n=30), los errores relativos promedio fueron de $\pm 4\,\%$ a 5 s, $\pm 3\,\%$ a 15 s y $\pm 3\,\%$ a 30 s, con todas las marcas $< 5\,\%$.

Los resultados muestran tendencias operativamente relevantes: la humedad/saturación actúa como detonante del bombeo de agua–barro; la extracción simultánea, respecto de la aislada, acelera la movilización inicial y aumenta la dilución final; mayores proporciones de finos y la presencia de arcillas elevan la susceptibilidad por su efecto en la estructura de poros y la reología; y la conectividad hidráulica del macizo explica respuestas asimétricas ante ingresos localizados de agua. En conjunto, el marco propuesto ofrece criterios para definir tasas y secuencias de extracción compatibles con niveles de saturación, priorizar el control hídrico (monitoreo piezométrico e infiltraciones) y apoyar el diseño de mallas, contribuyendo a reducir el riesgo de mud rush, mejorar la recuperación y disminuir la dilución en operaciones de caving.

Abstract

Quantifying mud rushes is key to protecting people, sustaining operational continuity, and containing costs in cave mining. Their activation depends on nonlinear interactions between granular flow and water that, under real geomechanical conditions, remain difficult to anticipate. Greater mining depths, climatic variability, and hydrogeological heterogeneity intensify these risks, so a framework is needed to measure, compare, and predict the phenomenon with verifiable operational criteria.

To this end, physical bench-scale experimentation is integrated with coupled DEM–CFD modeling to evaluate how drawpoint sequencing, particle size distribution, fines fraction, saturation, and the location of water ingress condition particle mobilization and dilution. A repeatable testing protocol is used with mass measurements and dilution curves, plus image processing that quantifies the evolution of fines areas and mobilization fronts. The numerical model reproduces fluid–particle interaction and is calibrated with laboratory data to explore scenarios beyond the experimental scale while preserving the dominant physics. In the statistical repeatability analysis (dry condition, n=30), average relative errors were $\pm 4\,\%$ at 5 s, $\pm 3\,\%$ at 15 s, and $\pm 3\,\%$ at 30 s, with all marks $< 5\,\%$.

The results show operationally relevant trends: moisture/saturation acts as a trigger for water–mud pumping; simultaneous extraction, relative to isolated extraction, accelerates initial mobilization and increases final dilution; higher fines proportions and the presence of clays raise susceptibility through their effects on pore structure and mixture rheology; and the rock mass's hydraulic connectivity explains asymmetric responses to localized water ingress. Taken together, the proposed framework offers criteria to set draw rates and sequences compatible with saturation levels, prioritize water control (piezometric monitoring and infiltration management), and support layout design, helping reduce mud-rush risk, improve recovery, and decrease dilution in caving operations.

Índice general

1. Introducción **11**
- 1.1. Motivación . . . 11
- 1.2. Objetivos . . . 12
  - 1.2.1. Objetivo general . . . 12
  - 1.2.2. Objetivos específicos . . . 12
- 1.3. Alcances y Limitaciones . . . 13

2. Marco Teórico **14**
- 2.1. Introducción a la minería de Hundimiento . . . 14
  - 2.1.1. Block/Panel Caving . . . 14
  - 2.1.2. Riesgos Geomecánicos Principales . . . 15
- 2.2. Fundamentos del Fenómeno Bombeo de Agua-Barro . . . 17
  - 2.2.1. Definición . . . 17
  - 2.2.2. Reología del Barro . . . 18
  - 2.2.3. Mecanismos de Falla . . . 19
  - 2.2.4. Riesgo de Entrada de Agua-Barro . . . 19
- 2.3. Registro de Agua-Barro en Operación . . . 21
  - 2.3.1. Situación en Chile: El Teniente y otras divisiones de CODELCO . . . 21
- 2.4. Control y Manejo en Operación . . . 22
  - 2.4.1. Drenaje de Agua . . . 22
  - 2.4.2. Extracción por LHD Telecomandados . . . 23
  - 2.4.3. Sistemas de Monitoreo . . . 23
  - 2.4.4. Clasificación de Puntos de Extracción . . . 24
- 2.5. Modelamiento Numérico . . . 25
  - 2.5.1. Método de Elementos Discretos (DEM) . . . 25
  - 2.5.2. Dinámica de Fluidos Computacional . . . 26
  - 2.5.3. Acople DEM-CFD . . . 27

3. Metodología **29**
- 3.1. Metodología Experimental . . . 29
  - 3.1.1. Diseño Experimental . . . 29
  - 3.1.2. Sistema de Extracción Automatizado . . . 30
  - 3.1.3. Caracterización del Material . . . 31
  - 3.1.4. Variables . . . 33
  - 3.1.5. Procedimiento Experimental . . . 34

3.1.6. Post-procesamiento experimental 35
3.2. Metodología Computacional 37
3.2.1. Calibración de parámetros del modelo computacional 37
3.2.2. Geometría 38
3.2.3. Generación de malla y análisis de convergencia 39
3.2.4. Variables de estudio 40
3.2.5. Configuración y ejecución de simulaciones 40

4. Resultados y Análisis **42**
4.1. Experimentos 42
4.2. Simulaciones computacionales 58

5. Conclusiones **70**
5.1. Conclusiones 70
5.2. Recomendaciones 71

Índice de figuras

2.1. Esquema de Block Caving con socavación, bateas y flujo gravitacional. . . . 14
2.2. Representación esquemática de los principales riesgos geomecánicos asociados a la minería por hundimiento: (a) estallido de roca, subsidencia y estallido de polvo; (b) ráfagas de aire (airblasts); y (c) ingreso repentino de lodo (mud rush). Fuente: Flores (2019). 16
2.3. (a)Mud rush Revuelta et al. (2008) (b)Mud rush Widijanto (2012) (c)Esquema representativo de los factores necesarios para que se forme un fenómeno de agua-barro. Fuente: Flores (2019). 18

3.1. Esquema del montaje experimental. (a) Vista isométrica del modelo. (b) Vista frontal desde la posición de la cámara. Vista lateral del modelo, casi bidimensional junto con las dimensiones de la maqueta. González (2025) 29
3.2. Sistema de extracción automatizado. (a)Vista frontal del montaje experimental haciendo énfasis en el sistema de extracción. (b)Vista lateral del sistema de extraccion automatizado con tapas móviles. 30
3.3. (a) Curva de distribución granulométrica del material utilizado. Se caracterizan los diámetros de ambos materiales, obtenidos mediante la distribución de Rosin-Rammler.(b) Muestra del material grueso-cuarzo. (c) Muestra del material fino-arena. 31
3.4. Esquema de las diferentes variables (a)Ubicaciones Espaciales de Fino y Agua. Fino: Zona 1 y Zona 2. Agua: Ubicación 1, 2 y 3. (b) Cantidades de Fino (c) Secuencias de Extracción: Aislada y Simultánea. Dependiendo de la Ubicación del Fino se considera que extracción aislada es utilizada. 33
3.5. (a) Imagen experimental original en escala de grises correspondiente a uno de los cuadros (frames) del video; (b) Imagen binarizada mediante umbralización, donde el área blanca representa el material fino cuya evolución superficial será cuantificada. El rectángulo rojo indica la región de interés (ROI) seleccionada para el análisis, lo cual permite excluir el fondo negro y reducir la influencia de puntos blancos asociados a imperfecciones de iluminación;(c) Secuencia temporal de la evolución del área segmentada y contorneada en rojo, en diferentes instantes ($t_0 = 0$ s, $t_1 = 7{,}5$ s, $t_2 = 15$ s), mostrando el avance y seguimiento automático del contorno del material fino durante el experimento. 35

3.6. (a) Dimensiones de la geometría utilizada en las simulaciones realizadas con Ansys Rocky. (b) Esquema de las partículas empleadas en el proyecto, con radios $r = 0{,}7\,\text{mm}$ y $R = 2{,}8\,\text{mm}$. (c) Representación del movimiento del fluido dentro de la maqueta, basado en la velocidad calculada en Ansys Fluent: a la derecha, el caso simultáneo; a la izquierda, el caso aislado. 38
3.7. (a) Mallas de tipo hexagonal utilizadas en ambos casos, donde las flechas de color azul indican el *inlet* y las de color rojo el *outlet*. (b) Gráfico de convergencia de la malla utilizado para determinar el tamaño óptimo. 39

4.1. Secuencia de imágenes del flujo de material en tres tiempos distintos $t_0 = 0$ s, $t_1 = 15$ s y $t_2 = 30$ s para las diferentes ubicaciones de material fino: (a) Zona 1 y (b) Zona 2. La cantidad de material fino es de 500 g en la primera columna, 750 g en la segunda y 1000 g en la tercera. 42
4.2. Secuencia de imágenes que ilustra el avance del material en tres momentos: inicio, intermedio y final, para dos tipos de extracción: (a) aislada y (b) simultánea. En ambas secuencias, la cantidad de material fino se presenta en orden descendente: 500 g, 750 g y 1000 g. 43
4.3. (a) Esquema simplificado del montaje experimental y las condiciones evaluadas: material fino (gris), material grueso (amarillo) y condiciones de extracción aislada (celeste) y simultánea (rojo). (b) Dilución final porcentual en función de la masa fina para ambas condiciones de extracción (aislada y simultánea) en las zonas 1 y 2. 44
4.4. Secuencia de imágenes que muestra el flujo de material en tres tiempos $t_0 = 0$ s, $t_1 = 15$ s y $t_2 = 30$ s, correspondientes a dos ubicaciones del material fino. La ubicación del agua se mantuvo fija en la Ubicación 1 (central). La secuencia presenta una extracción aislada: (a) Zona 1 y (b) Zona 2. La cantidad de material fino es de 500 g en la primera columna, 750 g en la segunda y 1000 g en la tercera. 45
4.5. Secuencia de imágenes en tres tiempos (inicio, intermedio y final), comparando (a) extracción simultánea y (b) aislada, con agua proveniente de la Ubicación 2 (derecha). La masa de finos se presenta en orden descendente: 500, 750 y 1000 g. 46
4.6. Secuencias en tres tiempos (inicio, intermedio y final) con agua en: (a) Ubicación 3 (izquierda), (b) Ubicación 1 (central) y (c) Ubicación 2 (derecha). En todos los casos la extracción es aislada. Las masas de finos son 500, 750 y 1000 g (de izquierda a derecha). 47
4.7. (a) Esquema del montaje y condiciones de extracción: finos (gris), gruesos (amarillo), extracción aislada (celeste) y simultánea (rojo), con entrada de agua desde la ubicación central (azul). (b) Dilución final (%) en función de la masa de finos para ambos regímenes (aislada/simultánea) en Zonas 1 y 2, con agua central. 48
4.8. (a) Esquema del montaje con agua en lateral derecho. (b) Dilución final (%) en función de la masa de finos para aislada y simultánea en Zonas 1 y 2, con agua introducida desde la derecha. 49

4.9. (a) Esquema del montaje con agua en lateral izquierdo. (b) Dilución final (%) en función de la masa de finos para aislada y simultánea en Zonas 1 y 2, con agua introducida desde la izquierda. 50
4.10. Secuencia de imágenes que muestra el avance del material en tres momentos distintos: al inicio, en el intermedio y al final, comparando el caso seco con el caso húmedo. (a) Caso Seco, con extracción aislada. (b) Caso Húmedo, con extracción aislada y agua proveniente de la Ubicación 1 (central). La cantidad de material fino se presenta en orden descendente: 500 g, 750 g y 1000 g . . . 52
4.11. Secuencia de imágenes que muestra el avance del material en tres momentos distintos: al inicio, en el intermedio y al final, comparando el caso seco con el caso húmedo. (a) Caso Seco, con extracción simultánea. (b) Caso Húmedo, con extracción simultánea y agua proveniente de la Ubicación 1 (central). La cantidad de material fino se presenta en orden descendente: 500 g, 750 g y 1000 g 53
4.12. Condición seca ($n = 30$), con repetición de una misma configuración experimental: Zona 2, 500 g de finos y extracción aislada. Evolución temporal de la dilución adimensional A/A_0 en función del tiempo t_s (s). Cada color corresponde a un experimento individual; la línea negra muestra el promedio suavizado del conjunto. Se incluyen tres barras de error (± error relativo promedio sobre los 30 ensayos): en $t_s = 5$ s, 4 %; en $t_s = 15$ s, 3 %; y en $t_s = 30$ s, 3 %. El conjunto exhibe un pico temprano seguido de un decaimiento posterior. . . . 55
4.13. Condición húmeda ($n = 9$) para la configuración: Zona 1, 500 g de finos, ingreso de agua por la Ubicación 3 (lateral izquierdo) y extracción simultánea. Dilución adimensional A/A_0 en función del tiempo t_s (s). La curva negra corresponde al promedio suavizado global. Se incluye una única barra de error (± error relativo promedio) en $t_s = 5$ s, de 8 %. Las trayectorias presentan reflejan un carácter anisotrópico observado en esta condición. 56
4.14. Evolución temporal de las simulaciones en caso seco para los tiempos $t_0 = 0s$, $t_1 = 15s$ y $t_2 = 30s$. Se ilustran las distribuciones de finos en dos ubicaciones: (a) Zona 1 y (b) Zona 2. En orden descendente, se muestran resultados para tres masas iniciales de finos: 500 g, 750 g y 1000 g. 58
4.15. Comparación de la velocidad transicional del sistema de partículas durante la extracción en condiciones secas, evaluada en tres momentos representativos del proceso: t_0 (inicial), t_1 (intermedio) y t_2 (final). Se consideran tres masas iniciales descendentes de finos (500 g, 750 g y 1000 g), todas localizadas en la Zona 1. Se presentan dos configuraciones de secuencia de extracción: (a) extracción aislada y (b) extracción simultánea. 59
4.16. Visualización del avance del fluido en el medio granular a través de la fracción de volumen sólido en tres etapas del proceso: t_0 (inicial), t_1 (intermedio) y t_2 (final). El agua ingresa de forma homogénea desde todo el *inlet* del sistema. Se comparan tres escenarios experimentales con diferentes masas iniciales de finos: 500 g, 750 g y 1000 g (de arriba hacia abajo). (a) Zona 2 (b) Zona 1 . . 61

4.17. Representación conjunta de la velocidad del fluido en el eje y y del movimiento de partículas durante el proceso de extracción, evaluado en tres etapas del tiempo: t_0 (inicial), t_1 (intermedio) y t_2 (final). El análisis se realiza para tres masas iniciales de finos (500 g, 750 g y 1000 g), mientras se mantiene constante la ubicación de observación en la Zona 2. Se comparan dos configuraciones de secuencia de extracción: (a) Extracción Aislada y (b) Extracción Simultánea. 62
4.18. Representación conjunta de la velocidad transicional de las partículas y la velocidad del fluido en el eje y durante el proceso de extracción, evaluado en tres etapas del tiempo: t_0 (inicial), t_1 (intermedio) y t_2 (final). El análisis se realiza para tres masas iniciales de finos (500 g, 750 g y 1000 g), mientras se mantiene constante la ubicación de observación en la Zona 2. Se comparan dos configuraciones de secuencia de extracción: (a) Extracción Aislada y (b) Extracción Simultánea. 63
4.19. Curvas evolución de la masa en función del tiempo para partículas finas y gruesas. Los subgráficos (a) y (b) representan los casos sin presencia de agua, mientras que (c) y (d) muestran los resultados con agua. En los subgráficos (a) y (c), se utilizó una cantidad de 500 g de partículas finas, mientras que en (b) y (d) la cantidad de partículas finas fue de 1000 g, la cantidad máxima utilizada en las simulaciones y experimentos. Las partículas finas se indican en verde y las gruesas en morado. 65
4.20. (a) Curvas de masa de partículas finas vs. tiempo bajo condiciones secas, mostrando las distintas cantidades de fino (500 g, 750 g y 1000 g). (b) Curvas correspondientes a las mismas cantidades de fino pero con la presencia de agua, observando su comportamiento bajo condiciones de saturación. 67
4.21. (a) Curvas de masa de partículas finas vs. tiempo bajo condiciones secas, mostrando las variaciones para las secuencias aislada y simultánea, con 500 g de partículas finas. (b) Curvas correspondientes a las secuencias aislada y simultánea bajo condiciones con presencia de agua, manteniendo una cantidad de 750 g de partículas finas. 68
4.22. (a) Relación entre la dilución final y la masa de partículas finas en condiciones secas, mostrando los resultados para las distintas ubicaciones (Derecha e Izquierda) y secuencias (Aislado y Simultáneo). (b) Relación entre la dilución final y la masa de partículas finas bajo condiciones húmedas, manteniendo las mismas ubicaciones y secuencias que en el gráfico (a) 69

Índice de tablas

2.1. Registro de eventos de bombeo de agua-barro en operaciones de hundimiento (2011–2025) 22

3.1. Parámetros granulométricos obtenidos para los materiales analizados. 32
3.2. Propiedades físicas y mecánicas de las partículas utilizadas en el modelo DEM 37

Introducción

1.1. Motivación

La minería por hundimiento representa una metodología ampliamente consolidada para la explotación de grandes masas de minerales de baja ley debido a sus bajos costos operativos y altas tasas productivas, Gómez y Labbé (2019). No obstante, esta metodología se enfrenta a desafíos operacionales y de seguridad, especialmente asociados al fenómeno de bombeo de agua-barro, que implica la irrupción súbita y violenta de material fino saturado con agua en puntos de extracción y galerías subterráneas.

El fenómeno de bombeo de agua-barro tiene graves consecuencias potenciales, tales como la pérdida de vidas humanas, daños en infraestructura y equipos mineros, retrasos en la producción, dilución del mineral extraído y, en casos extremos, la paralización completa de las operaciones mineras. La ocurrencia de estos eventos se ve favorecida en minas subterráneas que presentan condiciones específicas: material fino susceptible a saturarse, disponibilidad de agua (procedente de fuentes superficiales o subterráneas), puntos de descarga abiertos y perturbaciones dinámicas asociadas a las operaciones mineras.

Numerosos estudios destacan la importancia crucial del fenómeno de bombeo de barro en la seguridad operacional y la viabilidad económica de la minería subterránea. En este sentido, Castro et al. (2017) indican que parámetros geotécnicos como la densidad relativa y el nivel de saturación influyen de manera determinante en la resistencia al flujo del material, condicionando el riesgo de bombeo, en línea con la evidencia aplicada reportada por López (2024). Además, trabajos recientes realizados por Díaz et al. (2024) y R. Castro et al. (2023) resaltan la necesidad de emplear modelos numéricos que incorporen simultáneamente variables geomecánicas e hidrogeológicas para anticipar y reducir la ocurrencia de estos eventos.

La implementación de simulaciones numéricas acopladas a ensayos experimentales, como lo propuesto por Fonte et al. (2015) mediante la integración DEM-CFD, emerge como una vía prometedora para comprender y predecir el comportamiento del agua-barro en condiciones reales. Esto permitirá evaluar escenarios críticos, anticipar zonas de riesgo, optimizar diseños operacionales y establecer protocolos de extracción más seguros y eficientes.

Ante este panorama, la motivación de este estudio surge de la necesidad de desarrollar un enfoque integral que articule métodos experimentales con modelos numéricos, con el fin de profundizar en el análisis del comportamiento del fenómeno de bombeo de agua-barro en minas que operan bajo el método de *caving*. El propósito es generar un conocimiento fundamental y aplicable, que permita a las operaciones mineras anticipar la manifestación de este fenómeno, favoreciendo así la mejora de la seguridad, la continuidad operativa y la sustentabilidad económica en la minería subterránea a gran escala.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Evaluar la influencia de variables espaciales y operacionales en la formación de fenómenos de agua-barro mediante experimentos y simulaciones numéricas con un acople entre CFD-DEM.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar diferentes estrategias de secuencias de extracción en los fenómenos de agua-barro.
- Evaluar el impacto de diferentes ubicaciones de fuentes de agua en el sistema experimental y numérico.
- Cuantificar el efecto de las características granulométricas del material en los fenómenos de bombeo agua-barro.

1.3. Alcances y Limitaciones

El presente estudio se limita a la evaluación del fenómeno de bombeo de agua-barro en minería subterránea por hundimiento a través de un enfoque experimental y numérico basado en modelos a escala y simulaciones computacionales.

A nivel experimental, se empleó una maqueta de acrílico a escala 1:200 con cuatro puntos de extracción, diseñada para observar el comportamiento en dos dimensiones del fenómeno. El material granular utilizado en la maqueta tiene dos tamaños fundamentales uno grueso y otro mas fino con una proporción de 4:1 correspondientemente, que representan características aproximadas a las del material de una mina real, pero sin utilizar muestras directas provenientes de yacimientos minerales. Esta aproximación permite la visualización y análisis cualitativo del fenómeno de bombeo agua-barro, aunque limita la representación exacta de la complejidad tridimensional, heterogeneidad y composición del material real.

En la parte numérica, las simulaciones se realizaron con las mismas dimensiones de la maqueta, ajustando los parámetros mecánicos de las partículas (coeficientes de rodadura, fricción estática y dinámica, coeficiente de restitución) para asemejar el comportamiento del material real de minas subterráneas. Las partículas se modelaron con geometría esférica, decisión basada en evidencias que indican una influencia mínima en el comportamiento general, aunque se reconoce que la inclusión de formas irregulares sería más representativa pero computacionalmente más costosa. Además, el tamaño de las partículas se escaló 1:2 respecto a las partículas reales para reducir tiempos de cálculo. El fluido simulado fue agua infiltrando entre las partículas, sin llegar a representar el barro en su totalidad, aunque el acople entre fases permite medir variables relevantes como velocidades y porosidad, difíciles de obtener experimentalmente.

Se realizaron un total de 48 experimentos y 24 simulaciones computacionales, variando la ubicación y cantidad de partículas finas, así como la cantidad de agua infiltrada, manteniendo fija la cantidad total de fluido, lo cual implica una limitación en la representatividad de escenarios de caudal variable. Asimismo, la ausencia de un sistema para medir el caudal de agua constante entre ensayos introduce un error experimental asociado.

Las variables analizadas fueron seleccionadas con base en la descripción del fenómeno propuesta por Butcher et al., (2005) centrando el estudio en la presencia de agua en diferentes zonas de infiltración, la cantidad y ubicación del material fino susceptible a saturación de agua y dos secuencias de extracción operativas en minería, elegidas por su relevancia práctica para controlar la entrada de agua-barro y minimizar la dilución.

Finalmente, el alcance del estudio se restringe a estos escenarios específicos, sin abordar otras posibles configuraciones de extracción ni variaciones más complejas del fenómeno, dejando abiertas oportunidades para futuros estudios que amplíen estas condiciones.

Marco Teórico

2.1. Introducción a la minería de Hundimiento

En el contexto de la minería subterránea, el hundimiento por bloques o paneles se ha consolidado como una estrategia clave para la explotación masiva de cuerpos minerales profundos, Gómez y Labbé (2019). Este método se distingue por inducir el colapso controlado del macizo rocoso mediante la extracción de material desde niveles inferiores, lo que genera una propagación ascendente del hundimiento facilitada por la gravedad y las discontinuidades preexistentes en la roca, Flores (2019); Chitombo (2000). A diferencia de otros métodos de extracción selectivos, el hundimiento promueve un flujo volumétrico continuo del mineral fracturado hacia puntos de extracción, lo cual lo hace especialmente adecuado para yacimientos de tonelaje con leyes marginales. No obstante, su aplicación exige una comprensión detallada de los mecanismos de fracturamiento, propagación de esfuerzos y evolución del macizo fragmentado, aspectos que definen su viabilidad técnica y condicionan la planificación operativa, J. Jakubec y Laubscher (2001).

2.1.1. Block/Panel Caving

El método de *block caving* es una de las técnicas más utilizadas en minería subterránea masiva para la extracción eficiente de grandes volúmenes de mineral de baja ley localizados a gran profundidad. Este método se basa en la excavación de un nivel de socavación bajo el cuerpo mineralizado, lo que provoca una pérdida de soporte en la base del macizo rocoso, induciendo su colapso progresivo por efecto de la gravedad, (Laubscher (2000); Figura 2.1).

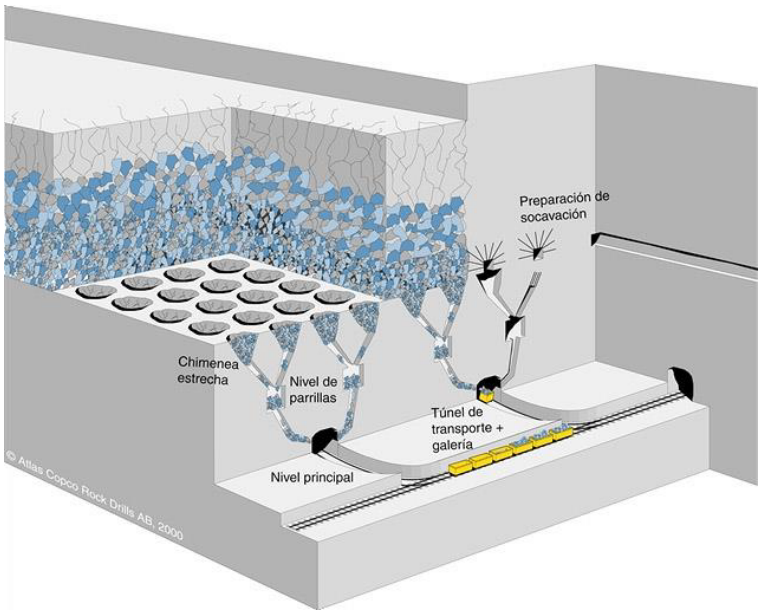


Figura 2.1: Esquema de Block Caving con socavación, bateas y flujo gravitacional.

El mineral fracturado se recolecta mediante puntos de extracción y descarga estratégicamente distribuidos en el nivel de producción, desde donde es transportado a través de equipos mecanizados hacia piques o sistemas de traspaso. La geometría de las aberturas, conocidas como bateas de extracción, y su disposición influyen directamente en la eficiencia de recuperación del mineral, Gómez y Labbé (2019). Comparado con otros métodos subterráneos, el *block caving* requiere menor volumen de perforación y tronadura por tonelada extraída, lo que le confiere una ventaja económica significativa, aunque exige altos niveles de inversión inicial y una planificación geotécnica rigurosa, Heslop (2000); Flores (2019).

Su implementación demanda condiciones geomecánicas favorables, tales como roca encajante con buena fragmentabilidad, continuidad del mineral y suficiente altura para desarrollar una columna de colapso estable. La operación se organiza en niveles funcionales: el nivel de hundimiento, donde se ejecutan las voladuras de socavación y bateas; el nivel de producción, desde el cual se extrae el material; y el sistema de transporte y ventilación. La fragmentación secundaria inducida por el colapso juega un rol clave en mantener la movilidad del mineral hacia los puntos de descarga, Codelco División El Teniente (2018).

En paralelo, el *panel caving* se presenta como una variante de mayor control operacional, en la cual el yacimiento se divide en paneles o unidades más pequeñas, que se hunden de forma progresiva o secuencial. Esta estrategia permite mitigar esfuerzos concentrados en zonas críticas, adaptarse a geometrías complejas del depósito, y mejorar la planificación de extracción, especialmente en minas profundas donde los riesgos geomecánicos son más severos, Chitombo (2000); Flores (2019). No obstante, su aplicación implica una mayor complejidad en el diseño de disposición, mayor infraestructura subterránea, y una supervisión técnica más intensiva.

Ambos métodos comparten fundamentos comunes pero se adaptan a contextos operacionales y geológicos distintos. Las diferencias en la escala de aplicación, secuencia de hundimiento y control de estabilidad hacen del *panel caving* una evolución importante dentro de las técnicas de hundimiento, especialmente en yacimientos donde la configuración estructural y el flujo del mineral son determinantes, Setiawan et al. (2023).

Pese a sus ventajas técnicas y económicas, tanto el *block* como el *panel caving* están asociados a una serie de riesgos geomecánicos que pueden comprometer la estabilidad de las excavaciones, la integridad del personal y la continuidad operacional. Estos riesgos, que incluyen estallidos de roca, subsidencia y fenómenos de tipo hidráulico como el bombeo de agua-barro, que se analizan en profundidad en la siguiente sección.

2.1.2. Riesgos Geomecánicos Principales

Si bien los métodos de *block caving* y *panel caving* se reconocen por su eficiencia en la explotación de yacimientos masivos, su ejecución está sujeta a importantes riesgos geomecánicos que deben ser considerados desde las etapas iniciales de diseño. Flores (2019), identifica una serie de mecanismos de falla característicos de este tipo de minería, cada uno con posibles consecuencias operacionales, estructurales o humanas.

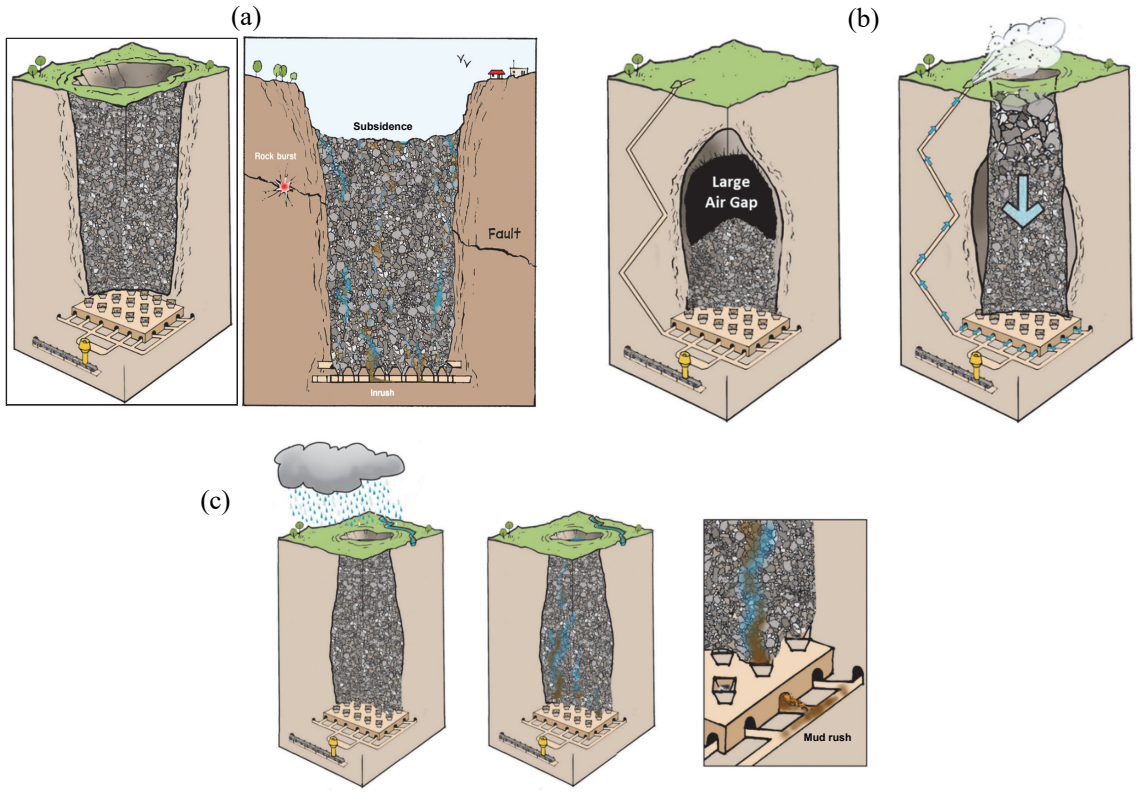


Figura 2.2: Representación esquemática de los principales riesgos geomecánicos asociados a la minería por hundimiento: (a) estallido de roca, subsidencia y estallido de polvo; (b) ráfagas de aire (airblasts); y (c) ingreso repentino de lodo (mud rush). Fuente: Flores (2019).

Uno de los fenómenos más estudiados es el *rockburst*, una liberación repentina de energía acumulada que ocurre principalmente en contextos de alta profundidad y esfuerzos confinados. Esta condición puede causar daño en las excavaciones y pone en riesgo la integridad de los equipos y operadores. Las estrategias de mitigación incluyen el uso de fracturamiento hidráulico, soporte de alto desempeño y sistemas de monitoreo sísmico en tiempo real, Heslop (2000).

Otro riesgo recurrente es el *airblast*, asociado a la presencia de cavidades abiertas en el techo del hundimiento. Este fenómeno puede liberar grandes volúmenes de aire comprimido a altas velocidades, generando sobrepresiones capaces de destruir estructuras subterráneas. La instalación de tapones de hormigón y la operación controlada desde los puntos de extracción en zonas críticas son prácticas recomendadas para reducir este riesgo, Palma et al. (2019).

La *subsidencia* del terreno es una consecuencia directa del colapso progresivo del macizo rocoso, pero su propagación hacia niveles de infraestructura activa puede derivar en la pérdida de galerías, ductos o chimeneas. El monitoreo geodésico, el uso de modelos numéricos predictivos y la planificación escalonada del hundimiento permiten controlar su avance, Flores (2019).

El *colapso de pilares* y la *sobreexcavación en chimeneas* representan amenazas estructurales severas, especialmente durante las etapas de producción sostenida. Un diseño inadecuado de las dimensiones o el factor de seguridad de los pilares puede conducir a fallas súbitas.

Para prevenirlo, se aplican estándares de diseño geomecánico que integran caracterización del macizo, modelamiento numérico y márgenes de seguridad ajustados a la carga inducida, Gómez y Labbé (2019).

Asimismo, la *sismicidad inducida por minería* se manifiesta con mayor frecuencia en paneles profundos y zonas con cambios abruptos de extracción. Esta puede activar mecanismos de falla secundaria, como caídas de roca o desconfinamiento de chimeneas. Landeros et al.(2022). recomiendan una estrategia integral que combine reducción de la tasa de hundimiento, preacondicionamiento del macizo y zonificación de áreas de exposición crítica, Flores (2019).

Por último, dentro del espectro de riesgos geomecánicos asociados al hundimiento, se encuentra un fenómeno de especial relevancia por su carácter súbito, su capacidad destructiva y su complejidad de predicción: la entrada violenta de mezclas saturadas de agua y finos al interior de la mina, conocido como bombeos de agua-barro o *mud rush* en inglés. Este riesgo, que implica una interacción crítica entre condiciones geomecánicas e hidrogeológicas, ha sido documentado en diversas operaciones de caving como un evento de alta peligrosidad, R. Castro et al. (2023).

2.2. Fundamentos del Fenómeno Bombeo de Agua-Barro

2.2.1. Definición

El *bombeo de agua-barro* es un fenómeno geotécnico caracterizado por la irrupción repentina, incontrolada y de alta energía de una mezcla de partículas de grano fino y agua en excavaciones subterráneas, principalmente en puntos de extracción o chimeneas. Esta mezcla puede comportarse como un fluido denso y altamente móvil, generando impactos destructivos tanto a nivel estructural como operacional, Butcher et al. (2005); R. Castro et al. (2023).

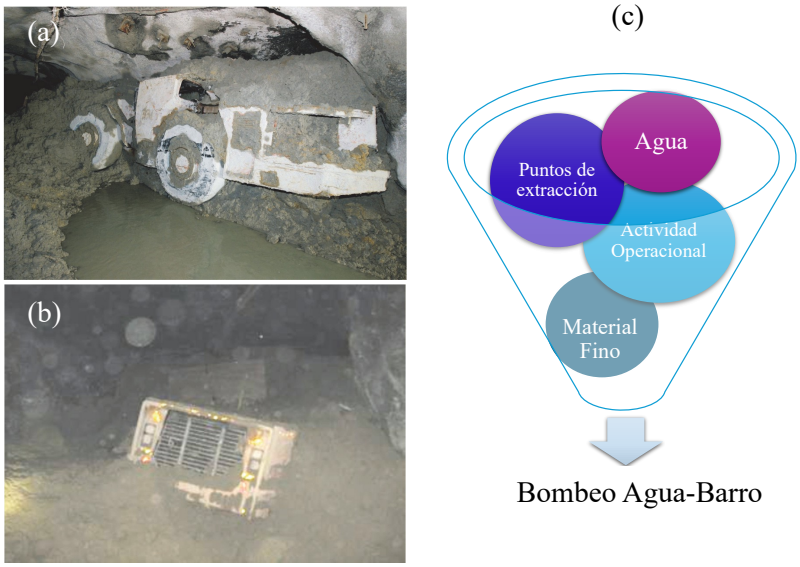


Figura 2.3: (a)Mud rush Revuelta et al. (2008) (b)Mud rush Widijanto (2012) (c)Esquema representativo de los factores necesarios para que se forme un fenómeno de agua-barro. Fuente: Flores (2019).

Desde una perspectiva geomecánica, el *mud rush* representa una transición desde un comportamiento parcialmente sólido del mineral fragmentado hacia una respuesta tipo fluida, causada por cambios súbitos en la presión de poros o perturbaciones inducidas por tronaduras, sismicidad o extracción acelerada. Estos eventos pueden desencadenar licuefacción estática, generando una pérdida de resistencia al corte y promoviendo el flujo del barro hacia zonas de menor energía, Castro et al. (2017).

Se han registrado casos históricos en diversas operaciones a nivel mundial, incluyendo minas de diamantes en Sudáfrica, donde la presencia de kimberlita y lutitas alteradas hidrotermalmente, sumada al ingreso de agua superficial, ha favorecido la ocurrencia de estos eventos, Butcher et al. (2005). El fenómeno también se ha documentado en minas chilenas como El Teniente y en Río Blanco-Los Bronces, donde ha motivado cambios significativos en la planificación operativa y en los sistemas de advertencia temprana, Vallejos et al. (2017); López(2024).

2.2.2. Reología del Barro

La reología del barro en minería subterránea corresponde al estudio del comportamiento mecánico del material fino saturado de agua bajo diferentes condiciones de esfuerzo, humedad y compactación. En el contexto de minería por hundimiento, el barro puede transitar desde estados plásticos hasta fluidos, dependiendo de variables clave como la densidad relativa, el tamaño de partículas y el grado de saturación, Castro et al.(2017).

Ensayos triaxiales consolidados y no consolidados realizados por Matsumoto (2016) demostraron que muestras saturadas y no consolidadas presentan una resistencia deviatórica mínima, seguida de licuefacción estática, lo que explica su alta movilidad cuando se ve perturbado. Por el contrario, materiales más densamente compactados y con menor saturación

mostraron mayor resistencia y menor susceptibilidad a fluir. El análisis mediante ensayos de cono de Abrams permitió identificar rangos críticos de humedad (12,2 %–16,9 %) entre los cuales el barro cambia de un comportamiento plástico a uno suave. Esta transición es esencial para el diseño de protocolos operacionales seguros. En general, se concluye que la baja cohesión y alta saturación son los dos condicionantes principales que determinan la respuesta fluida del barro bajo carga o vibración, Castro et al.(2017).

Para que un fenómeno de agua-barro ocurra, deben concurrir simultáneamente cuatro condiciones básicas: (1) existencia de material fino y susceptible a la saturación de agua, (2) presencia o ingreso de agua, (3) una perturbación del sistema (tronaduras, sismicidad, apertura de un punto), y (4) una vía de descarga abierta (punto de extracción o chimenea), Butcher et al. (2005). La ausencia de cualquiera de estos factores impide el desarrollo del fenómeno, aunque su coexistencia no siempre asegura que ocurra un evento, lo que introduce una fuerte componente estocástica en su predicción. Estudios como los de Flores (2019) y Vallejos et al. (2017) han destacado la relevancia de la proximidad entre puntos de extracción y la secuencia de explotación como variables críticas. Asimismo, el grado de fragmentación y la infiltración desde la superficie actúan como factores agravantes.

2.2.3. Mecanismos de Falla

Los mecanismos que desencadenan un *mud rush* se clasifican en: internos (formación de barro dentro de la columna de extracción), externos (infiltraciones desde acuíferos o superficie) y mixtos (combinación de ambos). La interacción entre material fino, agua acumulada y disturbios genera un gradiente hidráulico crítico que moviliza el barro hacia los *drawpoints* Butcher et al. (2005). Las fallas internas pueden activarse por consolidación diferencial del macizo, mientras que las externas dependen de factores hidrogeológicos como zonas de alta permeabilidad o fracturas conectadas a superficie. Gelcich (2018) modeló este fenómeno usando geometrías elípticas de alta permeabilidad en COMSOL, encontrando que contrastes en la conductividad de varios órdenes de magnitud favorecen caudales altos que pueden desencadenar eventos, Sánchez et al. (2019).

2.2.4. Riesgo de Entrada de Agua-Barro

Desde una perspectiva operacional, el *mud rush* constituye un riesgo multifactorial, cuya ocurrencia está condicionada por la interacción entre factores geomecánicos, hidrogeológicos y operacionales. Estudios realizados en El Teniente y Río Blanco-Los Bronces han demostrado que sectores con subsidencia acumulada, alta humedad, presencia de finos y puntos de extracción adyacentes en condición húmeda son particularmente vulnerables, Vallejos et al. (2017); Navia et al. (2014); López (2024).

Modelos Predictivos

Los modelos predictivos buscan anticipar la ocurrencia de eventos de entrada de barro mediante el análisis estadístico de variables críticas. Navia et al. (2014) identificó que la altura de extracción, la humedad del punto y la proximidad entre puntos de extracción en

condición de riesgo eran factores significativos. Matsumoto (2016) complementó este análisis con regresión logística aplicada a eventos registrados en El Teniente.

Modelos más avanzados, como los propuestos por Salas et al. (2022), incorporan variables climatológicas, topográficas y estructurales para mejorar la predicción a mediano plazo. Recientemente, Castro et al. (2023) presentó un modelo multivariable aplicado a la mina Esmeralda, logrando un 80 % de precisión e identificando zonas dinámicas de alto riesgo.

Modelos Numéricos

Desde el enfoque numérico, Sánchez et al. (2019) desarrolló una serie de simulaciones acopladas usando elementos finitos para resolver el flujo de barro a partir de las ecuaciones de Brinkman-Darcy, considerando geometrías realistas y propiedades físicas del medio granular. Las simulaciones evaluaron parámetros como tamaño de partícula, densidad relativa y separación entre puntos de extracción, concluyendo que estos influyen directamente en la velocidad de salida del barro y en la formación de zonas de movilización superpuestas. El modelo alcanzó errores medios inferiores al 1 %, validando su aplicabilidad como herramienta predictiva y de apoyo al diseño operativo.

Complementariamente, Gelcich (2018) desarrolló un modelo hidrogeológico en COMSOL Multiphysics con el objetivo de analizar el comportamiento del flujo de agua subterránea y su potencial para generar eventos de bombeo de agua-barro en minas explotadas mediante métodos de hundimiento. La propuesta conceptual plantea la existencia de una zona elíptica vertical de alta permeabilidad que actúa como vía preferencial de conexión entre un acuífero superior con drenaje restringido y un medio granular completamente saturado, idealizado como homogéneo e isotrópico.

El modelo, de carácter desacoplado, analiza por separado el flujo hidráulico y la respuesta mecánica del medio granular, lo que permite simular diversos escenarios mediante la variación de parámetros hidráulicos y geométricos. Entre las variables evaluadas se incluyen la conductividad hidráulica del entorno, la geometría de la zona de conexión y la incorporación de bandas de permeabilidad elevada. Los resultados evidencian condiciones críticas para la acumulación de presión y la generación de flujos súbitos de barro hacia los niveles de extracción.

En particular, se observó que la presencia de vías preferenciales de flujo (VPF), con conductividades del orden de 10^{-2} a 10^{-1}m/s, puede concentrar el drenaje e inducir caudales instantáneos del orden de 1 m^3/s, siempre que exista un contraste de al menos cuatro órdenes de magnitud respecto al medio circundante. Asimismo, variables geométricas como el radio del semieje menor de la elipse o el diámetro del punto de extracción demostraron influir directamente en la eficiencia del drenaje y en la acumulación de presión dentro del sistema.

En otro estudio, Reyes (2021) implementó simulaciones DEM para caracterizar el comportamiento de elipsoides de extracción (IEZ) bajo distintas condiciones de humedad. El análisis comparó su geometría en medios secos, intermedios y sobresaturados, observando que el aumento en cohesión reduce el ancho de los IEZ, mientras que las condiciones sobresaturadas generan mayor movilidad y geometrías más anchas, lo que aumenta el riesgo de eventos de tipo mud rush en extracciones simultáneas o alternadas.

Más recientemente, Díaz et al. (2024) desarrollaron un modelo acoplado geomecánico-hidrogeológico usando FLAC3D y FEFLOW para analizar cómo las deformaciones inducidas

por el hundimiento alteran la permeabilidad del macizo rocoso. Los resultados indicaron que zonas sometidas a esfuerzos tensionales aumentan su conductividad hidráulica debido a la apertura de fracturas, mientras que regiones bajo compresión la reducen. Esta redistribución afecta la magnitud y dirección del drenaje subterráneo, concentrando el flujo en zonas de alta permeabilidad inducida. También se evidenció que mayores tasas de recarga superficial incrementan el caudal de ingreso hacia los niveles de extracción, reforzando la necesidad de integrar las condiciones hidrogeológicas dinámicas en el diseño minero.

2.3. Registro de Agua-Barro en Operación

Las incidencias de *mud rush* o bombeo de agua-barro constituyen un riesgo operativo recurrente en operaciones de *block* y *panel caving*. Estos fenómenos, tradicionalmente poco reportados, han provocado consecuencias graves, desde interrupciones de producción hasta fatalidades en minas de Sudáfrica, Chile, Australia e Indonesia, Butcher et al. (2005). Sin embargo, avances recientes en estudios de riesgo han permitido desarrollar modelos predictivos que han mejorado la identificación de puntos críticos en minas a nivel mundial, R. Castro et al. (2023).

En Sudáfrica, minas como Dutoitspan (De Beers y Kimberley) reportaron *mud rushes* desde mediados del siglo XX, activando estrategias de control por uniformidad de extracción y diseño de los puntos de extracción, Butcher et al. (2005). En Asia, minas en Indonesia han implementado sistemas de monitoreo y clasificación de riesgo de lodo con estrategias de extracción regular para reducir susceptibilidad, Maia (2018).

Más recientemente, SRK Consulting documentó un sistema comprensivo de evaluación de riesgo de mud rush en minas de *sublevel caving* usando scoring y calibraciones basadas en datos históricos, con resultados positivos en minas de Asia y Norteamérica, Jakubec et al. (2016).

2.3.1. Situación en Chile: El Teniente y otras divisiones de CODELCO

En Chile, la División El Teniente ha investigado intensamente el fenómeno. En 2018 realizaron una prueba industrial piloto para extracción de agua-barro en Mina Diablo Regimiento usando LHDs remotos, logrando el retiro de casi 8 Mt de material húmedo y desarrollando KPIs como uniformidad de extracción y porcentaje de baldadas efectivas, Soto (2018). A partir de 2021, la División registró la extracción de más de 3 Mt de agua-barro, reforzando el uso de herramientas tele-operadas para reducir exposición laboral, Carvajal (2020).

Otras divisiones, como Salvador y Andina, han seguido esa línea, incorporando monitoreo continuo y sistemas de clasificación de puntos críticos según humedad y granulometría.

Tabla 2.1: Registro de eventos de bombeo de agua-barro en operaciones de hundimiento (2011–2025)

País / Mina	**Año**	**Acciones / Resultados principales**
Sudáfrica (Dutoitspan)	2011	Diseño de control de extracción, extracción uniforme, construcción de drenajes preventivos, Butcher et al. (2005).
Indonesia (varias)	2018–2020	Monitoreo de humedad, extracción regular, clasificación de riesgo, Maia (2018).
Global (*sublevel caving*)	2023	Sistema de scoring de riesgo y calibración con datos históricos, Jakubec et al. (2016).
El Teniente, Chile	2018	Extracción piloto con LHD remotos, uniformidad de extracción, KPIs, Soto (2018).
El Teniente, Chile	2021–2024	>3Mt retiradas; teleoperación; continuidad operacional y seguridad, Carvajal (2020).
CODELCO (divisiones varias)	2019–2024	Modelos de riesgo; clasificación de puntos de extracción según finos y humedad, Gómez y Labbé (2019).

2.4. Control y Manejo en Operación

2.4.1. Drenaje de Agua

Un aspecto fundamental para prevenir el bombeo de agua-barro es contar con un sistema efectivo de drenaje en la zona de hundimiento. Desde los primeros casos documentados en Kimberley a fines del siglo XIX, se reconoce que la extracción de flujos hídricos subterráneos, mediante galerías de drenaje y pozos filtrantes, puede disminuir sustancialmente el riesgo de acumulación de agua en el macizo superior y reducir las posibilidades de bombeo de agua-barro, Butcher et al. (2005). En operaciones modernas de hundimiento de bloques, la intercepción activa de acuíferos, junto con sistemas de bombeo en niveles de hundimiento, ha demostrado ser una medida de control efectiva en minas de Asia e Indonesia, Maia (2018).

Diseños actuales integran drenajes superficiales y subterráneos mediante un enfoque multicapa: galerías horizontales bajo aquicludos, drenes verticales de alivio de presión, y pozos de control de nivel piezométrico. Además, la planificación de la secuencia de hundimiento busca evitar intersecciones accidentales con acuíferos permeables, minimizando rutas de ingreso de agua, Jakubec et al. (2016).

En minas en Chile, como El Teniente, se han implementado redes de drenaje distribuidas

a distintos niveles de extracción. Estas redes, combinadas con pozos piezométricos para monitoreo continuo, permiten identificar aumentos de presión de poros vinculados a eventos de entrada de lodo potencial. Además, se emplean sistemas de bombeo redundante para asegurar la confiabilidad operativa ante eventos de alta recarga superficial o acuíferos transientes, Díaz et al. (2024).

En síntesis, un sistema de drenaje eficaz implica una estrategia activa de gestión hídrica, desarrollada a través de caracterización hidrogeológica detallada, monitoreo continuo y diseño de infraestructura redundante. Estas medidas permiten no sólo anticipar sino también mitigar el riesgo de ingresos súbitos de barro en cavernas.

2.4.2. Extracción por LHD Telecomandados

La extracción remota mediante LHD (Load–Haul–Dump) telecomandados ha emergido como uno de los principales mecanismos para proteger al personal humano ante episodios de *mud rush*. La tecnología combina control remoto de cabina, cámaras 360°, sensores de proximidad, y automatización de maniobras, lo que permite mantener operaciones eficientes y seguras en presencia de altos riesgos, Butcher et al. (2005); Jakubec et al. (2016).

Un reporte detallado de Liddell sublevel caving (Australia) menciona una reducción superior al 70 % de incidentes relacionados a lodo tras incorporar LHD teleoperados en 2018. La estrategia consistió en permitir la extracción desde zonas de retiro seguro, monitoreando vía sensores el comportamiento del flujo y activando alarmas tempranas para evacuación automática, Jakubec et al. (2016).

De modo complementario, estudios recientes sobre interfaces de teleoperación automatizadas (autonomía local) han demostrado que estas técnicas pueden aumentar la productividad un 30–50 %, reduciendo desgaste operativa y exponiendo menos a los operadores a condiciones de riesgo, Conway et al. (2002). Además, sistemas adaptativos ajustan automáticamente patrones de extracción y velocidad con base en telemetría y datos de consistencia del lodo, aportando mayor seguridad en escenarios dinámicos.

En CODELCO, el proyecto piloto de extracción remota de lodo en El Teniente, desarrollado entre 2018 y 2024, se basó en LHD equipados con cámaras 360°, sensores de humedad y sistemas de control telemétrico. Este sistema permitió retirar más de 3 Mt de material saturado, sin incidentes de seguridad y sin intervención humana directa dentro del drawpoint crítico, mejorando significativamente los indicadores de continuidad operativa y exposición laboral, Carvajal (2020).

2.4.3. Sistemas de Monitoreo

La aplicación de sistemas de monitoreo en tiempo real es esencial para gestionar el riesgo de bombeo de agua-barro. Esto implica la integración de diversas tecnologías:

- **Sensores piezométricos** distribuidos en la columna de extracción, capaces de detectar aumentos rápidos de presión intersticial que preceden un evento de bombeo de agua-barro, Díaz et al. (2024).

- **Medidores de humedad y conductividad eléctrica** en puntos de extracción, para evaluar la saturación e iniciar protocolos de acción ante condiciones críticas, Jakubec et al. (2016).
- **Sistemas de visión y fotogrametría** mediante cámaras, drones subterráneos o LHD, que permiten identificar zonas de acumulación de lodo o cambios geométricos en chimeneas, Jafari et al. (2023).
- **Sismómetros y acústica pasiva**, útiles para detectar microdesprendimientos o cambios de estado en el macizo, anticipando licuefacción o desplazamientos no visibles externamente, Flores (2019).
- **Plataformas de telemetría y Big Data** que integran información en tiempo real, algoritmos predictivos y unidades de extracción, permitiendo activar alarmas automáticas, interrumpir extracción y reconfigurar patrones operativos en tiempo real, Scalambrin et al. (2023).

Implementaciones recientes en las divisiones de CODELCO han incorporado módulos IoT, bases LoRa para transmisión subterránea y gestión remota de datos. Puede decirse que hoy la vigilancia geomecánica-hidro puede operar de forma continua y proactiva, anticipando eventos críticos y optimizando las acciones operacionales preventivas.

2.4.4. Clasificación de Puntos de Extracción

La clasificación de puntos de extracción según su nivel de riesgo es una práctica sistemática que permite focalizar esfuerzos y recursos preventivos. El sistema de clasificación considera variables geotécnicas, de humedad, granulometría y dinámica de flujo. En El Teniente, Navia et al. (2014). desarrollaron una matriz de decisión que clasifica puntos en categoría Normal, Observación o Crítico, según su contenido de humedad (11-17 %), densidad relativa y proximidad a puntos con historial de eventos

Posteriormente, Vallejos et al. (2017) validaron mediante pruebas de consistencia tipo cono Abrams que puntos clasificación "crítico" presentaban comportamientos consistentemente plásticos o fluidos, indicando alta probabilidad de fallo. En paralelo, Saepulloh et al. (2022) propuso introducir un Factor de Seguridad del Flujo (FSF), que combina contenido de agua, densidad y granulometría, para determinar reglas de corte en tiempo real.

Este enfoque también ha sido aplicado en Canadá (Northparkes), Australia (Liddell) y EE.UU. (Freeport-McMoRan), ajustando rangos de FSF y humedad crítica según condición de la roca y clima. Las operaciones han registrado una disminución del 60 % en la frecuencia de eventos críticos al focalizar control y extracción remota en puntos clasificados como "críticos", Jakubec et al. (2016).

2.5. Modelamiento Numérico

2.5.1. Método de Elementos Discretos (DEM)

El Método de Elementos Discretos (DEM) se ha consolidado como una herramienta poderosa para modelar procesos geomecánicos en minería subterránea, especialmente en contextos de *block* y *panel caving*. Esta técnica representa el macizo rocoso como un conjunto de partículas discretas, lo que permite estudiar en detalle mecanismos de fragmentación, interacción entre partículas y la movilidad granular bajo condiciones operativas relevantes, Cundall y Strack (1979); Steinmetz et al. (2019).

En el contexto del hundimiento, DEM permite simular la fracturación inducida por extracción en columnas de caving, capturando el desarrollo de zonas rompedoras y trayectorias de caída de fragmentos. Zhou et al. (2021) implementó simulaciones con PFC3D y ESyS-Particle, revelando cómo variables como el tamaño de partícula, la densidad relativa y la geometría de los puntos de extracción afectan la formación de la zona de movilización y la generación de finos.

Uno de los softwares más avanzados que implementa esta metodología es Rocky DEM, desarrollado por ESSS. Este programa opera bajo un enfoque lagrangiano, resolviendo de forma explícita la segunda ley de Newton para cada partícula individual, tanto en sus componentes traslacionales como rotacionales. En términos generales, las ecuaciones fundamentales utilizadas para calcular el movimiento son:

$$m_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \mathbf{F}_{c,p} + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{fp} \tag{2.1}$$

$$\mathbf{I}_p \frac{d\boldsymbol{\omega}_p}{dt} = \mathbf{T}_p \tag{2.2}$$

donde m_p es la masa de la partícula, $\mathbf{v}_p$ su velocidad, $\mathbf{F}_{c,p}$ representa las fuerzas de contacto entre partículas o con las paredes, $\mathbf{F}_g$ es la fuerza gravitacional y $\mathbf{F}_{fp}$ corresponde a las fuerzas de interacción fluido-partícula, en caso de existir acoplamiento con CFD. En cuanto al movimiento rotacional, $\mathbf{I}_p$ es el tensor de inercia y $\mathbf{T}_p$ el torque neto, Fonte et al. (2015).

El motor numérico de Rocky DEM sigue un ciclo explícito de integración compuesto por tres etapas: *configuración*, *procesamiento* y *movimiento*. Durante el procesamiento, se calcula la fuerza neta que actúa sobre cada partícula, sumando las fuerzas de cuerpo y las de superficie:

$$\sum \mathbf{F}_{\text{net}} = \sum \mathbf{F}_{\text{body}} + \sum \mathbf{F}_{\text{surface}} = m\frac{d\mathbf{v}}{dt} \tag{2.3}$$

Posteriormente, en la fase de movimiento, el sistema actualiza tanto la velocidad como la posición de cada partícula utilizando integración explícita en el tiempo:

$$\mathbf{v}_{\text{new}} = \mathbf{v}_{\text{old}} + \int_t^{t+\Delta t} \frac{1}{m} \sum \mathbf{F}_{\text{net}}\, dt \tag{2.4}$$

$$\mathbf{x}_{\text{new}} = \mathbf{x}_{\text{old}} + \int_{t}^{t+\Delta t} \mathbf{v}_{\text{step}}\, dt \tag{2.5}$$

Estas ecuaciones constituyen el núcleo del algoritmo de Rocky DEM y permiten simular con alta precisión fenómenos como colisiones, fricción, rotación, rompimiento y desgaste de partículas. Además, el programa incluye modelos de contacto avanzados, como la histéresis elástico-plástica y la fricción tipo Coulomb, y permite representar partículas no esféricas, lo cual incrementa significativamente el realismo en simulaciones de transporte y flujo granular.

A nivel de validación, Kim et al. (2020) desarrolló procedimientos para calibrar los parámetros microscópicos de los modelos de contacto mediante la comparación con datos empíricos, garantizando así una mayor confiabilidad y aplicabilidad de los resultados en condiciones operativas reales.

Finalmente, Rocky (2024) proporciona una descripción detallada del esquema de solución y del motor computacional implementado en Rocky DEM, incluyendo algoritmos de integración, estrategias de contacto y metodologías de paralelización utilizadas para mejorar el desempeño en simulaciones de gran escala.

2.5.2. Dinámica de Fluidos Computacional

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una herramienta numérica fundamental para la simulación del comportamiento de fluidos en medios porosos, fracturados y sistemas multifásicos. En minería por hundimiento, CFD se aplica para modelar el flujo de agua y lodo a través de chimeneas, zonas fracturadas y puntos de extracción, permitiendo analizar la interacción entre fluido y material granular en condiciones transitorias o estacionarias, Fonte et al. (2015).

ANSYS Fluent, uno de los softwares más utilizados en este ámbito, resuelve las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento para la fase continua, adaptando las ecuaciones de Navier-Stokes promedio en volumen para incluir el efecto de las partículas discretas. Estas ecuaciones son:

$$\frac{\partial(\alpha_f \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f) = 0 \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial(\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f \mathbf{u}_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \tau_f + \mathbf{F}_{fp} \tag{2.7}$$

donde α_f es la fracción volumétrica del fluido, ρ_f es la densidad, $\mathbf{u}_f$ la velocidad del fluido, p la presión, τ_f el tensor de esfuerzos viscosos y $\mathbf{F}_{fp}$ representa la fuerza de interacción entre fluido y partícula, que incluye efectos de arrastre y gradiente de presión.

En acoplamientos CFD-DEM, el término $\mathbf{F}_{fp}$ se computa desde el lado DEM y se incorpora como fuente en el modelo continuo. Las fuerzas típicas incluyen:

- **Fuerza de arrastre:**

$$\mathbf{F}_D = \beta(\mathbf{u}_f - \mathbf{v}_p) \tag{2.8}$$

donde β es un coeficiente dependiente del régimen de flujo, concentración y tamaño de partículas.

- **Fuerza por gradiente de presión:**

$$\mathbf{F}_{\nabla p} = -V_p \nabla p \tag{2.9}$$

Estas formulaciones permiten capturar fenómenos como licuefacción estática, entrada de lodo, airblasts y acumulación de presión. Según Fonte et al. (2015), se han implementado acoplamientos exitosos entre Rocky y Fluent, logrando simular sistemas densos con interacciones bidireccionales donde las partículas también modifican el campo de flujo del fluido. Este enfoque es especialmente relevante para condiciones de hundimiento saturado, donde el barro fluido puede movilizarse rápidamente hacia los niveles de extracción.

La flexibilidad de ANSYS Fluent permite emplear distintas leyes de arrastre como Schiller-Naumann, Ganser o Ergun, según la esfericidad y concentración de partículas. Además, el esquema numérico se basa en volúmenes finitos, usando algoritmos multigrilla y esquemas segregados de presión-velocidad como PC-SIMPLE, Hurtado-Cruz et al. (2012).

2.5.3. Acople DEM-CFD

El acoplamiento entre DEM y CFD permite simular simultáneamente el comportamiento mecánico discreto de partículas y la interacción con flujos de fluidos, siendo especialmente útil para fenómenos como el *mud rush*, donde una mezcla de finos y agua se moviliza dentro de colapsos granulares, Teng et al. (2023); Gómez Puigpinos (2022).

En el ámbito de la minería, Galindo-Torres et al. (2018) implementó un modelo DEM-CFD en LBM/DEM para simular *airblast* en un *drawpoint*, validado de modo experimental mediante un pistón y medición de velocidades. El modelo demostró la viabilidad de analizar flujos fluidos inducidos incorporando mecanismos de interacción con masa sólida. Un caso similar sobre erosión de bloques en *caving* mostró cómo CFD–DEM reproduce la movilización de finos saturados bajo gradientes hidráulicos.

Otra aplicación relevante es el uso de CFD-DEM en modelado de transporte de sedimentos en pozos y tuberías, donde se capturan fenómenos de migración, deposición y suspensión, Sun y Xiao (2016). Aunque el contexto no es minero, la metodología y algoritmos resultan directamente aplicables para simular entrada de barro a través de drawpoints y verificar condiciones hidrodinámicas de la cenefa de extracción.

El acople DEM-CFD se organiza usualmente en tres fases:

1. Resolución de la dinámica de partículas mediante DEM (posición, velocidad, contacto e interacción mecánica).

2. Solución de flujo del fluido mediante CFD modulando propiedades en células envolventes.

3. Intercambio iterativo de fuerzas: arrastre, flotación, presión de poros y fuerza de interacción fluido–sólido.

Este enfoque ha sido utilizado con éxito en aplicaciones como flujo gravimétrico, erosión de bloques y elaboración de mapas dinámicos de velocidad y presión, Kong et al. (2024). No obstante, la principal limitante para su uso en escalas de mina radica en el alto consumo

de recursos computacionales, generalmente mitigado mediante técnicas de simplificación de malla, mallas adaptativas y escalas híbridas (FEM/DEM).

En definitiva, la integración CFD-DEM es una herramienta de vanguardia para modelar fenómenos complejos como el bombeo de barro, aportando valor explicativo, predictivo y de diseño a escala real.

Metodología

3.1. Metodología Experimental

Con el objetivo de modelar y cuantificar el riesgo geomecánico asociado al fenómeno de bombeo de agua-barro, se lleva a cabo una serie de experimentos mediante una maqueta que simula una mina de *block caving* en su etapa de fracturación. El propósito de estos experimentos es analizar como diferentes variables combinadas impactan el comportamiento del sistema. Para representar el fenómeno de bombeo de agua-barro, se emplea un modelo simplificado que incorpora la adición de agua, dado que este fenómeno requiere tanto de un material fino como de un fluido, que en este caso es agua, que se infiltra en el sistema. En este contexto, el agua simula la infiltración de un acuífero cercano o la lluvia que ingresa a la mina, mezclándose con el material fino generado durante la etapa de fractura y perforación mediante tronaduras. De este modo, el experimento permite estudiar las condiciones bajo las cuales se produce el fenómeno en estudio en el proceso de extracción en minería subterránea.

3.1.1. Diseño Experimental

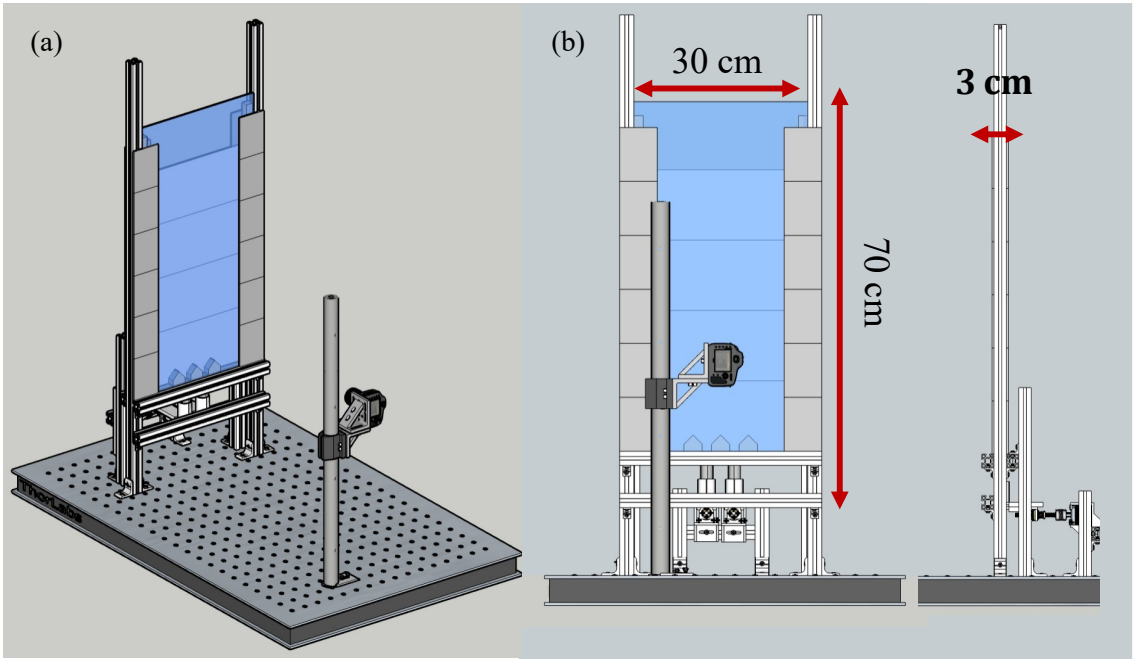


Figura 3.1: Esquema del montaje experimental. (a) Vista isométrica del modelo. (b) Vista frontal desde la posición de la cámara. Vista lateral del modelo, casi bidimensional junto con las dimensiones de la maqueta. González (2025)

El diseño experimental, observado en la Figura 3.1, se lleva a cabo utilizando una maqueta que representa una mina de *Block Caving* en su etapa de fracturación. La maqueta está

construida en acrílico y simula el proceso de extracción de material mediante la técnica de caving. Para representar el fenómeno de *mud rush*, se agrega agua al sistema, lo que permite observar cómo la interacción entre el material fino (arena) y el fluido (agua) genera el fenómeno en cuestión. Este proceso simula la infiltración de un acuífero cercano o la lluvia que entra a la mina y se mezcla con el material fino generado durante la etapa de fractura y perforación mediante tronaduras.

El sistema experimental se configura en una maqueta en la que se coloca primero una capa de cuarzo blanco hasta una altura de 30 cm desde el sector de los puntos de extracción. A continuación, se coloca una capa de material fino (arena), que se extiende solo hasta la mitad de la maqueta. Finalmente, se coloca otra capa de cuarzo blanco hasta completar la altura total de la maqueta. Este diseño permite simular la distribución del material y la infiltración del fluido en diferentes zonas de la mina.

3.1.2. Sistema de Extracción Automatizado



Figura 3.2: Sistema de extracción automatizado. (a)Vista frontal del montaje experimental haciendo énfasis en el sistema de extracción. (b)Vista lateral del sistema de extraccion automatizado con tapas móviles.

El sistema de extracción del montaje experimental fue diseñado para replicar de forma controlada y repetible las condiciones de apertura y cierre de puntos de extracción en una mina subterránea operada mediante hundimiento gravitacional(Fig. 3.2). El mecanismo está compuesto por dos motores eléctricos, los cuales operan de forma independiente y están acoplados a compuertas ubicadas en la base del modelo físico. Estos motores tienen la capacidad de rotar tanto en sentido horario como antihorario, permitiendo así el accionamiento de las tapas de apertura según el protocolo definido.

El control del sistema se realiza mediante un programa desarrollado en la plataforma *Arduino IDE*, cargado sobre una placa controladora Arduino UNO. Una vez que el código ha sido cargado al sistema, la activación del proceso experimental se realiza presionando la

tecla Enter desde el computador conectado. Al iniciar el experimento, los motores ejecutan una secuencia programada: giran en sentido antihorario hasta abrir completamente las tapas de los puntos de extracción seleccionados de acuerdo con la condición definida en la matriz experimental (extracción aislada o extracción simultánea).

En el caso de la extracción aislada, sólo uno de los motores se activa, manteniendo el punto abierto durante 30 segundos. En la extracción simultánea, ambos motores operan de forma coordinada, abriendo dos puntos de extracción durante 15 segundos. Esta diferencia de tiempos garantiza que la cantidad de material extraído en ambas condiciones sea equivalente, permitiendo una comparación directa entre ambos escenarios.

Finalizado el tiempo de apertura, los motores invierten su giro (sentido horario) y cierran nuevamente las compuertas hasta alcanzar la posición original completamente sellada. Esta operación garantiza que no se produzca pérdida adicional de material, y además evita interferencias visuales durante el análisis de imágenes. En efecto, el vaciado completo del sistema altera las condiciones de iluminación internas del modelo, lo cual comprometería la calidad del procesamiento digital de imágenes, al modificar abruptamente el contraste y generar reflejos indeseados desde la base del montaje.

3.1.3. Caracterización del Material

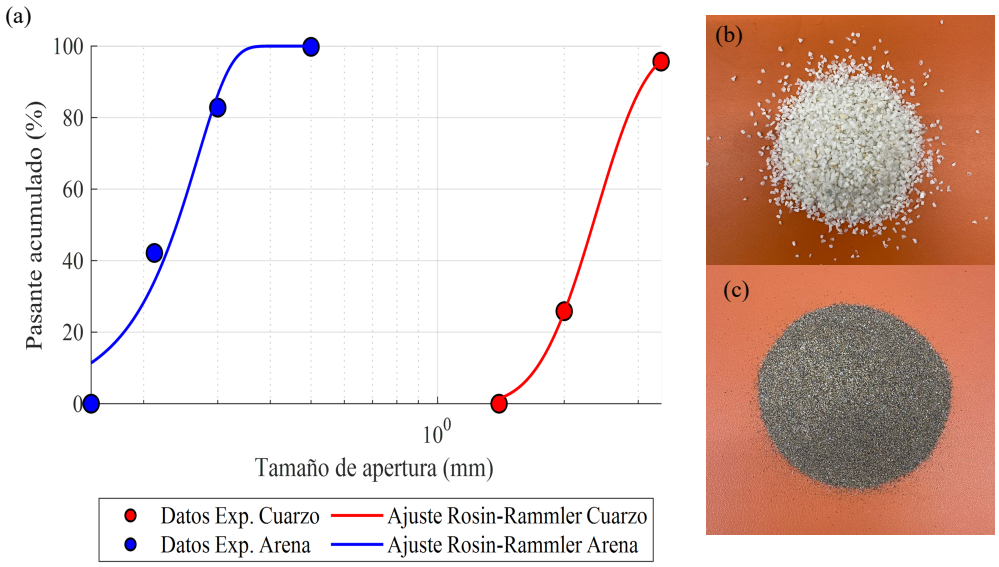


Figura 3.3: (a) Curva de distribución granulométrica del material utilizado. Se caracterizan los diámetros de ambos materiales, obtenidos mediante la distribución de Rosin-Rammler.(b) Muestra del material grueso-cuarzo. (c) Muestra del material fino-arena.

El material utilizado en el experimento se compone principalmente de dos tipos de componentes: cuarzo blanco y arena de playa, los cuales se observan en la Figura 3.3. La arena

representa el material fino generado durante las etapas de fractura y perforación con tronaduras, mientras que el cuarzo blanco simula el material más grueso y estructuralmente sólido dentro de la mina. Las características del material fino se evalúan mediante diferentes variaciones en la cantidad de arena, usando tres cantidades diferentes: 500 g, 750 g y 1000 g. Estas cantidades se ajustan como variables para observar cómo influye el contenido de material fino en la formación del fenómeno de *mud rush* según se muestra más abajo en la Figura 3.4.

Tabla 3.1: Parámetros granulométricos obtenidos para los materiales analizados.

Material	d_{80} (mm)	C_U	C_Z
Fino - Arena	0,24	1,52	0,91
Grueso - Cuarzo	2,83	1,64	0,99

En la Tabla 3.1 se presentan los parámetros granulométricos característicos de los materiales utilizados en los ensayos, que corresponden a un material fino y un material grueso. El parámetro d_{80} representa el diámetro por debajo del cual se encuentra el 80 % en peso de las partículas de la muestra; es una medida comúnmente utilizada para caracterizar el tamaño predominante de los materiales granulares. En este caso, el material fino presentó un $d_{80} = 0{,}24$ mm, mientras que el material grueso alcanzó un valor de 2,83 mm, lo que indica una diferencia significativa en la escala de tamaño entre ambos.

El coeficiente de uniformidad, definido como

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{3.1}$$

describe el grado de dispersión de tamaños dentro de la muestra. Un valor bajo de C_U (cercano a 1) indica una granulometría uniforme, mientras que valores mayores representan una mayor heterogeneidad. Para el material fino, $C_U = 1{,}52$, y para el cuarzo, $C_U = 1{,}64$, lo que refleja una distribución relativamente estrecha en ambos casos, siendo el cuarzo ligeramente más heterogéneo.

Por su parte, el coeficiente de curvatura se define como

$$C_Z = \frac{d_{30}^2}{d_{10} d_{60}}, \tag{3.2}$$

y entrega información sobre la forma de la curva granulométrica. Valores de C_Z entre 1 y 3 suelen indicar una curva bien graduada. Los valores obtenidos para ambos materiales (0,91 para la arena y 0,99 para el cuarzo) se sitúan cercanos a 1, evidenciando curvas granulométricas con poca curvatura y distribución predominantemente uniforme.

En cuanto al fluido utilizado en los ensayos, se seleccionó el agua debido a que representa el agente de infiltración más común en faenas subterráneas explotadas por hundimiento. En minería tipo *block caving*, el agua puede provenir tanto de acuíferos subterráneos como de la infiltración de aguas superficiales (por ejemplo, precipitaciones o escurrimientos estacionales). A temperatura ambiente (20°C), el agua posee una densidad de $\rho = 1000$ kg/m^3 y una viscosidad dinámica de $\mu = 1{,}002 \times 10^{-3}$ Pa·s, lo que la convierte en un fluido representativo para evaluar los efectos de saturación y movilización de finos.

Durante los experimentos, el agua fue introducida desde tres ubicaciones distintas: una cercana al material fino, otra más alejada y una tercera en el centro del sistema como se muestra más abajo en la Figura 3.4. Esta configuración experimental permitió comparar la influencia de la ubicación del fluido sobre el avance del frente de humedad y su interacción con el material granular, permitiendo observar el desarrollo de condiciones favorables para la formación de mezclas lodosas, fenómeno clave en la comprensión del bombeo de agua-barro.

3.1.4. Variables

Las principales variables consideradas en el experimento son:

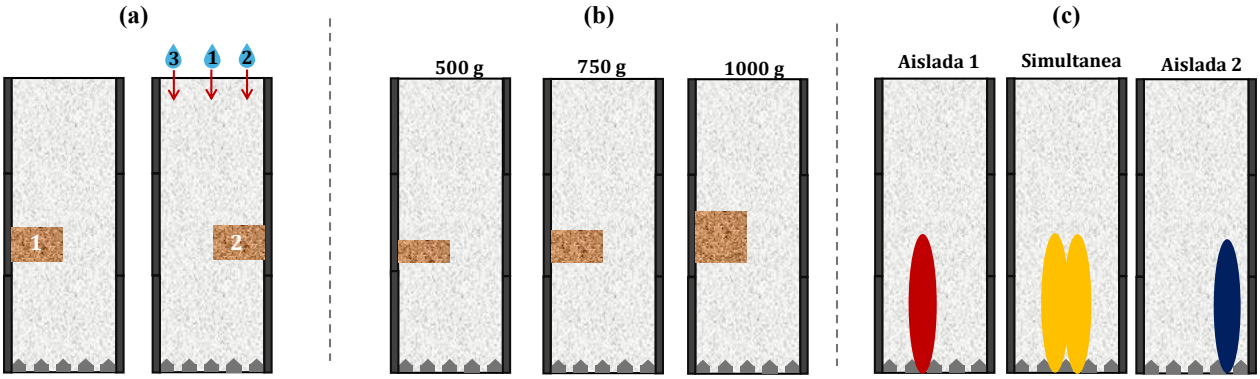


Figura 3.4: Esquema de las diferentes variables (a)Ubicaciones Espaciales de Fino y Agua. Fino: Zona 1 y Zona 2. Agua: Ubicación 1, 2 y 3. (b) Cantidades de Fino (c) Secuencias de Extracción: Aislada y Simultánea. Dependiendo de la Ubicación del Fino se considera que extracción aislada es utilizada.

- **Cantidad de material fino (arena):** Se utilizan tres cantidades de arena para simular diferentes condiciones de densidad y comportamiento del material en la mina. Las cantidades son 500 g, 750 g y 1000 g.
- **Ubicación del fluido (agua):** El agua se introduce en el sistema desde diferentes ubicaciones: cerca del material fino, más lejos de él y desde el centro, lo cual permite estudiar cómo la proximidad del fluido influye en el proceso de *mud rush*.
- **Tipo de extracción:** Se evalúan dos tipos de extracción:
  - *Extracción aislada:* Se abre un solo punto de extracción por 30 segundos.
  - *Extracción simultánea:* Se abren simultáneamente dos puntos de extracción por 15 segundos.
- **Condiciones de humedad:** En los experimentos con agua, se observa cómo la infiltración del fluido en la zona de material fino afecta la formación de barro. Además, se controla el tiempo de exposición de los puntos de extracción dependiendo del tipo de extracción seleccionada.

Estas variables permiten simular diversas condiciones de extracción y comportamiento del material bajo distintas circunstancias, replicando de manera controlada los factores que incitan al fenómeno de *mud rush*.

3.1.5. Procedimiento Experimental

El procedimiento experimental se realiza en los siguientes pasos:

1. **Preparación del Modelo:** Se coloca una capa de cuarzo blanco en la maqueta hasta una altura de 30 cm desde los puntos de extracción. Luego, se añade una capa de arena (material fino) hasta la mitad de la maqueta y, finalmente, se cubre con otra capa de cuarzo blanco hasta completar la altura total del modelo. Este diseño busca representar de manera esquemática la estratificación del material fragmentado en una mina operada mediante hundimiento gravitacional, simulando tanto la zona de material fino como la matriz más gruesa que conforman la columna de extracción.

2. **Activación del Sistema de Extracción:** La extracción del material se realiza mediante un sistema automatizado controlado por Arduino, que opera un motor para abrir y cerrar los puntos de extracción. En el caso de la extracción aislada, se habilita un único punto de extracción durante 30 segundos, mientras que en la extracción simultánea se abren dos puntos de forma conjunta durante 15 segundos. Esta configuración asegura que la cantidad total de material extraído sea equivalente en ambas modalidades, lo cual permite establecer una comparación directa entre los efectos de cada tipo de extracción sobre la movilidad del material y la dilución. Asimismo, se evita alcanzar el vaciado completo del sistema, ya que esta condición produce una alteración abrupta en la iluminación de la maqueta (por pérdida de contraste y entrada de luz por la base), lo que interfiere en el procesamiento posterior de imágenes capturadas por la cámara, afectando la confiabilidad del análisis digital del frente de flujo.

3. **Procesamiento del Material Extraído:** El material recolectado se lleva a una zona de clasificación, donde se separa por tamaños mediante un conjunto de tamices (especificar mallas si es necesario). Posteriormente, las fracciones obtenidas se secan en un horno por 24 horas para eliminar la humedad residual, garantizando así la precisión en la medición de masa para cada fracción.

4. **Cálculo de Dilución y Número de Reynolds:** A partir del material seco, se cuantifica la masa de finos y de gruesos extraídos, lo que permite calcular la dilución utilizando la ecuación:

$$\text{Dilución} = \frac{\text{Masa del material fino extraído}}{\text{Masa total extraída}} \tag{3.3}$$

   Este indicador se utiliza para evaluar el grado de mezcla entre las fracciones, siendo particularmente relevante para caracterizar el fenómeno de bombeo de agua-barro. De forma complementaria, se calcula el número de Reynolds para evaluar el régimen de flujo durante la infiltración del agua, considerando las propiedades físicas del sistema.

3.1.6. Post-procesamiento experimental

Una vez realizado el proceso experimental, en el cual se capturaron videos bajo condiciones de iluminación controlada, mediante dos focos de alta intensidad ubicados en las esquinas inferiores del montaje con el fin de minimizar la proyección de sombras y favorecer una visibilidad homogénea del material granular, se procedió al post-procesamiento de las imágenes obtenidas. Las imágenes fueron registradas utilizando una cámara Nikon D7500 configurada en resolución 4K a 30 fps, tomando videos de 15 y 30 segundos según la secuencia experimental definida.

El objetivo principal del post-procesamiento fue cuantificar de manera precisa el área cubierta por el material fino colocado en la maqueta, en función del tiempo y para cada ensayo. Para ello, se implementó un protocolo computacional basado en procesamiento digital de imágenes utilizando la librería OpenCV en Python.

Cabe destacar que una etapa fundamental de este proceso es la definición de la región de interés (ROI, por sus siglas en inglés *Region of Interest*). En procesamiento digital de imágenes, el ROI corresponde a una porción específica de la imagen donde se concentra el análisis, permitiendo excluir áreas irrelevantes y focalizar el procesamiento en la zona que contiene información relevante para el experimento. De acuerdo con Gonzalez y Woods (2008), una región de interés es cualquier subconjunto espacialmente delimitado dentro de una imagen en la cual se desea enfocar el análisis o procesamiento, por razones de eficiencia o relevancia de la información. En este caso, el ROI se define manualmente sobre la maqueta, asegurando que el cálculo del área corresponda únicamente al material granular de interés.

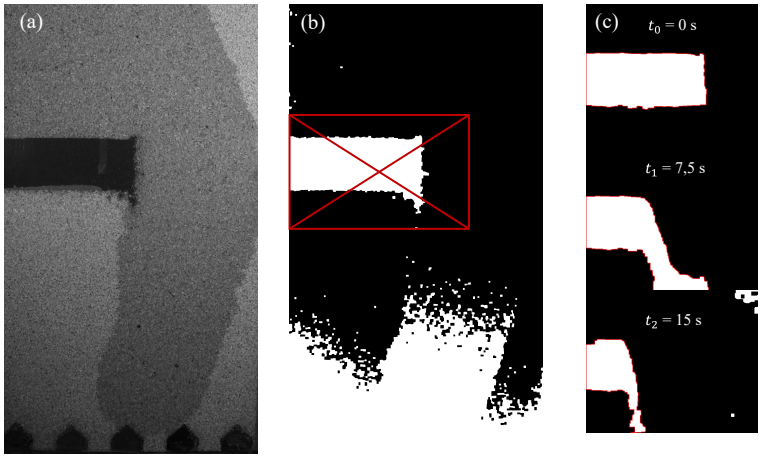


Figura 3.5: (a) Imagen experimental original en escala de grises correspondiente a uno de los cuadros (frames) del video; (b) Imagen binarizada mediante umbralización, donde el área blanca representa el material fino cuya evolución superficial será cuantificada. El rectángulo rojo indica la región de interés (ROI) seleccionada para el análisis, lo cual permite excluir el fondo negro y reducir la influencia de puntos blancos asociados a imperfecciones de iluminación;(c) Secuencia temporal de la evolución del área segmentada y contorneada en rojo, en diferentes instantes ($t_0 = 0$ s, $t_1 = 7{,}5$ s, $t_2 = 15$ s), mostrando el avance y seguimiento automático del contorno del material fino durante el experimento.

El procedimiento seguido es el siguiente:

1. **Selección de la región de interés (ROI):** Para cada video se selecciona manualmente el área de interés sobre el primer cuadro (frame) capturado, utilizando la interfaz gráfica de OpenCV, como se muestra en el apartado (b) de la Figura 3.5. El ROI (*Region of Interest*) es una subimagen rectangular que delimita el área específica de la maqueta a analizar, permitiendo excluir zonas no relevantes (como bordes, instrumentos u otras fuentes de ruido) y asegurar la consistencia espacial durante todo el análisis temporal.

2. **Procesamiento de cada cuadro:** El video es recorrido cuadro a cuadro. Cada imagen es convertida a escala de grises y suavizada mediante un filtro gaussiano para reducir el ruido. Posteriormente, se aplica un método de umbralización automática (Otsu) que permite segmentar el material fino respecto del fondo, generando una imagen binaria. Luego, se utilizan operaciones morfológicas de apertura y cierre para eliminar pequeños artefactos y homogeneizar los contornos detectados.

3. **Extracción de contornos y cálculo de áreas:** En la región de interés, se detectan los contornos presentes en la imagen binaria y se selecciona automáticamente el de mayor superficie, asumiendo que corresponde al material fino depositado. El área de este contorno es calculada y almacenada para cada cuadro junto con la marca temporal correspondiente, como se muestra en la sección (c) de la Figura 3.5.

4. **Normalización y exportación de datos:** El área medida en cada instante se normaliza respecto al valor inicial (A/A_0), lo que permite comparar la evolución relativa del área en distintas condiciones experimentales. Los resultados se exportan en formato CSV para su posterior análisis y representación gráfica.

5. **Visualización y validación:** Durante el proceso, se generan imágenes que muestran la detección del contorno en tiempo real, facilitando la validación visual del procesamiento automático. Además, se guarda un gráfico con la evolución temporal del área normalizada.

De esta manera, el post-procesamiento implementado provee una herramienta objetiva y reproducible para el seguimiento dinámico del área cubierta por material fino durante los ensayos experimentales. El valor máximo del área normalizada (A/A_0) obtenido para cada experimento constituye un parámetro clave utilizado en el análisis comparativo de los resultados, facilitando la interpretación de los mecanismos de interacción agua-barro bajo condiciones controladas en minería de caving.

3.2. Metodología Computacional

3.2.1. Calibración de parámetros del modelo computacional

En este proyecto, los parámetros del modelo numérico —tanto para las partículas como para el fluido— fueron definidos a partir de los datos experimentales obtenidos en los ensayos físicos previos, así como de simulaciones DEM realizadas por otros investigadores. Esta combinación de referencias permitió seleccionar valores representativos del comportamiento del material granular en condiciones similares a las de minería subterránea por hundimiento.

Con el fin de simplificar el modelo sin comprometer su validez, se utilizaron partículas esféricas. Aunque en el sistema real las partículas presentan formas irregulares, porosidad y cierta rugosidad superficial, se ha demostrado que esta aproximación reduce significativamente los tiempos de cómputo sin afectar de manera relevante las dinámicas generales del sistema.

Las partículas fueron clasificadas en dos grupos principales: material grueso (representado por cuarzo blanco) y material fino (representado por arena de playa). Los tamaños se definieron en 2,0 mm para el cuarzo blanco y 1,5 mm para la arena de playa, buscando simular con fidelidad la granulometría observada en los ensayos físicos.

Tabla 3.2: Propiedades físicas y mecánicas de las partículas utilizadas en el modelo DEM

Propiedad	**Valor**
Densidad (kg/m^3)	2.600
Módulo de Young (MPa)	3,00
Coeficiente de Poisson	0,46
Coeficiente de Restitución	0,30
Coeficiente de Fricción Estático	0,40
Coeficiente de Fricción Dinámico	0,30

La Tabla 3.2 presenta los parámetros utilizados para ambos tipos de partículas. Estos valores fueron seleccionados por su capacidad para reproducir, dentro de márgenes aceptables, el comportamiento mecánico de fragmentos rocosos en condiciones de operación minera. En particular, el módulo de Young fue reducido respecto de su valor real con el fin de facilitar la convergencia numérica, siguiendo criterios establecidos en trabajos anteriores.

Para el fluido, se utilizó agua, la cual fue modelada con las propiedades físicas por defecto de Ansys Fluent, sin modificaciones adicionales. La simulación se acopló al modelo de partículas mediante el enfoque DEM-CFD, permitiendo representar con mayor precisión los fenómenos de interacción sólido-líquido, tales como el arrastre de finos y el fenómeno de *mud rush*.

Asimismo, se realizó una calibración independiente de la malla computacional en Ansys Fluent. Esta consistió en evaluar la velocidad máxima del fluido para diferentes tamaños de celda, hasta identificar una meseta en el gráfico de velocidad en función del número de nodos. A partir de este análisis de convergencia, se definió un tamaño de celda óptimo de 0,005 m, logrando un equilibrio entre precisión y eficiencia computacional.

La calibración de parámetros constituye así una base sólida para el análisis numérico del fenómeno de bombeo de agua-barro en minería subterránea por caving, permitiendo que el modelo computacional reproduzca con alto grado de fidelidad las condiciones observadas en los ensayos experimentales.

3.2.2. Geometría

La geometría utilizada en las simulaciones fue diseñada en el software Discovery Ansys, modelando un volumen macizo de dimensiones 250 mm × 700 mm × 46 mm. Se incorporaron tres puntos de extracción de 30 mm de diámetro, distribuidos entre las bateas. Esta representación constituye una simplificación de la maqueta experimental, adaptada con el objetivo de optimizar los tiempos de cálculo sin comprometer la fidelidad del fenómeno físico a estudiar. Cabe destacar que el método de elementos finitos (FEM), en conjunto con las simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics), implica una elevada demanda computacional; por ello, el uso de una geometría simplificada resulta esencial para asegurar una simulación eficiente y viable desde el punto de vista numérico.

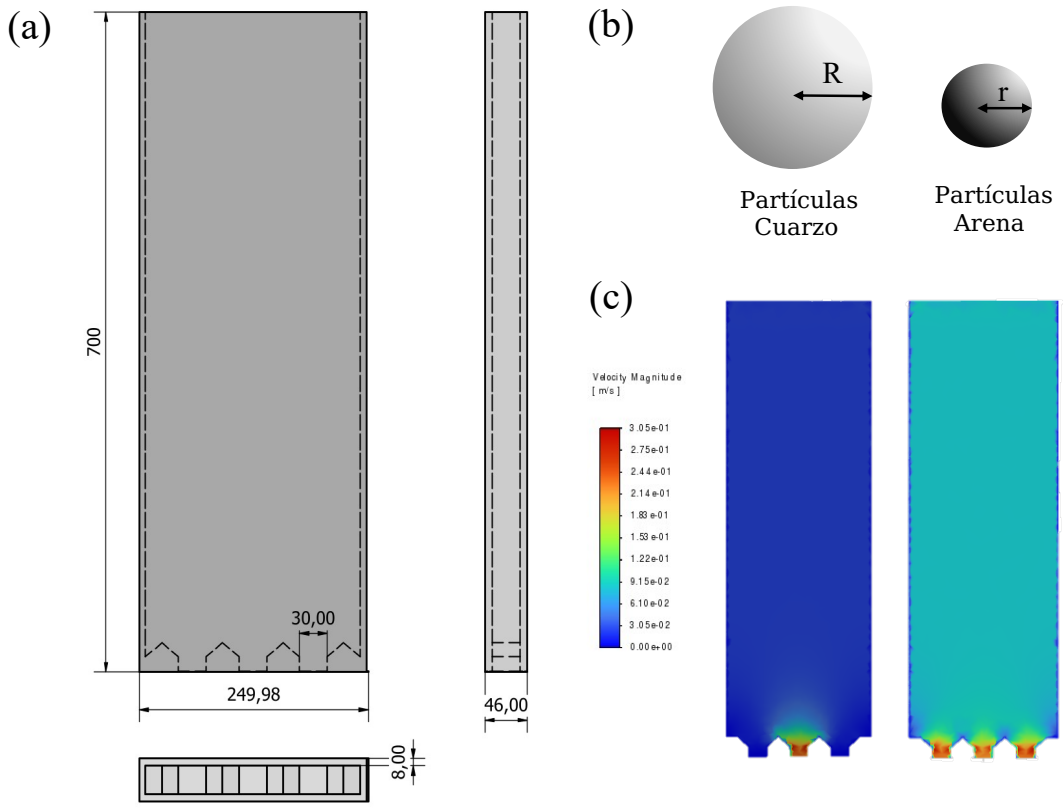


Figura 3.6: (a) Dimensiones de la geometría utilizada en las simulaciones realizadas con Ansys Rocky. (b) Esquema de las partículas empleadas en el proyecto, con radios $r = 0{,}7$ mm y $R = 2{,}8$ mm. (c) Representación del movimiento del fluido dentro de la maqueta, basado en la velocidad calculada en Ansys Fluent: a la derecha, el caso simultáneo; a la izquierda, el caso aislado.

Una vez construida, la geometría se exportó a Ansys Rocky como una superficie 3D (Fig. 3.6,a). Luego, se generaron superficies adicionales que cubren los puntos de extracción. Estas superficies se configuraron con movimiento programado para representar la apertura de los puntos de extracción durante las simulaciones, de acuerdo con el tipo de secuencia de extracción modelada.

3.2.3. Generación de malla y análisis de convergencia

En el entorno de Ansys Fluent, se llevó a cabo un estudio de convergencia de malla con el objetivo de garantizar la precisión y estabilidad numérica de las simulaciones. Para ello, se analizaron distintas resoluciones de malla evaluando tres criterios principales: el número total de elementos, el tiempo de simulación y la velocidad máxima alcanzada por el flujo en la geometría. A medida que se incrementó el refinamiento de la malla, se observó que las diferencias en los resultados disminuían progresivamente hasta alcanzar una meseta, indicando que un mayor refinamiento no aportaba mejoras significativas en la precisión, pero sí aumentaba considerablemente el tiempo de cómputo.

El análisis de convergencia permitió determinar que un tamaño de celda de 0,005 m resultaba óptimo, ya que representaba un buen equilibrio entre exactitud en los resultados y eficiencia computacional. Este tamaño de celda fue utilizado para todos los casos simulados.

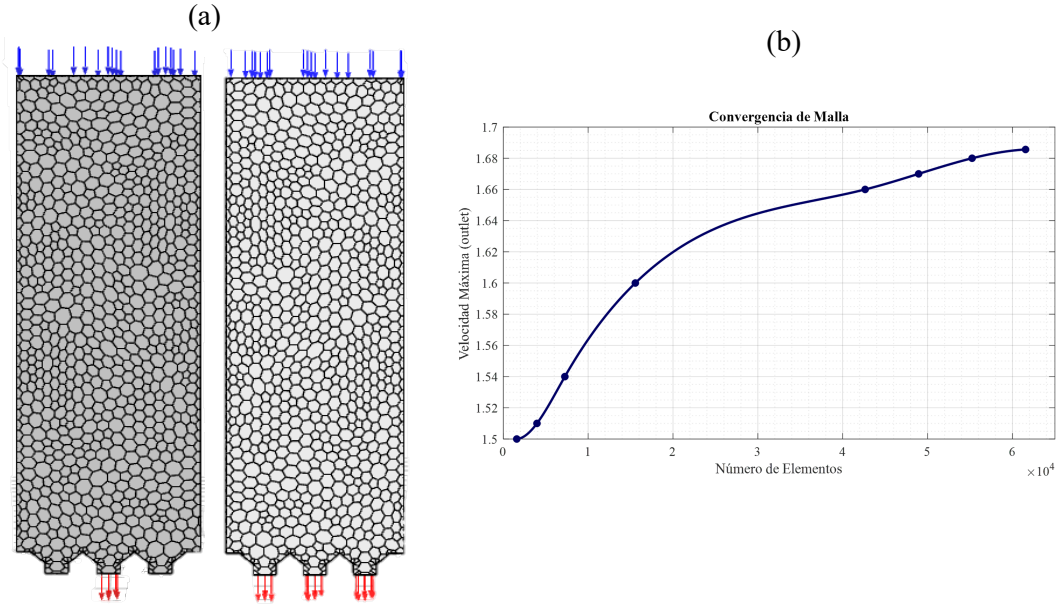


Figura 3.7: (a) Mallas de tipo hexagonal utilizadas en ambos casos, donde las flechas de color azul indican el *inlet* y las de color rojo el *outlet*. (b) Gráfico de convergencia de la malla utilizado para determinar el tamaño óptimo.

Se optó por utilizar una malla estructurada de tipo hexagonal debido a sus ventajas en simulaciones acopladas DEM-CFD. Estudios previos, como los de Fonte et al. (2015), destacan que este tipo de mallado mejora la estabilidad numérica, reduce los errores de interpolación y permite una mejor alineación con la dirección del flujo. Estas características

son especialmente relevantes cuando se acoplan partículas discretas con el campo fluido, como es el caso del fenómeno de bombeo de agua-barro modelado en este trabajo.

Finalmente, para mantener la coherencia con los experimentos físicos realizados, se desarrollaron dos mallas distintas correspondientes a los dos casos de extracción estudiados. Ambas utilizaron el mismo tamaño de celda, asegurando así que las diferencias observadas en los resultados se debieran únicamente al tipo de extracción y no a variaciones en la malla.

3.2.4. Variables de estudio

Para modelar de forma controlada el fenómeno de bombeo de agua-barro en condiciones representativas de minería por caving, se definieron y manipularon experimentalmente cuatro variables principales dentro del entorno simulado:

- **Cantidad de material fino:** Se consideraron tres niveles de contenido de arena de playa fina (500 g, 750 g y 1000 g). Esta variable busca representar distintos grados de fragmentación y presencia de partículas susceptibles a licuación, con el objetivo de analizar su influencia en la movilidad del material y en la generación de flujo repentino (*mud rush*).
- **Ubicación inicial del fluido:** El fluido (agua) se introduce desde tres posiciones estratégicamente distintas dentro de la geometría: adyacente al material fino, alejado de él y desde el centro de la maqueta. Esta variable permite evaluar cómo la interacción espacial entre agua y partículas afecta el comportamiento hidráulico del sistema.
- **Tipo de extracción:** Se simulan dos escenarios de extracción representativos de condiciones operacionales reales:
  - *Extracción aislada:* se abre un único punto de extracción durante 30 segundos, permitiendo observar la evolución localizada del sistema.
  - *Extracción simultánea:* se activan dos puntos de extracción al mismo tiempo durante 15 segundos, emulando una condición de producción más agresiva y sincronizada.
- **Condiciones de humedad:** Se analizan tanto condiciones secas como húmedas. En las simulaciones húmedas, se introduce agua en el sistema, permitiendo su interacción directa con el material fino y posibilitando la reproducción del fenómeno de licuación y arrastre característico del *mud rush*.

Estas variables han sido seleccionadas para permitir un análisis sistemático del sistema bajo diferentes configuraciones operacionales y geotécnicas, facilitando así la identificación de condiciones críticas para la ocurrencia de bombeos de barro.

3.2.5. Configuración y ejecución de simulaciones

Las simulaciones numéricas fueron realizadas utilizando los softwares comerciales Ansys Rocky y Ansys Fluent. Inicialmente, la geometría tridimensional se modeló en Discovery

Ansys, para luego ser exportada a Ansys Rocky, donde se configuraron los puntos de extracción y las condiciones dinámicas de las superficies móviles de acuerdo con el escenario simulado.

En total, se llevaron a cabo 24 simulaciones, abarcando la combinación de las distintas variables anteriormente descritas. La duración de cada simulación varió entre 10 y 20 segundos de tiempo simulado. En el caso de las condiciones húmedas, se implementó un modelo acoplado DEM-CFD, que permite representar con mayor fidelidad la interacción entre las partículas sólidas (material fino) y el fluido (agua).

Para las simulaciones con fluido, se definieron condiciones de frontera del tipo *inlet* en la parte superior de la maqueta y *outlet* en los puntos de extracción. Se adaptaron dichas condiciones según el tipo de extracción (aislada o simultánea), lo cual afectó la dirección y magnitud del flujo.

Adicionalmente, se llevó a cabo una calibración computacional del mallado en Ansys Fluent, evaluando parámetros como la velocidad máxima del fluido y el número de elementos de la malla, con el objetivo de asegurar una relación adecuada entre precisión numérica y tiempo de cálculo. Se utilizó una malla hexagonal con tamaño óptimo de 0,005 m, seleccionada en base a un análisis de convergencia previo.

Las simulaciones fueron ejecutadas en paralelo utilizando 32 núcleos de procesamiento, con tiempos de ejecución que oscilaron entre 24 y 48 horas por caso, dependiendo de la complejidad del escenario.

Finalizadas las simulaciones, se extrajeron datos de masa vs. tiempo y velocidad del fluido en función del tiempo, los cuales fueron post-procesados para su comparación con resultados obtenidos en los experimentos físicos. Esta comparación permitió validar el comportamiento general del modelo y ajustar parámetros relevantes.

El análisis de los resultados permite estudiar fenómenos como la dilución de finos, la velocidad de propagación del material licuado y el comportamiento hidráulico del sistema bajo condiciones críticas. Esta información es clave para comprender los mecanismos físicos del *mud rush* y proponer estrategias de control y prevención.

Resultados y Análisis

4.1. Experimentos

4.1.1 Experimentos secos

En condiciones secas, se efectuaron descargas gravitacionales en un modelo físico bidimensional con apertura de extracción controlada para evaluar la influencia de la posición (Zonas 1 y 2) y la masa de finos (500, 750 y 1000 g) embebida en matriz gruesa. La Figura 4.1 presenta secuencias en $t_0 = 0$ s, $t_1 = 15$ s y $t_2 = 30$ s, evidenciando la iniciación del frente de movimiento y la configuración de la vena de finos, definida como la traza o cuerpo alargado que se forma cuando el material arenoso fino abandona su posición original y es transportado preferentemente hacia la(s) abertura(s) de extracción. Esta vena persiste durante la descarga; su trayectoria queda principalmente controlada por la ubicación inicial de la lente de finos, mientras que su continuidad y la densidad óptica aparente se incrementan con la masa. Estos registros constituyen la línea base en condición seca para contrastar, en secciones posteriores, la respuesta del sistema con incorporación de agua y su relación con el fenómeno de bombeo de agua–barro.

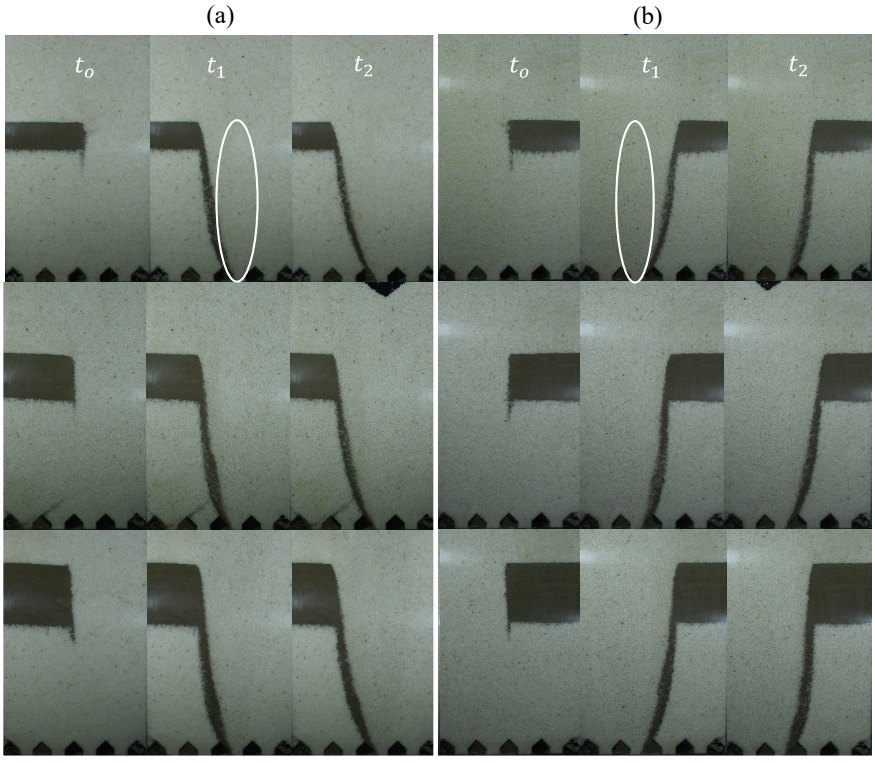


Figura 4.1: Secuencia de imágenes del flujo de material en tres tiempos distintos $t_0 = 0$ s, $t_1 = 15$ s y $t_2 = 30$ s para las diferentes ubicaciones de material fino: (a) Zona 1 y (b) Zona 2. La cantidad de material fino es de 500 g en la primera columna, 750 g en la segunda y 1000 g en la tercera.

La Figura 4.2 compara dos regímenes de extracción. En ambos, el estado inicial es estacionario; en t_1 emerge la vena de finos (elipses) y su traza persiste hasta t_2. Con extracción aislada (panel a) la vena resulta más estrecha y coherente, con recorrido prácticamente rectilíneo entre t_1 y t_2. Con extracción simultánea (panel b) se activa un entorno más amplio de la abertura, generando mayor dispersión lateral en t_1 que tiende a estabilizarse hacia t_2. Estas diferencias geométricas se acentúan a medida que aumenta la masa (750 y 1000 g), manteniéndose la tendencia de mayor continuidad cuando el contenido de finos es más alto. En conjunto, mientras que en la Figura 4.1 el factor dominante es la ubicación de la lente—que controla la trayectoria de la vena—, en la Figura 4.2 el efecto principal proviene del régimen de extracción, que condiciona la concentración del flujo y su dispersión lateral.

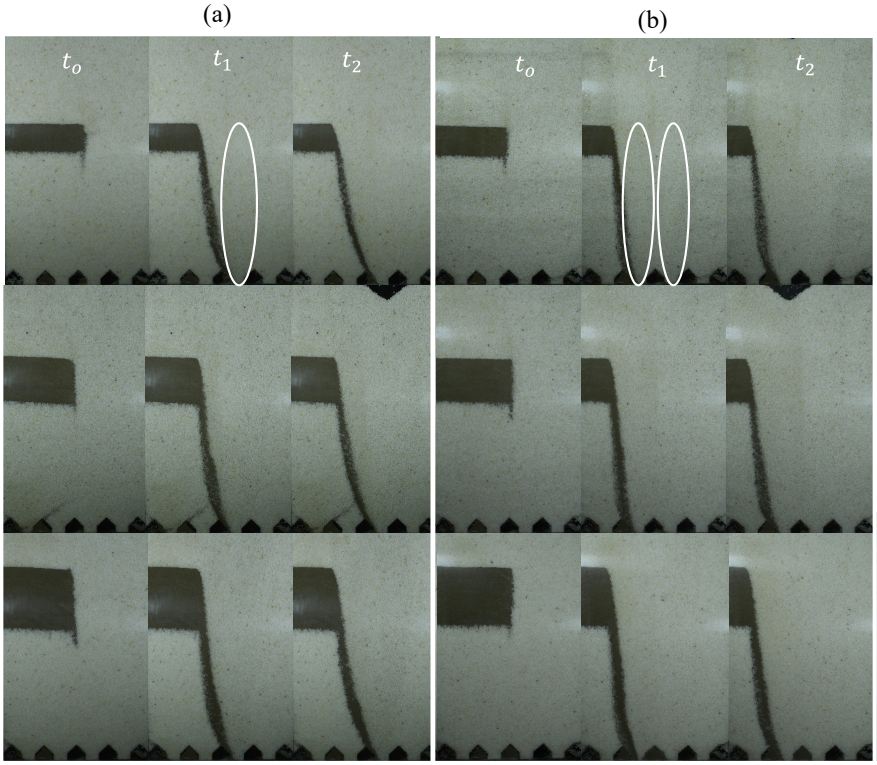


Figura 4.2: Secuencia de imágenes que ilustra el avance del material en tres momentos: inicio, intermedio y final, para dos tipos de extracción: (a) aislada y (b) simultánea. En ambas secuencias, la cantidad de material fino se presenta en orden descendente: 500 g, 750 g y 1000 g.

La Figura 4.3(a) esquematiza la disposición de la lente de finos respecto del material grueso y las dos modalidades de extracción, confirmando la simetría del montaje. El panel (b) cuantifica la dilución final porcentual en función de la masa de finos para ambas modalidades y para ubicaciones laterales opuestas. El comportamiento del gráfico es coherente con las secuencias: (i) la dilución crece de forma monótona al aumentar la masa de finos; (ii) la extracción simultánea produce diluciones mayores que la aislada para una misma masa, con una brecha que se amplía hacia 1000 g; y (iii) las diferencias entre lados (Zona 1 vs. Zona 2) son secundarias respecto del efecto del régimen de extracción. En síntesis, en condiciones

secas la masa de finos potencia la continuidad de la vena y la dilución, el tipo de extracción gobierna su concentración/dispersión y, por tanto, la magnitud de la dilución final, mientras que la posición lateral determina principalmente la trayectoria de la vena.

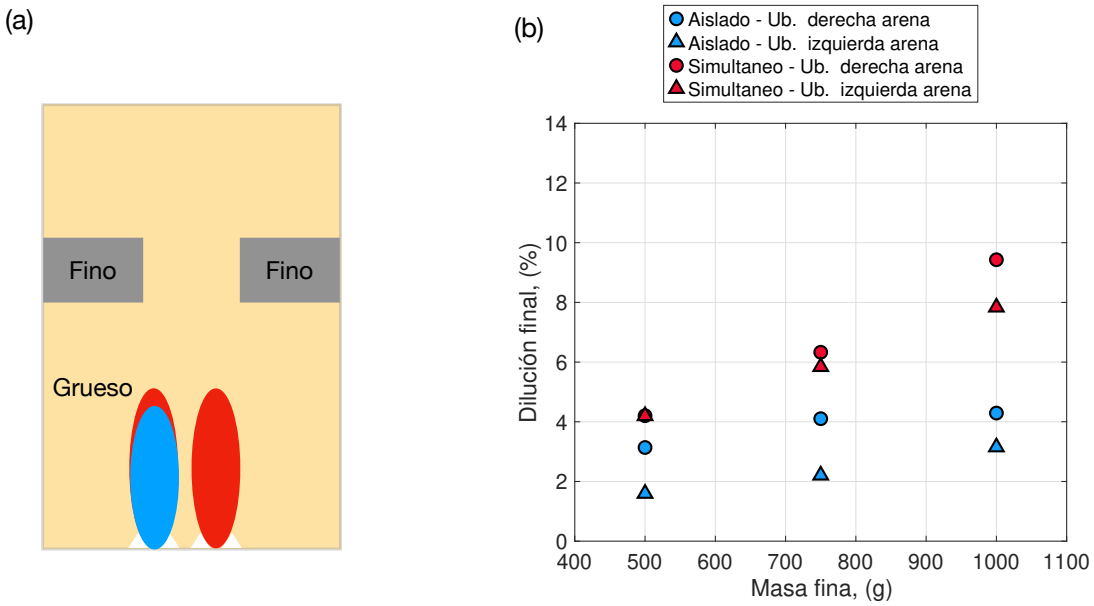


Figura 4.3: (a) Esquema simplificado del montaje experimental y las condiciones evaluadas: material fino (gris), material grueso (amarillo) y condiciones de extracción aislada (celeste) y simultánea (rojo). (b) Dilución final porcentual en función de la masa fina para ambas condiciones de extracción (aislada y simultánea) en las zonas 1 y 2.

La Figura 4.3 resume el arreglo y cuantifica la respuesta en seco. El panel (a) esquematiza la ubicación lateral de la lente de finos dentro de la matriz gruesa y las dos modalidades de extracción (aislada, celeste; simultánea, rojo). El panel (b) muestra la dilución final porcentual en función de la masa de finos para ambos lados y regímenes. Se observan tres patrones: (i) la dilución aumenta al pasar de 500 a 1000 g; (ii) para 750 y 1000 g, la extracción simultánea registra diluciones sistemáticamente mayores que la aislada, con una separación más marcada en 1000 g; y (iii) las diferencias entre las ubicaciones laterales (izquierda/derecha) son secundarias y se superponen dentro de la variabilidad experimental. En 500 g solo se dispone de datos de extracción aislada, con los valores más bajos, en concordancia con las secuencias previas donde venas de finos menos desarrolladas implican menor dilución. En conjunto, el gráfico corrobora que la masa de finos potencia la dilución y que el régimen de extracción controla su magnitud, mientras que la posición lateral condiciona principalmente la trayectoria observada en las imágenes.

4.1.2 Experimentos húmedos

Se analiza la respuesta del sistema al incorporar agua, manteniendo la misma geometría y el protocolo temporal (t_0, t_1, t_2) de la línea base en seco. Conforme a la metodología, se combinan de manera controlada la masa de finos (500, 750 y 1000 g), la ubicación lateral

del fino (Zonas 1 y 2), el régimen de extracción (aislada/simultánea) y la ubicación del agua. El objetivo es cuantificar cómo la presencia y localización del fluido modifican la iniciación, continuidad y dirección de la vena de finos, así como la dilución final, aportando evidencia experimental para la discusión del bombeo de agua–barro en minería de hundimiento.

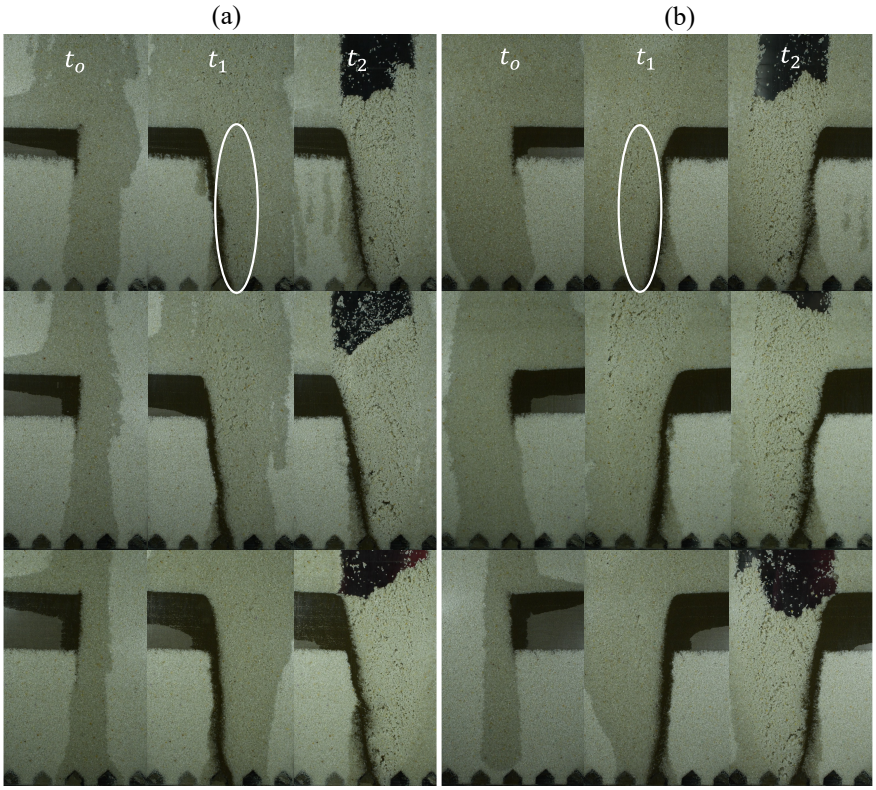


Figura 4.4: Secuencia de imágenes que muestra el flujo de material en tres tiempos $t_0 = 0$ s, $t_1 = 15$ s y $t_2 = 30$ s, correspondientes a dos ubicaciones del material fino. La ubicación del agua se mantuvo fija en la Ubicación 1 (central). La secuencia presenta una extracción aislada: (a) Zona 1 y (b) Zona 2. La cantidad de material fino es de 500 g en la primera columna, 750 g en la segunda y 1000 g en la tercera.

Con el agua en Ubicación 1 (central) y extracción aislada (Figura 4.4), la organización matricial de las secuencias permite discriminar con claridad los efectos de tiempo y masa para cada ubicación del fino. En t_0 ambas zonas exhiben un estado prácticamente estacionario; a partir de t_1 emerge una vena de finos continua, más definida que en los ensayos secos, que se mantiene hasta t_2. La presencia de agua introduce un control hidráulico que se manifiesta en una curvatura sistemática de la trayectoria hacia el eje, atenuando el contraste lateral entre Zona 1 y Zona 2 observado en seco. Este recentramiento se acompaña de un aumento del dominio activo —volumen cualitativamente movilizado—: en t_2 el área de influencia alrededor de la vena se amplía y disminuyen las "zonas sombra". El efecto de masa es consistente por filas: con 500 g la vena aparece y se sostiene, pero con longitud y espesor más acotados; con 750 g aumenta la conectividad y la extensión vertical; y con 1000 g la estructura se vuelve más continua y robusta, con bordes menos difusos y persistencia que abarca t_1–t_2.

Comparativamente entre zonas, las diferencias se reducen a microvariaciones de ruta y sutiles asimetrías en el inicio de la movilización, confirmando que, con agua central, predomina su influencia por sobre la posición lateral del fino. En síntesis, con agua central: (i) disminuye la sensibilidad a la ubicación del fino, (ii) aumentan continuidad y longitud de la vena con la masa, y (iii) las trayectorias convergen hacia la región húmeda, coherentes con una mayor redistribución espacial respecto de la condición seca.

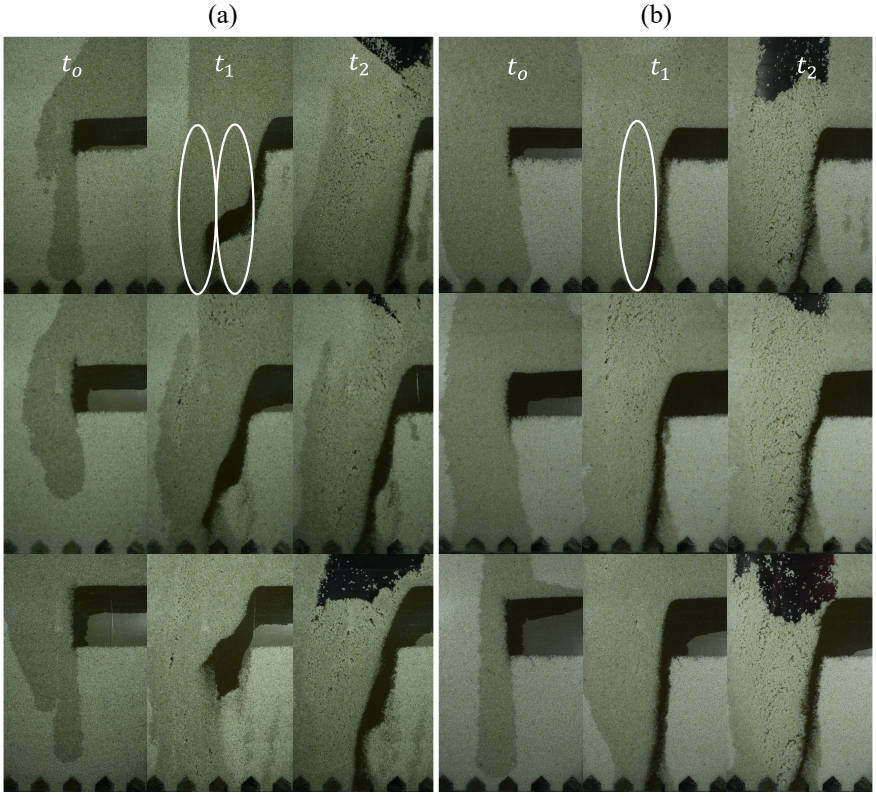


Figura 4.5: Secuencia de imágenes en tres tiempos (inicio, intermedio y final), comparando (a) extracción simultánea y (b) aislada, con agua proveniente de la Ubicación 2 (derecha). La masa de finos se presenta en orden descendente: 500, 750 y 1000 g.

Con el agua en Ubicación 2 (derecha), la comparación entre simultánea y aislada (Figura 4.5) exhibe diferencias de mayor alcance espacial y temporal. En t_0 ambas configuraciones parten de estados comparables; sin embargo, en simultánea la activación en t_1 ocurre antes y abarca un volumen mayor en torno a la(s) abertura(s), con deriva direccional hacia la derecha impuesta por el punto de inyección. Dicha deriva persiste hasta t_2 y se acompaña de incrementos en la anchura aparente de la estructura movilizada, indicio de que el campo de velocidades del fluido favorece trayectorias con mayor dispersión lateral y, por ende, mayor contacto con el material circundante.

En aislada, la respuesta es más confinada: la vena progresa de forma gradual y se concentra en una franja más estrecha, con menor extensión vertical para 500 g y crecimiento a 750–1000 g, sin alcanzar el alcance lateral de simultánea. El aumento de masa actúa como factor de amplificación en ambos regímenes: crece la persistencia entre t_1 y t_2 y disminuyen

gaps locales. No obstante, para 1000 g simultánea presenta un dominio activado claramente mayor, con bordes menos condicionados por confinamiento y mayor desplazamiento hacia el lateral húmedo.

En términos de dilución, estas observaciones cualitativas apuntan a que la combinación "agua lateral + simultánea" favorece una redistribución espacial más extensa que aislada, especialmente a masas intermedias y altas, en concordancia con diluciones superiores bajo simultánea para igual masa.

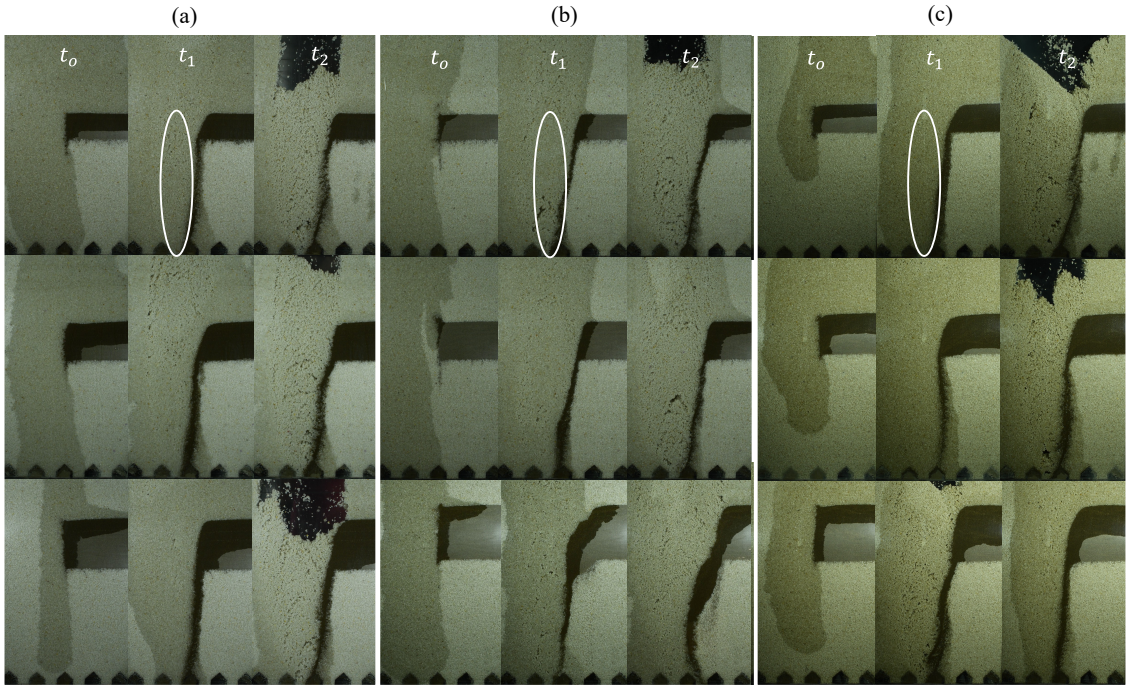


Figura 4.6: Secuencias en tres tiempos (inicio, intermedio y final) con agua en: (a) Ubicación 3 (izquierda), (b) Ubicación 1 (central) y (c) Ubicación 2 (derecha). En todos los casos la extracción es aislada. Las masas de finos son 500, 750 y 1000 g (de izquierda a derecha).

Bajo extracción aislada y variando el punto de inyección (Figura 4.6), el control direccional de la trayectoria recae principalmente en la ubicación del agua. Con Ubicación 3 (panel a), la vena se inclina hacia ese lateral desde t_1, con curvatura más pronunciada en t_2 y regiones de baja movilidad en el lado opuesto, sugiriendo un gradiente hidráulico que favorece la migración asimétrica del fino. Con Ubicación 1 (panel b), la respuesta es más vertical y simétrica: la vena se desarrolla con menor asimetría y el volumen activo se reparte de forma más equitativa a ambos lados del eje. Con Ubicación 2 (panel c), el desvío es hacia la derecha, en patrón especular respecto de (a). En los tres escenarios, el incremento de masa (500 $\rightarrow$ 1000 g) aumenta la continuidad, longitud y espesor aparente de la vena, y reduce zonas de estancamiento adyacentes a su ruta principal. Comparativamente, el agua en posiciones laterales (3 y 2) induce trayectorias más curvadas y asimétricas que la central, donde el contraste lateral tiende a atenuarse. Así, con igual régimen de extracción, la masa gobierna la intensidad de la movilización y la ubicación del agua define el sentido y grado de asimetría respecto de la línea base seca.

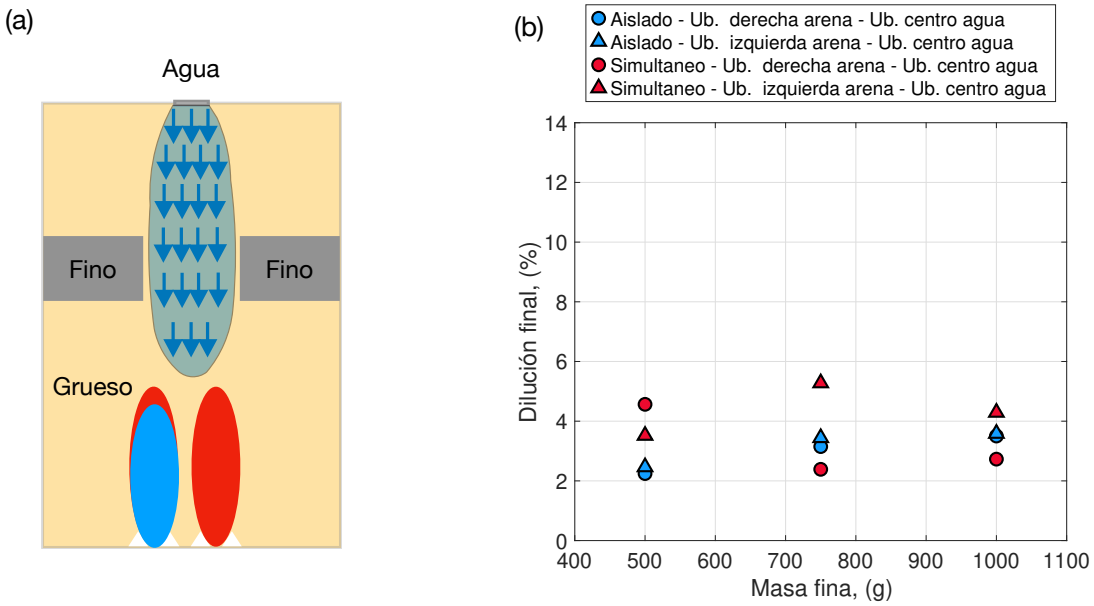


Figura 4.7: (a) Esquema del montaje y condiciones de extracción: finos (gris), gruesos (amarillo), extracción aislada (celeste) y simultánea (rojo), con entrada de agua desde la ubicación central (azul). (b) Dilución final (%) en función de la masa de finos para ambos regímenes (aislada/simultánea) en Zonas 1 y 2, con agua central.

El esquema y la síntesis cuantitativa de la Figura 4.7 respaldan los patrones identificados. El panel (a) confirma la simetría del montaje y la coherencia entre rutas de movilización y condiciones de borde impuestas por localización del agua y régimen. El panel (b) evidencia una relación monótona creciente de la dilución final con la masa de finos, y una separación sistemática entre simultánea y aislada para igual masa, más visible hacia 1000 g, consistente con la ampliación del dominio activado a mayor contenido de finos. Asimismo, las diferencias entre lados (Zona 1 vs. Zona 2) resultan secundarias con agua central, en línea con la reducción del contraste lateral observada en la Figura 4.4. En conjunto, los experimentos húmedos indican que: (i) la incorporación de agua intensifica la movilidad y prolonga la persistencia temporal de la vena; (ii) su ubicación gobierna direccionalidad y asimetría; y (iii) el régimen de extracción modula la extensión espacial de la movilización, siendo ésta mayor bajo simultánea. Estas conclusiones son consistentes con las tendencias de dilución y establecen base para discutir su vínculo con el bombeo de agua–barro.

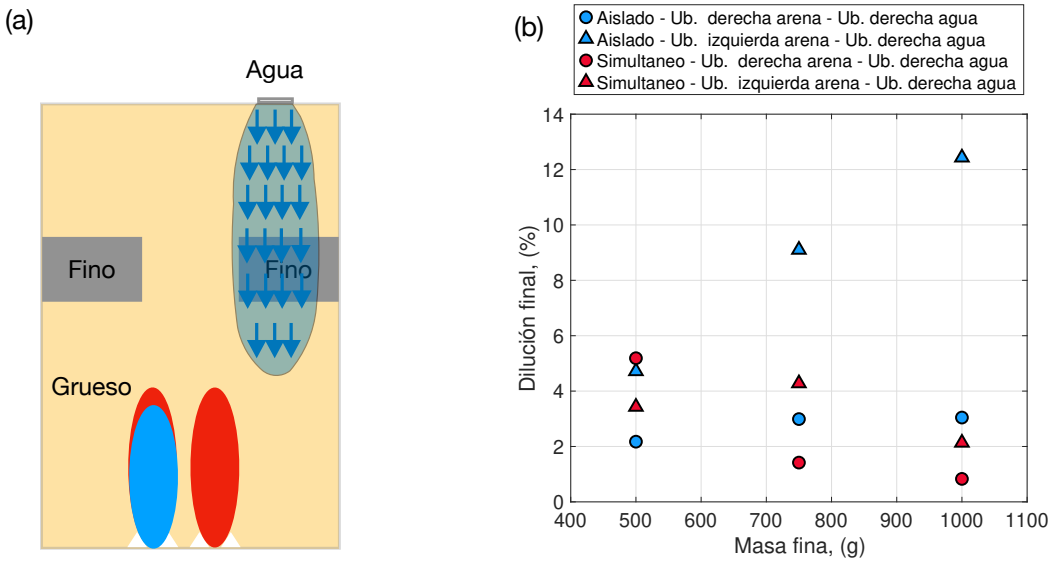


Figura 4.8: (a) Esquema del montaje con agua en lateral derecho. (b) Dilución final (%) en función de la masa de finos para aislada y simultánea en Zonas 1 y 2, con agua introducida desde la derecha.

La Figura 4.8 combina (a) el esquema con inyección lateral derecha y (b) la dilución final (%) según masa de finos (500, 750 y 1000 g), desagregada por régimen (símbolos azules: aislada; rojos: simultánea) y por ubicación lateral del fino (círculos: fino a la derecha; triángulos: fino a la izquierda). Aunque el panel (b) resume el estado final, su lectura coincide con la evolución temporal ($t_0 \to t_1 \to t_2$): la movilización inicia en t_1, se expande el dominio activado y la trayectoria responde al gradiente hidráulico. Primero, se observa una relación monótona creciente dilución–masa: a 500 g los valores son bajos y cercanos; a 750–1000 g la dilución aumenta y se amplía la separación entre series, reflejando venas más continuas y mayor dispersión lateral con más finos. Segundo, para igual masa, la simultánea arroja diluciones sistemáticamente superiores a la aislada; esta jerarquía, ya visible en seco, se intensifica bajo condiciones húmedas por activación más temprana y mayor volumen movilizado alrededor de la(s) abertura(s). Tercero, el arreglo agua–fino introduce una asimetría marcada: cuando el fino parte en el lado opuesto a la inyección (triángulos), la dilución —especialmente bajo simultánea— crece con mayor pendiente y alcanza máximos en 1000 g, coherente con trayectorias que cruzan el dominio hacia la zona húmeda. Por el contrario, con co-localización agua–fino (círculos), la dilución es menor, sobre todo en aislada, sugiriendo trayectorias más confinadas y menor extensión lateral del dominio activado. En comparación con el caso de agua central (Figura 4.7), la simetría hidráulica atenúa el contraste entre lados (círculos y triángulos tienden a agruparse) y reduce la brecha entre regímenes; con inyección lateral derecha, la direccionalidad impuesta magnifica la respuesta bajo simultánea y hace que el patrón opuesto agua–fino produzca las mayores diluciones, especialmente a altas masas. En síntesis, el panel (b) demuestra que (i) la dilución final aumenta con la masa de finos; (ii) para igual masa, simultánea > aislada por mayor dominio activado y dispersión lateral; y (iii)

la ubicación del agua gobierna direccionalidad y asimetría: el escenario “agua lateral derecha + fino opuesto” maximiza la mezcla efectiva, mientras la co-localización la minimiza.

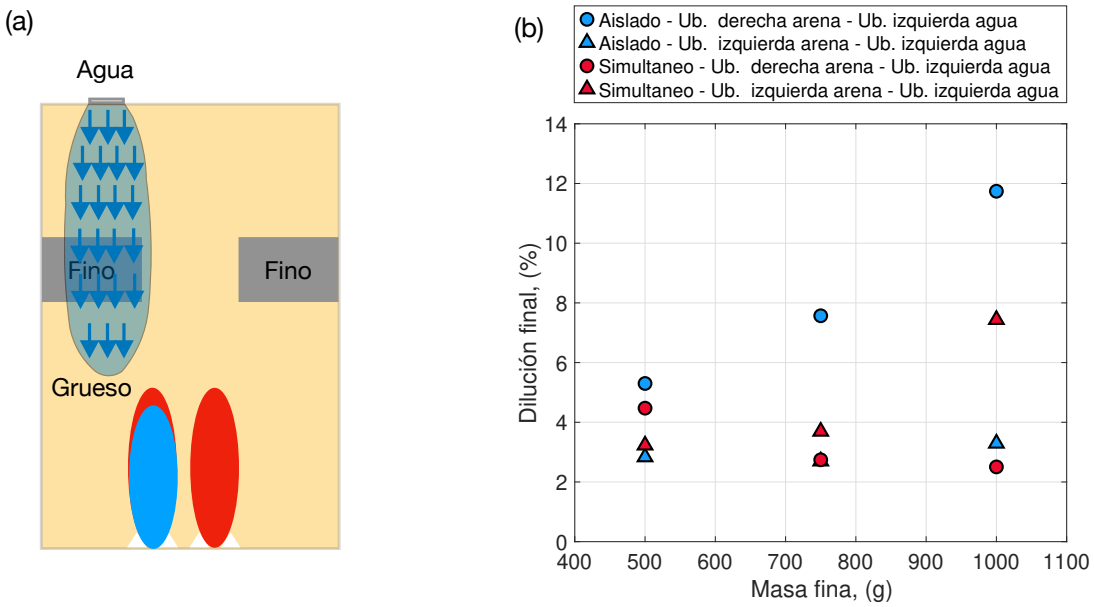


Figura 4.9: (a) Esquema del montaje con agua en lateral izquierdo. (b) Dilución final (%) en función de la masa de finos para aislada y simultánea en Zonas 1 y 2, con agua introducida desde la izquierda.

La Figura 4.9 reúne (a) el diagrama con inyección lateral izquierda y (b) la respuesta integrada al final del ciclo en términos de dilución (%) frente a masa de finos (500, 750 y 1000 g). En (b) los puntos se diferencian por régimen (aislada/simultánea) y por posición inicial de la lente de finos (izquierda/derecha), dando hasta cuatro combinaciones por masa con el agua fija a la izquierda. Aunque el gráfico sintetiza el estado final, su lectura se alinea con las secuencias húmedas: la movilización emerge en t_1, la vena persiste en t_2 y la trayectoria se pliega al lado húmedo, ampliando dominio activado y dispersión lateral según configuración.

En conjunto, la dilución aumenta con la masa de finos, con pendientes que dependen del arreglo “agua–fino” y del régimen. Cuando la lente parte en el lado contrario al de la inyección (agua a la izquierda, fino a la derecha), la extracción aislada presenta el crecimiento más marcado con la masa y alcanza máximos a 1000 g; ello es compatible con trayectorias que cruzan el dominio para converger al lateral húmedo, incrementando contacto transversal y mezcla efectiva. Para esa misma disposición contralateral, la simultánea se mantiene en niveles moderados y varía menos con la masa, lo que sugiere que, aunque el volumen movilizado es amplio, la mezcla adicional hacia el final del ciclo no escala al mismo ritmo que en aislada. En el caso co-localizado (agua y fino a la izquierda), la aislada muestra valores bajos y poco sensibles al aumento de masa —trayectorias más alineadas con la zona húmeda y menor redistribución transversal—, mientras que la simultánea evidencia un incremento tardío a 1000 g, coherente con el ensanchamiento del dominio activado cuando el contenido de finos es elevado.

Respecto de agua central (Figura 4.7), donde la simetría hidráulica atenúa contrastes entre lados y estrecha la brecha entre regímenes, el caso lateral izquierdo exhibe mayor sensibilidad al arreglo agua–fino: la diferencia entre configuraciones contralaterales y co-localizadas se acentúa con la masa, y la jerarquía entre regímenes no es uniforme —aislada puede superar a simultánea cuando el fino está opuesto y la masa es alta, mientras que simultánea toma ventaja con co-localización y 1000 g. En relación con el caso lateral derecho (Figura 4.8), la tendencia es el espejo direccional esperado —la vena deriva hacia la inyección—, aunque no idéntica en magnitud: aquí los máximos recaen en aislada bajo configuración contralateral, destacando que la eficiencia de mezcla final depende tanto de la direccionalidad impuesta por el agua como de cómo cada régimen traduce esa direccionalidad en longitud efectiva de trayectoria y dispersión lateral a lo largo del ciclo.

En síntesis, la Figura 4.9 confirma tres ideas clave: (i) la masa de finos controla el nivel de dilución, con incrementos más notorios cuando el sistema exige recorridos transversales; (ii) la ubicación del agua gobierna asimetría y sentido de la movilización (contralateral > co-localizada en mezcla efectiva); y (iii) el régimen de extracción modula dicha respuesta de forma no lineal —simultánea amplía el dominio activado, mientras aislada puede resultar más eficiente en mezcla cuando la trayectoria debe cruzar el dominio—, todo ello consistente con las observaciones temporales previas y con la línea base en seco.

4.1.3 Secos vs. húmedos

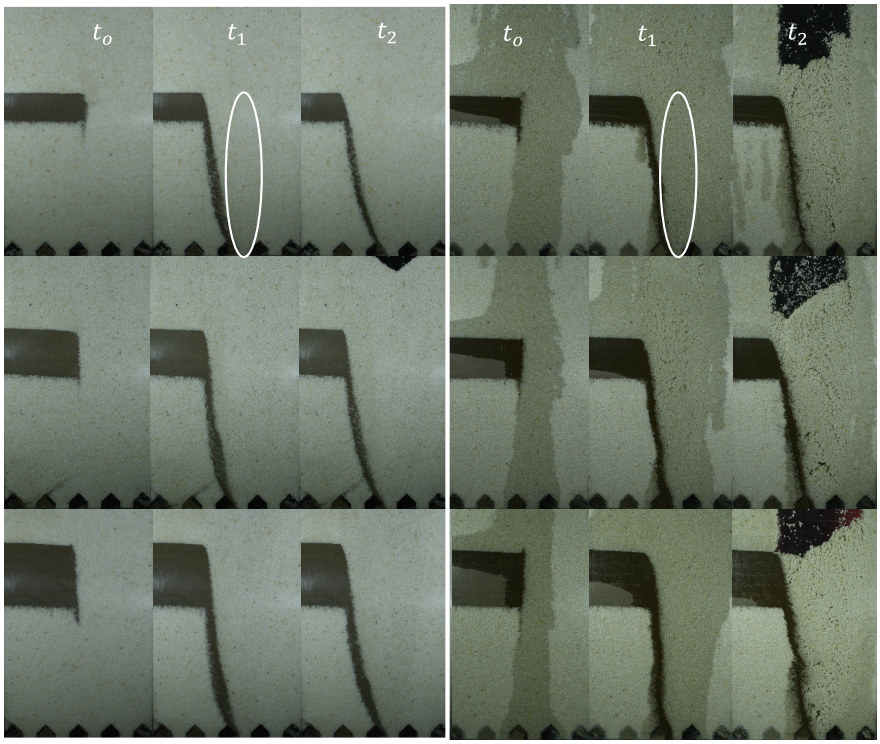


Figura 4.10: Secuencia de imágenes que muestra el avance del material en tres momentos distintos: al inicio, en el intermedio y al final, comparando el caso seco con el caso húmedo. (a) Caso Seco, con extracción aislada. (b) Caso Húmedo, con extracción aislada y agua proveniente de la Ubicación 1 (central). La cantidad de material fino se presenta en orden descendente: 500 g, 750 g y 1000 g

La Figura 4.10 contrapone el comportamiento en seco y húmedo bajo extracción aislada, con geometría y protocolo temporal (t_0, t_1, t_2) constantes para 500, 750 y 1000 g. El contraste permite evaluar cómo la inyección central de agua modifica la iniciación, continuidad y trayectoria de la vena de finos, y cómo se expande el dominio activado respecto de la línea base en seco, en el marco del objetivo de esta tesis sobre mezcla y dilución vinculadas al bombeo agua–barro.

En t_0 ambas series son comparables. A partir de t_1 emergen diferencias claras: en seco, la vena se inicia segmentada, con bordes difusos y estrechamientos locales; en húmedo, la iniciación es más temprana y definida, y la traza se mantiene conectada hasta la salida. En t_2, la condición húmeda conserva continuidad mientras en seco persisten gaps. Este patrón es consistente con un control hidráulico que favorece la reorganización de los finos y, por ende, una mayor estabilidad temporal de la vena (interpretación cualitativa).

La trayectoria también cambia: en seco, la vena sigue principalmente el gradiente gravitacional y la geometría de la abertura; en húmedo, la inyección central impone un recentrado de la traza hacia el eje y reduce la sensibilidad a heterogeneidades laterales. Como resultado, el contorno movilizado en t_2 es más ancho y uniforme y las zonas de baja movilidad adyacentes

disminuyen, evidenciando un dominio activado mayor en húmedo.

El efecto de la masa de finos (500 → 1000 g) intensifica estas diferencias: en seco, la mayor masa incrementa la longitud y levemente el espesor de la vena, sin eliminar por completo las discontinuidades; en húmedo, el aumento es sistemático en conectividad, extensión vertical y espesor aparente, con bordes más definidos y mínima presencia de gaps ya desde 750 g, acentuándose a 1000 g. En suma, el agua amplifica el efecto de la masa, traduciéndolo no solo en longitud sino en continuidad y participación lateral del entorno.

Estas observaciones cualitativas concuerdan con las tendencias de dilución reportadas anteriormente: la iniciación temprana y persistencia de la vena en húmedo aumentan la longitud efectiva de trayectoria y, junto con el recentrado y la dispersión lateral, amplían el dominio activado. Por ello, a igualdad de masa y régimen, la dilución final es típicamente superior en húmedo, reforzando la idea de que el agua no solo acelera la movilización, sino que modula su direccionalidad y eficiencia de mezcla, aspecto central para interpretar el fenómeno de bombeo agua–barro.

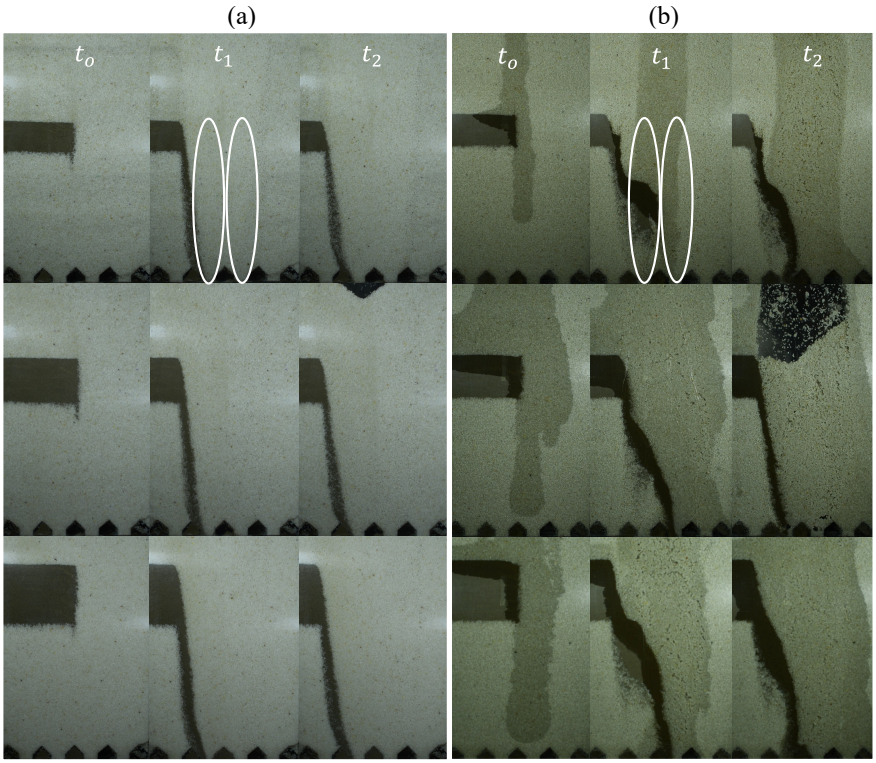


Figura 4.11: Secuencia de imágenes que muestra el avance del material en tres momentos distintos: al inicio, en el intermedio y al final, comparando el caso seco con el caso húmedo. (a) Caso Seco, con extracción simultánea. (b) Caso Húmedo, con extracción simultánea y agua proveniente de la Ubicación 1 (central). La cantidad de material fino se presenta en orden descendente: 500 g, 750 g y 1000 g

La Figura 4.11 presenta la comparación en extracción simultánea con agua central. Desde t_1, las dos aberturas activan el material a ambos lados, pero la morfología diverge: en seco (panel a) suelen formarse dos venas semindependientes con segmentaciones locales y un sector

central de menor participación; en húmedo (panel b) se observa coalescencia temprana en una banda central de mayor espesor aparente, que persiste continua en t_2, a diferencia de los estrechamientos que permanecen en seco. La curvatura de las trazas hacia el centro es más pronunciada y simétrica en húmedo, lo que ensancha el contorno movilizado y aumenta el contacto transversal con el material adyacente.

En términos de dominio activado, en seco persisten zonas de baja movilidad entre y a los flancos de las venas (notorias a 500 g y aún visibles a 750 g); a 1000 g el volumen movilizado crece pero con heterogeneidad remanente. En húmedo, el halo alrededor de la banda central es más amplio y homogéneo desde t_1, y en t_2 el volumen implicado supera claramente al de la condición seca, con menos zonas sombra. El aumento de masa (500 $\rightarrow$ 1000 g) refuerza este patrón: en seco se gana longitud y algo de espesor; en húmedo, ya a 750 g hay conectividad elevada y, a 1000 g, robustez y persistencia a lo largo de t_1–t_2, con mínimos gaps. Morfológicamente, el agua no solo acelera la activación, sino que reconfigura la geometría del transporte hacia trayectorias convergentes y mezcla más efectiva.

La coherencia con los resultados de dilución es directa: con agua central y régimen simultáneo se combinan iniciación más temprana, coalescencia y ensanchamiento del dominio, aumentando la longitud efectiva de trayectoria y el contacto transversal; por ello, a igual masa, la dilución final supera a la de la condición seca. Además, la inyección central atenúa el contraste lateral, haciendo al sistema menos sensible a asimetrías iniciales y más eficiente en redistribuir material hacia el eje.

En conjunto, al pasar de seco a húmedo con agua central, tanto en extracción aislada como simultánea se observa activación más temprana y continua, recentrado de la trayectoria, engrosamiento de la vena y expansión del dominio activado, efectos que se intensifican con la masa de finos. Estos resultados sustentan la interpretación de que la presencia de agua potencia la mezcla y la dilución respecto de la línea base en seco, aportando evidencia clave para comprender el vínculo con el bombeo de agua–barro en minería de caving.

4.1.4 Análisis Estadístico

En esta subsección se presenta una evaluación estadística destinada a otorgar sustento cuantitativo a las observaciones cualitativas previamente descritas. Para ello, se replicó un conjunto de ensayos bajo una misma configuración operativa y se caracterizó la variabilidad temporal de la respuesta mediante barras de error en instantes de control. La métrica analizada corresponde a la dilución adimensional A/A_0 en función del tiempo t_s, obtenida mediante análisis de imágenes (implementado en Python) a partir de la evolución del área normalizada asociada a la presencia de finos en el plano de observación. Este procedimiento—no utilizado en secciones anteriores—permite evaluar la repetibilidad de la señal y respaldar, con evidencia cuantitativa, la interpretación física del proceso: iniciación de la vena de finos, expansión del dominio activado y decaimiento posterior.

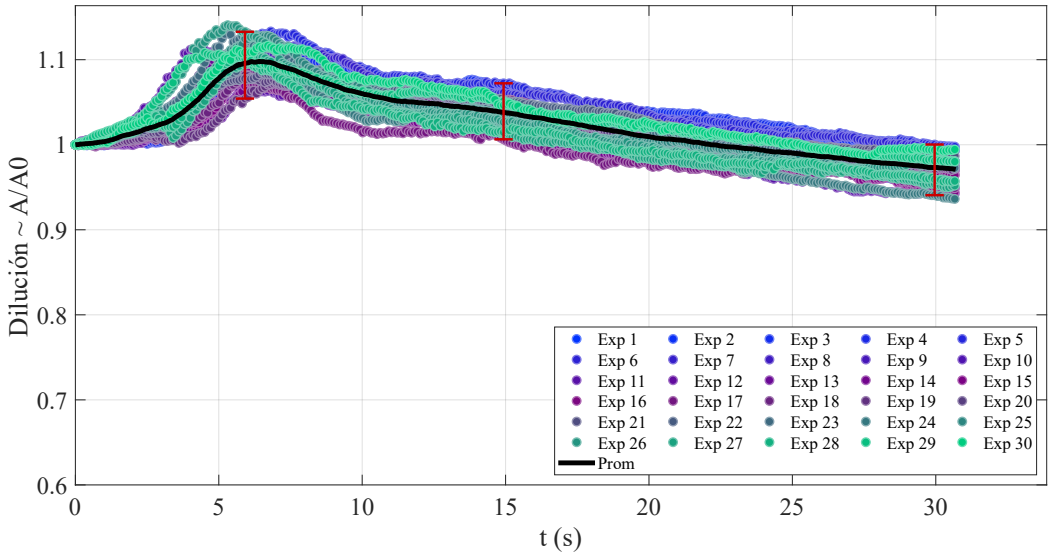


Figura 4.12: Condición seca ($n = 30$), con repetición de una misma configuración experimental: Zona 2, 500 g de finos y extracción aislada. Evolución temporal de la dilución adimensional A/A_0 en función del tiempo t_s (s). Cada color corresponde a un experimento individual; la línea negra muestra el promedio suavizado del conjunto. Se incluyen tres barras de error (± error relativo promedio sobre los 30 ensayos): en $t_s = 5$ s, 4 %; en $t_s = 15$ s, 3 %; y en $t_s = 30$ s, 3 %. El conjunto exhibe un pico temprano seguido de un decaimiento posterior.

La Figura 4.12 corresponde a la condición seca ($n = 30$), con repetición de una misma configuración: Zona 2, 500 g de finos y extracción aislada. Cada traza de color representa un experimento individual, mientras que la curva negra muestra el promedio suavizado del conjunto. Se incorporan tres barras de error (± error relativo promedio sobre los 30 ensayos) en tiempos representativos del ciclo: a $t_s = 5$ s el error es **4 %**, a $t_s = 15$ s es **3 %** y a $t_s = 30$ s es **3 %**. La baja magnitud de estos errores (todas las marcas $< 5\,\%$) indica congruencia interna de las mediciones y uniformidad del comportamiento en condición seca. En términos morfológicos, el conjunto exhibe un pico temprano—coherente con la iniciación y crecimiento rápido de la vena de finos—seguido de un decaimiento progresivo, que refleja la redistribución del material y la reducción del contraste óptico conforme avanza la extracción.

La envolvente de las 30 curvas alrededor del promedio es estrecha y prácticamente paralela al descenso de la señal a partir del máximo, lo que sugiere que la cinemática de la vena—su longitud efectiva, espesor aparente y trayectoria—es estable frente a pequeñas variaciones experimentales cuando se mantiene la misma condición operativa (ubicación lateral, masa y tipo de extracción). Ello es consistente con lo observado en las secuencias de imágenes en seco: bajo extracción aislada la movilización de finos es preferentemente canalizada, con un patrón temporal reproducible que no depende de fluctuaciones menores del montaje. La cuantificación mediante $A/A_0(t_s)$ confirma, por tanto, que el dominio activado crece de forma temprana hasta un máximo y luego decrece de manera casi monótona, con variabilidad moderada y controlada.

Desde la perspectiva metrológica, el uso de marcas de error en instantes fijos permite verificar la estabilidad del procesamiento de imágenes y descartar sesgos sistemáticos: (i) en

el régimen transitorio inicial ($t_s = 5$ s) el 4 % refleja el mayor dinamismo del frente, (ii) en el régimen intermedio ($t_s = 15$ s) el 3 % confirma que la respuesta se mantiene coherente entre repeticiones, y (iii) hacia el cierre del ciclo ($t_s = 30$ s) el 3 % indica que el decaimiento es igualmente consistente. En conjunto, estas tres referencias temporales validan que la señal promedio es representativa del conjunto de ensayos y que las conclusiones extraídas de la curva negra no están dominadas por casos atípicos.

En suma, la evidencia de la Figura 4.12 demuestra que, en condición seca y extracción aislada, el sistema presenta alta repetibilidad: la respuesta promedio resume fielmente el comportamiento individual y los errores relativos promedios (4 % a 5 s; 3 % a 15 s; 3 % a 30 s) se mantienen por debajo del umbral del 5 %. Este resultado refuerza la línea base en seco y proporciona un punto de comparación sólido para la sección siguiente, en la que se presentarán las curvas bajo condición húmeda—con menor número de repeticiones y mayor dispersión—y se analizará cómo la presencia de agua modifica la cinemática de la vena de finos y la extensión del dominio activado.

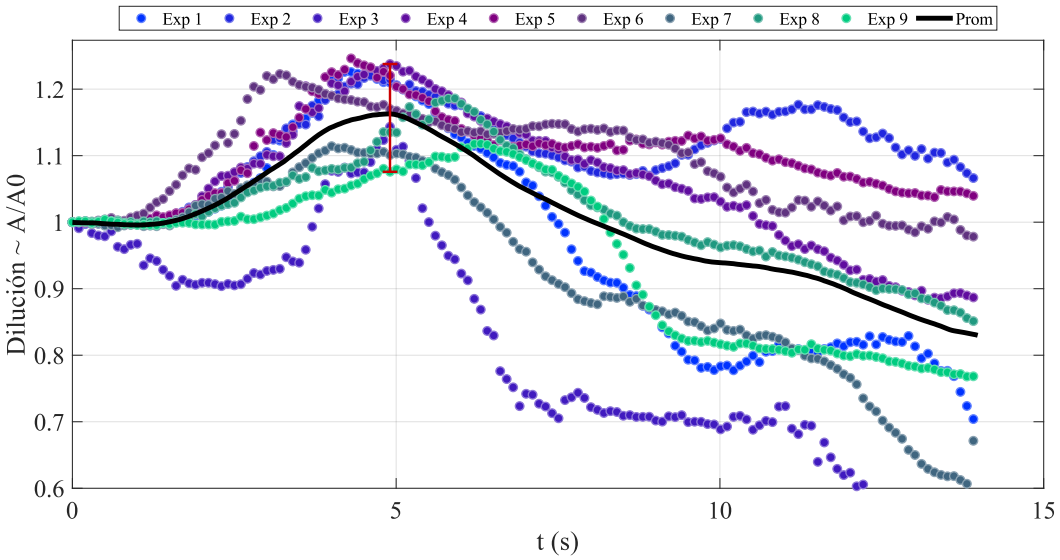


Figura 4.13: Condición húmeda ($n = 9$) para la configuración: Zona 1, 500 g de finos, ingreso de agua por la Ubicación 3 (lateral izquierdo) y extracción simultánea. Dilución adimensional A/A_0 en función del tiempo t_s (s). La curva negra corresponde al promedio suavizado global. Se incluye una única barra de error (± error relativo promedio) en $t_s = 5$ s, de 8 %. Las trayectorias presentan reflejan un carácter anisotrópico observado en esta condición.

En esta subsección se reporta el análisis estadístico de la condición húmeda con el fin de complementar las observaciones cualitativas previas y contrastarlas con los resultados en seco. La respuesta considerada es la dilución adimensional A/A_0 en función del tiempo t_s, obtenida mediante el mismo procedimiento de análisis de imágenes descrito anteriormente. A diferencia del caso seco—en el que se evidenció uniformidad y baja dispersión entre repeticiones—la incorporación de agua introduce variabilidad adicional asociada al campo hidráulico y a su acoplamiento con el esqueleto granular, lo que se traduce en trayectorias menos consistentes entre ensayos.

La Figura 4.13 corresponde a la configuración húmeda con $n = 9$ repeticiones: Zona 1, 500 g de finos, ingreso de agua por la Ubicación 3 (lateral izquierdo) y extracción simultánea. Cada serie de color representa un experimento individual y la curva negra muestra el promedio suavizado del conjunto. Se incluye una única barra de error ($\pm$ error relativo promedio) en $t_s = 5$ s de **8 %**. Este instante fue seleccionado por corresponder a la fase más uniforme del ciclo, de modo de disponer de una referencia de variabilidad representativa de la tendencia central. Aun así, la magnitud del error evidencia que la dispersión es elevada respecto del caso seco, por lo que el promedio debe interpretarse con cautela.

El abanico de trayectorias exhibe un carácter anisotrópico: bajo ingreso lateral y extracción simultánea se observan respuestas que divergen entre sí, reflejando que pequeñas diferencias locales en la organización del flujo pueden amplificarse y generar patrones distintos de mezcla. En términos morfológicos, la señal $A/A_0(t_s)$ conserva el esquema general descrito para el sistema (incremento inicial asociado a la iniciación de la vena de finos y crecimiento del dominio activado, seguido de un decaimiento), pero la amplitud y el ritmo de evolución varían notablemente entre repeticiones. Esta variabilidad explica la separación visible entre conjuntos de curvas y la dificultad para delimitar una tendencia robusta más allá de la ofrecida por el promedio suavizado.

La comparación con el caso seco pone de manifiesto dos diferencias clave: (i) la extracción simultánea en presencia de agua favorece activaciones tempranas pero también incrementa la dispersión transversal, y (ii) la variabilidad temporal es sustancialmente mayor, como lo sugiere el **8 %** de error relativo en $t_s = 5$ s frente a los errores $\leq 4\,\%$ reportados en seco. En consecuencia, la lectura de la curva promedio debe considerarse como indicador de tendencia general y no como representación de un comportamiento típico de cada repetición.

En síntesis, la Figura 4.13 confirma que, bajo condición húmeda con ingreso lateral y extracción simultánea, la respuesta del sistema es marcadamente más dispersa y anisotrópica que en seco. Esta evidencia motiva el paso a la sección de simulaciones computacionales, donde el acople numérico permite aislar el efecto del campo de velocidades del fluido y explorar de forma controlada cómo la direccionalidad de ingreso y el régimen de extracción modulan la formación y continuidad de la vena de finos.

4.2. Simulaciones computacionales

La simulación computacional mediante métodos numéricos como el *Discrete Element Method* (DEM) permite estudiar el comportamiento de las partículas bajo condiciones controladas, complementando los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio. En esta sección, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas con Ansys Rocky, las cuales replican las condiciones experimentales pero en un entorno virtual. El objetivo de estas simulaciones es analizar cómo la dinámica de las partículas, específicamente la formación y el movimiento de las venas de finos, se ve afectada por diferentes variables, tales como la masa de los finos y su ubicación inicial. Los resultados de las simulaciones secas proporcionan la línea base para contrastar con las simulaciones realizadas bajo condiciones húmedas, que se abordarán en una sección posterior.

4.2.1 Simulaciones secas (*DEM*)

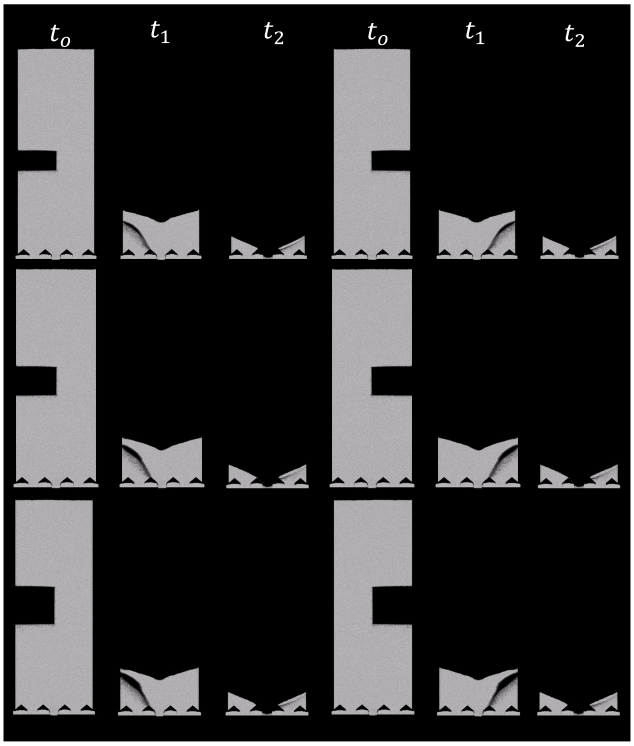


Figura 4.14: Evolución temporal de las simulaciones en caso seco para los tiempos $t_0 = 0s$, $t_1 = 15s$ y $t_2 = 30s$. Se ilustran las distribuciones de finos en dos ubicaciones: (a) Zona 1 y (b) Zona 2. En orden descendente, se muestran resultados para tres masas iniciales de finos: 500 g, 750 g y 1000 g.

En la Figura 4.14 se presenta la evolución temporal de las simulaciones en condiciones secas, correspondientes a tres momentos específicos: $t_0 = 0s$, $t_1 = 15s$, y $t_2 = 30s$. Se comparan las distribuciones de finos en dos ubicaciones diferentes, Zona 1 y Zona 2, para tres masas iniciales de finos: 500 g, 750 g y 1000 g.

Desde un análisis cualitativo, se observa que, independientemente de la ubicación de los finos, no existen variaciones sustanciales en la forma de movilización ni en la cantidad de material movilizado entre las dos zonas. A lo largo de los tres tiempos, se mantiene un patrón similar de movimiento de los finos, sin importar si están ubicados en la Zona 1 o en la Zona 2. En t_0, el material no muestra desplazamiento significativo. Sin embargo, al llegar a t_1 y t_2, los finos comienzan a movilizarse y se puede observar que el comportamiento de la movilización es prácticamente idéntico en ambas zonas. La forma de la vena de finos, que representa el patrón de desplazamiento del material, se mantiene constante entre las ubicaciones. Este comportamiento es consistente a través de las diferentes masas de finos, sugiriendo que, bajo condiciones secas y en régimen de extracción aislada, la ubicación inicial del material no tiene un impacto significativo en la cantidad ni en la forma de movilización.

El análisis indica que la ubicación lateral del fino, ya sea en la Zona 1 o en la Zona 2, no influye considerablemente en el comportamiento del material ni en la cantidad de material movilizado. Este patrón se mantuvo constante para las distintas masas de finos (500 g, 750 g y 1000 g), lo que sugiere que, en el régimen de extracción aislada y bajo condiciones secas, la ubicación inicial del material no afecta notablemente su movilización.

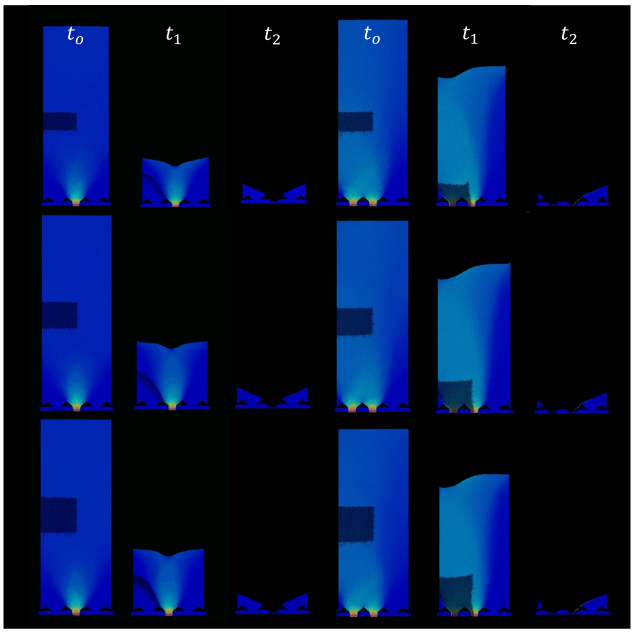


Figura 4.15: Comparación de la velocidad transicional del sistema de partículas durante la extracción en condiciones secas, evaluada en tres momentos representativos del proceso: t_0 (inicial), t_1 (intermedio) y t_2 (final). Se consideran tres masas iniciales descendentes de finos (500 g, 750 g y 1000 g), todas localizadas en la Zona 1. Se presentan dos configuraciones de secuencia de extracción: (a) extracción aislada y (b) extracción simultánea.

En la Figura 4.15 se muestra la comparación de la velocidad transicional del sistema de partículas durante la extracción en condiciones secas, observada en tres tiempos: t_0, t_1 y t_2. Los resultados presentados corresponden a tres masas iniciales de finos (500 g, 750 g y 1000 g) ubicadas todas en la Zona 1. La imagen ilustra cómo las partículas finas y gruesas se desplazan en dos tipos de extracción: aislada (panel a) y simultánea (panel b).

En la comparación de ambos regímenes de extracción, se observa que, en el caso de la extracción simultánea, el movimiento de los finos es más rápido. Esto se debe a la presencia de dos puntos de extracción abiertos, lo que favorece una mayor movilización de material en comparación con la extracción aislada, donde solo se activa un punto. Este patrón es evidente en los tres tiempos (t_0, t_1, t_2), especialmente en t_1, donde se capturó un momento intermedio en el que el movimiento de las partículas finas es más pronunciado en la extracción simultánea. La interacción entre las elipses de movimiento de las partículas en este escenario se observa con mayor frecuencia, lo que indica un mayor contacto entre las partículas y, por ende, una redistribución más rápida del material. Las elipses de movimiento son una representación visual del desplazamiento de las partículas, donde el tamaño y la forma de cada elipse indican la velocidad de desplazamiento y el grado de interacción entre las partículas. En la extracción simultánea, las elipses son más amplias y dispersas, lo que indica un movimiento más rápido y una mayor interacción entre las partículas, a diferencia de las elipses más pequeñas y concentradas observadas en la extracción aislada.

En el caso de la extracción aislada, el movimiento de los finos es más lento y está más restringido a un solo punto de extracción. En los tiempos t_1 y t_2, se ve que las elipses de movimiento de las partículas no interactúan tanto entre sí como en el caso simultáneo, lo que da lugar a un patrón de movimiento más limitado y concentrado. En este caso, las elipses son más pequeñas, lo que refleja un movimiento menos disperso y más controlado.

Los resultados obtenidos en las simulaciones secas proporcionan información relevante sobre el comportamiento de los finos en función de la ubicación y el tipo de extracción. En cuanto a la ubicación de los finos, se observó que, bajo condiciones secas, la ubicación lateral en la Zona 1 o Zona 2 no tiene un impacto significativo en la cantidad de material movilizado ni en la formación de la vena de finos. Este patrón se mantuvo constante para las distintas masas de finos (500 g, 750 g y 1000 g), sugiriendo que, en el régimen de extracción aislada, la ubicación inicial de los finos no afecta notablemente su movilización.

Por otro lado, los resultados de la comparación entre los regímenes de extracción aislada y simultánea mostraron que, en la extracción simultánea, el movimiento de los finos fue más rápido y disperso. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de dos puntos de extracción abiertos, lo que favorece una mayor interacción entre las partículas y una redistribución más rápida del material. Las elipses de movimiento de las partículas fueron más amplias y se expandieron lateralmente en el caso de la extracción simultánea, mientras que, en la extracción aislada, el movimiento fue más restringido y concentrado en un solo punto de extracción.

La extracción simultánea, al movilizar más rápidamente las partículas y permitir una mayor dispersión del material, tiene el potencial de mejorar la eficiencia del bombeo de agua-barro. Al incrementar la velocidad de la movilización y mejorar el control sobre la distribución de los finos, el proceso de extracción podría volverse más eficiente, lo que reduciría el tiempo de operación y optimizaría la mezcla de los finos con el agua en el sistema. Estos hallazgos proporcionan la línea base para la comparación con las simulaciones húmedas, donde se espera que la incorporación de agua modifique el comportamiento de las partículas, incrementando posiblemente la interacción entre ellas y alterando la dinámica de los finos.

4.2.2 Simulaciones húmedas (*CFD-DEM*)

Para las simulaciones acopladas *CFD–DEM* se emplea el campo de *fracción de volumen sólido* $\phi_s(\mathbf{x}, t)$ como variable de visualización del acople fluido–granular. En cada celda del mallado, ϕ_s corresponde al cociente entre el volumen ocupado por partículas y el volumen de la celda; la fracción de fluido es $\phi_f = 1 - \phi_s$. Valores bajos de ϕ_s señalan mayor presencia de agua y permiten identificar el frente de saturación y su interacción con la movilización de finos.

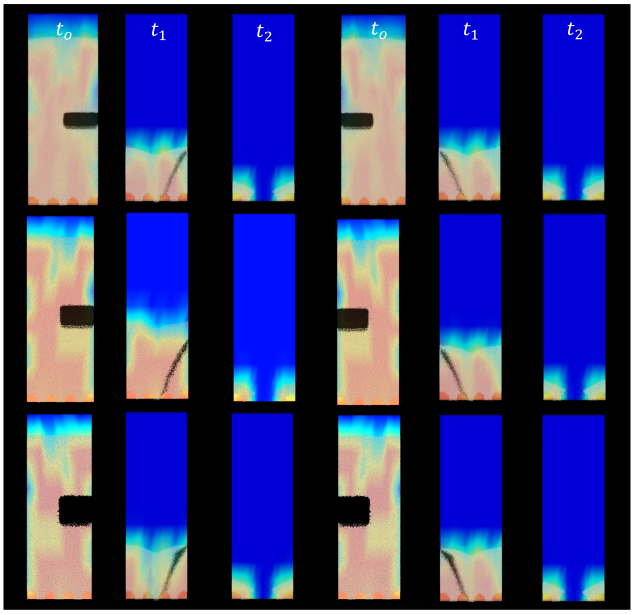


Figura 4.16: Visualización del avance del fluido en el medio granular a través de la fracción de volumen sólido en tres etapas del proceso: t_0 (inicial), t_1 (intermedio) y t_2 (final). El agua ingresa de forma homogénea desde todo el *inlet* del sistema. Se comparan tres escenarios experimentales con diferentes masas iniciales de finos: 500 g, 750 g y 1000 g (de arriba hacia abajo). (a) Zona 2 (b) Zona 1

La Figura 4.16 muestra la evolución de ϕ_s para t_0, t_1 y t_2 bajo ingreso de agua homogéneo por el *inlet* y manteniendo el régimen de extracción aislada. El patrón es marcadamente simétrico entre las configuraciones con finos en Zona 2 (a) y Zona 1 (b): en t_0 el medio permanece prácticamente uniforme; en t_1 emerge un frente de saturación bien definido (descenso de ϕ_s) que progresa en forma cuasi paralela al borde de entrada; y en t_2 el avance alcanzado y el grado de reordenamiento granular son equivalentes en ambos casos. En términos cualitativos, la vena de finos conserva longitud, espesor aparente y curvatura comparables entre zonas, lo que indica que, con extracción aislada y alimentación hídrica uniforme, la posición lateral inicial de la lente no altera de manera apreciable ni la cantidad de material movilizado ni el tempo de la movilización.

El barrido de masas (500 → 1000 g) intensifica de manera monótona la respuesta: a mayor masa, se observa un engrosamiento de la región de baja ϕ_s y una persistencia temporal mayor de la vena entre t_1 y t_2. Sin embargo, este incremento no introduce asimetrías entre Zona 1 y Zona 2; la cinemática global del frente y de la vena permanece equivalente, por lo que

la sensibilidad del sistema se concentra en la masa de finos y en las condiciones de borde hidráulicas, quedando en segundo plano la ubicación lateral cuando se conserva extracción aislada. De forma consistente con las observaciones experimentales, la presencia de agua confiere un control hidráulico que suaviza heterogeneidades locales (disminución de contrastes laterales en ϕ_s) y estabiliza la traza de la vena (bordes más nítidos y continuidad mayor). Cabe esperar que asimetrías marcadas —por ejemplo, curvaturas preferenciales o dominios activados desbalanceados— emerjan principalmente al modificar la localización del ingreso de agua o el régimen de extracción (p.ej., inyección lateral o extracción simultánea), más que por la reubicación lateral inicial de los finos bajo el esquema aquí evaluado.

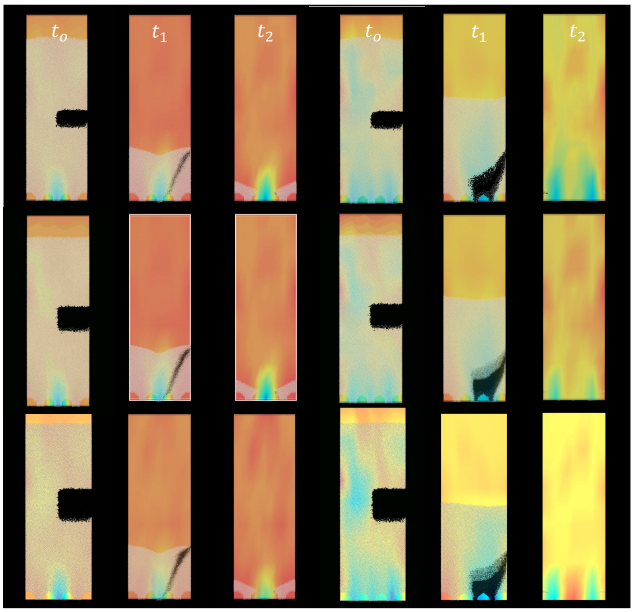


Figura 4.17: Representación conjunta de la velocidad del fluido en el eje y y del movimiento de partículas durante el proceso de extracción, evaluado en tres etapas del tiempo: t_0 (inicial), t_1 (intermedio) y t_2 (final). El análisis se realiza para tres masas iniciales de finos (500 g, 750 g y 1000 g), mientras se mantiene constante la ubicación de observación en la Zona 2. Se comparan dos configuraciones de secuencia de extracción: (a) Extracción Aislada y (b) Extracción Simultánea.

Para esta visualización se emplea la componente vertical de la velocidad del fluido, $v_y(\mathbf{x}, t)$, cuyo módulo $|v_y|$ cuantifica la intensidad del adveccionamiento vertical inducido por el campo hidráulico; el mapa de color permite localizar zonas de mayor/menor impulso del fluido sobre el esqueleto granular, mientras que las partículas se muestran explícitamente (gruesas en blanco y finas en negro), lo que facilita interpretar el acople fluido–partículas.

La Figura 4.17 evidencia que la incorporación de agua modifica de manera sustantiva la cinemática respecto del caso seco y que el régimen de extracción controla la magnitud y extensión del dominio activado por el flujo. En *extracción aislada* (panel a), el desarrollo de v_y entre t_1 y t_2 se concentra en una linea estrecha sobre la abertura activa, con gradientes verticales acotados y un transporte de finos predominantemente canalizado; la vena de finos mantiene un trazo estable y de menor curvatura, coherente con un campo de velocidades

más confinado. En extracción simultánea (panel b), en cambio, el patrón es más intenso y extendido: el mapa de v_y muestra mayor amplitud espacial y valores más altos ya en t_1, lo que se traduce en una movilización más temprana y rápida de los finos y en una vena de mayor espesor aparente, con curvatura hacia el eje de simetría y una zona de interacción entre plumas que promueve la dispersión lateral. Esta diferencia persiste hasta t_2, con un volumen granular afectado claramente mayor en el régimen simultáneo.

El efecto de la masa de finos (500 → 1000 g) actúa como factor de amplificación en ambos regímenes: al aumentar la masa, crece el dominio con $|v_y|$ elevado, la vena de finos gana continuidad y se incrementa el espesor de la traza. En términos visuales del campo v_y, las regiones de alta intensidad ocupan una fracción mayor del dominio a 1000 g que a 500 g, indicando mayor capacidad de advección y mezcla en presencia de más finos.

Comparado con las simulaciones secas, la presencia de agua no solo incrementa la velocidad de salida de partículas, sino que también modifica la geometría del transporte: bajo aislada el sistema conserva un carácter más confinado y de menor dispersión, mientras que bajo simultánea la acción combinada de dos aberturas genera superposición de plumas de v_y, intensificando el arrastre y favoreciendo trayectorias más convergentes y una redistribución transversal más efectiva. En síntesis, la lectura cualitativa de v_y y de las trazas de partículas confirma que, manteniendo fija la Zona 2, (i) la extracción simultánea produce mayores velocidades y volúmenes activados que la aislada; (ii) la masa de finos incrementa la continuidad y espesor de la vena; y (iii) la adición de agua acentúa las diferencias entre regímenes, elevando la velocidad de movilización y la mezcla efectiva al momento de la descarga.

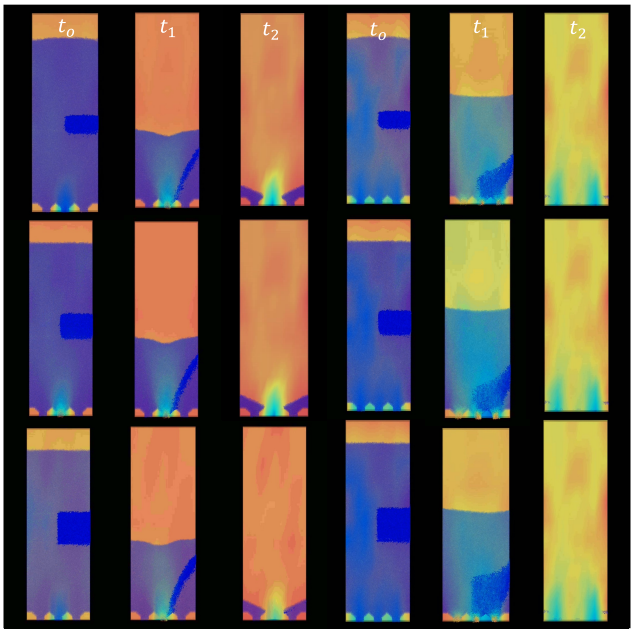


Figura 4.18: Representación conjunta de la velocidad transicional de las partículas y la velocidad del fluido en el eje y durante el proceso de extracción, evaluado en tres etapas del tiempo: t_0 (inicial), t_1 (intermedio) y t_2 (final). El análisis se realiza para tres masas iniciales de finos (500 g, 750 g y 1000 g), mientras se mantiene constante la ubicación de observación en la Zona 2. Se comparan dos configuraciones de secuencia de extracción: (a) Extracción Aislada y (b) Extracción Simultánea.

La Figura 4.18 presenta una representación visual detallada de la velocidad transicional de las partículas y la velocidad del fluido en el eje y durante el proceso de extracción, analizada en diferentes etapas temporales: t_0 (inicial), t_1 (intermedio) y t_2 (final). La organización de la figura es en forma de matriz, con una estructura de 3 filas y 6 columnas, donde cada fila corresponde a diferentes masas iniciales de finos (500 g en la primera fila, 750 g en la segunda fila y 1000 g en la tercera fila), y cada columna representa un momento específico en el proceso de extracción, permitiendo así una comparación clara entre diferentes condiciones en distintos instantes de tiempo. La disposición facilita la observación de cómo evoluciona la dinámica del sistema en función del tiempo, la cantidad de material inicial y la configuración de extracción utilizada.

Se destacan dos configuraciones de secuencia de extracción que se comparan en la Figura: (a) Extracción Aislada, ubicada en la primera fila, y (b) Extracción Simultánea, que ocupa la segunda y tercera filas. La diferencia principal entre ambas radica en cómo se realiza el proceso de extracción, lo que influye en la distribución de velocidades del flujo y en la interacción entre las partículas y el fluido. Los colores en las imágenes representan la magnitud de la velocidad en el eje y, donde los tonos cálidos (amarillo, naranja y rojo) indican velocidades mayores, mientras que los tonos fríos (azul y verde) representan velocidades menores. La variación en la escala de colores en cada subimagen refleja cambios en la intensidad y distribución de las velocidades a lo largo del proceso.

En las primeras columnas (t_0), correspondientes al inicio del proceso, se observa que las velocidades en el sistema son relativamente bajas en ambas configuraciones, con áreas de menor velocidad en las regiones cercanas a las partículas y en ciertos puntos del fluido. A medida que el proceso avanza hacia t_1 y t_2, las imágenes muestran cambios significativos en la distribución de velocidades, evidenciando cómo la interacción entre partículas y fluido evoluciona con el tiempo. En particular, en la configuración de Extracción Aislada, se perciben patrones de aceleración y una mayor dispersión en las velocidades, lo cual puede estar asociado a la presencia de partículas que se desprenden o se movilizan de manera diferente en comparación con la extracción simultánea. Por otro lado, en la extracción simultánea, la distribución de velocidades parece ser más homogénea en algunos casos, aunque también muestra áreas de aceleración y desaceleración que varían en función de la masa de finos y del tiempo.

El análisis de las diferentes masas iniciales de finos revela que a mayor cantidad de material, las velocidades tienden a presentar distribuciones más complejas y mayores variaciones en diferentes regiones del sistema. Por ejemplo, en la masa de 1000 g, se observa en t_2 que las velocidades alcanzan valores más elevados en ciertas áreas, lo que indica una mayor interacción y movimiento de partículas, así como una posible mayor influencia de la carga en la dinámica del flujo. La evolución en el tiempo muestra que las velocidades del fluido y las partículas no solo cambian en magnitud, sino también en su patrón espacial, reflejando procesos de aceleración, desaceleración, y redistribución de energía en el sistema.

Este conjunto de datos visuales y analíticos permite comprender con mayor profundidad cómo la configuración de extracción, la cantidad de finos y el tiempo influyen en la dinámica del proceso. La comparación entre las configuraciones aislada y simultánea proporciona información valiosa sobre las ventajas y limitaciones de cada método, en términos de eficiencia, homogeneidad del flujo y movimiento de partículas. La observación detallada de las variaciones en la velocidad en diferentes fases del proceso contribuye a optimizar las condi-

ciones operativas para mejorar el rendimiento de la extracción, reducir posibles ineficiencias y entender mejor los mecanismos físicos involucrados en el comportamiento del sistema. En conjunto, estos resultados ofrecen una visión comprensiva de la interacción entre partículas y fluido, y proporcionan una base para futuras investigaciones y aplicaciones en procesos de separación y transporte de materiales finos en contextos industriales.

4.3 Comparación de resultados secos vs húmedos

En esta sección se comparan los resultados obtenidos en condiciones secas y húmedas, con el objetivo de evaluar el efecto de la presencia de agua en la dinámica de las partículas finas y gruesas durante el proceso de extracción. A continuación, se analizan los gráficos correspondientes que muestran la evolución de la masa de partículas finas y gruesas, así como la dilución final, en ambos escenarios.

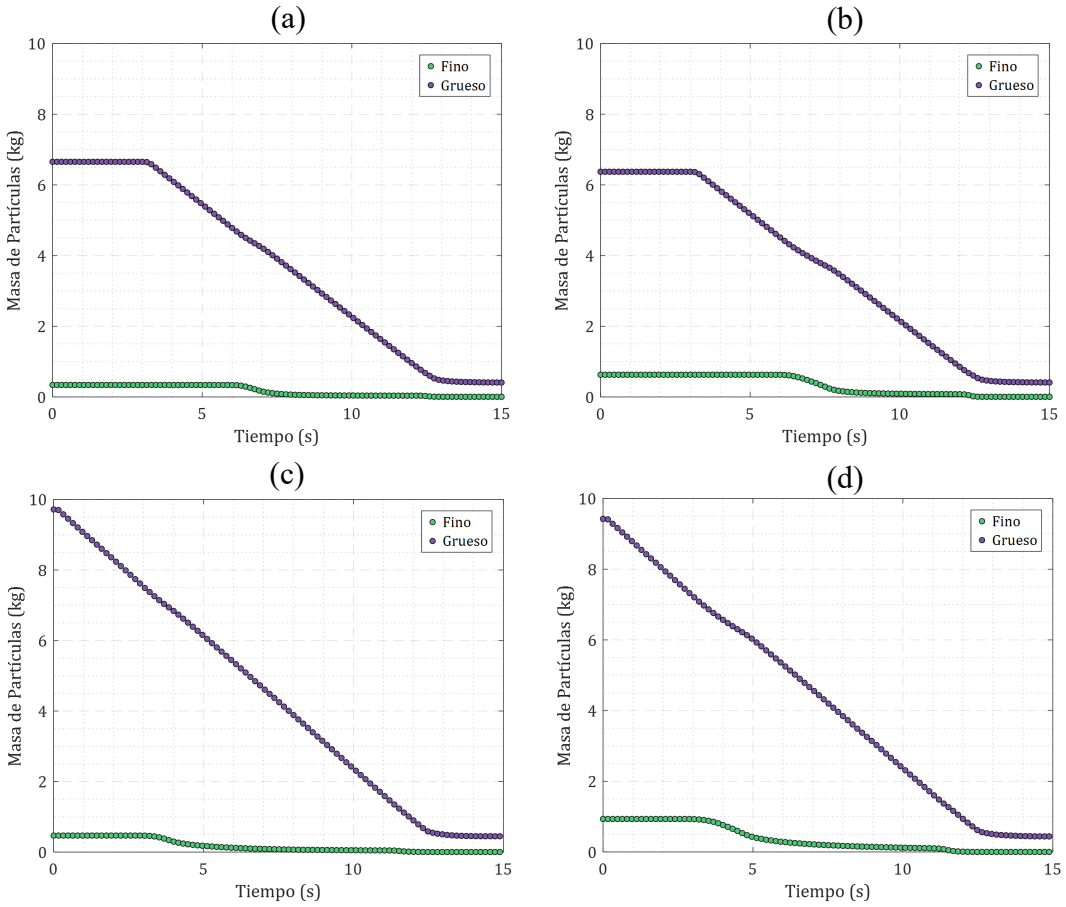


Figura 4.19: Curvas evolución de la masa en función del tiempo para partículas finas y gruesas. Los subgráficos (a) y (b) representan los casos sin presencia de agua, mientras que (c) y (d) muestran los resultados con agua. En los subgráficos (a) y (c), se utilizó una cantidad de 500 g de partículas finas, mientras que en (b) y (d) la cantidad de partículas finas fue de 1000 g, la cantidad máxima utilizada en las simulaciones y experimentos. Las partículas finas se indican en verde y las gruesas en morado.

En la Figura 4.19, se muestran las curvas de evolución de la masa en función del tiempo para partículas finas y gruesas, tanto en condiciones secas como húmedas. En el subgráfico (a), correspondiente a condiciones secas y con 500 g de partículas finas, observamos que la masa de partículas finas (en verde) se mantiene casi constante durante la mayor parte del tiempo, con una pequeña disminución inicial que refleja la estabilización del sistema después de la extracción. Por otro lado, la masa de partículas gruesas (en morado) muestra una caída rápida al inicio, estabilizándose rápidamente a un valor muy bajo. Este comportamiento es característico de un sistema en condiciones secas, donde las partículas finas no experimentan cambios significativos a lo largo del tiempo, y las partículas gruesas se estabilizan rápidamente debido a la ausencia de agua. En el subgráfico (b), con 1000 g de partículas finas bajo condiciones secas, la curva de masa de partículas finas muestra una caída más pronunciada en comparación con el caso anterior, lo que indica que una mayor cantidad de partículas finas ralentiza el proceso de estabilización, manteniendo la masa de las partículas finas a un nivel más bajo durante más tiempo. En cuanto a las partículas gruesas, la caída inicial también es evidente, pero se estabiliza más lentamente que en el caso de 500 g de fino. Este comportamiento sugiere que el aumento de partículas finas afecta la disolución de las partículas gruesas, al ocupar más espacio y alterar el flujo. En el subgráfico (c), bajo condiciones húmedas y con 500 g de partículas finas, la presencia de agua provoca una disminución más rápida de la masa de partículas finas (verde), acelerando su disolución debido a la saturación. El agua facilita el movimiento de las partículas, lo que causa que la masa de las finas se estabilice más rápidamente que en el caso seco. La masa de partículas gruesas (morada) también presenta una caída más gradual, reflejando cómo la saturación afecta la movilidad de las partículas gruesas, acelerando su disolución. Finalmente, en el subgráfico (d), con 1000g de partículas finas y presencia de agua, la dinámica es aún más pronunciada. La masa de partículas finas (verde) disminuye casi instantáneamente y se estabiliza a un nivel más bajo, mientras que la masa de partículas gruesas (morada) sigue un patrón de disolución más rápido, aunque a una tasa menor que las partículas finas. Este comportamiento resalta cómo la mayor cantidad de partículas finas en un sistema húmedo acelera la movilización tanto de las partículas finas como de las gruesas, gracias a la saturación, facilitando el proceso de extracción y aumentando la velocidad de disolución en comparación con las condiciones secas.

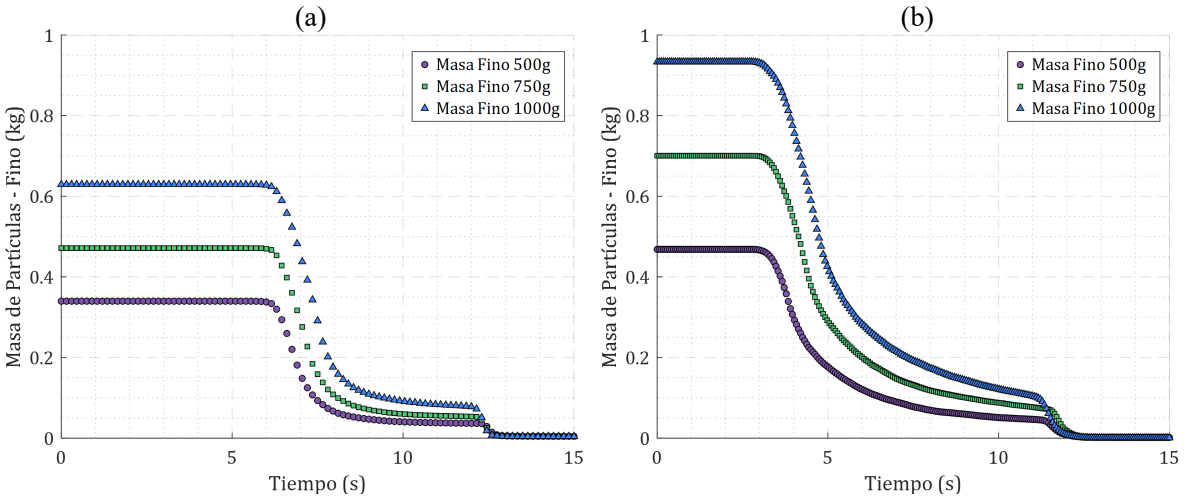


Figura 4.20: (a) Curvas de masa de partículas finas vs. tiempo bajo condiciones secas, mostrando las distintas cantidades de fino (500 g, 750 g y 1000 g). (b) Curvas correspondientes a las mismas cantidades de fino pero con la presencia de agua, observando su comportamiento bajo condiciones de saturación.

En la Figura 4.20, se presentan las curvas de masa de partículas finas vs. tiempo para diferentes cantidades de fino, tanto en condiciones secas como húmedas. En el subgráfico (a), correspondiente a condiciones secas, se muestran las curvas para 500 g, 750 g y 1000 g de partículas finas. A medida que aumenta la cantidad de partículas finas, la masa de las mismas disminuye de manera más lenta, lo que indica una mayor capacidad de estabilización en el sistema con un mayor contenido de fino. Las partículas finas tardan más en disolverse a medida que se incrementa la cantidad, lo que refleja una estabilización más prolongada y una velocidad de disolución menor. Este comportamiento sugiere que el sistema se vuelve más cohesivo a medida que se acumulan más partículas finas, dificultando su movilización. En el subgráfico (b), bajo condiciones húmedas, las curvas muestran un comportamiento mucho más pronunciado. La masa de partículas finas (verde) disminuye de manera más rápida y uniforme conforme se incrementa la cantidad de partículas finas, lo que indica que la presencia de agua facilita la disolución de las partículas. En este caso, el tiempo necesario para que las partículas se estabilicen es considerablemente menor. A medida que aumenta la cantidad de partículas finas (750 g y 1000 g), la disolución se acelera, lo que refleja cómo el agua favorece la movilización de las partículas finas. Esto mejora la eficiencia de la extracción bajo estas condiciones, siendo más notoria la aceleración de la disolución a mayores cantidades de fino.

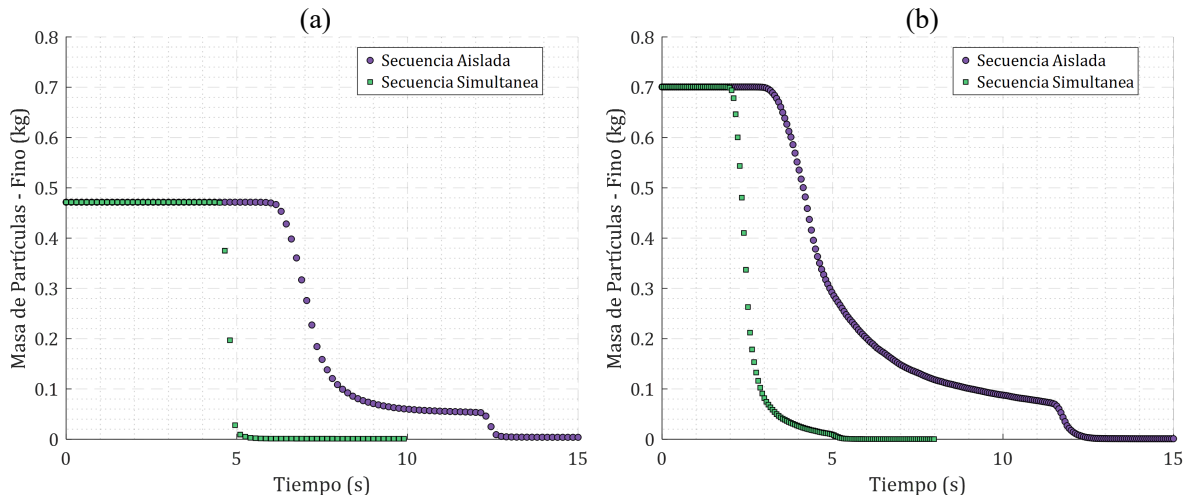


Figura 4.21: (a) Curvas de masa de partículas finas vs. tiempo bajo condiciones secas, mostrando las variaciones para las secuencias aislada y simultánea, con 500 g de partículas finas. (b) Curvas correspondientes a las secuencias aislada y simultánea bajo condiciones con presencia de agua, manteniendo una cantidad de 750 g de partículas finas.

En la Figura 4.21, se muestran las curvas de masa de partículas finas vs. tiempo para las secuencias de extracción aislada y simultánea bajo condiciones secas y húmedas. En el subgráfico (a), correspondiente a condiciones secas y con 500 g de partículas finas, se comparan las secuencias de extracción aislada (puntos morados) y simultánea (puntos verdes). En este caso, la secuencia simultánea presenta una caída más pronunciada de la masa de partículas finas, lo que indica una extracción más rápida de las partículas, mientras que la secuencia aislada muestra una disolución más lenta y gradual. Este comportamiento sugiere que, bajo condiciones secas, la secuencia simultánea facilita una disolución más rápida de las partículas finas, probablemente debido a la liberación simultánea de las partículas en el sistema, mientras que la secuencia aislada permite un mayor control sobre la liberación de las mismas, resultando en una estabilización más prolongada. En el subgráfico (b), bajo condiciones húmedas y con 750 g de partículas finas, se observa que la presencia de agua acelera la disolución de las partículas en ambas secuencias, pero la secuencia simultánea continúa mostrando una caída más pronunciada de la masa de partículas finas. La secuencia aislada, aunque también presenta una disminución en la masa de las partículas, muestra una caída más lenta, aunque se estabiliza más rápidamente debido a la presencia de agua. Esto refleja cómo el agua favorece la disolución más rápida de las partículas finas, pero la secuencia simultánea sigue siendo más eficiente en términos de velocidad de extracción y disolución.

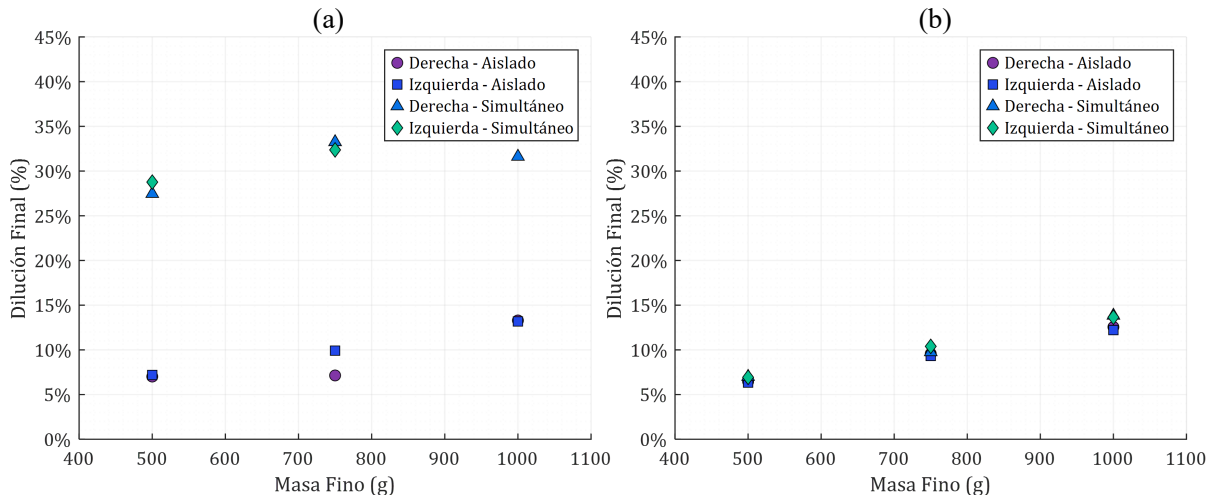


Figura 4.22: (a) Relación entre la dilución final y la masa de partículas finas en condiciones secas, mostrando los resultados para las distintas ubicaciones (Derecha e Izquierda) y secuencias (Aislado y Simultáneo). (b) Relación entre la dilución final y la masa de partículas finas bajo condiciones húmedas, manteniendo las mismas ubicaciones y secuencias que en el gráfico (a)

En la Figura 4.22, se presenta la relación entre la dilución final y la masa de partículas finas bajo condiciones secas y húmedas. En el subgráfico (a), correspondiente a condiciones secas, se observa que a medida que aumenta la masa de partículas finas, la dilución final también incrementa. Este comportamiento es más evidente en las ubicaciones Derecha e Izquierda y en las secuencias de extracción, donde la secuencia aislada en la ubicación Derecha presenta una dilución final más baja, sugiriendo que una extracción más controlada permite una mejor conservación de la masa de partículas finas. Por el contrario, la secuencia simultánea muestra una dilución final más alta, lo que indica que una mayor movilidad de las partículas finas facilita una mayor dispersión de la masa, lo que aumenta la dilución. En el subgráfico (b), bajo condiciones húmedas, la dilución final es considerablemente más pronunciada, especialmente cuando la masa de partículas finas es mayor. Las secuencias de extracción simultánea muestran una dilución final más alta en comparación con las secuencias aisladas, lo que resalta el impacto de la saturación sobre el comportamiento de las partículas finas. La presencia de agua acelera la disolución de las partículas, aumentando la dilución final en todas las ubicaciones. Además, la dilución es más significativa en las ubicaciones Derecha e Izquierda, lo que sugiere que el agua modifica la distribución y la movilización de las partículas finas, favoreciendo una mayor dispersión de la masa en el sistema. En resumen, los resultados muestran que la saturación no solo aumenta la dilución final en todas las secuencias, sino que también influye en la eficiencia del proceso de extracción, acelerando la disolución y la movilidad de las partículas finas.

Conclusiones

5.1. Conclusiones

El estudio realizado sobre el fenómeno de bombeo de agua-barro en minería de caving, utilizando un enfoque experimental y numérico, ha proporcionado una comprensión más profunda sobre la dinámica de las partículas finas y gruesas bajo distintas condiciones, tanto secas como húmedas. Mediante el empleo de simulaciones acopladas DEM-CFD y experimentos controlados, se lograron importantes hallazgos que permiten un análisis detallado de los factores que afectan este fenómeno. En primer lugar, uno de los aspectos más relevantes que surgieron de este estudio fue la influencia de la humedad en la dinámica de las partículas finas. La presencia de agua aceleró significativamente la disolución de las partículas finas, lo que no solo mejoró la eficiencia del proceso de extracción, sino que también facilitó la movilización de las partículas dentro del sistema. Este comportamiento fue particularmente evidente en los casos de extracción simultánea, donde se observó una mayor velocidad de movilización y dispersión de las partículas, en comparación con los casos secos.

Por otro lado, el efecto de la cantidad de material fino resultó ser otro factor clave en la evolución de la dinámica de las partículas. A medida que la cantidad de partículas finas aumentó, pasando de 500 g a 1000 g, el sistema experimentó una estabilización más lenta bajo condiciones secas. Este comportamiento indicó que una mayor carga de partículas finas tiende a generar un proceso de estabilización prolongado, lo que podría generar complicaciones en el manejo de material en situaciones de baja humedad. Sin embargo, bajo condiciones húmedas, la saturación con agua permitió una disolución más rápida de las partículas finas, lo que resultó en una estabilización más temprana del sistema. Este hallazgo sugiere que la cantidad de material fino es un factor determinante en la evolución del fenómeno de bombeo de agua-barro, ya que su presencia genera una mayor interferencia en el proceso cuando el sistema no está saturado, mientras que el agua facilita la disolución y mejora la eficiencia operativa.

La comparación entre las secuencias de extracción, tanto aislada como simultánea, permitió obtener información adicional sobre cómo las distintas estrategias de extracción impactan la dinámica del sistema. Las simulaciones revelaron que la secuencia simultánea favorece una disolución más rápida de las partículas finas, especialmente cuando el sistema se encuentra saturado. Esta mejora en la disolución fue más evidente bajo condiciones húmedas, lo que subraya la eficacia de este tipo de extracción en sistemas saturados. Por el contrario, la secuencia aislada, aunque permite un control más preciso de la liberación de las partículas, resultó en una movilización más lenta, lo que indica que, si bien es menos eficiente en términos de velocidad de disolución, ofrece ventajas en cuanto a la capacidad de manejo del material en escenarios donde se requiere un mayor control sobre la liberación de partículas.

Además, uno de los aspectos fundamentales de este estudio fue el impacto de la ubicación del agua en la dispersión y dirección de las partículas finas. Los resultados mostraron que la entrada de agua en ubicaciones laterales del sistema generaba una dispersión más amplia de las partículas finas, lo que resultaba en una mayor dilución del material y una movilidad más eficiente de las partículas. Esto resalta la importancia de gestionar adecuadamente el flujo de

agua en las operaciones de minería subterránea, particularmente en procesos de minería de caving, donde los bombeos de agua-barro pueden convertirse en un riesgo significativo para la estabilidad y la eficiencia operativa. La ubicación del ingreso de agua, por lo tanto, debe ser cuidadosamente planificada para mitigar el riesgo de formación de *mud rush* y garantizar la optimización del proceso.

En conclusión, los resultados obtenidos en este estudio proporcionan evidencia clara de que factores como la humedad, la cantidad de partículas finas, la estrategia de extracción y la ubicación del ingreso de agua son determinantes clave en la ocurrencia y dinámica del fenómeno de bombeo de agua-barro en minería de caving. Los hallazgos numéricos y experimentales de esta investigación ofrecen un entendimiento profundo de los mecanismos subyacentes a este fenómeno, lo que puede tener importantes implicaciones para la seguridad y eficiencia operativa en minas subterráneas. Estos resultados pueden ser utilizados para optimizar las técnicas de extracción y mejorar la gestión de los riesgos asociados con el bombeo de agua-barro, contribuyendo al desarrollo de prácticas mineras más seguras y eficientes en el futuro

5.2. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, se derivan diversas recomendaciones que pueden contribuir significativamente a la optimización de las operaciones mineras y a la gestión del riesgo asociado al bombeo de agua-barro en minería de caving. Estas recomendaciones abarcan tanto aspectos técnicos como operacionales, y tienen como objetivo mejorar la eficiencia del proceso, reducir riesgos y garantizar la seguridad en las operaciones subterráneas.

En primer lugar, se recomienda optimizar las estrategias de extracción mediante la consideración del uso de la secuencia simultánea en áreas donde se espera una alta concentración de partículas finas. Esta técnica facilita una movilización más eficiente del material, lo que permite una extracción más rápida y efectiva. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta que este enfoque puede requerir un control más riguroso de las condiciones operacionales, especialmente en lo que respecta a la gestión del agua y la saturación del sistema. Un monitoreo constante de la distribución del agua, así como ajustes dinámicos en la operación, serán esenciales para evitar efectos negativos como la excesiva acumulación de agua que podría comprometer la estabilidad del sistema.

La gestión del flujo de agua debe ser una prioridad en las operaciones mineras para mitigar los riesgos de bombeo de agua-barro. Dado el impacto significativo que tiene la ubicación del agua sobre la movilidad de las partículas, se sugiere la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real que permitan un control preciso sobre el ingreso y la distribución del agua en las zonas de extracción. El uso de sensores piezométricos, junto con sistemas de visibilidad en tiempo real, permitiría identificar de manera temprana cualquier acumulación excesiva de agua en áreas críticas. Este control facilitaría la toma de decisiones operativas más informadas y, por lo tanto, contribuiría a evitar situaciones de riesgo como los *mud rushes* o flujos de barro no controlados.

Otro aspecto clave es el ajuste de la cantidad de material fino en las áreas de extracción. En las operaciones que manejan grandes volúmenes de partículas finas, se debe considerar

la posibilidad de reducir la cantidad de partículas finas presentes en las zonas de extracción, o bien modificar la configuración de la infraestructura para mitigar los efectos negativos de la saturación excesiva. Esto es particularmente importante en zonas donde el agua puede estar presente en grandes cantidades, ya que un exceso de partículas finas puede alterar la dinámica del sistema y dificultar la estabilización. Además, resulta esencial continuar con el desarrollo de técnicas que permitan reducir la fragmentación del material fino durante las fases de perforación y tronadura. Esto no solo mejoraría la eficiencia operativa, sino que también permitiría un mejor manejo del material extraído y reduciría los riesgos asociados a la acumulación de partículas finas en el sistema. Asimismo, se recomienda incorporar en el análisis del fenómeno variables adicionales como la mineralogía del material fino (por ejemplo, arena de playa), el porcentaje de sólidos en el fluido, el porcentaje de material fino respecto del material grueso, la variación de humedad, la alteración hidrotermal, el pH y la presencia de arcilla en los materiales del experimento, las cuales, según algunos estudios, aumentan el riesgo de generación de bombeo de agua-barro.

Se recomienda también el desarrollo de simulaciones avanzadas para abordar escenarios más comples y de mayor escala, como los que se presentan en una mina de tipo block caving. Utilizando herramientas avanzadas como el acople DEM-CFD, se podrían incorporar variables adicionales como las fluctuaciones en la cantidad de agua infiltrada, la variabilidad geomecánica del macizo rocoso y otros factores que afectan el comportamiento de las partículas y el flujo de agua. Estas simulaciones más detalladas permitirían mejorar las predicciones de comportamiento del sistema y facilitar la planificación operativa en condiciones dinámicas y cambiantes. La precisión y la capacidad de simular diversos escenarios contribuirán a optimizar la toma de decisiones y a mejorar la seguridad en las operaciones.

Por último, es importante señalar que este estudio representa solo un primer acercamiento al análisis de cómo la entrada de agua influye en la dilución de las partículas finas y en la posible formación de *mud rush*. Si bien los resultados obtenidos son valiosos, los experimentos realizados presentaron ciertas imprecisiones, especialmente al incorporar la variable del agua. Esto sugiere que se requieren nuevas maquetas o equipos más especializados para obtener resultados más precisos y representativos. Las simulaciones numéricas empleadas también estuvieron limitadas por restricciones computacionales, lo que impidió la recreación precisa de una mina de caving a escala completa. Se recomienda que se superen estas limitaciones mediante el uso de equipos más potentes y el desarrollo de simulaciones más precisas, lo que permitirá una modelización más realista de la entrada de agua y su comportamiento dentro de un escenario de minería subterránea. A través de estas mejoras en las herramientas experimentales y computacionales, se podrá obtener una representación más fiel de las condiciones operativas en una mina de tipo block caving, lo que facilitará la comprensión de los fenómenos y contribuirá a mejorar la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras.

Bibliografía

Butcher, R., T. R. Stacey y W. C. Joughin (2005). «Mud rushes and methods of combating them». En: *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 105.11, págs. 817-824.

Carvajal, R (2020). «Roadmapping como herramienta para la planificación de tecnologías Komatsu y su potencial aplicabilidad en Codelco División El Teniente». En.

Castro, K Basaure, S Palma y J Vallejos (2017). «Geotechnical characterization of ore related to mudrushes in block caving mining». En: *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 117.3, págs. 275-284.

Castro, Raúl, Álvaro Perez y René Gomez (2023). «Evaluating wet muck risk in block caving mines: a new model». En: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 170, pág. 105485.

Chitombo, G. (2000). «Caving methods: selection and application in mining». En: *MassMin 2000*. Brisbane, Australia: Australasian Institute of Mining y Metallurgy.

Codelco División El Teniente (2018). «Evolution of Mining Methods at El Teniente Mine». En: *Caving Knowledge Workshop*. Presentación técnica sobre minería de hundimiento en El Teniente. Phoenix, USA. URL: https://www.scribd.com/document/429314336/083-Pioneering-Mass-Caving-at-El-Teniente.

Conway, Lynn, Richard A Volz y Michael W Walker (2002). «Teleautonomous systems: Projecting and coordinating intelligent action at a distance». En: *IEEE Transactions on robotics and automation* 6.2, págs. 146-158.

Cundall, P. A. y O. D. L. Strack (1979). «A discrete numerical model for granular assemblies». En: *Géotechnique* 29, págs. 47-65.

Díaz, Ramón, René Gómez, Rodrigo Vidal, Asieh Hekmat y Diego Oyarzo (2024). «Combining geomechanical and hydrogeological modeling for drainage analysis in Block Caving mine development». En: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 173, pág. 105606.

Flores, German (2019). «Major hazards associated with cave mining: are they manageable». En: *Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk, Australian Centre for Geomechanics, Perth*, págs. 31-46.

Fonte, C. B., J. A. A. Oliveira Jr. y L. C. de Almeida (2015). «DEM-CFD Coupling: Mathematical Modelling and Case Studies Using Rocky-DEM® and ANSYS Fluent®». En: *Eleventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. URL: https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2754.1365.

Galindo-Torres, SA, S Palma, S Quintero, A Scheuermann, X Zhang, K Krabbenhoft, M Ruest y D Finn (2018). «An airblast hazard simulation engine for block caving sites». En: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 107, págs. 31-38.

Gelcich, F. (2018). «Modelamiento hidrogeológico aplicado a eventos de bombeo de lodo en minería subterránea mediante block caving». Tesis de Magíster en Minería. Tesis de mtría. Santiago, Chile: Universidad de Chile.

Gómez, R. y E. Labbé (2019). «Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: la actual metodología aplicada en Chile del "block caving"». En: *Boletín Geológico y Minero* 130.1, págs. 181-198. URL: https://www.igme.es/Boletin/2019/130_1/Articulos/Art14.pdf.

Gómez Puigpinos, René Esteban (2022). «Gravity flow and fragmentation modeling in Block Caving». En.

Gonzalez, Rafael C. y Richard E. Woods (2008). *Digital Image Processing*. 3rd. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall.

González, Alexis (2025). «Fluidodinámica en minería subterránea: el impacto de las aguas en block caving». Spanish. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Santiago, Chile: Universidad de Chile. URL: https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/206082 (visitado 03-09-2025).

Heslop, T (2000). «Block caving–controllable risks and fatal flaws». En: *Proceedings of Massmin* 2000.

Hurtado-Cruz, Juan P., Nicolás Díaz y Enrique I. Acuña (2012). «Three-Dimensional Characterization of Mine Ventilation Circuits for Block Caving Production Levels». En: *Tunnelling and Underground Space Technology* 27, págs. 25-35.

Jafari, Ahmad, Mohammad Vahab, Pooyan Broumand y Nasser Khalili (2023). «An eXtended finite element method implementation in COMSOL multiphysics: Thermo-hydro-mechanical modeling of fluid flow in discontinuous porous media». En: *Computers and Geotechnics* 159, pág. 105458.

Jakubec, J, R. Clayton y A. Guest (ene. de 2016). «Mudrush risk evaluation». En: *CIM Journal* 7, págs. 7-12.

Jakubec, J. y D. H. Laubscher (2001). «Design and assessment of block cave mining methods». En: *Proceedings of the International Conference on Mass Mining*. The Australasian Institute of Mining y Metallurgy.

Kim, H., S. Park y K. Lee (2020). «Micromechanical calibration of DEM parameters for ore flow applications». En: *Powder Technology* 366, págs. 71-82.

Kong, Yong, Zhengshou Lai, Jianhua Yin y Jidong Zhao (2024). «Resolved CFD-DEM Modeling of Debris Flows, Avalanches, and Floods with Arbitrary-shaped Boulders and Driftwood Impacting Structures and Forests». En: *Authorea Preprints*.

Landeros, P., R. Castro y G. Albornoz (2022). *Geomechanical risk related to panel caving stages*. Informe técnico interno de CODELCO. El Teniente, Chile.

Laubscher, D. H. (2000). *A Practical Manual on Block Caving*. Inf. téc. Patrocinado por el International Caving Study (ICS). Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre /

Itasca Consulting Group. URL: https://www.scribd.com/document/471773363/A-practical-Manual-on-Block-Caving-pdf.

López, Francisca (2024). «Caracterización Mineralógica De Material Arcilla Con Capacidad De Generar Bombeo Agua-Barro En Sectores Productivos Y Su Impacto Metalúrgico En División Andina». Memoria de título. Santiago, Chile: Universidad Mayor.

Maia, Fabricio (2018). «A diagnostic assessment of operational, environmental and safety procedures in the onshore cassiterite artisanal mining sector in Indonesia». Tesis doct. University of British Columbia.

Matsumoto, Kenji Andrés Basaure (2016). «Geotechnical characterization and methodology for a risk evaluation of ore related to mud rushes in block/panel caving mining». Tesis para optar al grado de Magíster en Minería. Tesis de mtría. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas. URL: https://www.researchgate.net/publication/360688702.

Navia, I, R Castro y M Valencia (2014). «Statistical analyses of mud entry at Diablo Regimiento sector—El Teniente's Mine». En: *Caving 2014: Proceedings of the third international symposium on block and sublevel caving, University of Chile, Santiago, Chile*, págs. 372-378.

Palma, Sergio, S.A. Galindo-Torres, A. Delonca, M. Ruest, A. Scheuermann y D. Finn (2019). «Universal laws for air velocities in airblast events during block caving». En: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 113, págs. 303-309. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.12.007.

Reyes, J. (2021). «Análisis numérico de elipsoides de extracción en medios cohesivos saturados y su relación con mudrush en minería subterránea». Tesis de Magíster en Minería. Tesis de mtría. Santiago, Chile: Universidad de Chile.

Rocky, ESSS (2024). *Rocky DEM technical manual*. ESSS Rocky SL.

Saepulloh, D, R Hassell y J Albrecht (2022). «Managing the risk of uncontrolled flow of material (mudrush) at Argyle Diamond Mine». En: *Caving 2022: Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*. Australian Centre for Geomechanics, págs. 583-596.

Salas, O, R Castro, E Viera, K Basaure, F Hidalgo y M Pereira (2022). «Modelling of wet muck entry at El Teniente for long-term planning». En: *Caving 2022: Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*. Australian Centre for Geomechanics, págs. 545-560.

Sánchez, Katherine, Sergio Palma y Raúl L Castro (2019). «Numerical modelling of water flow through granular material for isolated and simultaneous extractions in block caving». En: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 52.1, págs. 133-147.

Scalambrin, Luca, Andrea Zanella y Xavier Vilajosana (2023). «LoRa multi-hop networks for monitoring underground mining environments». En: *2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, págs. 696-701.

Setiawan, M., D. Dimas, G. Prasetio y D. Sujatmiko (2023). «Block Caving Mining Method: Transformation and Its Potency in Modern Practice». En: *Energies* 16.1, pág. 9. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/9.

Soto, Andrés (2018). «Estudio y análisis de estrategias de extracción de agua-barro en la fase II de mina Diablo Regimiento». En.

Steinmetz, M., T. Jing y X. Zhao (2019). «Discrete element method applications in mining – a review». En: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 116, págs. 295-308.

Sun, Rui y Heng Xiao (2016). «SediFoam: A general-purpose, open-source CFD–DEM solver for particle-laden flow with emphasis on sediment transport». En: *Computers & Geosciences* 89, págs. 207-219.

Teng, Penghua, Fredrik Johansson y J Gunnar I Hellström (2023). «Modelling erosion of a single rock block using a coupled CFD-DEM approach». En: *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 15.9, págs. 2375-2387.

Vallejos, J, K Basaure, S Palma y RL Castro (2017). «Methodology for evaluation of mud rush risk in block caving mining». En: *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 117.5, págs. 491-497.

Zhou, Q., Y. Chen y X. Li (2021). «3D DEM modeling of fragmentation and flow in block caving». En: *Powder Technology* 383, págs. 163-176.